

Modelo numérico unidimensional estacionario de nubes cúmulos

Ismael Pomares Ponce
Carlos Alberto Pérez Sánchez
Daniel Martínez Castro

Centro Meteorológico de Camagüey.
Instituto de Meteorología. Cuba
ismael@cmw.insmet.cu

Resumen

Se pone a punto un modelo numérico unidimensional estacionario de nube cúmulo para su aplicación en los experimentos del Proyecto de Incremento Artificial de la Lluvia por Siembra de Nubes, en la toma de decisiones diarias para declarar un día experimental, en las evaluaciones de los datos experimentales y en la corroboración de hipótesis entre otros aspectos. La parametrización microfísica considera los procesos de conversión y coalescencia sobre la base de la partición del agua en partículas sólidas y líquidas, en la nube y en hidrometeoros de igual composición. El perfil vertical de la velocidad del aire dentro de la nube se obtiene, empleando la ecuación de la conservación del momento, teniendo en consideración la aceleración provocada por la flotabilidad, la pérdida de esta debido al adentramiento del medio y el peso del agua sostenida por la corriente ascendente. La aplicación del reactivo glaciogénico es simulada en el modelo. La salida del modelo consiste en perfiles de velocidad vertical, temperatura, razón de mezcla, agua de nube, de lluvia, hielo agua total y de factores de reflectividad del radar, así como la altura máxima alcanzada por la nube. Para el análisis de sensibilidad, el modelo fue corrido con los sondeos de Camagüey correspondientes a días experimentales del año 2005 y 2006; estos días se evalúan con los datos de radar. Se obtienen resultados que permiten proponer el uso operativo del modelo en la toma de decisiones y en la evaluación de la sembrabilidad durante la ejecución de los trabajos de siembra de nubes de forma experimental.

Introducción

Luego del descubrimiento de que las gotas superenfriadas de las nubes se podían convertir en cristales de hielo con la aplicación de un agente glaciogénico, las investigaciones han ampliado enormemente los conocimientos acerca de los procesos microfísicos, dinámicos y de formación de las precipitaciones en las nubes y el impacto de la intervención humana en esos procesos. Un papel fundamental en la profundización y desarrollo del conocimiento de los procesos que tienen lugar en las nubes es la modelación. Los modelos unidimensionales de nubes cúmulos fueron los primeros modelos utilizados para tal fin y en ellos solamente se analiza la variación vertical de la estructura de la nube.

Su amplio uso se debió principalmente a la eficiencia y a la rapidez computacional en su ejecución.

Así, los modelos de nubes con una simulación realista de los procedimientos de siembra y los procesos del hielo se pueden aplicar de tres modos diferentes: 1) planeamiento y justificación; 2) operación y 3) evaluación y análisis posoperacional. Estos modos ayudan a optimizar los procedimientos de siembra y establecer o refinar las hipótesis físicas, además ofrecen la única oportunidad de ver el efecto de la siembra sobre situaciones idénticas (modeladas) en las nubes sembradas y no sembradas. Se pueden utilizar para recrear los experimentos de siembra de nubes del pasado, para ayudar a evaluar el efecto de la siembra. También se pueden emplear para simular las trayectorias del ma-

terial de siembra dispersado, proporcionando un pronóstico en tiempo real de apoyo a los experimentos y a las operaciones de campo, que permitan examinar el efecto potencial fuera del área de siembra y sirva de ayuda al análisis estadístico (WMO,1991).

La OMM recomienda utilizar modelos de nubes en los experimentos de modificación artificial del tiempo, enfatizando en los objetivos anteriores. A partir de 1979, en Cuba se inicia el proyecto para el incremento artificial de las precipitaciones: Proyecto Cubano para la Modificación Artificial del Tiempo (PCMAT), en colaboración con la antigua Unión Soviética (Koloskov *et al.*, 1996). En los primeros años (1979–1981) los esfuerzos se dirigieron a seleccionar el sitio adecuado y la estación del año apropiada para hacer una evaluación preliminar de la física de las nubes y conducir un experimento exploratorio (1982–1985). Durante los 6 años comprendidos entre 1985 y 1990 se realizaron experimentos aleatorizados de siembra de nubes en el Área Experimental de Camagüey para evaluar la respuesta de nubes convectivas tropicales superenfriadas a la siembra con yoduro de plata (Martínez *et al.*, 1989, Pérez *et al.* 1992). En todos estos años de experimento nunca se empleó operativamente un modelo de nubes cúmulos.

En Cuba, durante los años 80, se desarrollaron varios modelos unidimensionales (Roger *et al.*, 1986, 1989a, 1989b) para el estudio de la física de las nubes. En 1992, Clavijo y Pérez desarrollan un modelo unidimensional de nubes convectivas a partir del obtenido en el Instituto de Ciencias Atmosféricas (IAS) de *South Dakota School of Mines and Technology* de los Estados Unidos (Hirsch 1972); además, se desarrolló un modelo unidimensional con microfísica parametrizada que incluye el hielo (Alfonso *et al.*, 1998), y un modelo para calcular la evolución del espectro de gotas por condensación y coalescencia, el cual no estaba acoplado a un soporte dinámico (Alfonso, 1999).

La realización de los experimentos para el incremento artificial de las precipitaciones y las investigaciones cola-

terales relacionadas con estos, ha influido grandemente en la popularidad de modelos numéricos unidimensionales de nubes. Su importancia radica en su amplio uso como modelos operativos. Numerosos ejemplos aparecen referidos en la literatura (Bruitjes, 1999), en los que se emplearon durante y después de la conclusión de varios experimentos (Hirsh, 1972, Silverman *et al.*, 1994, Woodley *et al.*, 2003). Los ejemplos incluyen la predicción de la altura del tope de las nubes para los casos de nubes sembradas y no sembradas, los perfiles de velocidad vertical y el contenido de agua líquida entre otros, y de manera más general su uso para evaluar experimentos de siembra de nubes, así como la declaración de la condición de día experimental.

Los modelos juegan un papel importante en la interpretación de la evidencia observacional para estimar el potencial de sembrabilidad de un tipo de nube, o sea, su respuesta a la aplicación del reactivo dentro de un área geográfica de interés. En resumen, los modelos de nube pueden ser muy útiles al permitir refinar una determinada hipótesis de siembra y ponerla en una base cuantitativa superior, sobre todo cuando se acoplan a estudios observacionales.

Con la selección del modelo adecuado es posible estimar cuantitativamente los cambios potenciales que tienen lugar en la microestructura de las nubes como resultado de la siembra. A través de la repetición de un número de cálculos se obtiene información acerca del lugar óptimo y la cantidad requerida del material para la siembra, y el momento óptimo para comenzar la misma con el fin de lograr el máximo efecto. De este modo, si no es muy complejo, el modelo se puede emplear operativamente para predecir los posibles efectos de la modificación, al considerar una estrategia particular de siembra y las condiciones atmosféricas prevalecientes. La modelación también se puede emplear en el diseño del experimento.

Además de evaluar el potencial de siembra, las salidas del modelo pueden resaltar los parámetros críticos presentes en las hipótesis de siembra. Una vez identifi-

cados estos, se pueden emplear operacionalmente en la toma de decisiones para la siembra y en la evaluación del experimento.

Este modelo también presenta una serie de restricciones, dadas fundamentalmente por su unidimensionalidad.

- El modelo predice el máximo crecimiento solo de la nube bajo las condiciones iniciales dadas en su base y en el medio circundante inmediato, cuando generalmente ninguno de los dos se conoce, ya que el sondeo disponible en general no coincide en tiempo y espacio con la nube que se pretende simular.
- No simula la evolución temporal de la nube y por lo tanto, no incluye su etapa de disipación.
- Omite las asimetrías horizontales, de modo que no tiene en cuenta efectos tan importantes como la convergencia en la mesoescala.
- Carece de un esquema realista de la caída de las precipitaciones.

Estas limitaciones implican que no se debe esperar a que las predicciones del modelo se cumplan cuantitativamente, excepto en casos en que el desarrollo de la nube tenga lugar en condiciones de masa de aire relativamente estable, cerca de la estación de sondeo y no muy alejado en tiempo de la hora del sondeo. En este caso, el modelo puede brindar una buena predicción de la altura del tope máximo de la nube, y en particular del incremento del producto de la siembra. Sin embargo, la utilización de estas predicciones como covariante, junto a otros parámetros del sondeo y la mesoescala, puede ser muy útil, tanto para la determinación del efecto de siembra como para el pronóstico a corto plazo de otras variables meteorológicas en el área de validez del sondeo (Martínez *et al.*, 2002).

La decisión de continuar los trabajos del Proyecto Cubano de Modificación Artificial del Tiempo y en particular los experimentos de incremento artificial de la lluvia, promovió la necesidad de diseñar dichos experimentos y crear herramientas de trabajo que, conjuntamente

con el diseño del experimento, el modelo conceptual del esquema de siembras de nubes y las hipótesis de trabajo, permitieran una ejecución de las investigaciones según las recomendaciones generales de la OMM para estos casos. Este modelo se enmarca dentro de los objetivos mencionados.

El objetivo del presente trabajo es poner a punto un modelo unidimensional de nube cúmulo para su uso operacional en la ejecución de los experimentos de incremento artificial de la lluvia. Además, como objetivos específicos efectuar el análisis de sensibilidad del modelo para demostrar que reacciona correctamente ante la variación de parámetros de entrada y por último demostrar que el modelo posee la efectividad necesaria para utilizarse operacionalmente.

Materiales y métodos

Termodinámica

En el trabajo se seleccionó el modelo unidimensional empleado en el experimento *Cloud Catcher* (Hirsh, 1971). Este modelo se ha utilizado con éxito en diferentes experimentos (Simpson, 1969; Hirsh, 1972; Silverman *et al.*, 1994; Woodley *et al.*, 2003) y está estructurado por una ecuación para la termodinámica y otra para la componente vertical de la velocidad, tratando además, la complicada interacción entre estos y la congelación, el mezclamiento y la formación de las precipitaciones. En el modelo se procedió a variar algunas características de las parametrizaciones y especificidades de los procesos con el objetivo de representar el comportamiento de las nubes que se desarrollan sobre el área de trabajo.

La presión ambiental, temperatura, humedad relativa y la velocidad vertical del viento obtenidos del sondeo, desde la base de la nube hasta aproximadamente 100 hPa, constituyen las entradas al modelo. Existen también condiciones en la base de la nube que son necesarias introducirlas como la altura de la base de la nube, el radio o diámetro del elemento activo de la corriente ascen-

dente y la velocidad vertical inicial del elemento activo de la corriente ascendente. Para expresar los cambios de la temperatura dentro de la nube con la altura se utiliza la primera ley de la termodinámica (ecuación 1):

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\frac{-g}{C_p} \left[1 + \frac{qL_e}{RT} \right] - \mu(T - T_e) - \frac{\mu L_e}{C_p} (q - q_e)}{1 + \frac{\varepsilon L_e^2 q}{C_p RT^2}} \quad (1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, C_p el calor específico a presión constante para el aire, μ es el coeficiente de inclusión, q y q_e son las razones de mezcla para la nube y el medio, L_e es el calor latente de condensación, T y T_e las temperaturas en el interior de la nube y en el medio, R es la constante de los gases para el aire seco y ε es la relación entre el peso molecular del vapor y el aire seco.

Los términos de la ecuación 1 representan (de izquierda a derecha) el decrecimiento adiabático húmedo de la temperatura, la pérdida de calor debido al aire del medio que penetra en la nube por inclusión y la pérdida de calor necesario para resaturar el aire incluido.

Se utiliza una función exponencial para calcular la velocidad del paso de agua de nube a hielo de nube. Si Q_c es la concentración de agua de nube y Q_i la concentración de hielo de nube, entonces:

$$Q_c + Q_i = Q(ic) \quad (2)$$

donde $Q_c = Q(ic)f(T)$, $f(T)$ es una función exponencial tal que

$$f(T) = 0.008 \cdot 1.274^{(T_g - T)} \quad (3)$$

T_g es la temperatura de glaciación y $f(T)=1$ si (3) sobrepasa la unidad

Para el cambio de temperatura debido a la congelación se utiliza la formulación de Saunders (1957):

$$\Delta T = \frac{Q_j L_f + \varepsilon L_s (\bar{e}_w - \bar{e}_i)}{C_p + q_{eb} C_p' + \frac{\varepsilon L_s^2 \bar{e}_i}{PR_w T^2}} \quad (4)$$

La clásica ecuación de conservación del momento vertical para el caso unidimensional estacionario se utiliza para obtener la velocidad de la corriente ascendente dentro de la nube.

$$\frac{1}{2} \frac{dw^2}{dz} = g \left[\frac{T_v - T_{ve}}{T_{ve}} - Q \right] - \mu w^2 \quad (5)$$

donde T_v y T_{ve} significan las temperaturas virtuales dentro de la nube y en el medio mientras que Q es el contenido total de agua dado en g/g^{-1} . Considerando el primer término de la derecha de la ecuación 5 como constante de un paso de integración a otro, es posible obtener la velocidad vertical analíticamente.

$$w_1 = \left[(1 - 2\mu\Delta z) w_o^2 + 2g\Delta z \left(\frac{T_{v1} - T_{ve1}}{T_{ve1}} \right) - Q \right]^{0.5} \quad (6)$$

Los cálculos se realizan mientras la velocidad de la corriente ascendente w_1 es positiva. Cuando esta alcanza el valor cero, los cálculos se detienen y este nivel es designado como el tope de la nube.

Microfísica

La microfísica del modelo, aunque comprende de modo general la mayor parte de los procesos que se ponen de manifiesto en las nubes cúmulos, está dada por un conjunto de parametrizaciones para las cuales diversas investigaciones demuestran una efectividad aceptable en la representación aproximada de los diferentes procesos. Lo anterior implica el desconocimiento explícito de características como el espectro de gotas de nubes, de gotas de precipitación y el de fase sólida; la efectividad de la coalescencia y la forma geométrica de los componentes de fase sólida.

La cantidad de agua líquida obtenida considera, tanto la formación de agua por condensación como la pérdida por evaporación debido al mezclamiento con el medio. La cantidad de agua resultante de este proceso se particiona en agua de nube, hielo de nube, agua de precipitación y/o 'graupel' (embriones de granizo) de acuerdo con la región de la nube en que se pone

de manifiesto este balance representado en la figura 1. Aquí y en adelante se consideran partículas de nubes, aquellas que debido a su diámetro no presentan una velocidad terminal de caída que les permita su precipitación, lo que para el caso de las gotas de agua está dado para diámetros menores a 200 micrones. El *graupel*, forma de precipitación por excelencia del agua en estado sólido, requiere de dimensiones mayores, debido a que su densidad resulta sustancialmente menor.

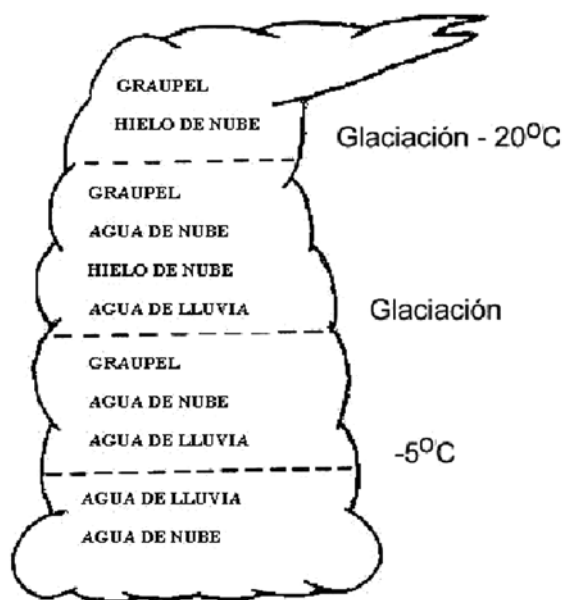


Fig. 1. Partición del agua en la nube.

La figura 1 muestra que en la región más baja de la nube, desde la base hasta $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se forma el agua de nube y la precipitación. La segunda región, comprendida entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una temperatura llamada de glaciación, indica que a partir de esta es posible implementar la formación del hielo de nube, se permite la formación de *graupel*, además de la ya existente agua de nube y de precipitación. A partir de la temperatura de glaciación (TF) hasta $\text{TF}-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ se permite la formación de hielo de nube, el cual se obtiene directamente a partir del vapor y además, mediante la congelación del agua de nube. Dentro de esta capa, el *graupel*, el agua de nube y la de precipitación continúan formándose y coexisten con el hielo de nube. En la parte superior de la nube compren-

dida entre $\text{TF}-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el punto donde la velocidad vertical del aire se hace cero, solo se admiten formas sólidas para el agua, o sea *graupel* y hielo de nube.

El balance de agua a través de toda la profundidad de la nube se expresa según la siguiente ecuación, cuando no se considera el agua precipitable (el esquema de precipitación se calcula aparte).

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{dQ_c}{dz} + \frac{dQ_i}{dz} + \frac{dQ_h}{dz} + \frac{dQ_g}{dz} \quad (7)$$

donde Q es el contenido total de agua, Q_c , Q_i , Q_h , Q_g son los contenidos de agua de nube, de hielo de nube, agua de precipitación y *graupel* respectivamente.

El agua de nube se obtiene mediante:

$$\frac{dQ_c}{dz} = -\frac{dq_s}{dz} - \mu(q - q_e + Q_c) - Q_c \frac{f(T)}{\Delta z} - R_{1ch} - R_{2ch} - R_{2cg} \quad (8)$$

El primer término de la derecha en la ecuación 8 representa el término de producción de agua de nube y el segundo su pérdida debido a la mezcla con el medio. Los términos restantes reducen el agua de nube por congelación exponencial, conversión de agua de nube a precipitación, acreción del agua de precipitación a expensas del agua de nube y acreción del *graupel* a expensas de la misma.

El hielo de nube se forma similarmente:

$$\frac{dQ_i}{dz} = -\frac{dq_s}{dz} - \mu(q - q_e + Q_i) + Q_c \frac{f(T)}{\Delta z} - R_{1ig} - R_{2ig} \quad (9)$$

Para las regiones en que el agua y el hielo de nube coexisten, los términos de producción y de mezcla son pesados con respecto a las cantidades de agua y de hielo de nube presentes.

El agua de precipitación se obtiene por medio de la autoconversión y la acreción del agua de nube, y se disminuye por la acreción y autoconversión a *graupel*, así como también por la fracción que precipita. El balance está dado por:

$$\frac{dQ_h}{dz} = R_{1ch} + R_{2ch} - R_{1hg} - R_{2hg} - F_h \quad (10)$$

R_{1hg} y R_{2hg} representan la autoconversión y acreción de agua de precipitación a *graupel*, F_h es la fracción precipitada.

Una ecuación similar se considera para el *graupel*, que representa para este modelo la forma de precipitación de partículas sólidas.

$$\frac{dQ_g}{dz} = R_{1ig} + R_{2ig} + R_{1hg} + R_{2hg} + R_{2cg} - F_g \quad (11)$$

donde F_g es la fracción de *graupel* precipitable.

Las parametrizaciones para cada uno de los términos (R) se obtienen mediante parametrizaciones que se pueden encontrar en Weinstein y Davis, 1968.

Análisis de los resultados

Datos de entrada al modelo

Durante los días del experimento se lanzó un globo sonda a las 12:00Z (7 a.m. hora local) que permitió caracterizar las condiciones termodinámicas existentes en la atmósfera y son, junto a las condiciones especificadas en la tabla 1, los parámetros de entrada al modelo. Además, se variaron tres parámetros de entrada con el fin de determinar su sensibilidad. Estos parámetros son:

- El radio inicial del chorro ascendente: se tomaron valores entre 0.5 y 2 km con un paso de 0.5.
- La velocidad de ascenso: entre 0.25 y 3 m/s con un paso de 0.25m/s.
- El coeficiente de inclusión: se tomaron valores de 0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.12, 0.13, 0.15, 0.16, 0.17, 0.19, 0.21 y 0.23 m⁻¹.

Tabla 1. Opciones de entrada al modelo

Parámetros	Si	No
Radio variable de la corriente ascendente	X	
Ascenso con toda el agua	X	
Cizalladura del viento		X
Formación de graupel	X	
Esquema de precipitación de Simpson	X	
Congelación isobárica	X	
Formación de lluvia	X	

Como parámetros de control se tomaron los valores de radio de 1 km, el parámetro de inclusión de 0.15 km⁻¹ y la corriente inicial de ascenso de 1 m/s.

Análisis de los sondeos

y condiciones sinópticas prevalecientes

Para realizar este trabajo se seleccionaron los días 8 y 11 de junio del 2006. El primer día se corresponde con una atmósfera inestable caracterizada por la presencia abundante de humedad en todos los niveles que supera el 85% por encima de los 4000 m. Se observa una capa estable entre los 925 y los 750 hPa que sirve de "tapón" al desarrollo convectivo. El calentamiento diurno posterior provocó el incremento de la temperatura y permitió el rompimiento de la capa de estabilidad. El viento en los niveles bajos era bastante débil y proveniente del sur. Las corrientes tienen componente sur prácticamente en toda la vertical de la atmósfera. Esto explica los valores elevados de humedad relativa existente en todos los niveles, aportados por el aire cálido y húmedo proveniente del Caribe.

El día 11 de junio, al contrario del anterior, muestra una atmósfera estable en casi todos los niveles, exceptuando una pequeña capa de inestabilidad centrada aproximadamente en los 500 hPa. También aparece una capa de inversión profunda en los niveles bajos a solo 200 m de la superficie. La dirección del viento varía del SE-S-SW-W hasta los 300 hPa. Los indicadores sugieren que no se van a formar tormentas con solo del 20 al 40% de probabilidad de convección muy débil. Se observa la presencia de un fuerte tapón en la atmósfera que impide el desarrollo convectivo. La humedad es escasa en todos los niveles y se concentra en los niveles altos.

Análisis de sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad el modelo se corrió para una misma nube cúmulo, simulando nubes naturales y sembradas en ambos casos, y empleando las condiciones atmosféricas descritas en los sondeos anteriores. Se variaron tres parámetros claves: el coefi-

ciente de inclusión, el radio inicial del chorro y la velocidad inicial de ascenso.

De acuerdo con los resultados experimentales siempre existe intercambio de masa y calor entre la nube y el medio circundante. Esto conlleva a que los valores reales de los parámetros meteorológicos medidos en la nube (temperatura, contenido de agua, la concentración y tamaño de las partículas de nubes, entre otros) no coinciden con los valores que se observarían si el proceso de desarrollo de la nube fuera adiabático.

La principal causa de la ruptura del desarrollo adiabático es el proceso denominado inclusión, el cual no es más que la penetración al interior de la corriente ascendente de la nube del aire "seco" de la atmósfera circundante. Por causa de la penetración, parte de los elementos de la nube (gotas, cristales) se evaporan y el contenido de agua (hielo), la temperatura y la flotabilidad disminuyen. Una medida cualitativa de la intensidad (velocidad) de la inclusión del aire externo lo constituye el coeficiente de inclusión (μ), que representa la variación relativa de la masa de aire en la nube en la distancia unitaria por la vertical.

En la figura 3 se muestra el comportamiento del perfil de velocidad vertical para diferentes valores del coeficiente de inclusión, teniendo en cuenta la condición 1 de la tabla 1. Para el caso hipotético $\mu = 0$ la nube crece vigorosamente lo mismo que su velocidad vertical. El tope de la nube no se vislumbra en el gráfico, debido a que el modelo está limitado hasta los 100 hPa.

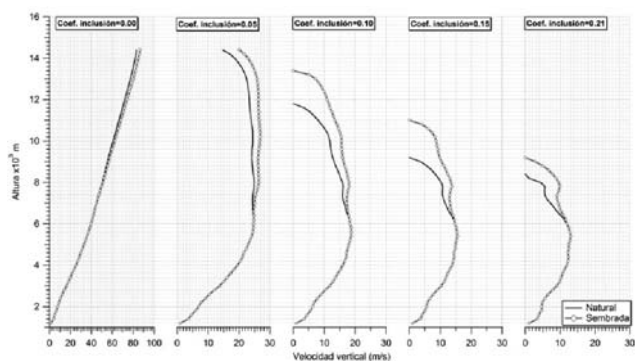


Fig. 3. Perfil de la velocidad vertical para valores seleccionados del coeficiente de inclusión. (8 de junio del 2006).

Además, aunque el caso representa una idealización, muestra que el modelo describe satisfactoriamente el proceso en que no se observa mezclamiento del chorro ascendente con el entorno que se corresponde aproximadamente con la situación de la corriente ascendente en el seno de un cumulonimbo maduro. Teniendo en cuenta la relación inversa entre el radio y la inclusión, se debe inferir que para que el coeficiente de inclusión sea cero, el radio de la nube debe crecer ilimitadamente, lo cual no ocurre en la práctica. En los casos restantes, el tope alcanzado por la nube disminuye notablemente a medida que el coeficiente de inclusión crece, tanto para la nube sembrada como para la no sembrada. Para las nubes sembradas siempre se alcanza un tope superior en comparación con las no sembradas como se infiere del análisis de la tabla 2. El tope de la altura máxima alcanzada para un coeficiente de inclusión de 0.01 es de 14 400. Este valor se tomó como referencia para analizar el por ciento de cambio de la nube sembrada y la no sembrada (no se toma $\mu = 0$ por las razones explicadas anteriormente). En la tabla 2 se muestra el coeficiente de cambio del tope máximo de la nube para varios valores del coeficiente de inclusión. En el caso de la nube sembrada el tope de la nube decrece en 6.9, 23.6 y 36.1% respectivamente, mientras que para la no sembrada el por ciento de cambio toma valores de 18.1, 36.1 y 41.7%. El por ciento de cambio de la nube se incrementa en valores absolutos a medida que se incrementa el coeficiente de inclusión. Esto indica que se va produciendo un proceso de inhibición en el desarrollo convectivo que está de acuerdo con otros modelos

Tabla 2. Por ciento de cambio del tope máximo para varios valores del coeficiente de inclusión

Coefficiente de inclusión	Sembrada	Por ciento de cambio (%)	Natural	Por ciento de cambio (%)
0.05	14 400	0	14 400	0.0
0.10	13 400	6.9	11 800	18.1
0.15	11 000	23.6	9200	36.1
0.21	9200	36.1	8400	41.7

teóricos y con observaciones experimentales (Frank y Cohen, 1985, Blyth *et al.*, 1988, Kain y Fritsh, 1990).

La velocidad vertical máxima, en consonancia con lo expresado anteriormente, disminuye a medida que se incrementa μ como se observa en la figura 4, donde aparece de forma más clara la dependencia de la velocidad vertical con la altura y el coeficiente de inclusión para una nube sembrada. Los mayores valores de la velocidad vertical se observan en el extremo superior izquierdo, donde el gradiente es mucho más cerrado, exhibiendo el modelo una elevada sensibilidad a las variaciones de μ . A medida que este tiende a cero el modelo muestra un incremento de la actividad convectiva, manifestándose esta última afirmación en el incremento de la profundidad de la nube y en el mismo hecho del aumento de la velocidad vertical. El comportamiento para el caso de una nube natural es similar al descrito (no se muestra la figura), solo que en este caso se alcanzan valores más bajos de la velocidad vertical y del tope de la nube, lo que expresa un desarrollo convectivo menos intenso. Es de destacar, que a partir de cierto valor del coeficiente de inclusión, la velocidad vertical máxima se alcanza a una misma altura para las nubes sembradas y naturales. Por ejemplo, para valores de $\mu = 0.10, 0.15$ y 0.21 las velocidades verticales máximas alcanzadas son de 18.7, 15.5 y 13.0 m/s respectivamente, todas obtenidas a una misma altura 5400 m.

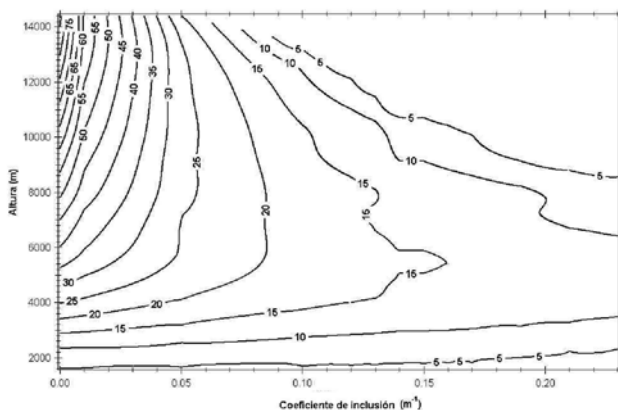


Fig. 4. Variación de la velocidad vertical (m/s) en función de la altura de los valores del coeficiente de inclusión seleccionados. Para una nube sembrada (8 de junio del 2006).

En la figura 5 se observa el comportamiento del agua total para la nube natural y sembrada. Análogamente a lo ocurrido con la velocidad vertical su contenido disminuye al aumentar el coeficiente de inclusión, mostrando la importancia de este último en el balance del agua en la nube, donde la pérdida por el mezclamiento con el medio aumenta su influencia.

Los valores máximos de agua total se muestran, por lo general, en niveles inferiores en la nube sembrada con respecto a la natural. Esto se debe a que luego de adicionado el reactivo a la nube en la región superenfriada, la mayor parte del agua se congela en esta zona. El calor latente liberado por la congelación aumenta la flotabilidad de la nube. Las gotas congeladas continúan creciendo en forma de *graupel* a partir de la adhesión de gotas pequeñas de nube. Estas partículas crecen más rápidamente que las gotas de agua superenfriada de masa similar y permanecen suspendidas por mayor tiempo que estas en la corriente ascendente.

En la figura 5, por debajo del máximo del contenido de agua total predomina el agua de nube y la presencia de gotas de agua de lluvia que se corresponde con la zona inferior de la figura 1. En las nubes sembradas, la adición del reactivo provoca la aceleración del proceso de congelación del agua de nube y del agua de lluvia, lo que aclara por qué el máximo en la curva de la nube sembrada está por debajo de la natural. Por encima de

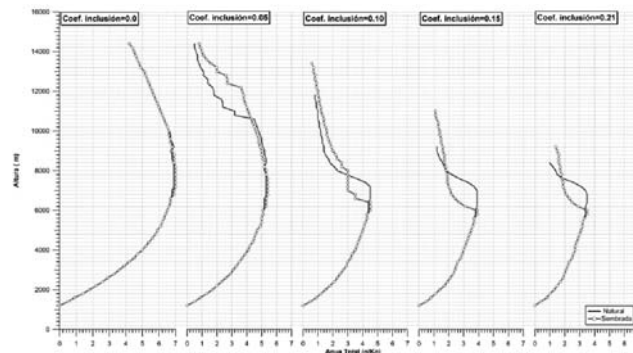


Fig. 5. Perfiles verticales del contenido de agua total para valores seleccionados del coeficiente de inclusión (8 de junio del 2006).

este punto tiene lugar la formación del *graupel* y un poco más arriba la formación de hielo de nube. Este proceso explica el descenso del contenido de agua total que se observa luego de alcanzado el máximo. La liberación del calor latente incrementa la flotabilidad de la nube, lo que permite un crecimiento mayor de esta, alcanzando toques más elevados que la nube no sembrada.

Para mostrar la sensibilidad del modelo para una atmósfera seca e inestable, se representan en la figura 6 los perfiles de la velocidad vertical para valores crecientes del coeficiente de inclusión. En general, el proceso convectivo se aprecia notablemente inhibido y para el caso en que $\mu = 0$ la razón de crecimiento de las curvas es mucho menor que en el caso analizado anteriormente. El incremento del coeficiente de inclusión unido a las características termodinámicas prevalecientes muestra un débil desarrollo convectivo para la nube modelada, incluso en el caso de que esta fuera sembrada, obsérvese en la figura 6 los casos para $\mu = 0.15$ y 0.21 .

El potencial para la evaporación de las gotas de agua y los cristales de hielo y el enfriamiento de la mezcla de aire del medio y la nube, en el proceso de crecimiento de esta, se incrementa al disminuir la humedad relativa; por tal motivo la masa ascendente se hace menor. Al contrario, una humedad relativa alta provoca una menor dilución del aire ascendente al mezclarse con el circundante, por lo que su flotabilidad aumenta con respecto al medio.

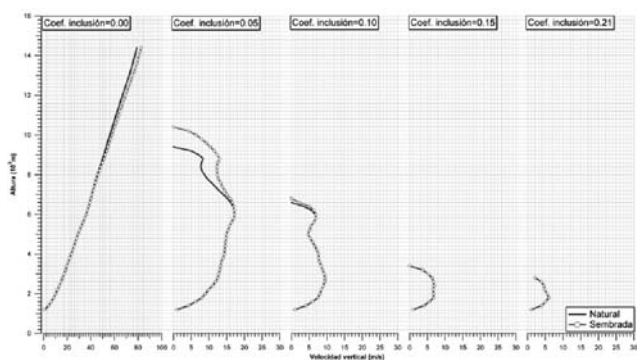


Fig. 6. Perfil de la velocidad vertical para valores seleccionados del coeficiente de inclusión (11 de junio del 2006).

Sobre la base de numerosos experimentos preliminares, el parámetro más sensible en el modelo de nube es el radio inicial, ya que este valor afecta fuertemente la razón de inclusión y la distribución vertical de la condensación (Anthes, 1977). Se seleccionaron 4 radios iniciales 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 km, como se muestra en la figura 7. Los perfiles de la velocidad vertical para las nubes de diferentes tamaños difieren significativamente. Radios pequeños están asociados con un crecimiento vertical mínimo de la nube al estar más afectada por la inclusión. Con radios mayores se observa un mayor desarrollo de la nube, tanto para la sembrada como para una nube natural.

El efecto de una atmósfera estable y seca en el modelo se observa para los valores mostrados del día 11 de junio, donde el desarrollo de la nube está fuertemente inhibido. La nube en este caso apenas alcanza la altura de 2600 m cuando su radio es 0.5 km, con radio de 2 km llega a la altura de 7000 m. Al aplicársele el reactivo a la nube en este último caso, crece en unos 400 m (5.4% de variación). Los valores de la velocidad vertical y el contenido total de agua no son elevados y para el mayor valor del radio inicial, están en el intervalo de los valores del radio menor de la atmósfera inestable y húmeda. La figura 8 muestra el grado de inhibición de los procesos convectivos que tienen lugar el día 11 de junio, compárese con la figura 7.

La figura 9 muestra el efecto de la velocidad vertical inicial (w_0) en el desarrollo convectivo de una nube cú-

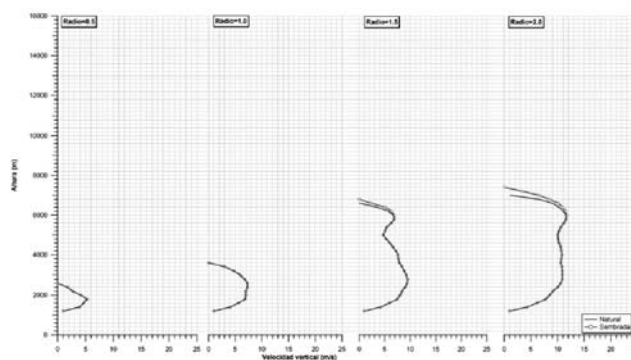


Fig. 7. Perfil de la velocidad vertical para valores seleccionados del radio inicial (8 de junio del 2006).

mulo en condiciones atmosféricas diferentes. La velocidad vertical depende de la aceleración a causa de la flotabilidad de la nube, del peso del contenido de agua y la influencia del aire externo mezclado con el aire nuboso por inclusión en la nube. En general, los valores elevados de la velocidad de ascenso inicial indican que en la base de la nube existe un fuerte flujo de aire ascendente, por lo que w_0 en la ecuación 6 debe influir favorablemente en el crecimiento de la nube como aparece en la figura 9.

Las figura 9a corresponde a la corrida del modelo para el día 8 de junio, para una nube cúmulo natural. Se aprecia que a medida que la velocidad inicial de ascenso se incrementa, aumenta la profundidad de la nube. El tope de la nube sufre un incremento del 46.2% al va-

riar w_0 de 0.25 a 3 m/s. La velocidad vertical máxima también se incrementa, alcanzando el valor de 10.7 m/s cuando la velocidad inicial es 0.5 m/s, y su porcentaje de variación es 46.2% (19.9 m/s) cuando esta se eleva a 3 m/s.

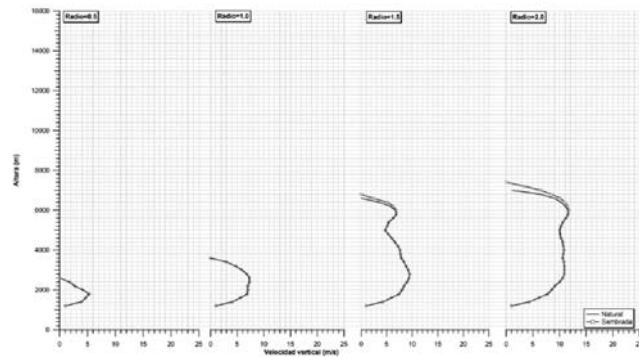


Fig. 8. Perfil de la velocidad vertical para valores seleccionados del radio inicial (11 de junio del 2006).

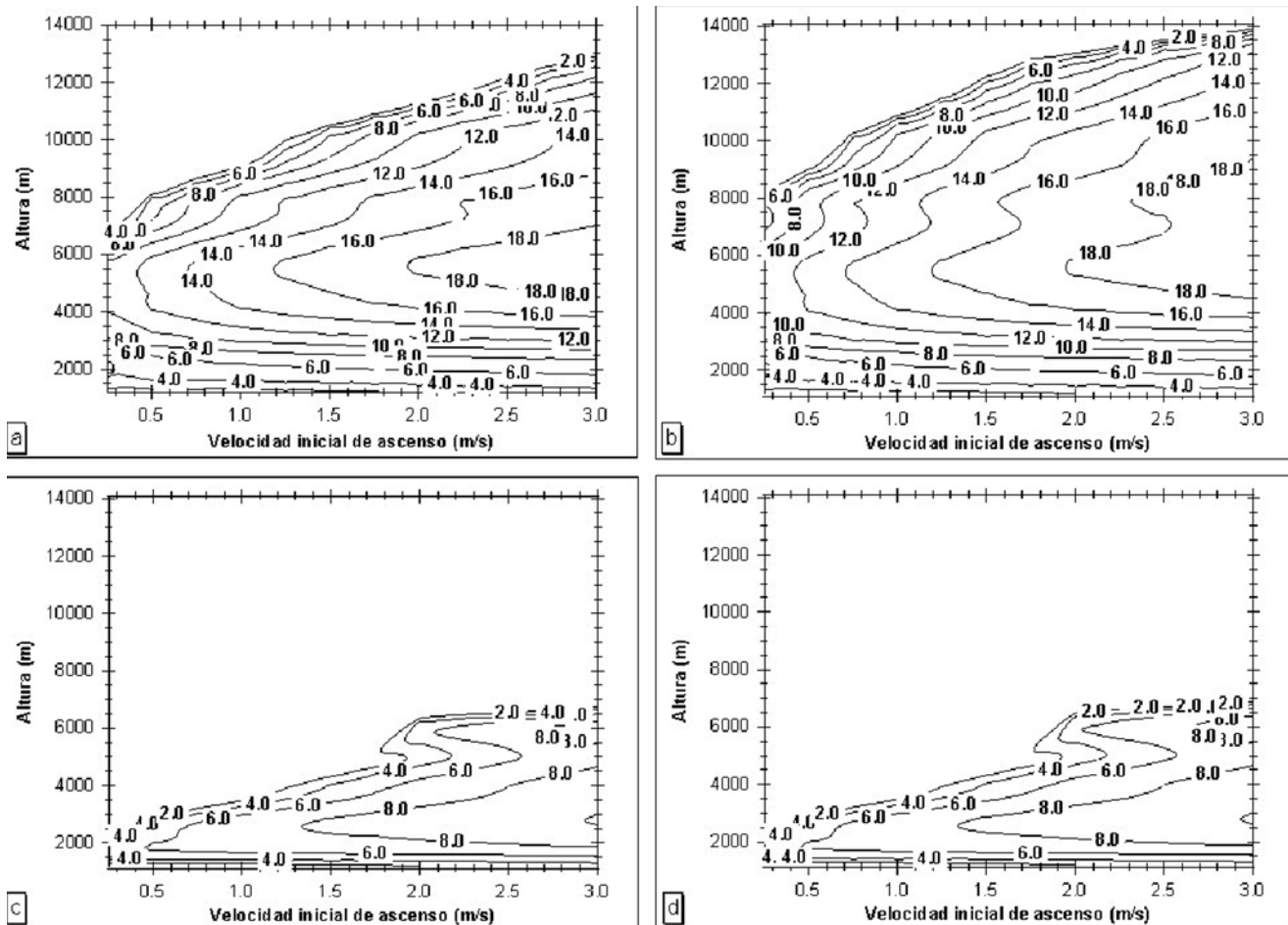


Fig. 9. Variación de la velocidad vertical máxima en función de la altura y la velocidad inicial de ascenso para nubes no sembradas (a y c) y nubes sembradas (b y d). a y b corresponden al día 8 de junio del 2006 y c y d al 11 de junio del mismo año.

La figura 9b también corresponde a una corrida para el día 8 de junio, solo que en este caso se simuló el proceso de siembra. La velocidad máxima sufre un incremento similar al de la nube no sembrada, sin embargo el tope de la nube se incrementa en 40% cuando analizamos los valores extremos seleccionados de la velocidad inicial. Este incremento es menor que el obtenido para la nube no sembrada, pero si comparamos la altura máxima de los dos casos vemos que la nube sembrada sufre un incremento de 7.1% con respecto a la nube natural para una velocidad de ascenso de 3 m/s. Lo anterior demuestra que si el modelo ha mostrado ser sensible a la variación de los parámetros analizados, también lo es al proceso de siembra. Si se analizan las figuras 9 c y d queda demostrado que el modelo también es sensible a las variaciones que sufren las condiciones atmosféricas. En estas dos últimas figuras se observa que la nube no alcanza gran desarrollo, las alturas máximas obtenidas en ambos casos prácticamente no difieren entre sí, la velocidad máxima es mucho menor si la comparamos con las alcanzadas en una atmósfera inestable y húmeda.

En la figura 9d se aprecia que solo es posible aplicar la siembra cuando la velocidad inicial alcanza los 2 m/s y el efecto que se logra es incrementar la altura máxima en 2.9%, equivalente a 200 m. Esta situación está dada, como se señaló anteriormente, por las condiciones atmosféricas prevalecientes caracterizadas por una fuerte estabilidad a lo largo de todos los niveles de la atmósfera que imposibilitan un desarrollo convectivo vigoroso.

Modelo para la toma de decisiones

Durante la realización del experimento, los días experimentales se declaran de acuerdo con el análisis de la situación sinóptica prevaleciente y de la información del radar y del satélite sobre el área, además del análisis de los sondeos de la zona. Sobre la base del estudio de toda esta información, la cual permite evaluar el posible desarrollo convectivo sobre el área, se decide si el día se declara experimental.

Por otra parte la WMO (1991) recomienda, entre otros aspectos, el uso de modelos de nubes cúmulos que ayuden en la toma de decisiones para declarar el día como operacional. La utilización de los modelos para estos fines fue común durante la realización de experimentos en Texas, Tailandia, Israel y otros sitios. Sin embargo, en Cuba nunca se ha empleado un modelo de nube cúmulo con estos objetivos. El presente modelo permitirá, por primera vez, junto a las consideraciones expresadas, evaluar los días como operacionales o no. Es necesario, por tanto, demostrar la factibilidad del mismo para esta tarea.

Con el fin de determinar la potencialidad del modelo en la toma de decisiones durante el experimento de incremento artificial de las precipitaciones se seleccionaron los sondeos de 6 días del verano del 2005 y 13 del 2006. En estos casos el modelo se corrió variando solamente el radio inicial del chorro, manteniendo las condiciones especificadas en la tabla 3. Los cálculos se realizaron con los mismos parámetros simulando nubes naturales y sembradas.

La decisión de declarar un día operacional se basa en los resultados del modelo numérico y para ello se tienen en cuenta la velocidad vertical máxima de la nube no sembrada y el tope de la nube sembrada. Con ayuda de esta última información se determina la sembrabilidad, definida como la diferencia entre los topes máximos de una nube sembrada y una no sembrada. Si para un radio inicial del chorro se alcanza una velocidad máxima mayor o igual a 10 m/s y/o la sembrabilidad es mayor o igual a 500 m, el día es declarado operacional. Se determina así la factibilidad del modelo para predecir el comportamiento convectivo de una nube, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas existentes, aportadas por los sondeos y las entradas al modelo que describen las características de las nubes existentes sobre el área experimental. Existe además, una información detallada del comportamiento de la atmósfera para esos días obtenida del radar, el satélite y la información sinóptica que permiten evaluar la efectividad del pronóstico del crecimiento de la nube.

En la tabla 3 se muestran los topes para las nubes sembradas y no sembradas, la diferencia entre ambas (sembrabilidad) y la información del radar que informa si realmente en el día hubo desarrollo convectivo. Sobre la base de esa información se evalúa la factibilidad del modelo para la toma de decisiones durante el experimento de lluvia provocada que se lleva a cabo en la provincia de Camagüey.

Del análisis de la tabla 3 solo 6 días se deben declarar como no operacionales según los criterios de sembrabilidad y de la velocidad vertical máxima alcanzada. En este caso la corrida del modelo mostró que las nubes que no sobrepasan los 500 m con respecto a las no sembradas son las mismas en que la velocidad vertical no llega o no supera los 10 m/s.

Las observaciones del radar permite conocer el comportamiento de la situación meteorológica durante los días seleccionados y de esta manera determinar la ocurrencia real de desarrollo convectivo. Esta información aparece señalada en la última columna de la tabla 3, de donde se infiere que en solo dos casos que se debían declarar como no operacionales, hubo desarrollo convectivo (el 28 de septiembre y el 14 de octubre del 2005). Para analizar las causas del fracaso del modelo en el pronóstico de la convección, a continuación se analiza la situación sinóptica existente en los días señalados.

El día 28 de septiembre el sondeo de Camagüey muestra una ligera capa de inversión en los niveles bajos, seguida de una capa estable que sirve de retención a la convección; mostraba además, gran contenido de humedad en la vertical. Los indicadores de severidad pronosticaban de un 60 al 80% de convección moderada o débil. Por otro lado, la información satelital indicaba la presencia de una onda tropical activa sobre el Mar Caribe central, localizada en los mares al sur, entre Ciego de Ávila y Camagüey, además de la presencia de un régimen de vientos de componente sur sobre la provincia en niveles medios y altos. Ante tal situación, en el día se produjo la entrada de nubosidad

procedente de los mares del sur, llegando a nublarse todo el territorio, lo que unido a la humedad existente y el calentamiento diurno favoreció el desarrollo convectivo en horas de la tarde.

Por su parte el día 14 de octubre el sondeo también muestra una ligera capa de inversión en los niveles bajos con la presencia de una capa estable por encima desde los 925 hasta los 600 hPa. El sistema complejo de bajas presiones con hondonada asociada que se encuentra situado sobre el Atlántico adyacente, el Paso de los Vientos, el extremo oriental del país y el Mar Caribe occidental, presenta un centro de bajas presiones situado sobre los mares al sur de las provincias más orientales que comienza a desplazarse lentamente hacia el oeste, para separarse de Jamaica, cuya posición ha estado garantizando un flujo de vientos del nordeste sobre la provincia en superficie y en el aire superior.

En las imágenes del satélite se aprecian los nublados convectivos y estratiformes asociados al sistema de bajas presiones, así como la escasez de nubosidad sobre la provincia en las primeras horas de la mañana, para posteriormente comenzar a invadir la provincia, contenidos en el flujo de arrastre del nordeste desde los mares al norte hacia el interior del territorio. También se muestra en las imágenes de vapor de agua que el contenido de humedad sobre la provincia es muy escaso. En el día se evidenció el incremento y avance gradual de la nubosidad, el radar meteorológico informa de nubes convectivas que alcanzan hasta 8 km de altura sobre el centro-este de la provincia a la una de la tarde. Posteriormente tiene lugar la ocurrencia de actividad convectiva con chubascos asociados.

El análisis de la situación sinóptica acaecida durante los días declarados como no operacionales nos permiten afirmar que el desacierto en el pronóstico de la convección está dado, fundamentalmente por el arribo de sistemas sinópticos al territorio; tal situación no ocurre con el resto de los casos en que el pronóstico resultó satisfactorio. Es de destacar, que el pronóstico se realiza para un sondeo lanzado a las 12:00 UTC y no tiene en

Tabla 3. Resultados de la ejecución del modelo simulando los valores máximos y mínimos alcanzados por una nube al ser sembrada con yoduro de plata y al desarrollarse de forma natural (no sembrada) bajo las condiciones atmosféricas prevaletientes los días señalados; la sembrabilidad se muestra como la diferencia entre ambos valores. La ocurrencia de desarrollo convectivo según el radar se muestra en la última columna. Los sondeos corresponden a las 7:00Z.

Fecha	Condición	Radio inicial de ascenso					Desarrollo convectivo según radar
		0.5	1	1.5	2	2.5	
29/05/06	Sembrada	2 200	2 600	3 000	3 400	3 600	No
	No sembrada	2 200	2 600	3 000	3 400	3 600	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	
30/05/06	Sembrada	4 600	5 600	6 800	10 600	11 800	Si
	No sembrada	4 600	5 600	6 200	11 00	11 400	
	Diferenciada	0	0	0	600	400	
02/06/06	Sembrada	4 600	6 200	9 800	11 600	12 400	Si
	No sembrada	4 600	6 000	6 600	11 000	12 000	
	Diferenciada	0	200	3 200	600	400	
04/06/06	Sembrada	8 600	12 000	12 800	12 800	12 800	Si
	No sembrada	6 800	11 800	12 600	12 800	12 800	
	Diferenciada	1 800	200	200	0	0	
07/06/06	Sembrada	4 600	9 600	10 600	11 200	11 200	Si
	No sembrada	4 600	9 000	10 000	11 200	11 200	
	Diferenciada	0	600	600	0	0	
08/06/06	Sembrada	6 200	8 800	11 200	13 600	14 400	Si
	No sembrada	6 200	6 800	8 800	12 200	13 800	
	Diferenciada	0	2 000	2 400	1 400	600	
09/06/06	Sembrada	3 600	5 800	9 600	12 600	13 800	Si
	No sembrada	3 600	5 800	6 400	7 000	12 800	
	Diferenciada	0	0	3 200	5 600	1 000	
10/06/06	Sembrada	3 200	3 800	4 400	5 000	5 400	No
	No sembrada	3 200	3 800	4 400	5 000	5 400	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	
11/06/06	Sembrada	2 400	3 200	4 000	5 000	7 000	No
	No sembrada	2 400	3 200	4 000	5 000	6 800	
	Diferenciada	0	0	0	0	200	
12/06/06	Sembrada	2 400	3 400	5 000	8 600	10 400	Si
	No sembrada	2 400	3 400	5 000	7 600	8 000	
	Diferenciada	0	0	0	1 000	2 400	
13/06/06	Sembrada	2 600	3 400	6 000	12 400	13 600	Si
	No sembrada	2 600	3 400	6 000	6 600	6 800	
	Diferenciada	0	0	0	5 800	6 800	
14/06/06	Sembrada	2 600	3 400	4 000	4 400	10 800	Si
	No sembrada	2 600	3 400	4 000	4 400	7 400	
	Diferenciada	0	0	0	0	3 400	
20/07/06	Sembrada	5 800	11 600	11 600	11 600	11 600	Si
	No sembrada	5 800	6 800	11 600	11 600	11 600	
	Diferenciada	0	4 800	0	0	0	
28/09/05	Sembrada	2 600	2 800	3 000	3 200	3 200	Si
	No sembrada	2 600	2 800	3 000	3 200	3 200	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	
29/09/05	Sembrada	2 200	13 400	13 800	13 800	13 800	Si
	No sembrada	2 200	12 800	13 800	13 800	13 800	
	Diferenciada	0	600	0	0	0	
11/10/05	Sembrada	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	No
	No sembrada	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	
12/10/05	Sembrada	2 000	2 200	2 400	2 600	5 200	No
	No sembrada	2 000	2 200	2 400	2 600	5 200	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	
13/10/05	Sembrada	3 000	3 400	3 600	3 800	4 000	No
	No sembrada	3 000	3 400	3 600	3 800	4 000	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	
14/10/05	Sembrada	1 800	2 000	2 200	3 400	3 200	Si
	No sembrada	1 800	2 000	2 200	3 400	3 200	
	Diferenciada	0	0	0	0	0	

cuenta el calentamiento diurno que ocurre en horas de la tarde cuando habitualmente ocurre la convección en el territorio. Es conveniente, por tanto, correr el modelo para una temperatura máxima pronosticada en superficie. Un sondeo con estas características permite tener en cuenta la acumulación de energía durante el día que permitiría "romper" la capa de inestabilidad presente en la atmósfera y el desarrollo de la convección.

Los resultados expuestos permiten asegurar que el modelo se puede utilizar como una herramienta más en el pronóstico de la convección para la toma de decisiones operativas.

Conclusiones

Se pone a punto un modelo numérico unidimensional estacionario de nube cúmulo con parametrización microfísica para los procesos de formación y crecimiento de las gotas y partición de elementos de nube y de precipitación para las fases sólida y líquida, para utilizarse en los trabajos del Proyecto Cubano de Incremento Artificial de la Lluvia.

Las corridas realizadas con datos de los sondeos aerológicos de la estación de Camagüey correspondientes a los años 2005 y 2006 permiten aseverar que, una vez escogidos determinados valores iniciales de radio del elemento convectivo y velocidad vertical inicial, el modelo describe aceptablemente el perfil de las características fundamentales de las nubes como el tope, la velocidad de la corriente ascendente y el contenido de agua líquida, permitiendo una apreciación anticipada del comportamiento del desarrollo convectivo, siempre que no esté presente un proceso sinóptico que implique variación de las características de la masa de aire.

La opción del modelo que proporciona simular la aplicación del reactivo mediante la congelación del agua dentro de un intervalo de temperatura (altura) permite la comparación entre las nubes naturales y sembradas según el modelo, permitiendo así un análisis comparativo que se pudiera utilizar en la toma de decisiones

diarias para la declaración de día experimental en el desarrollo de los Experimentos para el Incremento Artificial de la Lluvia en Áreas Extensas que se ejecutan en la provincia de Camagüey.

La sensibilidad mostrada por el modelo a los parámetros de entrada, la comparación favorable entre los valores calculados y los medidos con aviones laboratorios y radar, así como la poca exigencia computacional y la rapidez de las corridas, resultan un aval para proponer el uso operativo del modelo en los experimentos mencionados y en los estudios para la búsqueda de covariantes que permitan reducir la duración de los trabajos de campo e incrementar la confiabilidad de los resultados.

Bibliografía

- Alfonso L., D. Martínez y C. A. Pérez, 1998. Numerical simulations of tropical convective clouds over Cuba using a one-dimensional and time-dependent cloud model. *Atm. Res.*, 47-48, 343-354.
- Alfonso, L. A., 1999: Modelo numérico de nube convectiva con microfísica detallada. *Boletín de SOMETCUBA*, Vol 1, No.5. http://www.met.inf.cu/sometcuba/Boletin/v05_n01/
- Anthes, R. A., 1977. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 105, 270-286.
- Blyth, A. M., W. A. Cooper y J. B. Jensen, 1988: A study of the source of entrained air in Montana cumuli. *J. Atmos. Sci.*, 45, 3944-3964.
- Bruintjes R. T., 1999: A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 80, No. 5, pp. 805-820.
- Clavijo A. y C. A. Pérez, 1992: Modelo numérico de nubes convectivas. *NEWCLOUD: BAS*. Informe Científico-Técnico. Centro Meteorológico de Camagüey. pp. 23.
- Frank, W. M., y C. Cohen, 1985: Properties of tropical cloud ensembles estimated using a cloud model and an updraft population. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1911-1928.

- Hirsch, J. H. 1972: A numerical cloud model. Its use during Project Cloud Catcher. Third Conference on Weather Modification, June 26-29, Rapid City, South Dakota, 182-185.
- Kain, J. S. y J. M. Fritsch, 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 47, No. 23, 2784-2802.
- Koloskov, B., B. Zimin, V. Beliaev, Y. Seregin, A. Chernikov and V. Petrov, 1996: Results of Experiments on Convective Precipitation Enhancement in the Camagüey Experimental Area, Cuba, *J. Appl. Meteor.*, 35, 1524-1534.
- Martínez D., Rivero I y Báez R. (2002): Caracterización estadística de los perfiles meteorológicos de Camagüey en horas de la tarde y su relación con la lluvia. *Rev. Cub. Meteor.* 9 (1).
- Rivero R. E. (1986): Simulación de los resultados de la influencia activa para días con precipitaciones aisladas y generalizadas mediante un modelo unidimensional estacionario. Tercera Conferencia Científico Técnica del Centro Meteorológico Experimental de Camagüey, Camagüey, 22 Marzo de 1986.
- Rivero R. E. y R. R. Rivero (1989a): Modelo unidimensional simple de nube cúmulo. Primer Seminario Taller Cubano - Soviético de Física de las Nubes Tropicales e Influencia Activa, 4 - 9 de septiembre de 1989, Camagüey.
- Rivero, R. E. y R. R. Rivero (1989b): Modelación numérica de nubes convectivas: Modelo ATM. Simposio de Ciencias Pedagógicas y Naturales. Ciencia y Técnica Territorial Camagüey' 89, Instituto Superior Pedagógico "José Martí". 30 de junio de 1989, Camagüey, 22 pp. + Figuras y Tablas.
- Simpson, J., y V. Wiggert, 1969: Models of precipitating cumulus towers. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 97, pp. 471-489.
- Weinstein, A. I. y L. C. Davis, 1968: A parameterized numerical model of cumulus convection. Rept. 11, NSF Grant GA-777, Pennsylvania State Univ., University Park, Pennsylvania, 44 pp.
- WMO, 1991: The uses of numerical models in weather modification research and operations. Report of the Meeting of Experts held in Toronto, 8-12 December 1980. PEP Report, No. 24, Geneva. pp.32.
- Woodley, W. L., D. Rosenfeld, y B. A. Silverman, 2003: Results of On-Top Glaciogenic Cloud Seeding in Thailand. Part I: The Demonstration Experiment. *J. Appl. Meteor.*, Vol.42, 920-938.

Abstract

A one-dimensional stationary numerical cloud model is tune up for application in the experiments of artificial rain increase by seeding clouds project, in daily decision-making, in declaring experimental day, in experimental data evaluations and in the hypothesis corroboration amongst others. The microphysics parameterization considers conversion and collection processes based on the water partition in solid and liquid cloud particles and equal hydrometeors composition. The air speed vertical profile in the cloud is obtained using the conservation equation of momentum, taking into account the acceleration caused by buoyancy, the loss due to the environment entrainment and the water weight held by the current upstream. The glaciogenic reagent application is simulated in the model. The model output consists in profiles of vertical velocity, temperature, mixing ratio, cloud, rain water, total ice water and radar reflectivity factors, as well as the maximum height reached by the cloud. For the sensitivity analysis, the model was run with Camagüey radiosondes for experimental days in 2005 and 2006 years. Then, these days was evaluated with radar data. The obtained results allow proposing the model for operational use in decision-making and in the seeding evaluation during seeding clouds experiment.

Key words: Cloud seeding, cloud model, weather modification