

Programa de incremento artificial de la lluvia por siembra de nubes. Logros y dificultades en el período 2005-2010

Daniel Martínez¹, Carlos A. Pérez², Guillermo Puente³, Félix Gamboa², Sadiel Novo¹, Ibis Rivero¹, Graciela Angulo¹, Ismael Pomares², Alexei Gamboa², Elsa Velazco², Michel Rodríguez², Ernesto Chang³, Victor Petrov⁴, Boris Koloskov⁴ y Zhanyu Yao⁵

¹Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología (CFA-INSMET) *daniel.martínez@insmet.cu*

²Dpto de Física de la Atmósfera. Centro Meteorológico de Camagüey (INSMET) *carlos.perez@cmw.insmet.cu*

³Centro Meteorológico de Holguín. Instituto de Meteorología (INSMET) *ernesto.chang@hlg.insmet.cu.*

⁴Agency of Atmospheric Technologies. Rusia. *attech@attech.ru*

⁵Chinese Meteorological Administration. China. *yaozy@cams.cma.gov.cn*

Resumen

El Programa de Incremento Artificial de la Lluvia (PIALL) comenzó en el 2005, retomando los resultados del período 1982-1991. Incluyó inicialmente tres tareas: la primera fue el Experimento Aleatorizado de Siembra de Nubes en Áreas Extensas (EXPAREX), que se desarrolla en Camagüey y áreas adyacentes con carácter investigativo, con el objetivo de obtener incrementos significativos de lluvia en áreas de dimensiones lineales del orden de 50 km, por la siembra de los topos de las nubes convectivas con pirocartuchos de yoduro de plata desde aviones, aplicando la tecnología desarrollada en Cuba en la década del 80. De los 4 años de trabajo proyectados se logró el experimento solo en algunos meses del 2005, 2006, 2007 y 2010. Se procesaron un total de 28 unidades experimentales, cuyas principales características se muestran en este trabajo. La segunda consistió en las campañas operativas de siembra aérea de nubes convectivas, que aplicaron la metodología de siembra del EXPAREX, pero sin aleatorización ni otras restricciones del blanco relativas al experimento. Estas campañas se efectuaron en las provincias desde Camagüey hasta Holguín. La tercera tarea fue la aplicación de la siembra de aerosoles de yoduro de plata desde una red de generadores terrestres ubicados en Holguín y algunas zonas de las provincias limítrofes. La siembra operativa aérea y terrestre se realizó de forma relativamente estable durante los 6 años de trabajo del Programa, observándose tendencias positivas en el campo de precipitaciones en todas las provincias. No obstante, estudios de simulación numérica de la dispersión del reactivo procedente de la red de generadores muestran que, con la tecnología de siembra terrestre aplicada, no existe un mecanismo de transporte que asegure la llegada del reactivo a los topos de las nubes en concentraciones suficientes como para producir incrementos de lluvia, por lo que se proyecta concentrar los recursos en la siembra aérea, continuando las investigaciones sobre la dispersión del reactivo de los generadores terrestres.

Palabras clave: modificación del tiempo, siembra de nubes, nube convectiva

Introducción

En el último trimestre del año 2004, el Gobierno cubano decidió dar continuidad a las investigaciones que en el campo de la modificación artificial del tiempo se venían realizando en el país desde 1979, y que las dificultades económicas obligaron a detener a partir de 1991. Esta decisión fue oportuna y adecuada ante la situación de extrema sequía que afectaba la región

oriental de Cuba. Teniendo en cuenta el escenario global, instituciones científicas de diferentes países, organismos de Naciones Unidas y líderes políticos han manifestado que una de las cuestiones más importantes a enfrentar por la humanidad en el presente siglo, como consecuencia del cambio climático y del crecimiento demográfico, son las necesidades de agua. En Cuba, las sequías son cada vez más intensas y extensas en tiempo y espacio, por lo que es necesario retomar di-

chas investigaciones para mantener un programa científicamente correcto, estable y sustentable.

A principios del 2005 se comenzaron las acciones organizativas e inversiones para desarrollar el Programa, bajo la coordinación de la Corporación de la Aviación Cubana S.A., del Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba (CACSA-IACC) y la dirección científica de especialistas del Instituto de Meteorología. Luego de un breve período de búsqueda, adaptaciones y reajustes del personal científico, instalación de instrumentos de medición y de comunicaciones, y desarrollo de aspectos logísticos; en el verano de ese año se comenzaron las labores del nuevo experimento en el Área Experimental de Camagüey, en colaboración con la Agencia de Tecnologías Atmosféricas (ATTECH) y el Observatorio Aerológico Central de Rusia, que proporcionaron el equipamiento y la asesoría necesarios para instrumentar un avión An-26 como laboratorio de siembra y medición de nubes. En esta etapa, definida como exploratoria, se elaboraron o pusieron a punto las metodologías para la ejecución del trabajo de siembra y de medición de las principales características de las nubes y del medio que las circunda, para obtener y procesar la información de aviones laboratorios y del radar meteorológico. Se definió el concepto de unidad experimental, se determinó la posibilidad de su estudio y seguimiento, y se elaboró el diseño del experimento aleatorizado para el Incremento Artificial de la Lluvia en Áreas Extensas.

A partir del año 2006 se comenzó el experimento confirmatorio aleatorizado, definiendo las unidades experimentales como agrupaciones de nubes convectivas cumuliformes con alturas del tope que no sobrepasen los 10 km, contenidas dentro de un círculo con un área aproximada de 2000 km². Se cumplieron etapas experimentales también en el 2007 y 2010, siendo imposibles en el 2008 y en el 2009 por limitaciones financieras y logísticas. Los datos obtenidos permiten evaluar la potencialidad del tipo de nubes que se desarrollan sobre Cuba para el incremento artificial de la lluvia según la hipótesis de siembra dinámica adoptada

en el diseño y de acuerdo con los criterios actuales de la comunidad científica internacional (Martínez *et al.*, 2007, 2010; Pérez *et al.*, 2008 y 2011).

Paralelamente al experimento aleatorizado de Camagüey, se desarrolló la faceta operativa del Programa con el objetivo de obtener el mayor incremento de lluvia posible para mitigar los efectos de la sequía. En la propia base de operaciones de Camagüey se realizaron trabajos operativos desde el 2005 hasta el 2010, dentro del mismo periodo del año planificado para el experimento en los meses en que no estuvo disponible el equipamiento necesario para este. Se empleó una metodología de siembra similar a la del experimento, pero sembrando todas las unidades apropiadas, sin aplicar aleatorización. Por otra parte, en el 2005 se creó en la provincia de Holguín y en el Valle del Cauto una base de operaciones para organizar trabajos operativos, empleando tanto la tecnología aérea como la siembra desde superficie con generadores terrestres de yoduro de plata. En el caso de Holguín se realizó una fructífera campaña de vuelos operativos en julio del 2006, empleando un avión An-26 con equipamiento y asesoría chinos, donde se aplicó una metodología de siembra similar a la del experimento. Del 2007 al 2009 se empleó un avión Yak-40 con equipamiento ruso. Además, desde el 2005 se comenzó a instalar y a operar una red de generadores terrestres de yoduro de plata, en colaboración con la empresa chilena HIDROMET, de manera que desde el 2007 hasta el 2010 trabajaron operativos 23 de estos equipos.

Diseño del experimento aleatorizado de siembra de nubes en áreas extensas

El diseño del experimento se basó en los resultados del Proyecto Cubano de Modificación Artificial del Tiempo (PCMAT), desarrollado en el Área Experimental de Camagüey entre 1982 y 1991 (Koloskov *et al.*, 1996) y en los diseños de otros experimentos en

nubes convectivas realizados bajo hipótesis similares como es el caso del experimento de La Florida (Woodley y Sax, 1976), el de South West Texas (Rosenfeld y Woodley, 1993), y el de Tailandia (Woodley y Silverman, 2003). A continuación se resumen los aspectos fundamentales del diseño (Pérez *et al.*, 2011).

Definición de experimento aleatorizado: es aquel para el cual el tratamiento de la unidad experimental se escoge de manera aleatoria; es decir, se deja a la casualidad la decisión de realizar o no determinado tratamiento para hacer objetiva la comparación del comportamiento de los casos tratados con los no tratados.

Definición de la unidad experimental: en el caso del EXPAREX se utilizó como unidad experimental una región limitada con fronteras móviles que consiste en un círculo de 25 km de radio, con un área aproximada de 2000 km², centrado en la primera nube sembrada y que se mueve con una velocidad determinada por el movimiento predominante de las nubes en el área circundante. Esta unidad experimental puede contener uno o más sistemas nubosos y en ella pueden surgir, desaparecer, entrar o salir sistemas nubosos. Dentro de la unidad experimental se deben sembrar (real o simuladamente) todas las nubes que cumplan las condiciones de siembra.

Hipótesis de siembra: supone que al introducir en la nube determinada cantidad de aerosoles de yoduro de plata, por medio de los pirocartuchos, se induce un proceso de congelación rápida del agua superenfriada, acompañado de liberación de calor latente de congelación que brinda a la nube energía adicional y posibilita el aumento de su flotabilidad, lo que la fortalece y prolonga su vida, y a la vez, posibilita su expansión hacia los lados por el crecimiento de nuevas celdas, de manera que aumenta el volumen total de lluvia aportado por los sistemas de nubes sembrados. Esto se conoce como siembra dinámica, y responde al modelo conceptual desarrollado por Rosenfeld y Woodley (1993), que demostró su aplicabilidad en Cuba como resultado del PCMAT.

Área de trabajo experimental: las unidades experimentales se seleccionan en un área comprendida dentro de un círculo de radio igual a 150 km, centrado en el radar de Camagüey, cuyas coordenadas son 77°48',03" W y 21°26',15" N, exceptuando dentro de ella, las regiones sobre el mar y el área de un círculo de 20 km de radio centrado en el radar. Esta última región es una "zona ciega", en cuya circunferencia límite resulta imposible para el radar detectar los topes de los ecos con alturas mayores a 12 km.

Criterios de selección de un día experimental: las informaciones meteorológicas proporcionan los criterios requeridos para elaborar el pronóstico especializado del desarrollo convectivo. Los días en que la eficacia natural de las precipitaciones esté totalmente generalizada en el territorio, no se consideran como experimentales, así como aquellos días en que las condiciones meteorológicas impiden el desarrollo de la nubosidad convectiva.

Una vez declarado el día como experimental, la información del radar se utiliza para determinar el momento de despegue del avión o los aviones de siembra. En el caso de que no aparezcan radioecos que cumplan los requisitos establecidos por la metodología durante el período de espera establecido, el día se declara como no experimental.

Si se toma la decisión de despegar, el avión o los aviones ascenderán, dirigiéndose a las regiones indicadas por el radar hasta aproximadamente la altura de la isoterma de -7 °C que es el nivel de vuelo para el trabajo experimental. Las unidades experimentales se seleccionan en coordinación con el personal de tierra y la tripulación científica de cada avión, correspondiendo a esta última la decisión final. Inmediatamente se aplicará la decisión aleatorizada de siembra o no siembra, contenida en un sobre, y sacada de un bombo antes del vuelo, que será abierto por el especialista que efectúa el disparo de los pirocartuchos o lo simula, para cada unidad experimental seleccionada.

Criterios de selección de las unidades experimentales

Los criterios de selección de la primera nube de una unidad experimental son los siguientes:

- Las torres de las agrupaciones nubosas seleccionadas para el tratamiento deben tener, a la altura de vuelo, un contenido de agua líquida mayor que 0.5 g/m^3 , velocidad de la corriente ascendente de más de 5 m/s , el diámetro debe ser más de 2 km , y deben poseer el aspecto propio del estado de desarrollo (forma de coliflor con aspecto sólido y densidad óptica apreciable).
- Ninguna nube o celda dentro de la unidad experimental, en el instante inicial del tratamiento, debe tener altura del tope $> 10 \text{ km}$.
- La altura del tope se debe encontrar en el intervalo de $6\text{--}8 \text{ km}$, correspondiente a un intervalo de temperaturas de -7 a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente.
- En el momento de la selección el centro de la unidad experimental debe estar al menos a 40 km desde cualquier cumulonimbo que tenga una reflectividad de radar de 50 dBZ o mayor.

El resto de las nubes con condiciones para la siembra que surjan en la unidad experimental se someten al mismo tratamiento que la primera y deben cumplir las condiciones a, b y c.

Método de introducción del reactivo: el reactivo se introduce en la nube, en el interior de las corrientes ascendentes, a una altura entorno a los 6 km , correspondiente a una temperatura del aire cercana a $-7 \text{ }^\circ\text{C}$, liberando un pirocartucho cada 1 o 2 s con el objetivo de provocar una mezcla lo más homogénea posible entre las isotermas de -4 y $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Información de radar: el radar efectúa el seguimiento de esta área con mediciones continuas cada cinco minutos, con grabación para toda el área del polígono hasta que esté libre de nubosidad, aún después

de que el avión deje de efectuar su tratamiento.

Reactivo: el agente glaciogénico a usar en el experimento es la mezcla pirotécnica con AgI proporcionada por los pirocartuchos PV-26 con formulación y manufactura de procedencia rusa. Estos pirocartuchos aportan 1.7×10^{14} núcleos glaciogénicos por gramo de mezcla a $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ y 7.0×10^{13} a $-6 \text{ }^\circ\text{C}$. Cada pirocartucho quema durante unos 40 s .

Criterio de fin del tratamiento de la unidad experimental: el tratamiento a las nubes dentro de una unidad experimental culmina cuando se cumple al menos una de las siguientes circunstancias:

- ha transcurrido más de una hora desde la última siembra y si los ecos contenidos dentro de sus fronteras no perduran y no se presentan nuevas nubes favorables para la siembra;
- la unidad experimental se mueve más allá del área de realización del experimento;
- el radar presenta una falla en sus funciones;
- el avión presenta una falla técnica o se acerca al límite de su autonomía de vuelo;
- se acaban los pirocartuchos.

Muestra a obtener y duración del experimento

De acuerdo con los cálculos, basados en el método de la razón doble de Gabriel (1999), se necesitan unas 120 unidades experimentales para alcanzar una significación estadística del 95% o más. Considerando el comportamiento en la obtención de las unidades experimentales en el período $1986\text{--}1990$ para el caso de las agrupaciones nubosas (82 unidades) del Proyecto Cubano para la Modificación Artificial del Tiempo, las experiencias de los experimentos de Tailandia y Texas y la complejidad adicional de selección en nuestras condiciones de unidades con áreas de 2000 km^2 se proyectó originalmente una duración del experimento de 3 a 4 años. Esto supone que se trabajaría con dos

aviones de 3 a 4 meses por año, entre junio y septiembre, lográndose tratar al menos 10 unidades experimentales por mes. La duración se puede prolongar en dependencia de la disponibilidad de aeronaves y otras circunstancias que determinan las posibilidades reales de ejecución del experimento. Considerando el comportamiento de la disponibilidad de aviones durante los tres primeros períodos de experimento aleatorizado (2006, 2007 y 2010), en los que se han logrado ejecutar 27 unidades experimentales en total; teniendo en cuenta que no se pudo realizar el experimento en el período 2008-2009, ni en el 2011, y suponiendo que esta situación mejore en los años sucesivos, se puede inferir que el experimento se debe extender hasta el año 2013.

Procedimiento de evaluación

El procedimiento de evaluación será enfocado tanto a las celdas individuales como a las unidades experimentales que las contienen. Los parámetros a evaluar contemplan las relaciones de los valores medios para los casos sembrados y de control de la altura de los topes, reflectividad, área, duración y volumen de precipitación estimados por radar. Los efectos de la siembra se deben poner de manifiesto en la mayoría de los análisis, y estos deben ser consistentes con el modelo conceptual. Algunos de los resultados deben ser estadísticamente significativos, y en particular el incremento del total de lluvia.

Equipamiento del avión laboratorio AN-26

Complejo de instrumentos de medición

Con el objetivo de equipar un avión laboratorio An-26 para realizar los trabajos de medición y siembra de nubes del EXPAREX, se contrató a la empresa rusa

Agencia de Tecnologías Atmosféricas (ATTECH). En el 2005 se utilizó un conjunto básico de instrumentos, que se completó en el 2006 y el 2007. En la figura 1 se muestra una fotografía del avión equipado en el 2007 y en la figura 2, el esquema general de instalación de los equipos.



Fig. 1. Avión laboratorio CU-1228 de la empresa cubana Aerogaviota S.A., utilizado en el EXPAREX-2007.

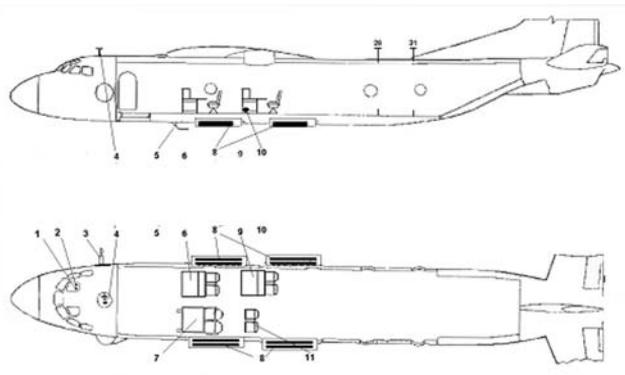


Fig. 2. Esquema general de instalación de los equipos en el AN-26 No 1417.

1-2 Antena del GPS. 3. Sensores del medidor del contenido de agua IVO y del medidor de la concentración y tamaño de las partículas de nubes IRCH-M. 4. Sensores del complejo de fluctuaciones termodinámicas y del higrómetro de condensación. 5. Antena del sistema de control de vuelo. 6. Puesto principal de trabajo del complejo de medición y cómputo. 7. Módulo de control del sistema de lanzamiento. 8. Lanzadores del sistema de lanzamiento ASO-21. 9. Puesto secundario de trabajo del complejo de medición y cómputo. 10. Instrumentos giroscópicos y sensores de sobrecarga del complejo de turbulencia.

El sistema de medición y cómputo instalado se distribuyó en dos puestos de trabajo de la cabina de carga del avión, comprendiendo un sistema de colección, procesamiento y archivo de datos, un complejo de sensores estándar de aviación de temperatura del aire, presión y velocidad del viento y sensores específicos de alta resolución y alta frecuencia de respuesta, como el espectrómetro de partículas grandes LPS y los sensores de contenido de agua líquida y total, el higrómetro de condensación aéreo y el complejo termodinámico de fluctuaciones (Nevzorov, 1996; Mezrin y Starokoltsev, 2001).

Para el registro y representación de los datos en el panel del Sistema de Medición y Cómputo (SMC), al puerto USB de entrada de una computadora portátil se conecta la salida del controlador de recolección, tratamiento y almacenamiento de datos, que procesa los datos de los sensores (figura 3). Por medio de un programa se procesan, registran y muestran en pantalla los parámetros medidos, tanto en forma numérica como por medio de gráficos en tiempo real.



Fig. 3. Puesto principal del sistema de medición y cómputo del AN-26.

Complejo de equipos de a bordo y terrestres del sistema de control de vuelo

El complejo de equipos de navegación del sistema de control de vuelo (SCV) está destinado a garantizar el control del vuelo durante la ejecución de los trabajos

de investigación y siembra de nubes. Garantiza además, la determinación de las coordenadas, el rumbo, la velocidad y la altura de vuelo del avión, la transmisión de estos parámetros al Centro de Dirección del Experimento en tierra, y su presentación gráfica en el mapa electrónico de la computadora de tierra.

En la composición del sistema entran el complejo de a bordo y el equipamiento terrestre del sistema de control de vuelo. Este sistema garantiza el establecimiento de un enlace digital confiable y libre de interferencias "tierra-aire-tierra" en la banda de VHF de 125.0 MHz (Petrov *et al.*, 2007).

Un programa especial situado en la computadora de tierra regula el trabajo del sistema de control de vuelo. La figura 4 muestra un ejemplo de trazado de la trayectoria del avión en la pantalla de la computadora de tierra. A la derecha del mapa se presentan las coordenadas del avión respecto al radar MRL-5 y al radiofaro de navegación del aeropuerto de Camagüey.

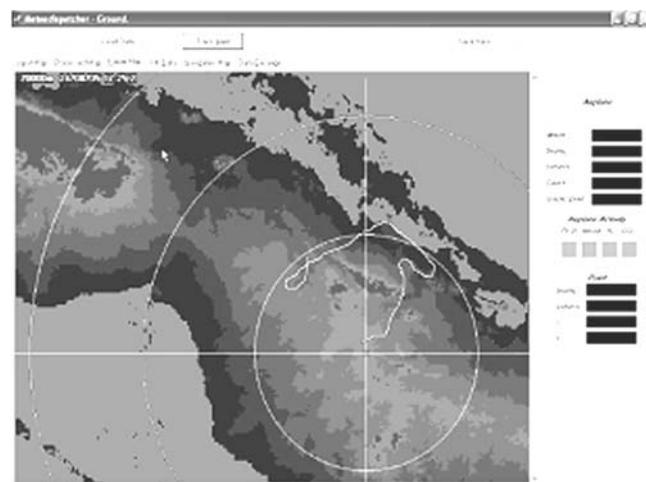


Fig. 4. Pantalla de la computadora del complejo de equipamiento terrestre, donde se destaca la trayectoria del avión.

Sistema de lanzamiento de pirocartuchos ASO-21

Para realizar la siembra de las nubes con los AN-26, con los pirocartuchos PV-26, en el 2006 se instaló en el avión un sistema consistente en dos complejos de

lanzadores del tipo ASO-21 y en el 2007 se instalaron otros dos complejos, para una capacidad total de 256 pirocartuchos. Cada complejo incluye dos vigas con dos casetes con capacidad de 32 cada uno, para 64 pirocartuchos en cada complejo, con sus aditamentos (figura 5).

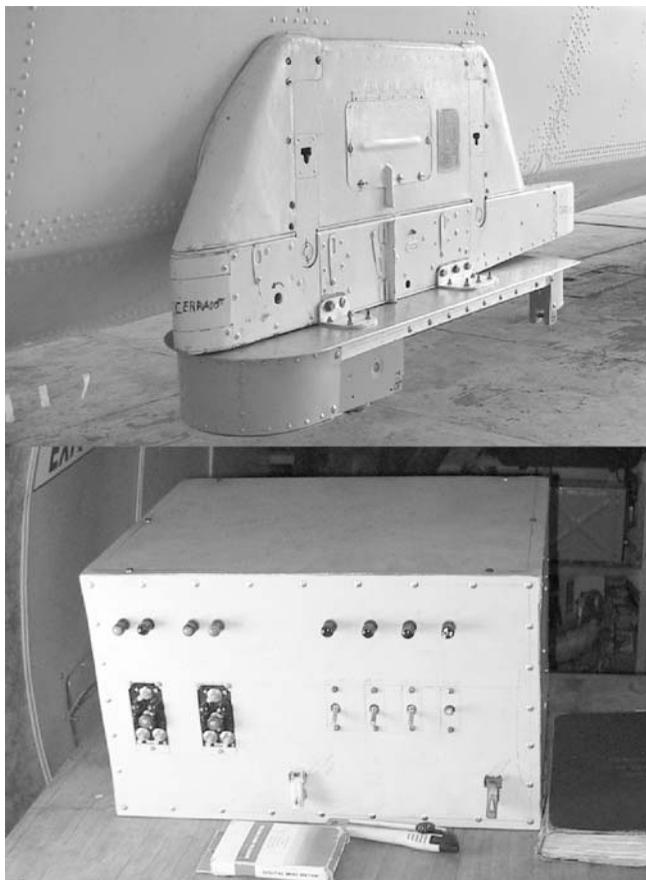


Fig. 5. Arriba: sistema de lanzamiento ASO-21 instalado en el avión AN-26. Abajo: dispositivo de control del sistema de lanzamiento y de la alimentación.

Complejo automatizado de radiolocalización

Para realizar las observaciones de la nubosidad y la lluvia sobre el área de trabajo en el experimento, se utilizó el complejo automatizado de radiolocalización desarrollado por especialistas cubanos basado en el radar ruso MRL-5, utilizando la longitud de onda de 10 cm (Peña *et al.*, 2000). Para garantizar la representatividad

de la información meteorológica obtenida con ayuda del radar el complejo se situó en una elevación a 4 km al sur-suroeste del aeropuerto de Camagüey.

El complejo automatizado de radiolocalización se controló con ayuda del programa de aseguramiento VESTA, elaborado por especialistas cubanos (Pozas *et al.*, 2003). Ver ejemplo en figura 6.

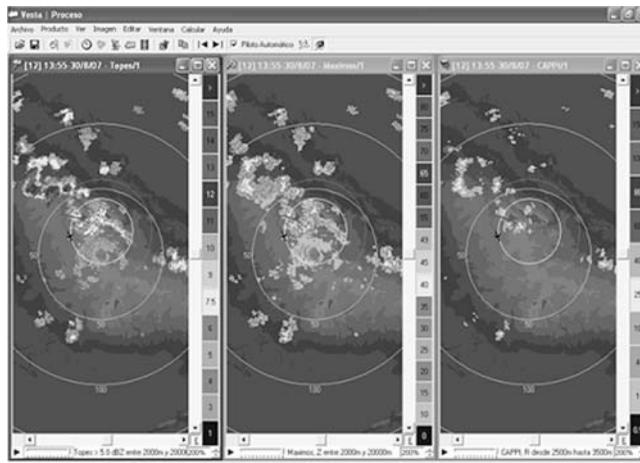


Fig. 6. Imagen de la pantalla del complejo de radiolocalización con información de los máximos de la reflectividad (izquierda), altura del límite superior del radioeco (centro) y de la intensidad de la lluvia (derecha). En las imágenes se muestra la trayectoria de vuelo del avión y el "blanco flotante" como un círculo con radio de 25 km.

La metodología de observación del radar se resume de la forma siguiente:

Se realiza un sondeo cada una hora con el fin de obtener información volumétrica de radiolocalización de la semiesfera superior durante el giro de la antena a una velocidad de 4 rpm para 16 exploraciones en cada ciclo de medición con ángulos de 0.5 a 21.3 grados. Se pasa al régimen de exploración cada 30 minutos si no existen zonas de radioecos en un radio de 150 km alrededor del radar pero se pronostica el desarrollo de nubes convectivas después de las 09:00 (hora local). Cuando aparecen radioecos sobre el territorio de la isla dentro de un radio de 150 km del radar, entonces las observaciones se realizarán con una periodicidad de 4-6 minutos. (Gamboa Romero *et al.*, 2005).

Para el seguimiento de la unidad experimental, se desarrolló un programa que permite asignar al centro de esta una velocidad de desplazamiento basada en el promedio vectorial de las velocidades de las celdas que la componen y las circundantes (Novo *et al.*, 2007). La figura 7 muestra un ejemplo de dos horas de seguimiento de una unidad experimental.

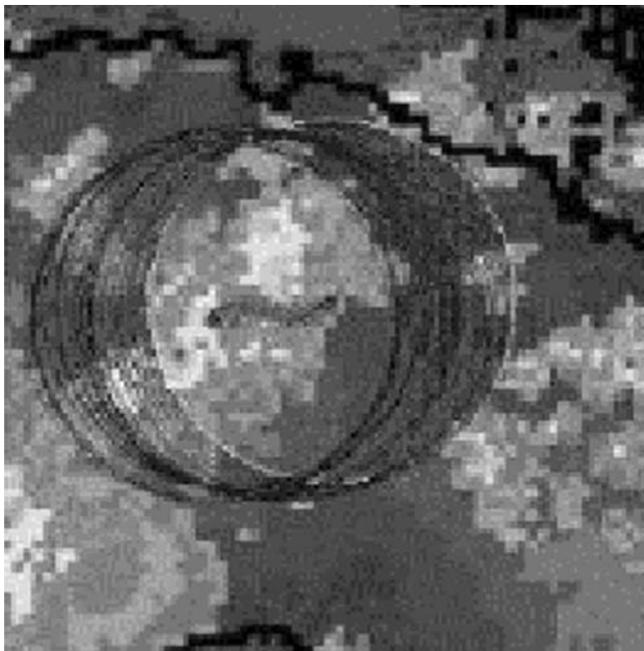


Fig. 7. Seguimiento de una unidad experimental por dos horas por el método de promediación. La circunferencia inicial es la blanca y la final es la roja.

En correspondencia con los planes de preparación para realizar los trabajos experimentales en el 2006, en el polígono de Camagüey se comenzó la instalación de 4 meso-redes de 5 pluviómetros cada una (distanciados a cerca de 40 km al norte, sudeste, sur y oeste de las coordenadas del radar) para medir la cantidad de lluvia caída con el objetivo de garantizar la calibración diaria del radar a partir de la medición de lluvia en superficie. Debido a que, antes de comenzar el experimento en el 2006 la instalación de las meso-redes no estuvo concluida para recolectar datos de la lluvia, se empleó la información de la red pluviométrica existente en el territorio de la provincia de Camagüey, consistente en 6 pluviógrafos de la red de estaciones

meteorológicas de dicha provincia y los 57 pluviómetros de la red de telecorreos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Camagüey, del INRH. En el 2007 se concluyó la instalación de las meso-redes y se coleccionaron sistemáticamente los datos de estas que se utilizaron como complemento en el análisis de la lluvia, según la metodología descrita por Gamboa Moreira *et al.* (2005).

Experimento exploratorio del 2005.

La tabla 1 ofrece información sobre las coordenadas de las zonas sembradas y la cantidad de zonas correspondientes a cada día de trabajo; la cantidad de nubes sembradas en cada zona y los resultados de la evaluación de la lluvia caída asociada a cada una de las zonas sembradas dentro del territorio de la provincia de Camagüey. Ello se obtuvo para todos los días de vuelo con siembra de nubes, siempre que se contara con la información de radar sin interrupciones.

Los valores de las láminas de lluvia estimadas por radar que se aprecian en la tabla 1 están corregidos con el coeficiente de conciliación. Los valores del coeficiente para el período del 21 de septiembre hasta el 20 de octubre se incluyeron en la tabla 3.3, del capítulo 3 del Informe. En el período anterior al 21 de septiembre no se pudieron determinar los coeficientes de conciliación, debido a limitaciones de la información de radar que fue inestable hasta esa fecha, de manera que en la tabla 1 los datos anteriores al 21 de septiembre están multiplicados por el valor medio del coeficiente para el resto del período que fue de 1.08.

De los resultados expuestos en la tabla 1 se deduce que la cantidad de lluvia caída en las regiones con influencia de la siembra fue de 1.7 a 3.6 veces mayor que fuera de ellas, para un promedio de 2.5 veces. Aunque estos resultados de ningún modo constituyen una prueba, para el conjunto de nubes sembradas, son consistentes con la hipótesis de que la siembra de las nubes convectivas con reactivos glaciogénicos produ-

Tabla 1. Zonas sembradas y resultados de la evaluación de la cantidad de lluvia aportada por estas, utilizando la información del radar

Fecha	Zonas	Cantidad de nubes sembradas	Lluvia asociada a las zonas sembradas	Lámina de lluvia en la provincia	Localización inicial de las zonas sembradas
22/08	Z1	6	–	–	245 – 270°, 40 – 55 km
24/08	Z1	5	5.78 mm	2.62 mm	319 – 360°, 29 – 74 km
25/08	Z1	13	10.79 mm	3.25 mm	220 – 354°, 9 – 51 km
26/08	Z1	5	8.10 mm	2.99 mm	151 – 336°, 11 – 37 km
27/08	Z1	1	–	–	26 – 29°, 30 – 32 km
28/08	Z1	8	5.86 mm	2.42 mm	302 – 339°, 59 – 84 km
01/09	Z1	1	20.09 mm	9.66 mm	317 – 318°, 51 – 53 km
03/09	Z1	5	–	–	135 – 215°, 16 – 59 km
05/09	Z1	2	8.93 mm	5.27 mm	217 – 221°, 25 – 30 km
09/09		10	–	–	120 – 345°, 6 – 84 km
10/09	Z1	2	27.73 mm	7.69 mm	332 – 336°, 44 – 46 km
16/09	Z1	2	1.84 mm	0.92 mm	289 – 295°, 95 – 106 km
17/09	Z1	10	7.83 mm	3.50 mm	229 – 50°, 20 – 87 km
21/09	Z1	5	19.30 mm	8.77 mm	167 – 193°, 20 – 46 km
	Z2	5	17.09 mm		147 – 168°, 44 – 67 km
22/09	Z1	2	18.90 mm	8.53 mm	252 – 275°, 15 – 40 km
	Z2	6	29.92 mm		295 – 316°, 48 – 81 km
23/09	Z1	12	9.23 mm	3.61 mm	74 – 248°, 5 – 49 km
25/09	Z1	8	18.93 mm	6.18 mm	179 – 12°, 1 – 34 km
	Z2	4	14.91 mm		101 – 110°, 69 – 90 km
04/10	Z1	4	8.85 mm	3.74 mm	179 – 216°, 22 – 34 km
10/10	Z1	5	6.01 mm	2.79 mm	174 – 209°, 70 – 84 km

ce un efecto dinámico, y un aumento del área y la intensidad de la lluvia, lo que conlleva al aumento de la cantidad de lluvia en las regiones sembradas respecto a las que no reciben influencia de la siembra.

Simultáneamente con la siembra de nubes, en el experimento del 2005 se realizaron mediciones de las características de la nubosidad y la atmósfera. En la figura 8 se muestra la frecuencia de ocurrencia de los valores medios y máximos de contenido de agua líquida en las nubes medidas en el período experimental del 2005. Como comparación, se representa también la frecuencia de ocurrencia de dichas magnitudes para las investigaciones realizadas en el período 1987-1990.

La forma de las distribuciones de los parámetros del contenido de agua líquida medidos en el 2005 y en el período de 1987-1990 coinciden aproximadamente, ya que se observan distribuciones monótonas decrecientes para los valores medios de contenido de agua y

distribuciones modales para los valores máximos. Sin embargo, en las características cuantitativas de estas distribuciones se observan diferencias. La distribución de valores medios de contenido de agua obtenida en el 2005 decrece más rápido que la del período 1987-1990 y los valores modales son 0.4 g/m³ y 0.8 g/m³. El promedio de los valores medios de contenido de agua resultó igual a 0.32 g/m³ para el 2005 y a 0.50 g/m³. El promedio de los valores máximos de contenido de agua para el 2005 fue de 0.76 g/m³, mientras que para el período 1987-1990 fue 1.03 g/m³.

Como las mediciones de contenido de agua líquida realizadas en 1987-1990 y en el 2005 se tomaron con el mismo tipo de sensor (el medidor termoeléctrico de contenido de agua en las nubes IVO), las diferencias encontradas deben estar condicionadas por diferencias de carácter metodológico o meteorológico. En relación con esto se debe señalar que en 1987-1990

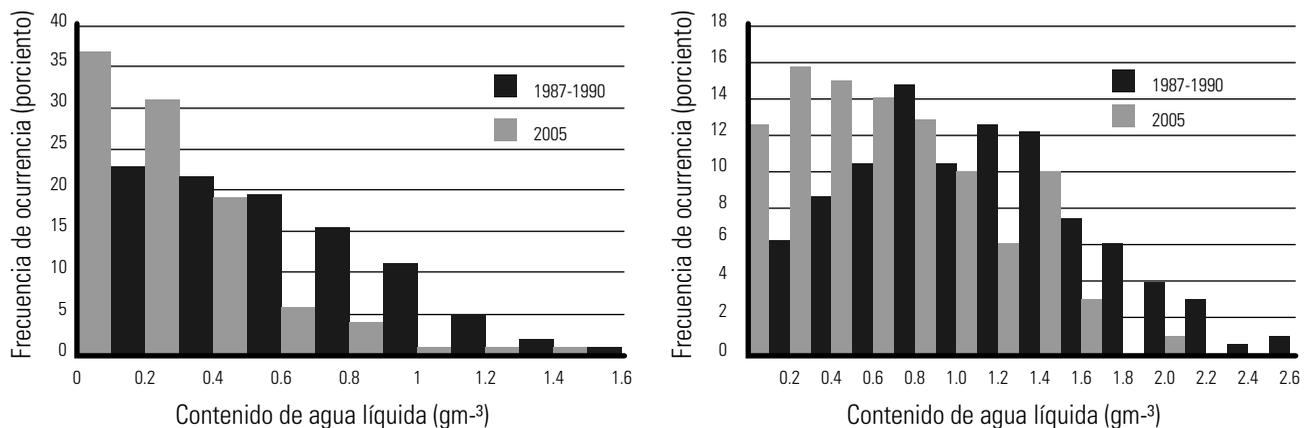


Fig. 8. Frecuencia de ocurrencia de los valores medios (izquierda) y máximos (derecha) de contenido de agua líquida a la altura de penetración (5,5-6,5 km) medidos en el período de 1987-1990 y en el 2005.

el 70% de las mediciones se efectuaron a alturas (barométricas) menores que 5700 m y solo 27% a alturas mayores que 5900 m. Por otra parte, en el 2005 el 82% de las mediciones se efectuaron por encima de los 5900 m. En 1987-1990 las investigaciones se efectuaron en el verano y concluyeron siempre antes del 5 de septiembre, mientras que en el 2005 más del 80% de los datos se obtuvieron después del 5 de septiembre. La principal consecuencia de estas circunstancias fue que la temperatura al nivel de vuelo fue diferente en ambos períodos, para un valor medio de $-7,7^{\circ}\text{C}$ en 1987-1990 y de $-10,5^{\circ}\text{C}$ en el 2005 (consecuentemente con las mayores alturas de vuelo).

Entre las posibles causas de las diferencias observadas puede estar la diferencia entre la distancia del nivel de penetración al tope de la nube para ambos períodos, ya que el contenido de agua decrece rápidamente a medida que disminuye la distancia al tope, y las posibles diferencias entre los estados de desarrollo de las nubes medidas.

Experimento confirmatorio. Etapas del 2006, 2007 y 2010

Vuelos experimentales

Una vez perfilada la metodología experimental y precisados todos los aspectos del diseño, se comenzó

la etapa exploratoria del experimento, inicialmente proyectada para ejecutarse en un período de 3 años, previéndose períodos experimentales de 4 meses por año, y un promedio de 40 unidades experimentales por año. Sin embargo, las dificultades prácticas impidieron el cumplimiento de este plan.

En el 2006, los trabajos se efectuaron desde el 29 de septiembre al 15 de octubre. En ese período se realizaron 2 vuelos preparatorios y 10 vuelos de trabajo experimental, para un total de 20 horas y 10 minutos de vuelo.

Debido a que el experimento es aleatorizado y la información sobre las nubes que fueron sembradas o de control será conocida solo después de obtener la cantidad de datos necesarios, el análisis de las nubes investigadas se realizó de acuerdo con su inclusión o no en las unidades experimentales. De esta manera, las nubes medidas entraron en 7 unidades experimentales para 6 de los 10 vuelos (en un vuelo se obtuvieron 2 unidades experimentales) realizados. En los restantes 4 vuelos las nubes analizadas no cumplieron con el criterio que permitiría que fueran incluidas en las unidades experimentales. Los datos obtenidos en estos vuelos se utilizaron para profundizar el conocimiento de las características de las nubes convectivas tropicales que se desarrollan en esta región.

En los vuelos de investigación se realizaron mediciones en 70 nubes convectivas y en tres regímenes ex-

perimentales, durante el estudio de los sistemas de nubes desarrollados en la región sur del polígono. De ellas, 54 nubes estaban contenidas en las 7 unidades experimentales obtenidas (ver tabla 2).

El 15 de agosto del 2007 se concluyó el equipamiento del avión AN-26 No. 1228, y el 17 de ese mes comenzaron los vuelos experimentales. Del 17 de agosto al 4 de octubre del 2007 se realizaron los trabajos. En este período se efectuaron 23 vuelos sobre el PMC para el estudio de las nubes y la aplicación del esquema experimental a estas.

En el 2008-2009 no fue posible realizar el experimento por problemas financieros, pero en el 2010 se logró reanudar el mismo. Se decidió sustituir los lanzadores tipo ASO-2I, por otros similares más modernos del tipo UV-26, pero esto conllevó dificultades en la instalación que condujeron de nuevo al inicio tardío del experimento. La primera unidad experimental del 2010 se trató el 1ro de septiembre, y el experimento se extendió hasta el 4 de octubre. En ese período se lograron procesar 8 unidades experimentales. Por limitaciones en el equipamiento del avión, las nubes experimentales de esta temporada cuentan solo con mediciones de las variables meteorológicas básicas y contenido de agua líquida y total.

La tabla 2 enumera los vuelos y unidades experimentales de los tres años de experimento confirmatorio.

Información de radiolocalización de las nubes y la lluvia

La metódica de realización de las mediciones de radiolocalización de las nubes y la lluvia en el ARE durante el experimento exploratorio fue similar a la aplicada en el 2005.

En el procesamiento y análisis de la información de radar obtenida en el período mayo-septiembre, en el cual se efectuaron vuelos operativos de siembra de nubes al margen del experimento, se detectaron errores en la información de radar que consistían en valores puntuales extremadamente altos de intensidad de precipitación (de hasta 400-500 mm/h) no compatibles

Tabla 2. Vuelos del EXPAREX (2006, 2007 y 2010)

Fecha	A	B	C	D
2006/10/02	1	-	4	3
2006/10/03	2	1	5	5
2006/10/04	3	-	1	0
2006/10/06	4	2	6	6
2006/10/09	5	-	11	8
2006/10/10	6	3 y 4	12	12
2006/10/11	7	5	17	16
2006/10/12	8	6	11	7
2006/10/14	9	7	13	11
2006/10/15	10	-	3	0
2007/08/17	1	-	4	6
2007/08/18	2	-	1	1
2007/08/24	3	8	8	12
2007/08/27	4	9	10	18
2007/08/30	5	10	4	4
2007/08/31	6	11	8	8
2007/09/10	7	12	8	10
2007/09/11	8	13	11	11
2007/09/13	9	-	2	2
2007/09/15	10	14	6	8
2007/09/17	11	15	13	18
2007/09/18	12	16	8	10
2007/09/22	13	17	9	14
2007/09/27	14	18	11	13
2007/09/28	15	19	8	14
2007/10/04	16	20	4	6
2010/09/01	4	21	9	9
2010/09/05	6	22	6	6
2010/09/09	7	23	4	4
2010/09/11	9	24	5	5
2010/09/16	10	25	3	3
2010/09/21	14	26	7	7
2010/09/26	15	27	12	12
2010/10/02	16	28	1	1
Totales		28	245	270

A: Número del Vuelo

B: Número de la Unidad Experimental

C: Cantidad de segmentos de medición

D: Cantidad de nubes

con la realidad. El análisis detallado de la información permitió encontrar las causas de los errores, que fue un defecto en el sistema de giro de la antena. Para eliminar el defecto, en octubre del 2006 se incluyeron correcciones en el programa de control del sistema de la antena, que evitan la posibilidad de variaciones bruscas descontroladas del ángulo de elevación durante la ejecución de los barridos espaciales del radar.

La intensidad de precipitación I se obtuvo a partir de la información de radar, transformando los valores de reflectividad Z por medio de la relación $Z = 300 I^{1.4}$, utilizada previamente en los experimentos del período 1985-1990 y también en el 2005. Los valores corregidos de precipitación se calcularon posteriormente introduciendo el coeficiente de conciliación (K_c), que se determina como resultado de la calibración de los datos de radar con los datos de la red pluviométrica de superficie.

Debido a que la densidad en la red pluviométrica en el polígono de Camagüey no es suficiente para garantizar la exactitud necesaria de las mediciones diarias de la lluvia caída de las nubes convectivas, para valorar la cantidad de precipitación diaria, se utilizaron los datos de radiolocalización calibrados con los datos de la red pluviométrica existente en la región.

Resultados preliminares de los parámetros medidos para las unidades experimentales

Al igual que en el 2005, en el experimento confirmatorio se determinaron las variables físicas de las nubes sembradas y su entorno, utilizando los sensores instalados en el avión-laboratorio. La figura 9 muestra las distribuciones de contenido de agua en las nubes medidas para las temporadas del 2006 y 2007 comparadas con las del período 1987-1990, evidenciándose que la adecuación de la altura de vuelo en el 2006 y 2007 garantizó la similitud entre ambos conjuntos de datos.

Para cada una de las 28 unidades experimentales definidas en su seguimiento por el método del promedio se calcularon sus parámetros de forma preliminar en cada paso del seguimiento y, a partir de estos, se obtuvieron los parámetros integrales que caracterizarán a la unidad experimental en la posterior evaluación del efecto de siembra. En la tabla 3 se muestran los tiempos de vida T en minutos y el volumen total aportado por cada unidad experimental, en kT .

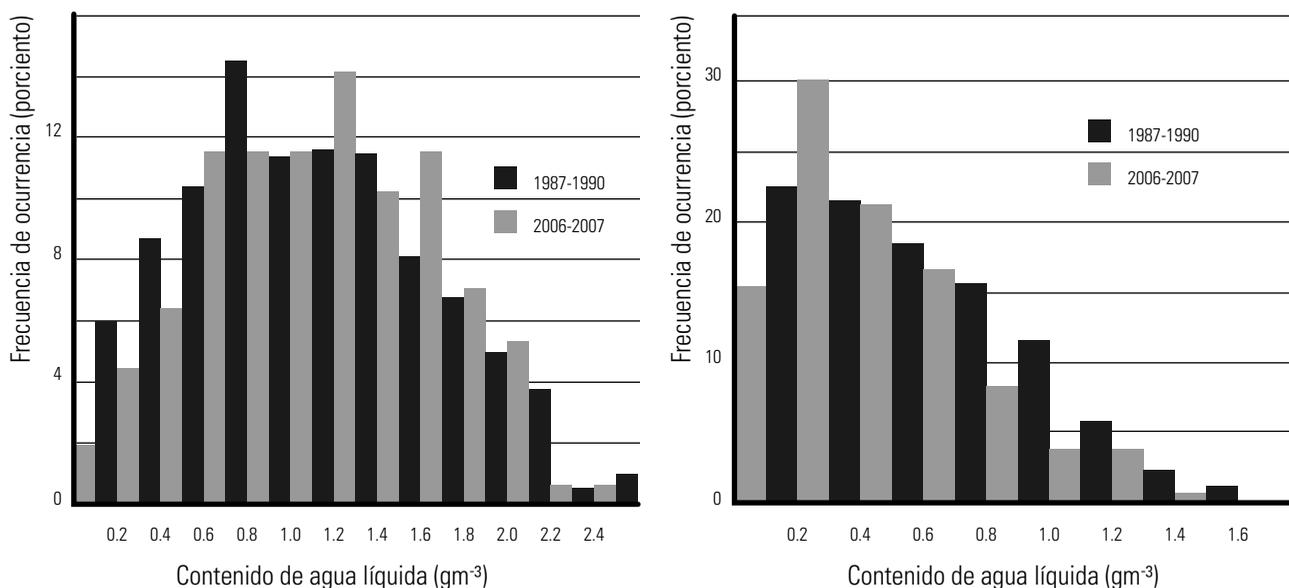


Fig. 9. Frecuencia de ocurrencia de los valores medios (izquierda) y máximos (derecha) de contenido de agua líquida a la altura de penetración (5.5-6.5 km) medidos en el período de 1987-1990 y en los experimentos del 2006 y el 2007.

Tabla 3. Parámetros correspondientes a las unidades experimentales del 2006, 2007 y 2010 calculados a partir del seguimiento del círculo por el método del promedio

No.	Fecha-hora inicial	T (min)	Q (kT)
1	20061003-14:20	240	55273
2	20061006-15:20	400	12841
3	20061010-13:50	60	16
4	20061010-14:50	290	1141
5	20061011-14:50	350	1450
6	20061012-14:45	115	35
7	20061014-15:15	525	25391
8	20070824-14:05	550	9388
9	20070827-13:35	300	12133
10	20070830-14:00	275	5535
11	20070831-13:15	290	1453
12	20070910-14:05	540	4868
13	20070911-13:30	520	24378
14	20070915-13:40	705	6704
15	20070917-14:15	540	13014
16	20070918-14:30	615	4241
17	20070922-13:55	230	1029
18	20070927-13:15	655	14473
19	20070928-13:45	355	4975
20	20071004-13:25	595	11158
21	20100901-14:05	460	7363
22	20100905-15:00	240	7418
23	20100909-14:45	420	8949
24	20100911-14:40	350	8783
25	20100916-14:20	270	5972
26	20100921-13:15	260	1616
27	20100926-13:25	240	5475
28	20101002-13:55	710	1496

Siembra operativa de nubes en la región oriental

Siembra desde aviones

A partir del 2006 comenzaron los trabajos operativos de siembra de nubes desde aviones con base en Holguín, con el objetivo de incrementar la lluvia en la parte central y occidental de la provincia y en el Valle del Cauto. En ese año se utilizó un avión An-26, equipado

con un sistema de lanzamiento de pirotecnos del tipo Long B-2, con características técnicas muy similares a los PV-26 rusos, descrito anteriormente. El sistema de lanzamiento se instaló en uno de los portabombas del avión de forma similar al sistema ruso.

La metodología de vuelo y siembra utilizada fue similar a la empleada en Camagüey, con la diferencia de que no siempre se hicieron penetraciones, realizándose una parte de la siembra encima del tope de las nubes. En total, se realizaron 14 vuelos de trabajo, en los cuales se sembraron 154 nubes convectivas, utilizándose 1297 pirotecnos. La mayor parte de las siembras se efectuaron en el mes de julio y se concentraron en la provincia de Holguín, con algunas excepciones en regiones limítrofes con otras provincias como se muestra en la figura 10.



Fig. 10. Posiciones de las siembras en Holguín con provincias limítrofes en julio del 2006.

Aunque la ausencia de aleatoriedad en las siembras y de instrumentos de medición de física de las nubes, y lo limitado de la muestra, impide realizar una evaluación rigurosa del aporte adicional de lluvia obtenido de las siembras para obtener una estimación aproximada de la efectividad del trabajo, se aplicó el método de regresión histórica. Como área de trabajo se escogió a la provincia de Holguín, donde se concentró la mayoría de las siembras, y como control se escogió la provincia de Guantánamo que mostró buena correlación histórica en sus totales de lluvia para el mes de julio con los de Holguín (coeficiente de correlación lineal de 0.734 significativo al 1%), y no debe haber sido afectada por la siembra, si se tiene en cuenta que el viento predo-

minante tuvo componentes del este y del sur. Además, ambas provincias presentan orografía similar y estuvieron afectadas por condiciones similares del tiempo durante el período de trabajo. Como resultado se estimó cerca del 30% el incremento de lluvia en julio del 2005 en la provincia de Holguín producto de las siembras.

En el 2007 no estuvo disponible un An-26 para la base de operaciones de Holguín, por lo que se sustituyó por un Yak-40. Gran parte de la temporada de trabajo en ese año se ocupó en tratar de adaptar los lanzadores de pirocartuchos chinos Long B-2 a este tipo de avión, pero no se logró obtener una propuesta técnicamente satisfactoria, debido al peso excesivo de este equipamiento. Finalmente, se decidió instalar un par de lanzadores rusos del tipo ASO-21, realizándose una corta campaña desde el 7 hasta el 18 de septiembre, con un total de 71 nubes sembradas, la mayor parte de ellas en la provincia mencionada.

En el 2008 se utilizó de nuevo el Yak-40 con lanzadores ASO-21, y la campaña se extendió desde junio hasta principios de septiembre, cuando se interrumpió definitivamente, después de la afectación del huracán Ike. Aunque la extensión total de la campaña ocupó gran parte del período lluvioso, la disponibilidad para el trabajo del avión fue muy limitada, realizándose solamente 15 vuelos, en los que se sembraron 82 nubes, de ellas 52 sobre Holguín, 13 sobre Las Tunas y el resto sobre Santiago y Granma.

En el 2009 se realizó una campaña mucho más estable, que se extendió desde el 18 de junio hasta el 16 de octubre, lográndose sembrar 180 nubes en 30 vuelos en el período junio-octubre.

Siembra desde generadores terrestres de yoduro de plata

Esta faceta del Programa se inició el 29 de julio del 2005 con la instalación de una red de 14 generadores terrestres, suministrados por la empresa chilena HIDROMET. Sus características técnicas se descri-

ben en HIDROMET (2005). En el 2006 se aumenta el número de generadores a 23, quedando la red con 2 en Granma, 6 en Santiago de Cuba y 15 en Holguín, que estuvieron operativos en el 2007 (figura 11). De acuerdo con la metodología propuesta, los generadores se debían instalar en las laderas o cimas de montañas para garantizar que la mayor parte posible del reactivo llegara a las nubes convectivas. Sin embargo, la instalación de los equipos en las alturas necesarias implicaba, en muchos casos, la construcción de emplazamientos específicos y vías de acceso que encarecían mucho la instalación, de modo que se decidió instalarlos en las viviendas de campesinos e instruir a estos como operadores. En la mayoría de los casos estas ubicaciones no cumplen con los requerimientos necesarios. La aplicación en el 2009 de estudios numéricos de dispersión del reactivo indicaron que las concentraciones que llegan a la zona activa del yoduro de plata en los topes de las nubes es insuficiente para obtener efecto de siembra, siendo necesario revisar sus ubicaciones y la dosificación del reactivo (González *et al.*, 2009). Las simulaciones indican que aún, colocando los generadores en las cimas de las montañas orientales, sería necesario incrementar sensiblemente los flujos de reactivo para lograr las concentraciones mínimas necesarias para la siembra dinámica.



Fig. 11. Esquema de un generador terrestre de yoduro de plata (izquierda) y de las ubicaciones de la actual red de 25 generadores en las provincias de Holguín, Granma y Santiago de Cuba (derecha).

Para estimar integralmente los resultados del programa operativo en la provincia de Holguín, se compararon los acumulados estacionales de lluvia en los municipios del oeste y del este de la provincia, bajo el supuesto que, de acuerdo con los objetivos del Programa, los municipios del Este, donde no se realizaron siembras desde aviones, tampoco están afectados por los aerosoles de yoduro de plata de la red de generadores terrestres debido al predominio de los vientos del este. La figura 12 muestra los polígonos de trabajo y control definidos con este fin. Los municipios del este, con relleno gris claro en la figura, conforman el área de trabajo y los del oeste, rellenos de blanco, el área de control. El municipio Antilla se excluyó de la evaluación por su carácter peninsular (se muestra sombreado en gris oscuro).

En la figura 13, las cruces simbolizan los puntos correspondientes a los años del 2005 al 2009, en los cuales se realizaron trabajos del PIAL, ya sea siembra desde generadores, o desde aviones o ambas. Los asteriscos indican los años correspondientes al período de 1986-1991, en el cual se realizaron actividades significativas de siembra de nubes en la zona oeste.

En cada una de las áreas se determinaron los tota-

les de lluvia para el período agosto-octubre de cada año del período 1964-1998. Después de comprobar la existencia de correlación lineal de 0.81, significativa al 95% entre los totales de lluvia de ambas áreas, se trazó el diagrama de dispersión con la correspondiente línea de regresión, como se muestra en la figura 13. Las líneas punteadas muestran los márgenes del error de estimación de la variable y (lluvia en el área de trabajo) en función de la variable x (lluvia en el área de control) de Holguín, que no es objeto de evaluación, pero se deben diferenciar del resto. Los cuadros sin relleno simbolizan los años sin actividades de siembra de nubes en Holguín, incluyendo algunos de la década del 80 con muy poca actividad. Como se aprecia en el gráfico, en todos los años evaluados, la lluvia en el área de trabajo superó el pronóstico de regresión con un incremento entre 5 y 10%, insuficiente para quedar por encima del corredor de errores, excepto el 2005, en el que se alcanza una significación marginal del 95%. Esto se cumple también para la mayor parte de los trimestres correspondiente al período de campañas de los 80-90, excepto en 1986 y 1988, en los que se observó decrecimiento.



Fig.12. Polígonos de trabajo (gris claro) y control (blanco) para evaluar el incremento artificial de la lluvia en la provincia de Holguín. Los cuadrados muestran las posiciones del grupo de generadores instalados entre julio y agosto del 2005 y los círculos, los instalados en septiembre del 2006.

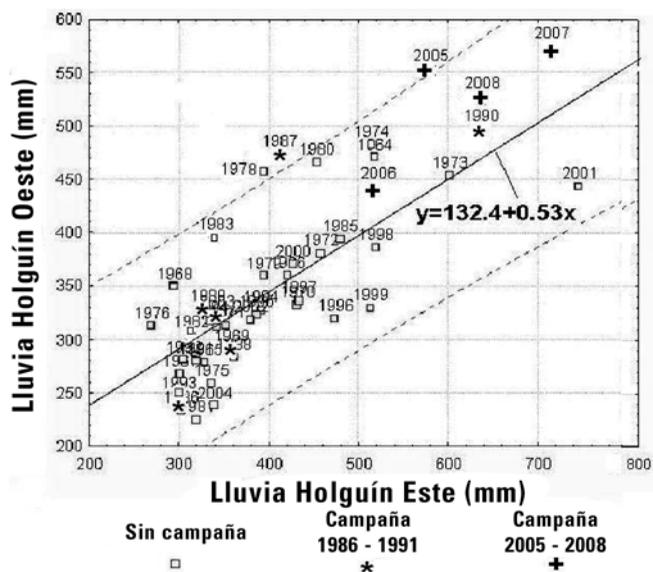


Fig. 13. Diagrama de dispersión para los totales trimestrales (agosto-octubre) de los municipios del oeste de Holguín en función de los del este y línea de regresión.

Comportamiento de la lluvia en las provincias de trabajo en el período de actividad del PIALL

Los primeros meses del 2005 marcaron la etapa más crítica de una sequía que había comenzado en el 2003, afectando principalmente a las provincias orientales desde Camagüey hasta Guantánamo. La figura 14 muestra las series temporales de los totales mensuales de lluvia, comenzando en el 2004, según los reportes de los boletines del INRH, de manera directa (arriba) y suavizada con una media móvil de 6 meses, para reflejar la variabilidad de la lluvia entre las sucesivas estaciones seca y lluviosa.

Se muestra la lluvia mensual para las provincias de Camagüey y Holguín, que han sido los principales objetivos de las campañas operativas. Se incluyen también las series correspondientes a la provincia de Guantánamo como referencia no perturbada para la zona oriental, teniendo en cuenta su buena correlación de lluvias con Holguín, y la antigua provincia La Habana, como referencia del comportamiento de la lluvia para la región occidental. También se incluyó la serie de lámina media mensual para todo el país. Como se aprecia en la figura 14, la variabilidad de la lluvia mes a mes es considerable, destacándose varios picos significativos, especialmente para La Habana y Guantánamo, relacionados con eventos extremos bien conocidos. Sin embargo, la característica más sobresaliente de la serie es la marcada variabilidad interanual. Para facilitar el análisis de esta última, se utilizó la serie filtrada con la media móvil de 6 meses. De esta última se ve la recuperación en el 2005 de la sequía anterior, y la ulterior mejoría en el 2006 y 2007. El 2008, a pesar del considerable aporte de los huracanes, marcó una tendencia al descenso en los volúmenes de lluvia, que fue mucho más marcada en el 2009, lo que sugiere una nueva tendencia hacia la sequía. De este somero análisis se deduce que, al menos de forma directa, no se puede afirmar que las campañas de incremento artificial de la

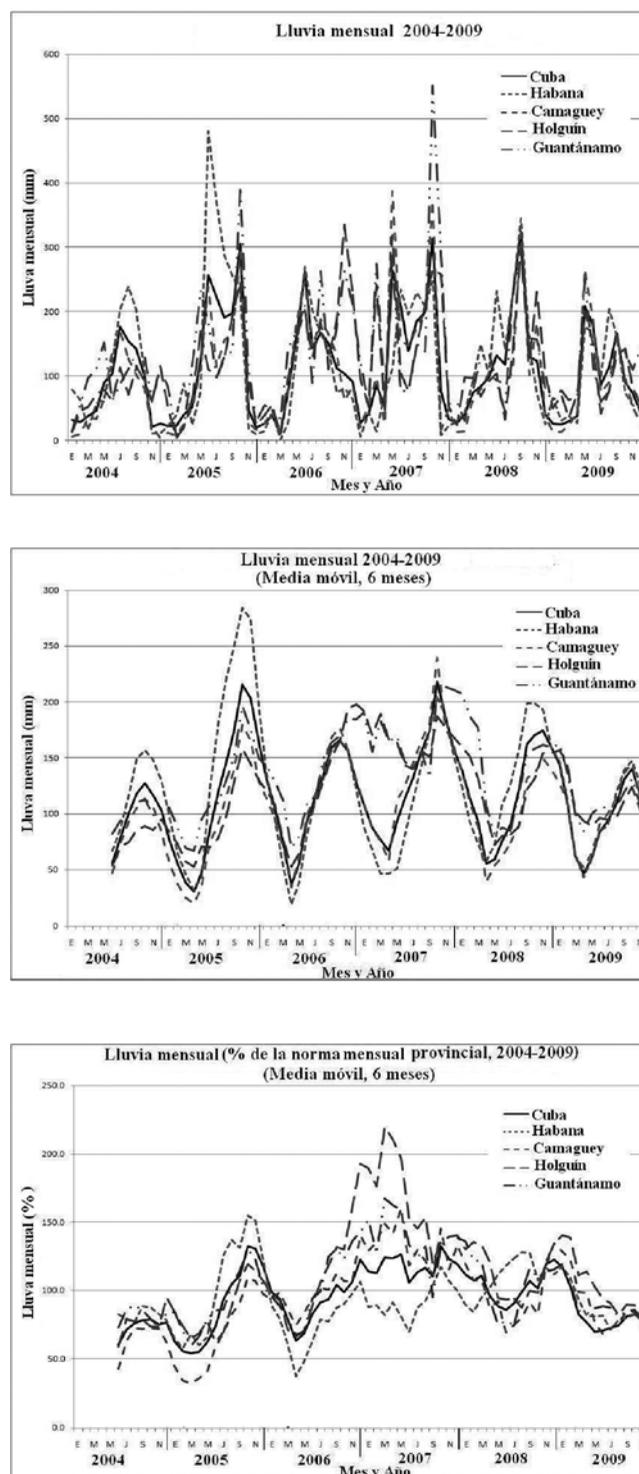


Fig. 14. Series temporales de totales mensuales de lluvia (arriba, izquierda) y su correspondiente serie asociada, después de aplicar un filtro de media móvil de 6 meses (arriba, derecha). El gráfico de abajo muestra la serie temporal de los acumulados de lluvia normalizados con la norma provincial de cada mes, después de aplicarle la media móvil de 6 meses.

lluvia hayan tenido un impacto considerable sobre el régimen de lluvia que se pueda destacar en el fondo de la variabilidad natural. Por otra parte, si se comparan las variaciones estacionales de la lluvia en la provincia de Holguín con las de La Habana se puede constatar que la diferencia de volumen de lluvia entre esta última y la primera fue sustancialmente mayor en la primera mitad del período que en el segundo.

La figura 15 muestra los mapas del boletín del INRH sobre el estado relativo de las presas para el período 2004-2009, con corte en diciembre. Los mapas se incluyen en la forma en que aparecieron en los boletines, aunque el formato de presentación de la información cambió en el 2004 y el 2005 para mantenerse homogéneo en los años sucesivos. De la secuencia gráfica se observa que el comportamiento relativo de las precipitaciones en el período ha ido variando, pues en el 2004 (figura 15 A), prácticamente todo el país estaba en situación crítica, mientras que en el 2005 (figura 15 B), las precipitaciones de verano mejoraron la situación, coincidiendo con el comienzo de los trabajos operativos en Camagüey y Holguín. No obstante, estas provincias con considerable capacidad de llenado en sus presas, no lograron alcanzar rangos favorables en la serie de llenado. Sin embargo, en los años sucesivos se nota un paulatino mejoramiento de la situación de llenado en las provincias orientales. En el 2006 (figura 15 C y D), Camagüey y Holguín pasaron a ocupar el nivel 1 en su serie, situación que se mantuvo hasta el 2008, lo que evidencia un constante mejoramiento de la situación.

En el 2009, a pesar del comienzo de la sequía, ambas provincias se mantuvieron ocupando niveles bajos en sus series. No existen pruebas sólidas que demuestren en qué grado este mejoramiento pueda estar asociado a los trabajos de siembra de nubes, pues hay muchos factores que inciden en el llenado de las presas, y en particular la incidencia de huracanes y otros fenómenos meteorológicos productores de lluvias, pero el cambio de los patrones en el período de actividad del Programa es un argumento a favor de la continuidad de estos trabajos.

Conclusiones

Desde el verano del 2005, como medida de mitigación contra la intensa sequía que azotaba a la región oriental de Cuba se reanudaron las actividades de incremento artificial de la lluvia, interrumpidas por limitaciones financieras desde 1991. Con este objetivo surgió el Programa de Incremento Artificial de la Lluvia (PIALL), bajo la coordinación y el financiamiento de la Corporación de la Aeronáutica Civil de Cuba (CACSA-IACC) y la asesoría científica del Instituto de Meteorología del CITMA. En el período transcurrido de 5 años, se destacan los siguientes logros:

- Impacto positivo en el régimen de lluvia de la región oriental de Cuba;
- Recuperación de la capacidad tecnológica de modificación artificial del tiempo para hacer frente a situaciones de sequía, creándose tres centros de dirección con los medios técnicos necesarios en La Habana, Camagüey y Holguín y formación de recursos humanos;
- Elaboración del diseño para el experimento aleatorizado de siembra de nubes y comienzo de su ejecución, acumulándose un total de 28 unidades experimentales documentadas;
- Desarrollo de un esquema de pronóstico especializado para determinar las condiciones meteorológicas favorables para la siembra de nubes, incluyendo el desarrollo y aplicación de modelos numéricos con gran incidencia en el Servicio Meteorológico Nacional;
- Elaboración e implantación de metodologías especializadas para el procesamiento de las observaciones de radar con perspectivas de aplicaciones a la medición de lluvia por radar y al pronóstico inmediato de desarrollo convectivo.

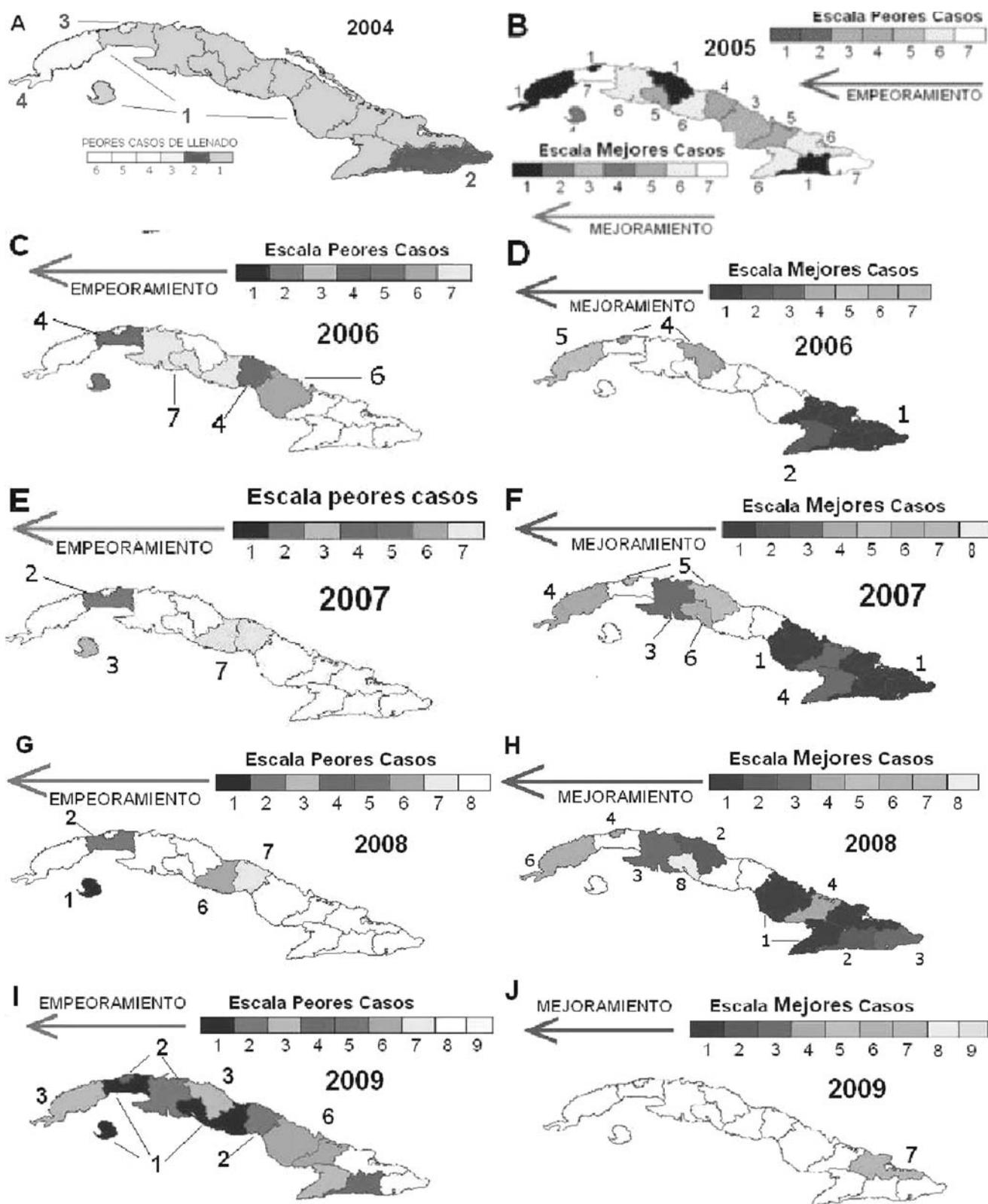


Fig. 15. Mejores y peores casos, según el comportamiento del llenado de las presas por provincias, de acuerdo con el nivel de posición en la serie cronológica de llenado en diciembre desde el 1993 para los últimos 6 años.

Principales dificultades

Después de un primer año de ejecución del EXPAREX bastante satisfactorio, en el 2006, 2007 y 2010 las operaciones comenzaron muy tarde, perdiéndose los mejores meses para el trabajo desde el punto de vista climatológico, de manera que solamente se pudo realizar 28 unidades experimentales en todo el período. En el 2008 y el 2009 no fue posible realizar el experimento. En estos problemas incidieron dificultades organizativas y de financiamiento.

A partir de estudios de simulación numérica se demostró que la ubicación de la red de generadores terrestres de yoduro de plata en Holguín y provincias limítrofes no garantiza que lleguen las concentraciones necesarias de reactivo a la zona activa del yoduro de plata cumple con los requerimientos de la metodología de utilización de estos equipos.

Recomendaciones

El saldo resultante de los logros y dificultades del Programa en estos 5 años es, a juicio de los autores, positivo. En estos momentos se han creado las condiciones mínimas, tanto materiales como de recursos humanos, necesarias para continuar la ejecución de las diferentes líneas de trabajo con mucha más eficiencia que en el 2005, y sería más económico y eficiente continuar el desarrollo de las capacidades de modificación artificial del tiempo en Cuba que lo que resultó retomarlas en aquel momento. Para lograr dar continuidad y desarrollo al Programa, es necesario realizar las siguientes acciones:

- Realizar al menos, dos temporadas experimentales más de 4 meses cada una para culminar la cantidad de 120 unidades experimentales estipulada en el diseño del EXPAREX, manteniendo todo el equipamiento necesario en forma óptima, incluyendo el avión laboratorio, el radar meteorológico y la esta-

ción aerológica que requieren de aseguramiento de piezas de repuesto, de aseguramiento de las comunicaciones, y de los equipos de cómputo necesarios para garantizar el funcionamiento del experimento en Camagüey y Casablanca. Esto implicaría concluir el experimento en el 2013.

- Mantener la acción de un avión operativo de siembra de nubes atendiendo las provincias más afectadas por la sequía durante los meses de temporada lluviosa.
- Realizar un estudio detallado de simulación numérica para determinar las posiciones óptimas de la red de generadores de Holguín y el Valle del Cauto, y las dosis mínimas de reactivo, tiempo y horario de encendido de los generadores necesarios para lograr la siembra dinámica de los cúmulos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Desarrollo de la Corporación de la Aviación Cubana S.A., del Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba por su apoyo financiero al Programa.

Bibliografía

- Gabriel, K. R., 1999: Ratio statistics for randomized experiment in precipitation stimulation. *J. Appl: Meteor.* 38. pp 290-301.
- Gamboa Moreira A., F Gamboa Romero. y S. Novo., 2005: Determinación cuantitativa de las precipitaciones por radar ajustada según la información pluviométrica. *Memorias del III Congreso Cubano de Meteorología.* 5 al 9 de diciembre del 2005. La Habana, Cuba. Publicación electrónica en CD, disponible en la biblioteca del INSMET. Publicación electrónica en CD, ISBN 959-7160-31-5, disponible en la biblioteca del INSMET.
- Gamboa Romero F., C.A. Pérez, D. Martínez y A. Gamboa, 2005: El radar meteorológico camagüeyano

- como una herramienta para la coordinación científica de vuelo y evaluación de los experimentos de incremento artificial de las precipitaciones Memorias del III Congreso Cubano de Meteorología. 5 al 9 de diciembre del 2005. La Habana, Cuba. Publicación electrónica en CD, ISBN 959-7160-31-5, disponible en la biblioteca del INSMET.
- González Y., D. Martínez y I. Borrajero, 2009: Simulación numérica de la dispersión del yoduro de plata emitido por los generadores terrestres en la región oriental de Cuba". Memorias del V Congreso Cubano de Meteorología. La Habana, 1 al 4 de diciembre del 2009.
- HIDROMET S.A., 2005: Especificaciones técnicas, manual de operaciones y procedimientos para el desarrollo de un programa de estimulación de precipitaciones utilizando la modalidad de siembra de nubes con generadores terrestres de yoduro de plata, 70pp. Disponible en el CFA del INSMET.
- Koloskov B., B. Zimin., V. Beliaev, Y. Seregin, A. Chernikov, V. Petrov, M. Valdés, D. Martínez, C. Pérez and G. Puente, 1996: Results of Experiments on Convective Precipitation Enhancement in the Camagüey Experimental Area. Cuba. Jour. Appl. Meteor., 35, 9, pp. 1524-1534.
- Martínez D., C.A. Perez, F. Gamboa., G. Puente, E. Chang, S. Novo, I. Rivero, G. Angulo, V.V. Petrov, B. Koloskov y Danielyan B, 2010: Proyecto de incremento artificial de la lluvia por siembra de nubes en Cuba. Resultados preliminares del 2005. Rev. Cub. Meteor., 16, 1: 65-76.
- Martínez D., C. A. Pérez, B.P. Koloskov, V.P. Korneyev, V.V. Petrov, F. Gamboa and S.Novo: 2007: Randomized Convective Cold Cloud Seeding Experiment in Extended Areas in Cuba (EXPAREX). Ninth WMO Scientific Conference on Weather Modification (Antalya, Turkey, 22-24 October 2007). WMP No. 44. WMO TD. No. 1406. Publicación electrónica en CD.
- Mezrin M.Y. and E.V. Starokoltsev, 2001. Aircraft Condensation Hygrometer and some results of measuring humidity in the zone of the equatorial tropopause J. Atmospheric Research, v. 59-60, p. 331-341.
- Novozorov A. N., 1996: CAO aircraft instrumentation for cloud physics. 12th International Conference on Clouds and Precipitation. . Zürich, Switzerland, Aug. 19-23, 1996. Proceedings. Vol. 1, p. 371-374.
- Novo S., D. Martínez, C.A. Pérez, B. Koloskov and F. Gamboa, 2007: Radar tracking method for cloud seeding experimental units over Cuba. Ninth WMO Scientific Conference on Weather Modification (Antalya, Turkey, 22-24 October 2007). WMP No. 44. WMO TD. No. 1406.
- Peña A., O. Rodríguez, M. Perez, R. Naranjo, L. Fernandez, A. Barreiras, A. Martínez and M.D. Rodriguez, 2000: Modernization of the Cuban weather radar network. Phys. Chem. Earth (B) 25, #10-12, 1169-1171.
- Pérez C. A., D. Martínez, F. Gamboa, V. Petrov, B. Koloskov, B. Danielyan 2011: Diseño del experimento cubano para el incremento artificial de la lluvia en áreas extensas. Rev. Cub. Meteor., 17, 1:3-14.
- Pérez C. A., D. Martínez, V.V, Petrov, I. Pomares, B. Koloskov, F. Gamboa Romero, 2008: An exploratory analysis of the potential for rainfall enhancement in the randomized convective cold cloud seeding experiment in extended areas in Cuba (EXPAREX). Proceedings of the 15th International Conference on Clouds and Precipitation. Cancun, July 7-11, 2008.
- Petrov V.V., O.G. Egorov., S.V. Melnik, A.M. Zakharov and S.N. Skuratov: 2007: Data transmission system "land-aircraft-land". Ninth WMO Scientific Conference on Weather Modification (Antalya, Turkey, 22-24 October 2007). WMP No. 44. WMO TD. No. 1406.
- Pozas, W. 2003: Software Vesta|Distribuidor versión 1.2.7.0. Distribuidor automático de productos Vesta para radar meteorológico. Laboratorio de Desarrollo Técnico, Centro Meteorológico de Camagüey.
- Rosenfeld, D., and W. L. Woodley, 1993: Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights. J. Appl. Meteor., 32, pp 1848-1866.
- Woodley, W. L. and R. I. Sax, 1976: The Florida Area Cumulus Experiment: Rationale. Design, Procedure, Results, and Future Course. NOAA Technical Re-

port ERL 354-WMPO 6. Boulder, Colo. 204 pp. Artificial rainfall enhancement program in Cuba by convective cloud seeding. Achievements and shortcomings in the period 2005-2010

Woodley, W. L., and B. A. Silverman, 2003: Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part. II: Exploratory Analyses. *J. Appl. Meteor.*, 42, pp 939-951.

Abstract

The Artificial Rainfall Enhancement Program started in 2005, as a continuation of the results obtained in the period 1982-1991. Initially, it included three tasks. The first was the Randomized Convective Cloud Seeding Experiment in Extended Areas (EXPAREX), which takes place in Camagüey and its surrounding areas, as a research Project, with the objective of determining the possibility to obtain significant rainfall increase in areas with linear dimensions of the order of 50 km by seeding convective cloud tops with silver iodide flares from aircraft, applied the technology which was developed in Cuba in the decade of the eighties. From the previously projected four years of work for 120 experimental units, it was only possible to work on the experiment in some months of 2005, 2006, 2007 y 2010, achieving 28 experimental units, which main characteristics are shown in this paper. The second task consisted in an operational cloud seeding program to enhance precipitation in the provinces from Camagüey to Holguín. In this operational campaign the same methodology of seeding from aircraft used in EXPAREX was applied, but excluding randomization and other additional restrictions of experimental target clouds. The other task was an operational cloud seeding project using a network of ground based silver iodide generators located in the province of Holguin and surrounding territories. Aerial and ground based operational seeding projects were carried out in a relatively stable way during the six years of the Program, showing positive trends in rainfall in all the target provinces. However, numerical simulation studies of the dispersion of the reagent produced by the ground generators show that, using the present technology, there is no physical transport mechanism granting the silver iodide aerosol to reach the cloud top region of the clouds in sufficient amount as to produce rainfall enhancement. Consequently, it is projected to concentrate resources in aerial seeding, continuing at the same time the investigations of the dispersion on dispersion of the ground generators' aerosol.

Key words: weather modification, cloud seeding, convective cloud