

Proyecto de incremento artificial de la lluvia por siembra de nubes en Cuba. Resultados preliminares del 2005

*Daniel Martínez, daniel.martinez@insmet.cu
Carlos A. Pérez, Félix Gamboa, Guillermo Puente,
Ernesto Chang, Sadiel Novo, Ibis Rivero, Graciela Angulo
Instituto de Meteorología, Ap. 17032, Cuba.
Victor Petrov, Boris Koloskov, Bagrat Danielian,
attech@mail.ru; Agency for Atmospheric Technologies,
Novovagankovsky, p, ed. 8, 123242, Moscú, Rusia
y Miguel Martínez hidromet@chile.com;
HIDROMET S.A., Moneda 1542, Santiago de Chile.*

Resumen

Considerando los resultados positivos de experimentos anteriores, en 2005 se comenzó el Proyecto de «Incremento artificial de la lluvia por siembra de nubes en Cuba». En su primer año, el Proyecto estuvo conformado por dos subproyectos. El de mayor peso científico es el «Experimento de siembra aleatorizada de nubes convectivas en áreas extensas desde avión en la provincia de Camagüey (EXPAREX)», en el que se toma como unidad experimental un área flotante de dimensiones fijas, dentro de la cual se siembran desde aeronaves, real o simuladamente, todas las nubes convectivas con determinadas condiciones, en dependencia del resultado del esquema aleatorio. El segundo subproyecto es el «Experimento operativo de siembra de nubes con generadores terrestres de yoduro de plata (EXOENTER)», cuyo objetivo fundamental es incrementar, en lo posible, la lluvia procedente de las nubes que se forman sobre la cuenca del río Cauto para aumentar el caudal de ese río y el flujo de agua hacia las presas a él asociadas. La aplicación de este método en el 2005 parece haber tenido una influencia positiva en el régimen de lluvia de la región.

Palabras claves: Física de las nubes, nubes convectivas, modificación artificial del tiempo.

Introducción

Durante miles de años los seres humanos han pensado en cómo modificar el tiempo con la intención de obtener agua adicional, en especial en tiempo de sequía. Sin embargo, este deseo adquirió una base científica sólo con el descubrimiento en los últimos años de la década del cuarenta, de que las gotas superenfriadas de las nubes podían ser convertidas en cristales de hielo con la aplicación de agentes glaciogénicos como el hielo seco (nucleación homogénea) o con núcleos artificiales de congelación como el yoduro de plata (nucleación heterogénea, Mason, 1971). Durante los más de cincuenta años transcurridos, las investigaciones han ampliado enormemente el conocimiento 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.

Uno de los primeros experimentos de gran relevancia fue el de Israel (Israel I, II y III), que comenzó en los años 60. Este ha sido uno de los pocos que ha brindado resultados positivos, se ha comprobado el incremento de las precipitaciones para un área extensa con un alto grado de confiabilidad (Gagin and Neuman, 1981). Se introdujo el reactivo (yoduro de plata) mediante un avión que volaba a la altura de la base de las nubes según una línea de vuelo donde dispersaba el reactivo en sucesivas pasadas, complementado por la liberación de yoduro de plata desde tierra por medio de generadores con el objetivo de suministrar en el área experimental, la cantidad de núcleos de congelación requeridos.

El experimento de La Florida (FACE: Florida Area Cumulus Experiments I y II) es un ejemplo típico de los primeros experimentos que trazaron el objetivo de cambiar la dinámica de las nubes (Woodley *et al.*, 1982; Barnston *et al.*, 1983) que aun cuando no

dio resultados conclusivos, resultaron de inestimable utilidad por los estudios colaterales realizados tanto para la física de las nubes como con los esquemas de medición de las precipitaciones, el empleo de los radares meteorológicos, la determinación de las unidades experimentales y los esquemas de obtención de la información primaria.

Los experimentos efectuados en Texas mostraron incrementos en los toques de las nubes (7 %), sus áreas, tiempo de duración y volumen de precipitación (por 130 %). Estos constituyen un ejemplo de experimento de éxito, comparable por su alcance con los realizados en Cuba. En estos experimentos se expusieron ya algunos conceptos nuevos en cuanto a las hipótesis básicas y la cadena de eventos mediante la cual se evidenciaría el incremento de las precipitaciones.

Recientemente en el período 1994-1998 se realizaron experimentos aleatorizados en Tailandia, que tuvieron un gran valor científico y metodológico, aún cuando sus resultados no fueron conclusivos (Rosenfeld *et al.*, 1999) debido a no alcanzar el número requerido de unidades experimentales (se obtuvieron 62 y se necesitaban 125). Sus resultados, aunque no significativos desde el punto de vista estadístico, fueron positivos y de gran interés para la comunidad internacional.

En Sudáfrica (Mather *et al.*, 1997) se desarrolló un experimento aplicando pirocartuchos de reactivos higroscópicos cerca de la base de sistemas de nubes convectivas con composición de fase mixta. Este experimento físico estadístico dio resultados positivos y ha sido evaluado independientemente por diferentes autores (Bigg, 1997; Silverman, 1999). En México se realizó una réplica de estos experimentos con buenos resultados, aunque no conclusivos (Bruitjes *et al.*, 1999).

Actualmente, la técnica de siembra de nubes para el incremento de la lluvia procedente de nubes convectivas se considera por la comunidad científica internacional como un método en fase experimental, que puede producir resultados positivos siempre que sea aplicado contando con los medios adecuados de evaluación del estado de la atmósfera a escala local, de monitoreo del estado de desarrollo de las nubes objeto inmediato de la siembra y de su evolución inmediatamente después de esta. La aplicación operativa de estos métodos sólo es recomendable después de realizados experimentos que incluyen un riguroso programa de medición de los parámetros internos de las nubes y el estudio de su evolución en condiciones naturales y bajo la acción de la siembra. Estos experimentos permiten formular y demostrar la

aplicabilidad de un modelo conceptual que explique consistentemente la reacción de las nubes a la siembra, y además, evaluar de forma estadística el volumen adicional de lluvia a obtener, como promedio, por cada nube sembrada, y en una determinada área durante un determinado período de tiempo con operaciones continuas de siembra de nubes (OMM, 2001).

En Cuba, los intentos de incrementar la lluvia mediante la interacción con los mecanismos que dentro de las nubes dan lugar a las precipitaciones, datan de mediados del siglo pasado, cuando compañías privadas realizaron trabajos operativos en la región oriental del país. En los años 60 se realizaron algunos trabajos de este tipo sin asesoría científica, pero no fue hasta finales de la década del 70 que se comenzó un programa sólido de investigaciones en el campo de la modificación del tiempo, el cual se conoció posteriormente como Programa cubano de modificación artificial del tiempo (PCMAT).

Durante 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). En los seis años comprendidos entre 1985 y 1990, experimentos aleatorios fueron implementados en el polígono 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; Valdés *et al.*, 1992). Se estableció un sistema de mediciones y herramientas primarias compuestas por tres aviones laboratorios instrumentados adecuadamente (AN 26, AN 12 CICLON, IL 14), dos radares meteorológicos (MRL-5 y ARS-3), un sistema con radiosondeo, dos redes pluviométricas especiales y seis estaciones meteorológicas de superficie. El experimento confirmatorio, conducido durante los años 1986-1990, alcanzó los siguientes resultados.

Para las nubes aisladas sembradas con yoduro de plata con una temperatura del tope entre -10 y -20 °C se obtuvo un incremento en el tiempo de vida de 24 %, altura máxima 9 %, área 64 % y volumen de lluvia 120 %, en comparación con las nubes no sembradas. Los incrementos en el tiempo de vida, el área y las precipitaciones, resultaron significativos con un nivel de confiabilidad estadística mayor a 90 %. Para el caso de las agrupaciones nubosas con área de hasta 400 km², la siembra incrementó el tiempo de vida en 21 %, la altura máxima en 17 %, el área en 28 % y el volumen de lluvia en 65 %, todo con una confiabilidad estadística mayor a 95 % (Koloskov *et al.*, 1996).

En caso de existir suficientes recursos nubosos (nubes apropiadas para la siembra) en un área de trabajo operativo del orden de 4000 km², se estima que este incremento de 60 % por cada nube sembrada podría producir un incremento de la lluvia total en el área de 10 a 20 %, por encima de la lluvia que habría caído de forma natural. Esta última aseveración, sin embargo, no puede considerarse como demostrada, ya que el experimento que debía confirmar la efectividad del método de siembra de nubes en Cuba en un área extensa, estaba planificado para realizarse en el quinquenio 1991-1995 y no se pudo efectuar por falta de financiamiento. No obstante, en el mismo período de los experimentos de Camagüey durante la década de los años 80, se realizaron campañas operativas de incremento artificial de la lluvia en varias regiones del país, principalmente en las provincias orientales, que demostraron de manera cualitativa, la posibilidad de mitigar los efectos de la sequía en el área de operaciones.

La motivación principal para la propuesta del proyecto cuyos primeros resultados se discuten en el presente trabajo, consiste en culminar la etapa de siembra masiva aleatorizada en área extensas del PCMAT y a la vez, introducir en la práctica

sus resultados preliminares y otras técnicas alternativas de siembra de nubes. Para esto se planificaron en el 2005 los siguientes subproyectos:

1. Experimento de siembra aleatorizada de nubes convectivas en áreas extensas desde avión en la provincia de Camagüey (EXPAREX). En este experimento se toma como unidad experimental un área de dimensiones fijas que se desplaza, dentro de la cual se siembran real o simuladamente desde aviones instrumentados a todas las nubes con condiciones, en dependencia del resultado del esquema aleatorio.
2. Experimento operativo de siembra de nubes con generadores terrestres de yoduro de plata en la cuenca del Cauto (EXOGENER). Su objetivo fundamental es incrementar en lo posible la lluvia procedente de las nubes que se forman sobre la cuenca del Cauto para aumentar el caudal de ese río y el acumulado de las presas a él asociadas. La metodología que se aplica es la siembra desde generadores terrestres de aerosoles de yoduro de plata en las corrientes ascendentes en la capa subnubosa asociadas a la orografía. Ver figura 1.

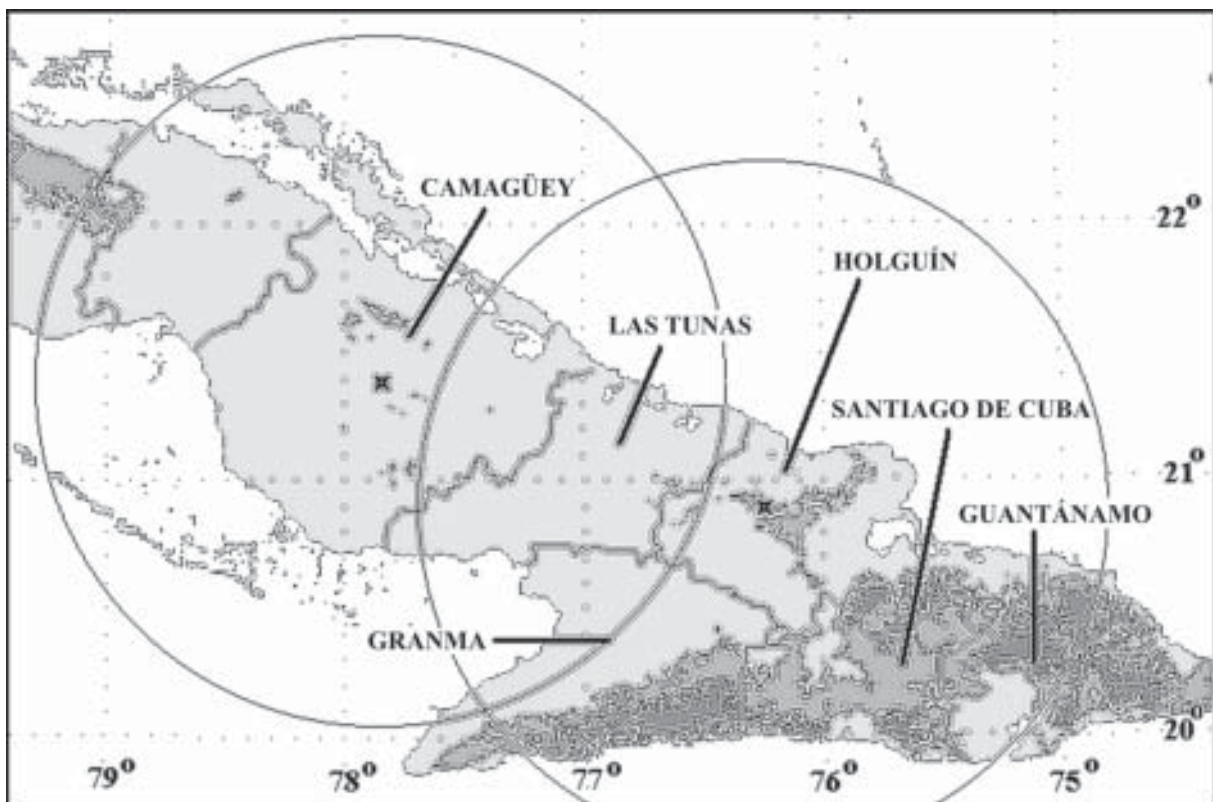


Fig. 1. Ubicación de las provincias donde se efectúan el EXPAREX y el EXOGENER, incluyendo las posiciones de los dos radares. Se destaca un círculo de 150 km de radio alrededor de cada radar.

EXPAREX

Complejo de equipamiento aéreo y terrestre. Avión laboratorio

Durante la temporada experimental de 2005, en el EXPAREX se empleó un avión AN-26 de la empresa cubana Aerogaviota S. A., instrumentado como plataforma para la siembra de nubes y la medición de sus parámetros físicos. El esquema de instalación de este equipamiento en el avión se muestra en la figura 2.

Descripción del complejo de instrumentos del Sistema de medición y cómputo (SMC)

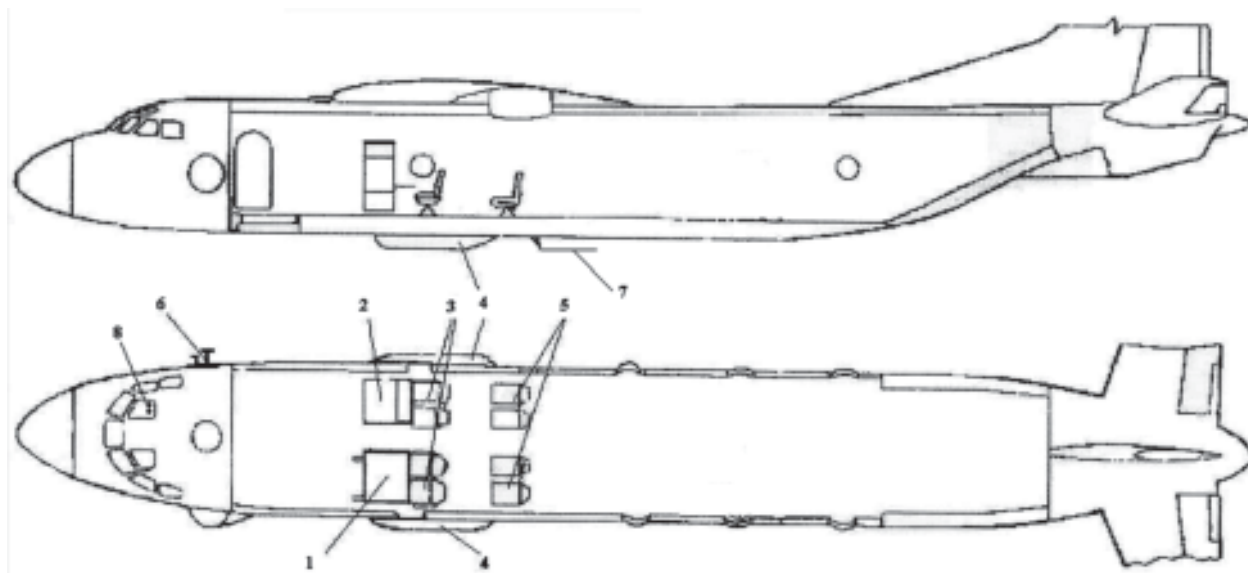
El sistema de medición y cómputo instalado en el avión garantizó las mediciones, registro y representación gráfica en la computadora de a bordo de los parámetros de navegación y meteorológicos del vuelo y contó con equipamiento para la medición de coordenadas geográficas, a partir de un receptor de GPS. Las variables meteorológicas medidas adicionalmente a las proporcionadas por el sistema de medición propio del avión fueron el contenido de agua de nubes, la humedad relativa y la temperatura real del aire. El sistema permite, además, visualizar la trayectoria del avión en vuelo y los puntos con siembra de nubes sobre un mapa con el relieve y otras características locales

y se enlaza el Centro de Dirección del Experimento en tierra. La relación de los parámetros medidos se muestra en la tabla 1.

Computadora personal y software

Para el registro y la presentación gráfica de los datos, en el puesto del SMC se instaló una computadora personal tipo note-book. En el puerto RS232 se introdujo la salida del bloque de asimilación y procesamiento preliminar de datos del SMC. El software instalado en la computadora procesa en tiempo real, registra y presenta los parámetros medidos en la pantalla de la computadora, tanto en forma de texto como gráfica. Con ayuda de un sencillo sistema de menú, se puede escoger los parámetros que se desean visualizar en la pantalla y la forma de visualización preferida. Se pueden visualizar hasta cuatro parámetros a la vez en gráficos de distribución horizontal o las distribuciones verticales de tres parámetros a la vez, así como analizar los datos en forma de tablas y llevar un diario electrónico de vuelo. El sistema permite, también, visualizar la trayectoria del avión en vuelo y los puntos con siembra de nubes sobre un mapa con el relieve y otras características locales. Todos los parámetros medidos y calculados se graban en tiempo real en el fichero de salida del SMC.

Un programa especial situado en la computadora de tierra controla el trabajo del sistema de con-



1. Puesto de control del sistema de lanzamiento de pirocartuchos ASO-2-I. 2. Puesto del sistema de medición y cómputo (SMC). 3. Butacas de los operadores del ASO-2-I. 4. Barras del sistema ASO-2-I. 5. Butacas adicionales. 6. Sensores del complejo de medición y cómputo. 7. Antena de a bordo del sistema de control del vuelo. 8. Antenas de los receptores de GPS de los sistemas de medición y cómputo (SMC) y de control de vuelo.

Fig. 2. Esquema de instalación de los equipos en el avión AN-26.

Tabla 1. Parámetros medidos y registrados por el SMC

No	Tipo de parámetro	Parámetro	Intervalo de medición	Error
1	Parámetros de navegación	Tiempo	0 - 24 horas	1 s
2		Coordenadas geográficas	0 - 900 (lon) 0-1800 (lat)	0,5 seg. ang.
3		Ruta de vuelo		
4		Altura barométrica	0 - 10 000 m	5 m
5		Altura GPS	0 - 10 000 m	10 m
6		Ángulo de ruta	0 - 360°	3,0
7		Acimut	0 - 360°	2 0
8		Distancia	0 - 500 km	1 km
9		Velocidad aérea	50 - 500 km/h	1 km/h
10		Velocidad de ruta	0 - 850 km/h	0,5 km/h
11	Parámetros meteorológicos	Contenido de agua	0,005 - 3 g/m ³	0,005 g/m ³
12		Humedad relativa	10 - 99 %	5%
13		Temperatura real	- 500 - + 50 °C	0,1 °C
14	Parámetros especiales	Lugar de la siembra		

rol de vuelo. El programa envía una demanda al avión, a la cual el controlador de a bordo responde con un paquete de información. El sistema de tierra recibe esta información, la asimila y la muestra en forma gráfica en el monitor de la computadora de tierra sobre el mapa de la región de trabajo.

Sistema de lanzamiento de pirocartuchos ASO-21

Para la realización de la siembra de las nubes, con los pirocartuchos PV-26-1, se instaló en el avión un sistema consistente en dos complejos de lanzadores del tipo ASO-21. Cada complejo incluye dos vigas con dos casetes con capacidad de 32 cada uno, para 64 pirocartuchos en cada complejo, un relé de tiempo del tipo RV-E7R, una caja de control KU-E7R, un dispositivo de control PU-E7R y equipamiento de prueba y control del sistema. La capacidad total del sistema es de 128 pirocartuchos PV-26.

Las vigas del sistema de lanzamiento se instalan en los portabombas originales del avión AN-26, que están fijados en los reforzamientos frontales del avión. Para instalar las vigas en los portabombas, los especialistas del taller de instalaciones y reparación de la empresa cubana de aviación prepararon las estructuras de fijación y los fuselados aerodinámicos. En cada portabomba se instalaron dos vigas (Fig. 3a). Ver las figuras 3b y c.

Los especialistas de ATTECH elaboraron el esquema eléctrico de conexión del sistema de lanzamiento a la red de alimentación del avión. En colaboración con los especialistas del TIR de Cubana de Aviación, se instaló el panel de control para el manejo del sistema de lanzamiento y también de la alimentación eléctrica de los puestos del propio sistema de siembra y del SMC.

Para apreciar las características técnicas del sistema de lanzamiento ASO-21 instalado en el avión AN-28 ver cuadro 1.

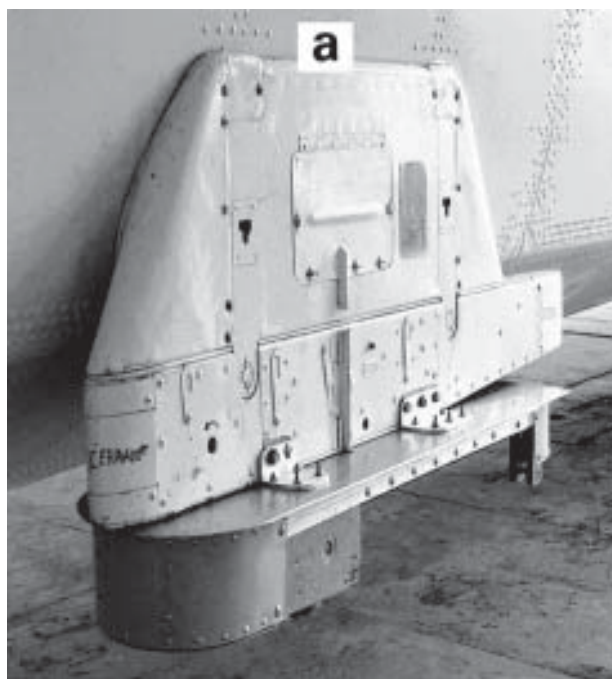


Fig. 3a. Sistema de lanzamiento ASO-21, instalado en los portabombas del avión AN-26.

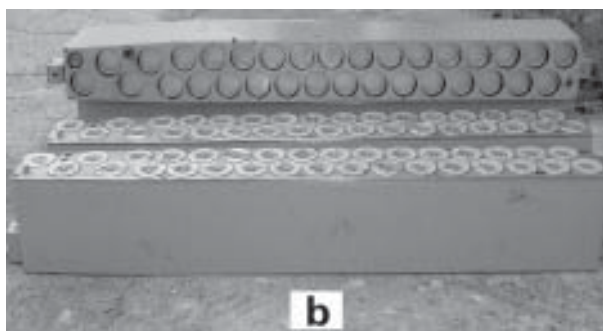


Fig. 3b. Casetes donde se cargan los pirocartuchos antes del vuelo.

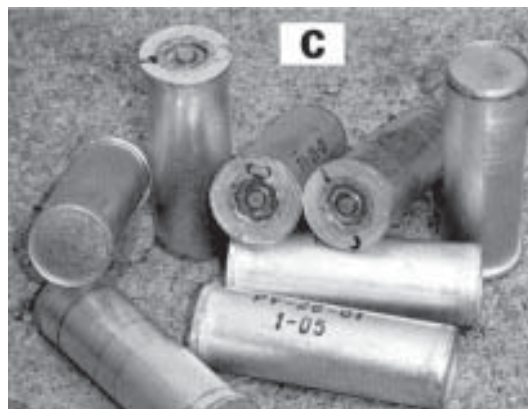


Fig. 3c. Pirocartuchos PV-26-1.

Cuadro 1. Principales características técnicas del sistema de lanzamiento ASO-21 instalado en el avión AN-26

Tipo de pirocartucho	PV-26
Cantidad de vigas (con casetes desmontables)	4
Capacidad de lanzamiento de pirocartuchos de cada viga	32
Capacidad total de lanzamiento de pirocartuchos del sistema	128
Cantidad de pirocartuchos que salen a cada disparo	4 ÷ 16
Intervalo entre la salida de los pirocartuchos de un mismo disparo	0,3; 1 s.
Voltaje de alimentación	27V DC
Máxima potencia requerida para todo el sistema	660 W
Peso total del sistema sin pirocartuchos ni aditamentos de fijación.	25 kg

Características de los pirocartuchos PV-26-1

El cuadro 2 muestra las principales características de los pirocartuchos PV-26-1 utilizados en el experimento de Camagüey, que son el mismo tipo de

pirocartuchos utilizados en el PCMAT, con mayor eficiencia glaciogénica y confiabilidad.

Metodología de siembra de nubes

El radar utilizado en el experimento es un radar convencional de fabricación rusa MRL-5, automa-

Cuadro 2. Características generales de los pirocartuchos PV-26-1

Calibre, mm	26,6
Largo, mm	80
Tiempo de dispersión de humo, seg	60-65
Masa del pirocartucho, g	78
Masa de composición pirotécnica, g	34
Tipo de composición pirotécnica	AD-1 (8 % de AgI)
Salida de los núcleos glaciogénicos de un gramo de composición pirotécnica, g ¹ :	
- A la temperatura de -10 °C	2,0·10 ¹³
- A la temperatura de -6 °C	1,0·10 ¹³
Longitud de la trayectoria de dispersión del aerosol, km	2,0
Tiempo de activación del efecto glaciogénico, min	1

tizado y digitalizado en Cuba (Pérez *et al.*, 1999). Posee longitud de onda de 10,14 cm, y el ancho del haz es de 1,5°. Se mantuvo el monitoreo sobre la región definida por el área de 150 km de radio con centro en el radar, aunque la gran mayoría de las zonas sembradas se mantuvieron dentro del territorio de la provincia de Camagüey. Se sembraron las torres en desarrollo con alturas del tope entre 6 y 8 km en el interior de las corrientes ascendentes. La temperatura en el nivel de siembra estuvo entre los -6,7 °C y los -12,9 °C y los valores máximos de contenido de agua líquida en las nubes al nivel de la siembra variaron entre 0,02 g/m³ y 0,5 g/m³ en 36 % de los casos, entre 0,5 g/m³ y 1,0 g/m³ en 34 % de los casos y fueron mayores que 1,0 g/m³ en el restante 31 % de los casos.

El diseño del experimento y la metodología de seguimiento de las áreas sembradas siguieron los lineamientos generales del experimento de siembra glaciogénica con yoduro de plata en los topes de nubes realizado en Tailandia en la década del 90 (Woodley *et al.*, 2003), adaptados a la tecnología empleada en Cuba y a las características de las nubes cubanas. Los criterios de selección de las nubes experimentales, las técnicas de penetración de nubes y las metodologías de siembra se ajustaron a las recomendaciones del PCMAT. En el trabajo de Pérez *et al.* (2005) se profundiza en el diseño del experimento y la metodología aplicada.

Estimación por radar de la lluvia aportada por las zonas sembradas

En los trabajos de incremento artificial de las precipitaciones y especialmente en nubes convectivas, cuyas precipitaciones presentan una gran variabilidad espacio-temporal, la información de radar juega el papel principal. La utilización de esa infor-

mación permite una alta la efectividad de los vuelos de siembra de nubes, y resulta el medio más eficaz para evaluar el resultado de los trabajos, ya que generalmente la densidad de la red pluviométrica no garantiza medir la lluvia con la precisión necesaria para los experimentos de siembra de nubes convectivas.

El radar utilizado en el experimento es un radar convencional de fabricación rusa MRL-5, automatizado y con salida digital. Posee longitud de ondas de 10,14 cm, sensibilidad mínima de -136 dB/W, máxima potencia del pulso 510 KW, ancho del haz de 1,5°. Se trabajó en un régimen de cuatro revoluciones por minutos y con duración del pulso de 2 microsegundos, el cual está ubicado en la zona central de la provincia de Camagüey, en las coordenadas de 77 °,48',03" W y 21 °,26',15" N.

Este radar se controló mediante un sistema automatizado de adquisición y procesamiento de datos, denominado VESTA, de origen cubano (Pérez *et al.*, 1999).

Se mantuvo el monitoreo sobre la región de trabajo experimental (RTE), definida por el área de 150 km de radio con centro en el radar. Para esto, se hace un registro volumétrico completo (RV) de la capa de formación y desarrollo de nubes cada 60 minutos e inmediatamente después, el operador analiza esa información para determinar la necesidad del inicio de un régimen de observación más frecuente. En el caso de que, a las 17:00 GMT, no se hayan detectado ecos, pero el pronóstico especializado indique alta probabilidad de convección en la tarde, se pasa a esa hora al régimen de un RV cada 30 minutos.

Cuando se observe eco a más de 15 km de la costa, el radar se pasa a régimen de un RV cada 15 minutos. A partir del momento en que se observe

eco sobre tierra, en los límites de la RTE, el radar se pasa a régimen continuo de observación, bajo el que cada 4 ó 5 minutos se realiza un RV, conformado por un conjunto de 16 ángulos verticales iniciando por 0,5 °, 1,5 ° y elevando la antena a continuación cada 1,4 ° hasta el límite de 21,3 °. La culminación del régimen continuo se determina por la ausencia total de ecos sobre en la RTE. En el trabajo de Gamboa Moreira *et al.* (2005) se discute la metodología de medición de lluvia por radar corregida por pluviómetros empleada en el experimento, mientras que en el de Gamboa Romero *et al.* (2005) se expone en detalle la metodología de empleo del radar para la ejecución y la evaluación del experimento.

El experimento se realizó entre los meses de agosto y octubre. Se sembraron 115 nubes, a las que en total se aplicaron 1519 pirocartuchos, para un promedio de 13 por nube. La identificación y seguimiento por radar de las zonas sembradas en el EXPAREX permitió estimar la lámina de lluvia acumulada en las regiones barridas por los sistemas sembrados y compararla con la correspondiente al resto de la región de trabajo experimental cubierta por nubes convectivas, después de calibrar la estimación del radar con una red pluviométrica a través de un coeficiente de conciliación diario (Tabla 2).

En la tabla 2 se utilizó la información del radar MRL-5 calibrada con la red pluviométrica.

EXOGENER

En el EXOGENER las siembras se realizaron aprovechando las corrientes ascendentes de origen orográfico. Se utilizaron generadores terrestres de aerosoles de yoduro de plata basados en el principio de la combustión de una mezcla de dicho reactivo con acetona. Su distribución espacial se realizó atendiendo a las direcciones preferenciales del viento en la mesoescala y a la orografía de manera que los penachos de aerosoles se dirigieran a las zonas de formación e nubes convectivas condicionadas por la orografía de la región (Fig. 1).

Características de los generadores terrestres de yoduro de plata

El equipo generador de yoduro de plata está compuesto de cuatro unidades fundamentales:

- Estanque de gas presurizado.
- Estanque de solución, también presurizado.
- Cámara de combustión.
- Estructura de protección.

Tabla 2. Datos de las zonas sembradas y resultados de la evaluación de la cantidad de lluvias

Fecha	Zonas	Cantidad de nubes sembradas	Lámina de lluvia asociada a las zonas sembradas, mm	Lámina de lluvia en todas las zonas nubosas de la provincia mm	Localización inicial de las zonas sembradas
22/08	Z1	6	–	–	245-270 °, 40-55 km
24/08	Z1	5	5,78	2,62	319-360 °, 29-74 km
25/08	Z1	13	10,79	3,25	220-354 °, 9-51 km
26/08	Z1	5	8,10	2,99	151-336 °, 11-37 km
27/08	Z1	1	–	–	26-29 °, 30-32 km
28/08	Z1	8	5,86	2,42	302-339 °, 59-84 km
01/09	Z1	1	20,09	9,66	317-318 °, 51-53 km
03/09	Z1	5	–	–	135-215 °, 16-59 km
05/09	Z1	2	8,93	5,27	217- 221 °, 25-30 km
09/09		10	–	–	120-345 °, 6-84 km
10/09	Z1	2	27,73	7,69	332-336 °, 44-46 km
16/09	Z1	2	1,84	0,92	289-295 °, 95-106 km
17/09	Z1	10	7,83	3,50	229- 50°, 20-87 km
21/09	Z1	5	19,30	8,77	167-193 °, 20-46 km
	Z2	5	17,09		147-168 °, 44-67 km
22/09	Z1	2	18,90	8,53	252-275 °, 15-40 km
	Z2	6	29,92		295-316 °, 48-81 km
23/09	Z1	12	9,23	3,61	74-248 °, 5-49 km
25/09	Z1	8	18,93	6,18	179-12 °, 1-34 km
	Z2	4	14,91		101-110 °, 69-90 km
04/10	Z1	4	8,85	3,74	179-216 °, 22-34 km
10/10	Z1	5	6,01	2,79	174-209 °, 70-84 km

a) Componente de gas

Dos funciones cumple el estanque de gas, una de ellas fundamental: proporcionar la presión necesaria al estanque con solución, para que esta sea evacuada del equipo y pueda ser combustionada. La segunda función, de menor trascendencia, es la de proporcionar gas para el funcionamiento de una llama piloto, que permita dar el encendido inicial a la combustión de la solución y asegurar que este proceso se mantenga, aun bajo condiciones de viento intenso, cese momentáneo del flujo de solución por alguna obstrucción en el conducto u otra causa.

El circuito de gas se inicia a la salida del estanque, donde se encuentra una llave de paso original de los cilindros con que son entregados por el proveedor de él.

A continuación se ubica un regulador de presión, destinado a bajar la presión de este (aproximadamente 110 PSI), para llegar al estanque de la solución con sólo los 20 a 25 PSI requeridos. Este regulador posee dos manómetros, el primero que indica la presión interna del estanque de gas y el segundo la presión que está proporcionando al estanque de solución.

Luego el circuito de gas tiene una bifurcación. La primera destinada a la presurización del estanque de solución, que comienza con otra llave de paso, que permite controlar la entrada de gas al estanque de solución. La presurización como se mencionara, está destinada a forzar la salida de la solución por el circuito correspondiente, detallado más adelante, hacia la cámara de combustión, donde valga la redundancia, se combustiona para liberar las partículas de yoduro de plata a la atmósfera. Para observar un generador de yoduro de plata ver la figura 4.

La segunda salida de la bifurcación está destinada a una llama piloto, cuya finalidad ya fue mencionada. Contempla una llave de paso y el conducto de cobre para llegar con el gas al piloto, ubicado al interior de la cámara de combustión.

El equipo también contempla la existencia de una llave de paso de gas en la parte trasera superior de él, destinada a despresurizar el equipo para la realización de reparaciones, recargas de solución o mantenimiento.

b) Componente de solución

El circuito de la solución de yoduro de plata con acetona se inicia en el estanque de solución. Este estanque contiene una cantidad importante de solución, que le permite una autonomía de al me-

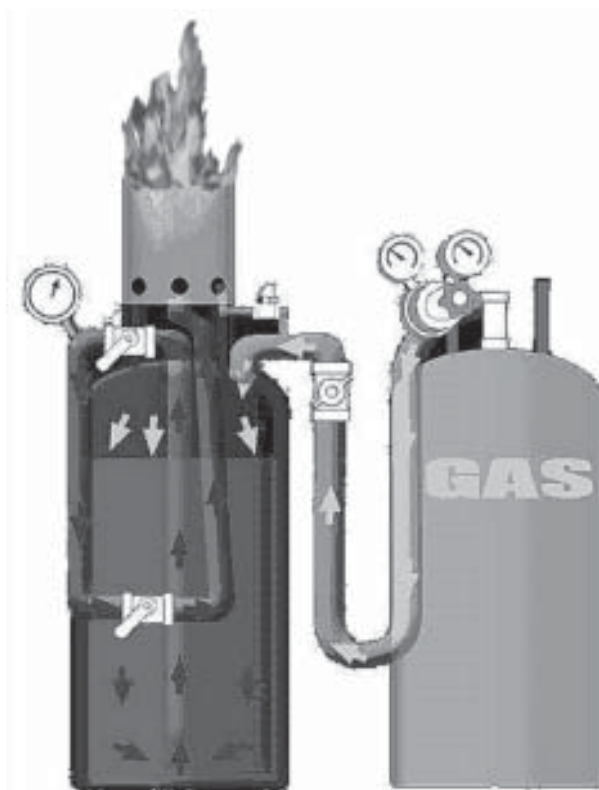


Fig. 4. Esquema de un generador terrestre de yoduro de plata.

nos 20 horas de funcionamiento continuo. El circuito se inicia al fondo del estanque, donde existe la toma de una cañería de cobre, provista del primer filtro, consistente en una malla de acero de 5 micras, por donde comienza a ascender la solución impulsada por la presión interna del gas.

Al salir del estanque se encuentra con la primera llave de paso, cuya finalidad es asegurar que el equipo quede absolutamente sellado cuando no esté en funcionamiento, como también permitir trabajar en el resto del circuito ya sea para mantenimiento o reparaciones, sin tener que descomprimir el estanque. El circuito continúa con una segunda llave de paso, destinada a la operación del equipo (encendido y apagado). La instalación de esta llave lejos de la cámara de combustión es para que, en la eventualidad de una fuga, derrame del líquido o inflamación del equipo (todo lo cual ocurriría en el sector alto de él) permita la posibilidad de accionarla con la distancia suficiente para evitar el riesgo de sufrir quemaduras.

A continuación, el circuito contempla un segundo filtro destinado a evitar el paso de impurezas o partículas que pudieran obstruir la válvula pulverizadora, la que por los extremadamente finos conductos que posee, tiene propensión a obstruirse

con suma facilidad. Este segundo filtro también es de malla de acero de 5 micras. Finalmente, el circuito termina en la válvula pulverizadora de la solución, la que produce la emisión en forma de un cono hueco de 45° y entrega un caudal volumétrico para la combustión de 4 a 5 lts por hora.

Metodología de trabajo

El radar utilizado para la toma de decisiones operativas en el EXOGENER es un radar Doppler marca Gematronik, tipo METEOR 1500S, que está situado muy cerca de la ciudad de Holguín. Tiene longitud de onda de 10,14 cm y ancho del haz de 1°. La frecuencia de registro volumétrico fue de 11 minutos, ya que hubo que limitarla por no contarse con los módulos necesarios para procesar imágenes a mayor frecuencia, lo que impidió utilizar el radar para estimar lámina de lluvia, pero permitió utilizarlo para estimar el desplazamiento de las nubes y sus características.

Originalmente se preveía controlar el encendido y apagado de cada generador desde el Centro de dirección del EXOGENER en la ciudad de Holguín, en dependencia de la información de radar sobre el desarrollo de los ecos, pero esto se cumplió sólo de manera parcial por no contarse con medios de comunicación efectivos en la mayor parte de los generadores. En los casos en que no existían medios de comunicación los operadores de los generadores tenían instrucciones de encender los generadores en caso de formarse nubes convectivas profundas en desarrollo a sotavento del generador, y de mantenerlos encendidos mientras persistiera esta condición.

Este subproyecto, que se realizó entre julio y diciembre, es sumamente difícil de evaluar, ya que no se realiza aleatorización, y el cauce de los ríos está afectado por numerosas represas y trasvases

que dificultan la evaluación por esta vía. Se está trabajando en métodos de evaluación a partir de las variaciones en los patrones de distribución de la lluvia en la región en el período de trabajo y de definición de áreas de control, pero por el momento, el EXOGENER se evalúa cualitativamente en base al comportamiento de la lluvia en el área a beneficiar, definida fundamentalmente por las provincias de Holguín y Santiago de Cuba.

En la figura 5 se muestra el comportamiento de la lluvia (acumulado mensual en mm y porcentaje respecto a la norma por meses) durante los meses de ejecución del proyecto en las provincias involucradas.

Para el análisis debe tomarse en cuenta que en los meses de septiembre y octubre las provincias orientales y en particular Santiago de Cuba, se vieron beneficiadas por las lluvias asociadas a tres tormentas tropicales (Rita, Stan y Wilma), durante cuya influencia no se realizaron operaciones de siembra. No obstante esto, se observa que desde julio hasta octubre, la lluvia acumulada mensualmente en Las Tunas, donde no se realizaron labores de siembra de nubes, fue consistentemente menor que en todas las otras provincias mostradas en el gráfico. Si se analiza el comportamiento de la lluvia relativa se observa el aparente efecto positivo de la siembra en la provincia de Holguín en este indicador.

Conclusiones

Como conclusión general de la etapa exploratoria del experimento EXPAREX se puede afirmar que se demostró la factibilidad de la realización de un experimento confirmatorio de 3 a 4 años de duración en el Polígono meteorológico experimental de Camagüey, aplicando las metodologías de-

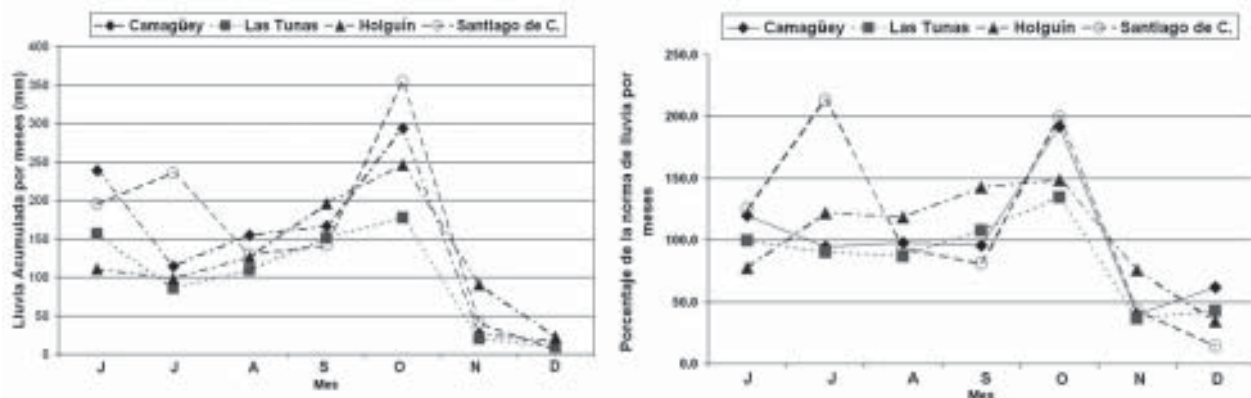


Fig. 5. Comportamiento de la lluvia mensual absoluta y relativa para los meses desde junio hasta diciembre de 2005.

sarrolladas en el 2005. A partir de esto, se recomendó la utilización operativa de la técnica de siembra de nubes convectivas aplicada en el EXPAREX al COSINAV, que se desarrolla en el 2006 en las provincias de Holguín y Santiago de Cuba.

El comportamiento de la lluvia en Holguín respecto a la vecina provincia de Las Tunas parece indicar un resultado positivo de EXOGENTER, aunque se requiere de diseñar un método de evaluación estadístico para argumentar más sólidamente esta conjetura.

Bibliografía

- Barnston A., J.A. Flueck and R. Biondini (1983): «The Florida Area Cumulus Experiment second phase (FACE II)». Part. II: Replicate and Confirmatory Analysis, *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1529-1540.
- Bigg, E.K. (1997): An independent evaluation of South African Hygroscopic cloud seeding experiment 1991-1995. *Atmos. Res.*, 43, 111-127.
- Bruintjes, R.T. *et al.* (1999): «Program for the Augmentation of Rainfall in Coahuila (PARC): Overview and Desing. Preprints 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification», Chiang Mai, Thailand, pp. 53-56.
- Gagin, A. and J. Newman (1981): «The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of results», *J. Appl. Meteor.*, 20, 1301-1311.
- Gamboa Moreira A., F. Gamboa Romero y S. Novo (2005): «Determinación cuantitativa de las precipitaciones por radar ajustada según la información pluviométrica». III Congreso Cubano de Meteorología, 5 al 9 de diciembre de 2005, La Habana, Cuba.
- Gamboa Romero F.; C.A. Pérez Sánchez; D. Martínez Castro y A. Gamboa Moreira (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». III Congreso Cubano de Meteorología, 5 al 9 de diciembre de 2005, La Habana, Cuba.
- Koloskov B. *et al.* (1996): «Results of Experiments on Convective Precipitation Enhancement in the Camagüey Experimental Area. Cuba». *Jour. Appl. Meteor.*, 35 (9): 1524-1534.
- Martínez D., C. Pérez, V. Believ, and V. Petrov (1989): «Thermodynamics characteristics of tropical convective clouds». *Tropicheskaya Meteorologia*, Trudy IV Mezhdunarodnovo Simpoziuma, L. Guidrometeoizdat, 350360.
- Mason B. J. (1971): *The Physics of clouds*. 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 671 p.
- Mather, G. K.; D. E. Terblanche; F. E. Steffens and L. Fletcher (1997): «Results of the South African cloud seeding experiments using hygroscopic flares». *J. Ap. Meteor.*, 36, 1433-1447.
- OMM (2001): «Declaración de la OMM sobre la situación de la modificación artificial del tiempo». En informe final abreviado de la 53 reunión del Consejo Ejecutivo (Anexo III).
- Pérez, C.; D. Martínez and V. Petrov (1992): «Microstructure, mixing and turbulence in cumulus clouds over Cuba and the Caribbean Sea. Proceedings of the WMO Workshop on Cloud Microphysics and Applications to Global Change», WMO/TD-537, Toronto, Canadá, pp. 254-256.
- Pérez C. A., *et al.* (2005): «Diseño del experimento cubano para el incremento artificial de la lluvia en áreas extensas». III Congreso Cubano de Meteorología. 5 al 9 de diciembre del 2005, La Habana, Cuba.
- Pérez, M., *et al.* (1999): «Reengineering MRL-5 for the Cuban Weather radar Network». Montreal, Quebec, Canada, 29 th International Conference on Radar Meteorology. Am. Met. Soc. 12-16 de julio de 1999, pp. 811-814.
- Rosenfeld D., P. Sudhicoses, W. Sukanjanaset, S. Ruangsuttinaruparp and W. Khantiyanan (1999): «The Thailand cold-cloud seeding experiment: Results of statistical evaluation. Preprints 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification, Chian Mai, Thailand, pp. 25-28.
- Silverman, B.A. (1999): «An Independent Statistical ReEvaluation of South African Hygroscopic Flare Seeding Experiment. Preprint 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification», Chiang mai, Thailand, pp. 45-48.
- Valdés, M., *et al.* (1992): «Aumento Artificial de las precipitaciones por siembra de nubes convectivas en el trópico», *La meteor. mundo Iberoamericano*, 2 1118.
- Woodley, W.L., *et al.* (1982): «Rainfall results of the Florida Area Cumulus Experiment, 1970-1976». *J. Appl. Meteor.*, 21, 139-164.

Agradecimientos

El colectivo de autores desea expresar su reconocimiento al Gobierno de la República de Cuba y en especial a su Instituto de Aeronáutica Civil por su invaluable apoyo, tanto financiero como organizativo y moral, que ha hecho posible el renacimiento de la actividad de modificación artificial del tiempo en Cuba, y en especial las investigaciones en ese campo. Para la ejecución del experimento resultó imprescindible la colaboración de todo el Centro Meteorológico de Camagüey, y en especial del Centro de Radares y el Departamento de Pronósticos.

Abstract

Considering the positive results of previous experiments, in 2005 started the Rain Enhancement by Cloud Seeding Project. In its first year, this Project was composed by two «subprojects» with different characteristics. The one with more scientific weight is the Randomized Convective Cloud Seeding Experiment in Extended Areas who is being carried out in the province of Camagüey (EXPAREX). In this experiment, the experimental unit is a floating area with fixed dimensions inside which all convective cells with certain conditions are seeded (actually or simulated) following a randomization scheme. The second subproject is the Operational Experiment on Cloud Seeding using ground-based silver iodide generators in the Cauto River Basin (EXOENTER), which main objective is to enhance rainfall as much as possible over the Cauto Basin to increase the flow of the river and the water intake of the water reservoirs and in the Holguin province as a whole. The application of this method in 2005 seems to have exerted positive influence in the rainfall regime in the target region.