

# Estimación de la cobertura nubosa sobre Cuba

*Estimation of cloud cover on Cuba*

**Gabriel Trujillo Sánchez** | [gabriel.trujillo@insmet.cu](mailto:gabriel.trujillo@insmet.cu) | Centro de Pronósticos, Instituto de Meteorología

**Maritza Ballester Pérez** | [maritza.ballester@insmet.cu](mailto:maritza.ballester@insmet.cu) | Centro de Pronósticos, Instituto de Meteorología

**Elier Pila Fariñas** | [elier.pila@insmet.cu](mailto:elier.pila@insmet.cu) | Centro de Pronósticos, Instituto de Meteorología

**Maibys Sierra Lorenzo** | [maibys.sierra@insmet.cu](mailto:maibys.sierra@insmet.cu) | Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología

Recibido: 21 mayo 2013, Aceptado: 9 noviembre 2013. pp. 140 – 153.

## Resumen

Ante la necesidad de encontrar una nueva forma de evaluar los pronósticos numéricos y oficiales de la nubosidad elaborados en el Instituto de Meteorología (INSMET), como objetivo general de este trabajo se plantea diseñar y validar una metodología para estimar la cobertura nubosa sobre Cuba, a partir de las relaciones entre la presencia o la ausencia de nubosidad con los niveles de grises. Los objetivos específicos son los siguientes: determinar los umbrales para detectar la presencia de nubosidad o superficie mediante las imágenes del satélite GOES-E, correspondiente a los canales 1 (0.6  $\mu\text{m}$ ), 2 (3.9  $\mu\text{m}$ ) y 4 (10.7  $\mu\text{m}$ ); obtener una herramienta computacional para determinar la cobertura nubosa sobre Cuba y validar los resultados a partir de la comparación entre las clasificaciones visuales y las categóricas de variables no escalables. Se emplean imágenes del satélite GOES-13 (4 km de resolución) obtenidas de la estación receptora del INSMET 15 min antes de los horarios sinópticos. El algoritmo diseñado resultó confiable para todo el año, aunque esta confianza disminuye en las noches muy frías con cielos despejados de la temporada invernal.

**PALABRAS CLAVE:** Cobertura nubosa, detección de nubes, imágenes de satélites, técnica de umbrales.

## Abstract

Given the need to find a new way of assessing both numerical and official forecasts of clouds at the Institute of Meteorology (INSMET), the general objective of this work is set to design and validate a methodology to estimate cloud cover on Cuba, based on the relationships between the presence or absence of clouds and gray levels on GOES-E's satellite images. The specific objectives are to determine the thresholds for the presence of either clouds or surface from images of channel 1 (0.6  $\mu\text{m}$ ), 2 (3.9  $\mu\text{m}$ ) and 4 (10.7  $\mu\text{m}$ ), to obtain a computational tool for the cloud cover determination over Cuba and validate the results from the comparison between visual classifications and those based on non-scalable categorical variables. GOES-13 images (4km resolution) obtained from the INSMET receiving station 15 minutes before synoptic times are used. The algorithm designed is reliable all year but its level of confidence decreases in very cold nights with clear skies of winter.

**KEYWORDS:** Cloud cover, cloud detection, satellite images, threshold technique.

## Introducción

La nubosidad puede estimarse visualmente por los observadores o medirse con un nefómetro. Si bien la

observación visual que se realiza habitualmente en las estaciones meteorológicas brinda una información básica para el análisis y el estudio del clima, su resolución es limitada en el tiempo y es sensible a los errores del observador (Carzola *et al.*, 2005). Mediante las imágenes de los satélites meteorológicos también se pueden observar las nubes con buena cobertura espacial y temporal de grandes áreas prácticamente desprovistas de otro tipo de información meteorológica. Estas, desde sus inicios en abril de 1960, abrieron muchas líneas de investigación y se han convertido en una de las herramientas más prácticas para la predicción del tiempo, porque supuso un cambio de mentalidad en cómo analizar y entender los fenómenos atmosféricos y oceánicos. Trabajos como los de Derrien y Le Gléau (1999) y Casanova *et al.* (2003), por solo citar algunos, se han dedicado a la clasificación de las nubes mediante la información obtenida con los satélites meteorológicos.

En Cuba, Lavastida (2005) y Suárez (2010) han trabajado la nubosidad a partir de la información satelital; el primero, realiza una clasificación para estimar flujos de radiación solar, mientras que el segundo, la discrimina mediante umbrales con vistas a determinar la temperatura superficial del mar. No se han realizado investigaciones para contabilizarla; por ello, este trabajo consiste en diseñar y validar una metodología con miras a determinar la cobertura nubosa sobre Cuba sobre la base de las imágenes recibidas del

GOES-E. El resultado permitirá conciliar los criterios de evaluación de los pronósticos de nubosidad perfeccionados en el INSMET con el formato de salida de las predicciones de esta variable realizadas por los modelos numéricos.

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio, canales utilizados y horarios seleccionados**

Las imágenes obtenidas del satélite GOES-E para este estudio se acotan del Ecuador a los polos, entre los 19.01° N y 24.04° N, y de este a oeste por los 72.96° W y 86.00° W, con una resolución espacial de 4 km. De estas, solo se utilizará la información que contienen los píxeles que están sobre las islas de Cuba y de la Juventud con sus respectivas zonas costeras. El área de estudio está compuesta por cuatro regiones y sus pertinentes espacios costeros (Fig. 1); para ello, se dividió la isla de Cuba en tres zonas: occidental, central y oriental, donde se incluyen los cayos Coco, Romano y Sabinal; como cuarta región se consideró la Isla de la Juventud.

Las imágenes de satélite para el presente trabajo provienen del sensor GOES-Imager a bordo del satélite meteorológico geoestacionario GOES-13, operativo desde abril de 2010. A partir del 1.º de mayo de 2010, durante los siguientes 365 días, se estuvo almacenando las imágenes satelitales con una frecuencia



Fig. 1 Máscara utilizada para determinar la nubosidad por regiones.

de 3 h. Diariamente, si no hubo afectaciones, se recibieron 16 imágenes, ocho del canal 4, cinco del canal 2 y tres del canal 1. La tabla 1 muestra la cantidad de parejas de imágenes con que se trabajó para realizar esta investigación, las cuales se agruparon por trimestres y por horarios.

Para cada horario se utilizaron dos de estas bandas. Las imágenes del espectro visible (0.6  $\mu\text{m}$ -VIS), referidas al canal 1, y las imágenes infrarrojas térmicas (10.7  $\mu\text{m}$ -IR) del canal 4, se consideraron para los horarios 14:45 UTC, 17:45 UTC, 20:45 UTC. Para las 02:45 UTC, 05:45 UTC, 08:45 UTC, 11:45 UTC, 23:45 UTC se trabajó con las imágenes del canal 2, correspondientes al espectro infrarrojo cercano (3.9  $\mu\text{m}$ -IRC), y las del canal 4.

Se utilizaron parejas de imágenes que se originan a partir de longitudes de ondas distintas, con el objetivo de identificar fácilmente los distintos tipos de nubosidad. Por ejemplo, la identificación automática de nubes bajas en imágenes infrarrojas es compleja porque la diferencia entre la tierra y las nubes bajas en niveles digitales es poca. Sin embargo, al utilizar las imágenes visibles durante el día y las imágenes infrarrojas de onda corta durante la noche en pareja con las imágenes infrarrojas de onda larga, se facilita la identificación.

En la selección del tipo de imagen, para cada horario, se tuvo en consideración la presencia o no de la radiación solar reflejada y la radiación emitida por la superficie teledetectada. En los horarios de las 11:45 UTC y las 23:45 UTC no se utilizó la información del canal 1 porque la contribución de la radiación solar es muy débil y, en su lugar, se utilizaron las imágenes del canal 2.

La selección de los horarios se realizó teniendo en cuenta la hora en que se registra la nubosidad en las estaciones meteorológicas y en que se evalúan sus pronósticos en el INSMET. Cerca de los horarios seleccionados, los operadores meteorológicos comienzan a realizar las estimaciones de cobertura nubosa,

que luego registran en sus observaciones y son utilizadas para las evaluaciones.

La estratificación por meses se hizo trimestralmente, considerando la estación o época del año. Cada trimestre fue centrado en los solsticios y equinoccios; de esta forma, se asegura que la declinación solar varíe lo menos posible y no sea necesario aplicar correcciones a las imágenes del espectro visible por esta causa.

TABLA 1  
Cantidad de juegos de imágenes utilizados en el trabajo

May-jun-jul	Trimestres			
	Ago-sep-oct	Nov-dic-ene	Feb-mar-abr	
02:45	92	83	89	87
05:45	91	63	85	86
08:45	91	82	85	87
11:45	90	82	87	88
14:45	88	81	85	86
17:45	89	82	85	86
20:45	87	73	83	85
23:45	91	79	89	88

### Ajuste de las imágenes infrarrojas

Los datos de las imágenes infrarrojas recibidas de los GOES llegan a las estaciones receptoras en formato GVAR (GOES VARIABLE Format). Estas radiancias, normalizadas y empaquetadas en palabras de 10 bits, son convertidas en temperatura de brillo mediante la ecuación de Planck y, posteriormente, llevadas a valores del modo-A (8 bits) con las ecuaciones siguientes:

$$\text{Para } 163 \text{ }^\circ\text{K} \leq T \leq 242 \text{ }^\circ\text{K}, XA = 418 - T \quad (1)$$

$$\text{Para } 242 \text{ }^\circ\text{K} \leq T \leq 330 \text{ }^\circ\text{K}, XA = 660 - 2T \quad (2)$$

La relación existente entre la temperatura de brillo y los niveles digitales de los píxeles de las imágenes que proporciona la estación de trabajo del INSMET no se corresponde con lo indicado en las ecuaciones (1) y (2), por lo que es necesario ajustar las imágenes de

los canales 2 y 4. Para ello, se compararon los niveles digitales obtenidos según las ecuaciones (1) y (2) con los de las imágenes del INSMET, de acuerdo con la relación mostrada para el satélite GOES en el archivo USER.CAL, que utiliza el software Skyceiver view, de Tecnavia (Fig. 2).

```
User calibration for GOES
[GOES_CH2]
TEMP = 60 30 0 -25 -50 -85
PIXVAL = 0 40 80 140 200 255

[GOES_CH4]
TEMP = 40 10 -20 -45 -70 -95
PIXVAL = 0 40 80 140 200 255
```

Fig. 2 Reproducción parcial del fichero USER.CAL donde aparece la relación entre la temperatura de brillo y el valor digital de píxel correspondiente para los canales 2 y 4 del GOES.

En esta estación de trabajo se consideran tres tramos en ambas imágenes con relaciones lineales entre el nivel digital (0-80, 81-200, 201-255) y la temperatura. El mejor ajuste obtenido entre los niveles digitales de las imágenes del INSMET y los del modo-A fue el polinomial de cuarto grado para cada canal infrarrojo:

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + Ex^4 \quad (3)$$

Donde los coeficientes son los siguientes:

Para el Canal 2:

$$A = -8.12824430560e+000$$

$$B = 1.64480852563e+000$$

$$C = -4.34363705824e-004$$

$$D = -2.89421769629e-005$$

$$E = 7.77944023392e-008$$

Para el Canal 4:

$$A = 2.88876136688e+001$$

$$B = 1.88805760317e+000$$

$$C = -3.89631673288e-003$$

$$D = -1.87527509229e-005$$

$$E = 7.06669039555e-008$$

Los ajustes realizados son muy buenos porque los coeficientes de correlación fueron iguales a 0.99974649 y 0.99905451 para los canales 2 y 4, respectivamente.

### Filtrado de las imágenes

Dado el proceso de captura, digitalización y transmisión de las imágenes satelitales, en estas aparece cierta cantidad de ruido de tipo impulsional; para poder eliminar los efectos espurios en estas imágenes, se hizo necesario realizar una identificación de estos, para lo cual se tomaron de forma aleatoria las imágenes de noviembre y se efectuó una observación visual con la que se identificaron seis tipos de ruidos.

1. Píxel con nivel digital 255 o cercano a este, cuyo valor difiere significativamente con respecto a sus ocho vecinos.
2. Píxel con nivel digital cero o cercano a este, cuyo valor difiere significativamente con respecto a sus ocho vecinos.
3. Dos píxeles consecutivos a lo largo de una fila con niveles digitales idénticos e iguales a 255 o cercano a este, cuyos valores difieren significativamente con respecto a sus vecinos.
4. Dos píxeles consecutivos a lo largo de una fila con niveles digitales idénticos e iguales a cero o cercano a este, cuyos valores difieren significativamente con respecto a sus vecinos.
5. Dos píxeles consecutivos a lo largo de una columna con niveles digitales idénticos e iguales a 255 o cercano a este, cuyos valores difieren significativamente con respecto a sus vecinos.
6. Dos píxeles consecutivos a lo largo de una columna con niveles digitales idénticos e iguales a cero o cercano a este, cuyos valores difieren significativamente con respecto a sus vecinos.

La aplicación de los algoritmos encontrados en la literatura a los ruidos reconocidos provoca un en-

turbiamiento en la imagen, puesto que estos modifican el valor original del píxel teniendo en cuenta el valor de píxeles vecinos que también pueden ser ruidos o no. Para este trabajo es necesario modificar, solamente, la información del píxel “ruidoso” sin alterar el resto y, por ende, fue necesario utilizar una variante del algoritmo denominado *promedio selectivo* que identificase los seis tipos de ruidos y los filtrase simultáneamente.

Luego de identificados los píxeles ruidosos se procede a identificar, utilizando los mismos criterios, si alguno de sus vecinos es también ruido; después se calcula para cada píxel con ruido el promedio de los píxeles vecinos que no son ruido y el resultado se le asigna al píxel mencionado. Cabe destacar que, mediante este algoritmo, en las filas y columnas que constituyen los bordes de una imagen no se identificaron ruidos y, por ende, no se modificó el valor de ningún píxel contenido en las filas y columnas referidas. No se buscó una vía para eliminar esta desventaja porque los bordes de las imágenes no estaban comprendidos dentro del área de estudio.

### **Detección de píxeles contaminados por nubosidad**

Para determinar si los píxeles están contaminados por nubes o no, se aplicará la técnica de los umbrales. En este método se construyen dos segmentos (uno para las nubes y otro para la superficie) y la pertenencia de un píxel a uno de estos segmentos se decide mediante la comparación de su nivel de gris con el valor umbral encontrado. Con miras a obtener la imagen final, solo hay que realizar una comparación numérica por píxel de los umbrales.

El cálculo de los umbrales no debe ser arbitrario, y para escoger los valores en que se segmentará la muestra se clasificaron de forma visual 24 píxeles seleccionados en todas las imágenes y se agruparon por clases. El píxel contaminado por nubes se clasificó como “1” y a los que no, como: “0”, “2”, “3”, “4” o “5”. El “0” y el “2” se corresponden con superficies

terrestres: la primera, costera y la segunda, interior; los casos clasificados de “3” y “4” se relacionan con superficies marinas: el primero, con la plataforma y el segundo, con las aguas profundas con respecto a las primeras; el “5” clasifica a las zonas montañosas. Los juegos de píxeles correspondientes a los pares de imágenes y sus clasificaciones respectivas se plotearon por horarios en gráficos de dispersión.

A cada conjunto de píxeles que no estaban contaminados por nubosidad segmentados por clases se le determinó el valor medio y la desviación estándar. El entero positivo más cercano a la suma de ambos estadígrafos se consideró como valor umbral de superficie, mientras para el umbral de las nubes se hizo el corte por el valor a partir del cual todos los píxeles se correspondían con presencia de nubes, según la apreciación visual.

Mediante el análisis de los gráficos se determinaron dos umbrales (para cada pareja de imágenes) por horario y por trimestre para cada superficie. Estos umbrales se sometieron a una valoración por clases y por horarios con vistas a determinar si las diferencias de las medias entre estas eran significativas, lo cual se efectuó mediante el cómputo del parámetro estadístico  $Z$  de acuerdo con la metodología seguida por Paegle y Kierulff (1974).

Después de determinar los umbrales se construyeron, por trimestres y para cada horario, dos imágenes que presentan donde cada píxel del área de estudio tiene por valor digital un umbral de nube y otro de superficie. El resto de los píxeles de la imagen que no corresponden al área de estudio se les asigna el valor 255. Estas imágenes serán utilizadas para el cálculo de la nubosidad.

Entre los valores umbrales fijados queda una *zona de duda*, en esos valores digitales pueden coexistir nubes con topes cálidos y superficies despejadas relativamente frías, bien sean terrestres o marítimas. Para “aclarar” la situación de los píxeles dudosos, puede aplicarse una técnica de filtrado basada en el

cálculo de la mediana que, por defecto, tiene una vecindad de 9 x 9. De la vecindad declarada, solo se tienen en cuenta para el cálculo del estadígrafo aquellos píxeles que, en caso de no existir nubes, detectan la misma superficie que el píxel central. Si el valor que arroja la mediana supera el valor del píxel, se considera que este está registrando la superficie terrestre o marina; de lo contrario, se clasifica como nube. Esta técnica permite detectar elementos de nubes pequeños, pero cuando la vecindad es uniforme con respecto al píxel, el método no funciona porque la diferencia entre la mediana calculada y el valor del píxel es cero o un valor muy cercano a este, fallando el criterio anterior.

También existen soluciones para los casos en que los métodos anteriores no funcionan. Cuando la superficie es uniforme y tiene valores digitales en el intervalo de duda, se procede a determinar bordes o irregularidades en la imagen; esta irregularidad es perceptible por una observación visual cuando la diferencia entre dos píxeles vecinos supera cinco unidades. Manteniendo el criterio de que ambos píxeles deben estar registrados en una misma clase, si la diferencia entre estos es igual o mayor que el valor prefijado, se procede a encontrar bordes, y clasificar como nube el mayor valor y todo aquel que lo supere.

Otra forma de determinar la presencia de nubes cuando las técnicas anteriores no funcionan es mediante una combinación de canales; en este sentido, ciertas operaciones, como la diferencia entre canales infrarrojos, pueden destacar las nubes bajas y nieblas.

Los contaminantes atmosféricos (por ejemplo, el humo y el polvo en suspensión) perceptibles en las imágenes visibles no se tratan en este estudio porque en la muestra que se toma como referencia no hubo casos detectados visualmente. Además, para realizar su detección automática mediante la diferencia entre imágenes de los canales infrarrojos, es necesario utilizar el canal centrado en los 12.0  $\mu\text{m}$  (canal 5). Las imágenes correspondientes a ese canal no son trans-

mitidas desde que estuvo operativo el satélite GOES-12 ni tampoco *a posteriori* se incluyó este canal en el GOES-13; por ende, no es posible utilizar esta técnica.

La detección se realiza mediante la comparación píxel a píxel de tres imágenes: la primera, proviene del satélite luego del filtrado y el ajuste correspondientes, en el caso de ser infrarroja; la segunda y la tercera, son construidas a partir de la determinación de los umbrales, donde los píxeles de cada región de la zona de estudio toman como valor digital los umbrales de superficie y nubosidad estimados para ese horario. Las imágenes son convertidas en matrices utilizando la función de Matlab: `imread`, y se comparan; los píxeles con valores por debajo del umbral para superficie se identifican como superficie y los que están por encima del umbral para nubes, como nube.

A partir de las comparaciones se van creando dos matrices con valores 0, 128 y 255, una para cada canal. El cero identifica las áreas despejadas dentro de las regiones de estudio; el segundo valor, las zonas que no son de interés; y el último, las nubes. Si existen píxeles con valores en el intervalo de la zona de duda, toman como valor 64 dentro del programa y se discriminan por las técnicas explicadas. Se genera una imagen donde aparece la nubosidad detectada en, al menos, una de estas.

El cálculo de la cubierta nubosa se realiza por regiones dentro del área de estudio, para lo cual se utiliza como base la máscara (ver Fig. 1). Cada píxel representa 0.0347 % de toda la región occidental, mientras que el resto representa 0.0437 %; 0.0226 % y 0.3012 % de las regiones central, oriental y la Isla de la Juventud, respectivamente. Luego del conteo por regiones de aquellos píxeles contaminados por la nubosidad, se calcula el porcentaje de área cubierta y, junto con otros datos, se expone en forma de tabla (Tabla 2).

TABLA 2

Salida del programa que determina la cobertura nubosa por regiones

Mes	Día	Horario	Occidente	Centro	Oriente	Isla de la Juventud
10	10	11:45 UTC	21%	87%	100%	25%

### Validación del método

En la literatura especializada existen diferentes métodos para comparar los datos obtenidos por diversas vías; en este caso, los detectados visualmente en las imágenes y por la técnica automática diseñada. La validación se hizo para los píxeles correspondientes a las estaciones meteorológicas de Casablanca (78325), Topes de Collantes (78342) y Camagüey (78355) porque son representativas de regiones costeras, montañosas y del interior, respectivamente. Asimismo, se trabajó con todos los horarios de un mes de verano (julio) y otro de invierno (febrero).

Para validar la técnica se recurre a las clasificaciones categóricas de variables no escalables. Las medidas que indican la exactitud de las clasificaciones son la *razón de falsas alarmas*, y la *probabilidad de detección* (FAR y POD, respectivamente, por sus siglas en inglés), además de la *probabilidad de clasificación correcta* (PCC).

FAR mide el número de clasificaciones erróneas de un evento; viene dada por la razón entre las clasificaciones incorrectas de un evento y el número total de casos que se han de clasificar (para clasificaciones perfectas FAR = 0). POD es una medida de la capacidad de clasificar correctamente un evento; resulta del cociente entre el número de clasificaciones correctas del evento y el número de veces que se observa. El índice PCC es una medida del número de clasificaciones correctas; está dado por la razón entre el número de clasificaciones correctas y el número de casos que han de clasificar la ocurrencia o no de un evento.

La tabla 3 muestra cómo fueron tratados los casos para cada estación seleccionada en cada horario. Con los umbrales determinados y la clasificación visual realizada se contaron los casos existentes para luego

fraccionarse en cuatro grupos (A, B, C y D). Aquellos en que las clasificaciones coincidían se agruparon en A (nubes) y D (despejado); en los grupos B y C se cuentan los casos en que existe divergencia entre ambos métodos. Con los valores arrojados por la tabla de contingencia se calcula FAR, POD y PCC mediante de las fórmulas siguientes:

$$FAR = B/(A + B) \quad (4)$$

$$POD = A/(A + C) \quad (5)$$

$$PCC = (A + D)/(A + B + C + D) \quad (6)$$

TABLA 3

Tabla de contingencia 2 x 2 usando dicótomos (SI/NO)

Mes y horario	Visual			
	SI		NO	
Automática	SI	A	B	
	NO	C	D	

Se utilizó también una segunda forma de validación buscando una complementación de la primera. Si bien utilizando las tablas de contingencia se valida de forma puntual aquellos píxeles seleccionados, el método de análisis de casos corroborará en forma de área lo expresado con anterioridad. Además, este método es apropiado cuando se estudian situaciones particulares en profundidad.

## Resultados y discusión

### Clasificación de las superficies

Para clasificar las superficies se construyeron tablas divididas por trimestres, en las cuales se observaron los valores obtenidos luego de calcularse el parámetro Z. En los trimestres de verano existe una mayor cantidad de casos en que las poblaciones de las clases involucradas no muestran diferencias significativas, porque en esos meses el comportamiento térmico de las superficies tiende a ser estable y a mostrar poca

diferencia entre las clases, sobre todo entre la costa y las superficies marítimas, así como entre las propias superficies marinas. Además, el comportamiento reflexivo de las clases correspondientes a las zonas montañosas y costeras es similar. En los meses de invierno las medias se distancian; solo en algunos horarios y con superficies distintas, las diferencias entre el valor medio de la clase montaña y otras clases no resultan significativas. En general, son pocos los casos en que las clases pueden unirse, menos de 18 %, por lo cual se decide mantener el número de combinaciones y no unir ninguna de las clases.

### Umbrales encontrados para la detección de superficies y nubes

Los umbrales para la detección de superficies fueron seleccionados sobre la base del análisis de los casos en que los píxeles fueron clasificados visualmente como superficies. Durante el día, los bajos niveles digitales se corresponden con la baja reflectividad de las superficies si se compara con las nubes; en la noche, por el efecto de irradiación las superficies, van perdiendo el calor recibido durante el día y el valor de los umbrales en canales infrarrojos se incrementa, con un pico máximo a las 8:45 UTC. La máxima irradiación es a las 11:45 UTC, aunque en ese horario contribuye levemente la radiación solar en el canal 2. La tabla 4 muestran los umbrales de superficies.

Desde el punto de vista climatológico, las superficies son más frías en invierno; esta condición justifica el aumento de los valores umbrales de superficie en los meses invernales y, en consecuencia, de los umbrales para las nubes. De mantener igual el valor de los umbrales las superficies frías pueden ser detectadas como nubes. Asimismo, el aumento de los umbrales para las nubes en este período trae consigo desventajas porque, ante la presencia de nublados bajos con niveles digitales inferiores a los umbrales establecidos, quedarían sin detectar píxeles contaminados por la nubosidad.

TABLA 4  
Valores umbrales para la detección de superficies

		Mayo-junio-julio										
Clase	0	2		3		4		5		General		
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	68	75	70	77	66	75	67	74	76	80	68	75
03	71	78	75	81	68	80	68	78	80	83	71	78
06	73	80	76	82	69	80	69	77	81	84	73	80
09	74	79	77	81	68	77	69	78	82	84	74	79
12	70	77	72	79	66	76	67	77	76	83	70	77
15	22	72	25	71	19	73	16	75	21	75	22	72
18	26	71	32	70	23	73	19	74	28	77	26	71
21	19	72	21	73	18	73	16	75	18	78	19	72
		Agosto-septiembre-octubre										
Clase	0	2		3		4		5		General		
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	70	76	74	78	66	74	66	73	79	82	70	76
03	72	81	76	84	67	79	68	80	81	87	72	81
06	73	79	77	82	68	77	66	76	80	85	73	79
09	74	78	77	81	66	74	67	75	80	83	74	78
12	72	76	75	78	65	73	65	73	77	81	72	76
15	21	75	24	76	19	75	16	77	20	79	21	75
18	26	73	29	70	22	74	17	74	25	76	26	73
21	17	73	20	75	16	74	15	75	16	83	17	73
		Noviembre-diciembre-enero										
Clase	0	2		3		4		5		General		
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	81	82	86	86	76	77	71	73	88	88	81	82
03	84	84	90	89	76	78	71	74	92	91	84	84
06	86	86	92	91	77	79	72	75	93	92	86	86
09	87	86	93	92	77	78	71	74	93	92	87	86
12	87	86	93	91	77	78	71	74	93	91	87	86
15	21	75	26	75	17	77	15	74	19	80	21	75
18	24	75	27	71	19	76	16	73	22	78	24	75
21	15	74	16	74	15	76	12	73	14	80	15	74
		Febrero-marzo-abril										
Clase	0	2		3		4		5		General		
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	75	76	78	78	73	75	72	74	84	84	75	76
03	79	79	84	83	73	75	73	75	88	86	79	79
06	80	81	86	85	74	76	73	76	88	87	80	81
09	82	82	87	86	78	79	71	74	90	88	82	82
12	83	82	86	85	73	75	71	75	88	87	83	82
15	22	73	26	66	18	74	15	73	19	75	22	73
18	29	71	35	57	21	73	17	72	26	71	29	71
21	19	73	22	69	16	74	14	75	18	78	19	73

Los valores umbrales para detectar la nubosidad superan los de superficie (Tabla 5). El intervalo de niveles digitales acotados entre los valores umbrales de superficie y de nubosidad no se clasifica por este método; para clasificar estos píxeles se utilizan otros métodos descritos.

De las tablas con los valores umbrales se extrajo la información necesaria con vistas a generar dos imágenes umbrales: una para las superficies y otra para la nubosidad; a cada trimestre le corresponden 32 parejas de imágenes umbrales (cuatro por horario y dos por canal).

Durante el trimestre noviembre-diciembre-enero, las temperaturas mínimas registradas estuvieron por debajo de la media histórica en la mayoría de los días, fundamentalmente en diciembre (sección del Clima en <http://www.insmet.cu>). Hubo madrugadas frías, con el pico mínimo el 15 de diciembre, en que se registraron mínimas entre 3 °C y 6 °C en localidades desde Mayabeque hasta Camagüey. Los umbrales encontrados para esos meses no son representativos de un trimestre clasificado climatológicamente como normal; por ello, en este trimestre deben utilizarse los umbrales del trimestre febrero-marzo-abril, cuando no existan condiciones invernales extremas. De existir estas condiciones, serán usados los primeros, tanto en un trimestre, como en el otro (esta técnica se denomina *días fríos*).

Por ejemplo, el 16 de febrero de 2011 se registraron las temperaturas mínimas más bajas de ese mes, y se detectó la nubosidad a partir de los umbrales encontrados para los trimestres de invierno. La mejor detección de nubes resultó con los umbrales del trimestre noviembre-diciembre-enero, puesto que fueron discriminadas las superficies frías ubicadas en las regiones central, oriental y la Isla de la Juventud. Cabe destacar que la llanura Habana-Matanzas es donde existe una probabilidad mayor de realizar una detección de nubes incorrecta, dado que allí se registran los niveles digitales más altos (temperaturas más bajas) de superficie.

TABLA 5  
Valores umbrales para la detección de nubes

Mayo-junio-julio												
Clase	0		2		3		4		5		General	
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	78	90	78	92	75	92	75	90	80	90	82	92
03	78	96	90	100	80	100	80	100	90	98	90	102
06	82	100	90	100	82	100	78	92	90	100	90	102
09	82	100	90	100	84	100	78	96	90	98	90	102
12	82	100	82	98	72	98	78	98	82	98	82	102
15	32	84	34	88	25	82	22	84	28	88	34	88
18	34	88	38	88	30	88	25	86	30	86	38	96
21	25	88	30	88	25	88	25	88	22	88	30	96
Agosto-septiembre-octubre												
Clase	0		2		3		4		5		General	
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	76	88	82	88	70	80	72	82	82	86	84	88
03	80	100	85	100	75	98	75	98	90	100	90	100
06	82	90	85	94	82	90	72	88	86	92	86	94
09	80	88	86	98	72	82	74	84	84	88	86	98
12	80	80	82	86	72	80	70	80	82	86	82	86
15	30	90	30	98	28	92	20	94	30	92	30	98
18	36	88	32	86	30	86	20	86	30	80	36	88
21	22	80	22	90	24	86	20	86	20	88	24	92
Noviembre-diciembre-enero												
Clase	0		2		3		4		5		General	
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	90	90	100	100	84	82	76	80	94	92	90	90
03	95	95	100	100	82	85	75	78	100	100	95	95
06	100	100	105	105	82	88	78	80	100	100	100	100
09	100	100	105	105	84	86	75	80	100	100	100	100
12	100	100	105	105	84	84	75	80	105	105	100	100
15	40	88	45	90	25	84	22	84	26	86	40	88
18	35	88	35	90	25	85	20	80	26	86	35	88
21	22	84	20	84	22	82	15	78	18	88	22	84
Febrero-marzo-abril												
Clase	0		2		3		4		5		General	
Canal	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4	1-2	4
00	88	92	88	90	82	82	80	84	90	92	92	92
03	90	88	98	95	82	90	82	86	98	96	98	96
06	90	98	100	98	80	88	80	90	98	96	100	98
09	98	94	98	98	94	94	76	80	100	95	100	96
12	97	95	100	100	83	88	76	88	97	96	100	100
15	30	90	40	80	25	85	25	85	25	85	40	90
18	38	80	40	75	30	82	25	80	32	82	40	82
21	25	92	28	98	20	88	18	95	25	98	28	98

### Software elaborado para la detección automática de nubes

Fue creado en su versión 1.0 el software Nubes, con el cual puede detectarse automáticamente la cobertura nubosa sobre Cuba. La figura 3 muestra el funcionamiento del programa y sus etapas, que serán descritas brevemente en adelante.

Para detectar las nubes durante el día, el usuario del programa debe tener un juego de imágenes VIS-IR e IRc-IR, si se trata de la noche; si son varias parejas de imágenes se recomienda separarlas en dos carpetas independientes, puesto que para cargar las imágenes, primero, deben seleccionarse según el horario las VIS o IRc, y luego las IR.

En el momento de cargar las imágenes pueden cometerse errores frecuentes (por ejemplo, la omisión de una o varias imágenes) y, por ende, quede alguna

sin su pareja y(o) que haya sido modificado el nombre con que salen las imágenes desde la estación receptora. Tampoco deben coincidir imágenes que tengan el mismo horario y trimestre en años distintos.

Si se cargan correctamente las imágenes, las etapas 2 y 3 se ejecutan de forma automática sin intervención del usuario. Tanto el ajuste, como el filtrado se realizan en dependencia de los canales y se utiliza la metodología descrita para ello. Las imágenes generadas en cada etapa se guardan en la dirección donde están las originales; por ello, se recomienda separar los canales por carpetas.

El programa continúa realizando la detección de nubes por mediación del método de los umbrales utilizando mapas, como los representados en la figura 3.1, que son generados en dependencia del trimestre, el horario y el canal. Para la detección de nubes dentro de la zona de duda pueden utilizarse varias técnicas, las cuales quedan a selección del usuario. Posteriormente, con el software se genera una tabla que muestra el valor porcentual del área cubierta por las nubes detectadas en cada región de estudio, y se le solicita al usuario la dirección donde desea guardar la imagen producto (en formato .TIF y la tabla en .txt).

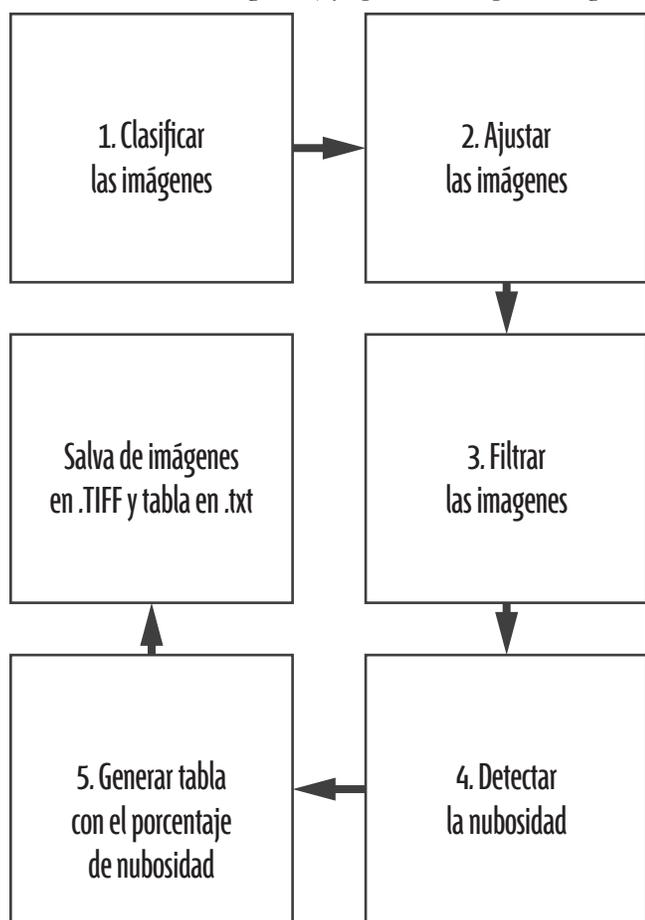


Fig. 3 Esquema de funcionamiento de Nubes 1.0.

### Validación puntual en píxeles seleccionados

Se corrió el programa con las imágenes de los meses seleccionados para realizar la validación; los resultados obtenidos fueron estratificados en dependencia de los horarios y se colocaron en tablas de contingencias (ver Tabla 3). Luego se determinaron los coeficientes FAR, POD y PCC, los cuales se multiplicaron por 100 con miras a expresarlos en términos de porcentaje (Tabla 6).

De la tabla 6 puede inferirse que en los meses de verano el algoritmo alcanza las mejores detecciones de nubosidad con escasas falsas alarmas. La probabilidad de detectar incorrectamente la nubosidad en invierno por el método umbral-mediana se debe a la no detección de nubes bajas en zonas donde la

tierra está muy fría. La utilización del método umbral-diferencia disminuye las falsas alarmas, sobre todo durante los horarios nocturnos, pero, a su vez, disminuye la probabilidad de detección. En el mes de invierno, el índice FAR está muy elevado en comparación con la cifra para el verano porque a todos los días se les aplicó la técnica umbrales-mediana sin tener en cuenta que en los días fríos del mes deben utilizarse otras técnicas.

Para el verano, en 90 % está el PCC, tanto de día, como de noche, mientras que durante el invierno, baja entre 4 puntos y 5 puntos porcentuales por el día y 1 punto por la noche; este comportamiento se justifica por el alza de los casos en que difieren la detección automática y la visual.

A escala de un píxel pueden clasificarse como satisfactorios la metodología y el software, puesto que la validación aportó buenos resultados en la detección de nubes.

TABLA 6  
Resultados de las tablas de contingencia

Verano (julio)	Día			Noche			General		
	FAR	POD	PCC	FAR	POD	PCC	FAR	POD	PCC
Umbral-mediana	9	96	90	2	85	90	5	91	90
Invierno (febrero)	Día			Noche			General		
	FAR	POD	PCC	FAR	POD	PCC	FAR	POD	PCC
Umbral-mediana	18	90	86	24	71	89	20	81	86
Umbral-diferencia	17	86	85	4	51	89	13	70	88

### Comparación visual del producto Nubes con las imágenes originales

A continuación, se presenta un grupo de escenarios del cual se tenían imágenes satelitales. A estas imágenes se les aplicó el programa que utiliza la metodología diseñada para determinar automáticamente la nubosidad; se le colocó la rejilla que corresponde al área de estudio. La rejilla puede ser diferenciada de la nubosidad detectada porque su ND = 254. La idea

fundamental del epígrafe es reflejar en qué medida se detecta de forma automática la nubosidad asociada con diferentes fenómenos meteorológicos sin importar el horario.

La figura 4 presenta el caso correspondiente al 7 de julio de 2010, a las 02:45 UTC, donde sobre Cuba influía una vaguada en la tropósfera superior e imperaba un flujo del sureste en los niveles bajos. Esta situación meteorológica generó nublados medios y altos sobre gran parte del país, los que fueron detec-

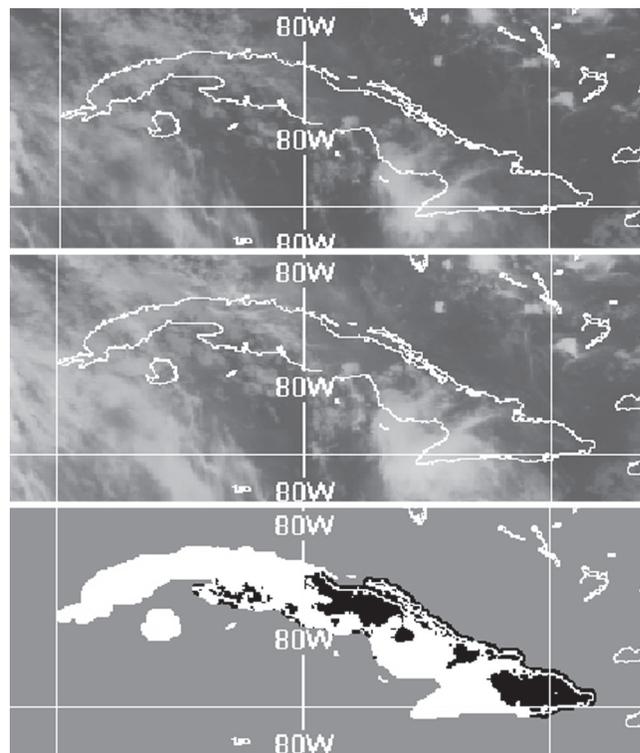


Fig. 4 Imágenes de los canales 2 (a) y 4 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 7 de julio de 2010, a las 02:45 UTC.

tados correctamente. Cabe señalar la detección de cirros sobre el occidente, la Isla de la Juventud y parte de Oriente; estos son más evidentes en las imágenes del canal 4 que las del 2 dada su baja emisividad.

La figura 5 representa el caso del 14 de octubre de 2010, a las 17:45 UTC, cuando la tormenta tropical Paula estaba influyendo sobre la región occidental; en esta región predominan los nublados asociados al organismo tropical, mientras que en el resto del país prevalecían las nubes bajas.

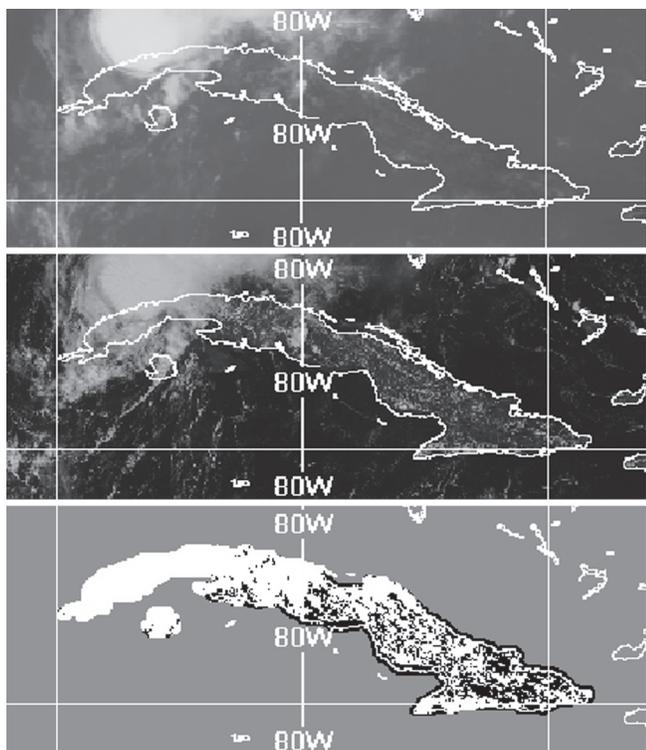


Fig. 5 Imágenes de los canales 4 (a) y 1 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 14 de octubre de 2010, a las 17:45 UTC.

Los pequeños elementos de nubes cumuliformes son detectados fundamentalmente por la alta reflectividad que poseen cuando son vistos por el canal 1, aun cuando la temperatura de sus topes es comparable con la superficie subyacente. Para que este tipo de nubes sea detectado en horario nocturno es necesario que sea evidente la diferencia entre las temperaturas de brillo de los canales infrarrojos.

El 13 de noviembre de 2010, a las 11:45 UTC, había un anticiclón de origen continental al norte de Cuba, el cual impuso un flujo del noreste con arrastre de la nubosidad en niveles bajos hacia el área de estudio (Fig. 6). En cierto grado, fue subestimada la nubosidad en el interior de Pinar del Río, pero en el resto del país la detección fue correcta.

El 13 de diciembre de 2010, a las 02:45 UTC, estaba presente una banda de nublados, asociada a un frente frío, sobre la región occidental de Cuba, la cual fue detectada correctamente al igual que los nublados bajos y medios en el resto de la isla (Fig. 7).

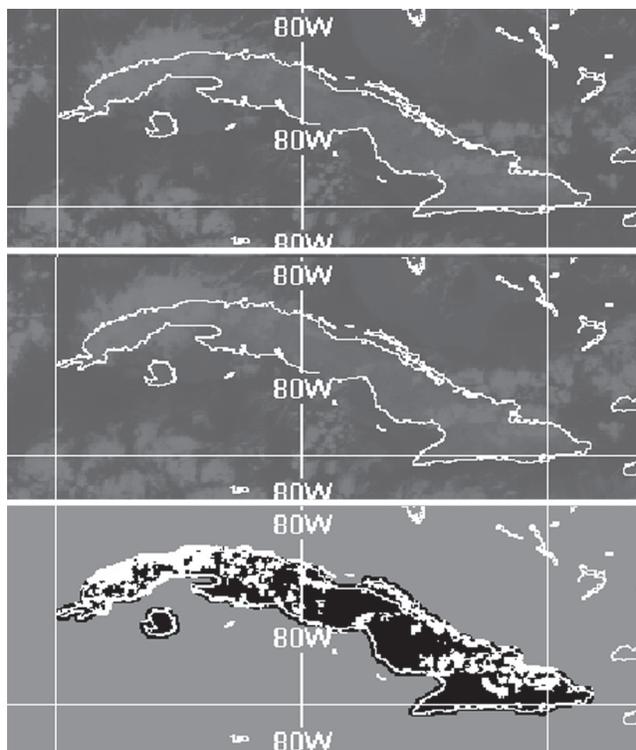


Fig. 6 Imágenes de los canales 2 (a) y 4 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 13 de noviembre de 2010, a las 11:45 UTC.

El 2 de febrero de 2011, a las 05:45 UTC (Fig. 8) y las 17:45 UTC (Fig. 9), un sistema frontal se encontraba desplazándose sobre el sureste del Golfo de México. En las primeras horas de la madrugada, Cuba estaba prácticamente desprovista de nubosidad; solo se observaba la rejilla que delimita la superficie costera, y aislada nubosidad sobre Oriente, mientras que en las primeras horas de la tarde predominaban los nublados bajos. En ambos escenarios fue detectada la nubosidad existente.

El día 20 de junio de 2011, a las 17:45 UTC, una vaguada superior influía sobre Cuba e imperaba cierta nubosidad de niveles medios y altos sobre toda el área de estudio, con intersticios pequeños y aislados, lo cual también se detectó satisfactoriamente (Fig. 10).

De esta forma, quedan validadas, tanto la metodología, como la herramienta creadas para determinar la cobertura nubosa sobre Cuba mediante los diferentes escenarios mostrados en este epígrafe.

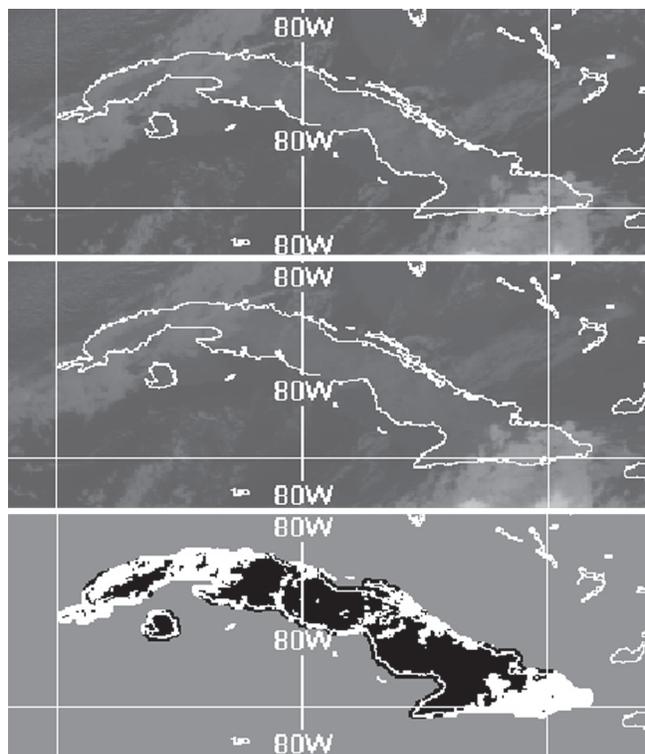


Fig. 7 Imágenes de los canales 2 (a) y 4 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 13 de diciembre de 2010, a las 02:45 UTC.

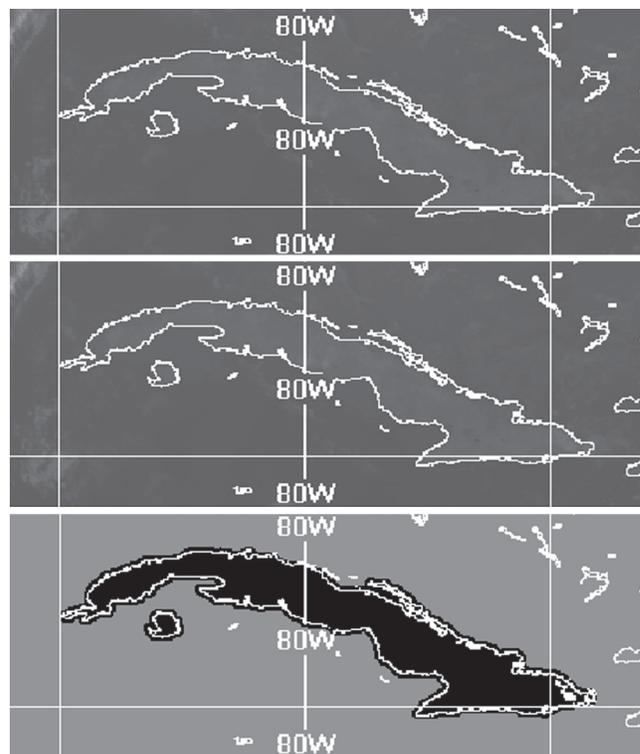


Fig. 8 Imágenes de los canales 2 (a) y 4 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 2 de febrero de 2011, a las 05:45 UTC.

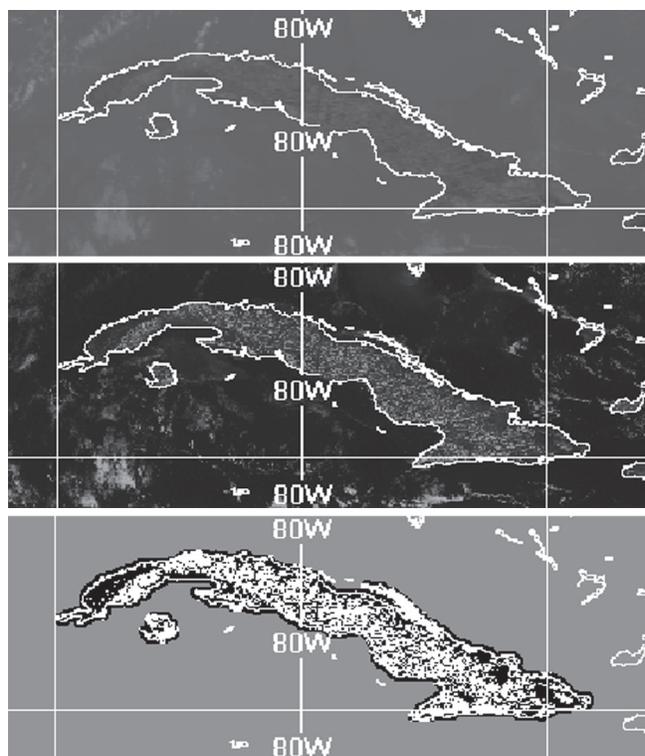


Fig. 9 Imágenes de los canales 4 (a) y 1 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 2 de febrero de 2011, a las 17:45 UTC.

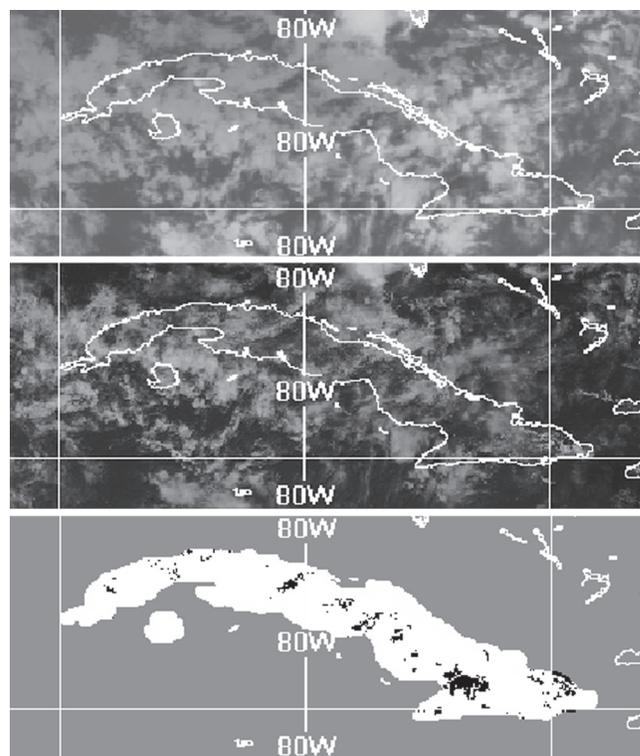


Fig. 10 Imágenes de los canales 4 (a) y 1 (b) e imagen del producto Nubes (c) del 20 de junio del 2011, a las 17:45 UTC.

## Conclusiones y recomendaciones

Para el territorio nacional, utilizando los canales 1 (0.6  $\mu\text{m}$ ), 2 (3.9  $\mu\text{m}$ ) y 4 (10.7  $\mu\text{m}$ ) del satélite GOES-13, se determinaron (por trimestres, horarios y canales) los umbrales que caracterizan la zonas del interior, montañosas, costeras y de superficies marítimas que lo rodean, de conjunto con los umbrales para detectar la áreas cubiertas por nubosidad.

Se diseñó una metodología con vistas a estimar la cobertura nubosa, que incluye algoritmos para el procesamiento digital de imágenes a partir de la relación entre la presencia o la ausencia de nubosidad y los niveles de grises. El algoritmo diseñado es confiable para todo el año, aunque debe destacarse que esta confianza disminuye en las noches muy frías con cielos despejados de la temporada invernal.

Se diseñó y validó una herramienta computacional sobre la base de los algoritmos creados, que permite contabilizar la cobertura nubosa de áreas determinadas del archipiélago cubano.

Se deben usar los resultados obtenidos en la evaluación de los pronósticos oficiales de nubosidad confeccionados por el INSMET, incluir en el programa nuevos algoritmos para casos de niebla densa, superficies con temperatura comparables con las de las nubes observadas en noches invernales y en días con elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos; asimismo, confeccionar una climatología de la nubosidad, el albedo y la temperatura de la superficie estimados por satélite para las distintas épocas del año.

## Referencias

- Cazorla, A., F. J. Olmo y L. Alados-Arboledas (2005): Estimación de la cubierta nubosa en imágenes de cielo mediante el algoritmo de clasificación KNN, extraído de: <http://www.aet.org.es/congresos/xi/ten76.pdf>.
- Casanova, C., A. Romo, E. Hernández y J. L. Casanova (2003): Clasificación automática de nubes mediante imágenes METEOSAT VIS IR y NOAA A TOVS, disponible en: <http://www.aet.org.es/congresos/x/cac59.pdf>.
- Derrien, M. y H. Le Gléau (1999): Cloud Classification Extracted From AVHRR And GOES Imagery. Météo-France / SCEM / Centre de Météorologie Spatiale BP14722302 Lannion, France, disponible en: <http://www.meteorologie.eu.org/safnwc/publis/conf1999b.pdf>
- 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, 33 pp.
- Paegle, J. N. y L. P. Kierulff (1974): "Synoptic Climatology of 500-mb Winter flow Types", *J. Appl. Meteor.*, vol. 13, no. 2, pp. 205-220.
- Suárez, H. L. (2010): *Estimación de la temperatura superficial del mar a partir de las imágenes del satélite GOES-E*, Trabajo de diploma, 56 pp.

---

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Erick González por su ayuda en la programación; a Ramses Vázquez, por las consultas sobre sistemas de información geográfica; a José L. Quevedo y Carlos M. González, por su colaboración ante la detección visual de nubosidad; y a Milagros Sarmiento, por su apoyo en la digitalización de los datos provenientes de la detección visual para la nubosidad.

---