

PROYECTO DE INCREMENTO ARTIFICIAL DE LA LLUVIA POR SIEMBRA DE NUBES EN CUBA. RESULTADOS PRELIMINARES DEL 2005.

Daniel Martínez¹, Carlos A. Pérez¹, Félix Gamboa¹, Guillermo Puente¹, Ernesto Chang¹, Ibis Rivero¹, Graciela Angulo¹, Victor Petrov², Boris Koloskov², Bagrat Danielian² y Miguel Martínez³

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 dicho río y el flujo de agua hacia las presas asociadas al mismo. La aplicación de este método en el 2005 parece haber tenido una influencia positiva en el régimen de lluvia de la región.

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.

Palavras chaves: sementeira de nuvens; chuva artificial

INTRODUCCION

Los intentos de incrementar la lluvia en Cuba mediante la siembra de nubes datan de mediados del siglo pasado, 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). En los primeros años (1979 – 1981) los esfuerzos se dirigieron a seleccionar el sitio adecuado y la estación del año apropiada, para

¹ Instituto de Meteorología. Cuba. Ap. 17032. Tel. 537-8813411. daniel.martinez@insmet.cu. ² Agency for Atmospheric Technologies. Novovagankovsky pereulok, ed. 8, 123242, Moscú, Rusia. Tel.: +7 (495) 255-23-72 atech@atech.ru.

³ HIDROMET S.A., Moneda 1542, Santiago de Chile. Tel. 562-4918202 hidromet@chile.com.

hacer una evaluación preliminar de la Física de las Nubes y conducir un experimento exploratorio en la provincia de Camagüey y en los meses de verano para evaluar la respuesta de nubes convectivas tropicales superenfriadas a la siembra con yoduro de plata (1982 – 1985). En el período desde 1986 hasta 1990, se realizó la fase confirmatoria del experimento, que alcanzó los siguientes resultados:

Para las agrupaciones nubosas con área de hasta 400 km², la siembra incrementó el tiempo de vida en un 21 %, la altura máxima en un 17 %, el área en un 28 % y el volumen de lluvia en un 65 %, todo con una confiabilidad estadística mayor al 95 % (Koloskov et al.,1996).

La motivación principal para la propuesta del presente Proyecto consiste en culminar la etapa de siembra masiva aleatorizada en área extensas del PCMAT y a la vez, introducir en la práctica los resultados preliminares del mismo y otras técnicas alternativas de siembra de nubes. Para esto se planificaron en 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 dicho río y el acumulado de las presas asociadas al mismo, y 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.



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.

Durante la temporada experimental de 2005, en el EXPAREX se empleó un avión AN-26 instrumentado como plataforma para la siembra de nubes y la medición de sus parámetros físicos. 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.

Metodología de siembra de nubes.

Las siembras se realizaron con pirocartuchos de yoduro de plata de fabricación rusa, del tipo PV-26-1 similares, pero más eficientes que los empleados en el PCMAT en la década del 80. Los mismos dispersan 34 gramos de composición pirotécnica con un 8% de yoduro de plata y una salida de núcleos glaciogénicos de $2,0 \cdot 10^{13}$ núcleos por gramo a -10°C .

El radar utilizado en el experimento es un radar convencional de fabricación rusa MRL-5, automatizado y digitalizado en Cuba. (Pérez et al., 1999). El mismo 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 $-6,7^{\circ}\text{C}$ y los $-12,9^{\circ}\text{C}$ y los valores máximos de contenido de agua líquida en las nubes al nivel de la siembra variaron entre $0,02 \text{ g/m}^3$ y $0,5 \text{ g/m}^3$ en el 36% de los casos, entre $0,5 \text{ g/m}^3$ y $1,0 \text{ g/m}^3$ en el 34% de los casos y fueron mayores que $1,0 \text{ g/m}^3$ 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. (2006) se profundiza en el diseño del experimento y la metodología aplicada.

Estimación por radar de la lluvia aportada por las zonas sembradas.

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 1).

Tabla 1. Datos de las zonas sembradas y resultados de la evaluación de la cantidad de lluvia aportada por las mismas utilizando la información del radar MRL-5 calibrada con la red pluviométrica.

| 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 |

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)

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.

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 Fig. 2 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 en el mismo.

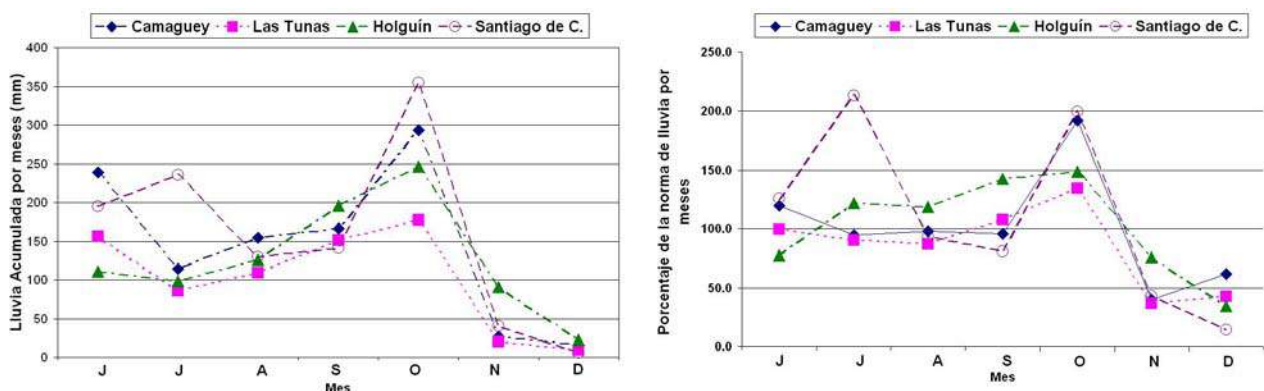


Fig 2. Comportamiento de la lluvia mensual absoluta y relativa para los meses desde junio hasta diciembre del 2005.

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 analizamos el comportamiento de la lluvia relativa observamos el aparente efecto positivo de la siembra en la provincia de Holguín en este indicador.

6. Conclusiones

1. 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 desarrolladas 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.
2. El positivo 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Pérez, C. A., D. Martínez, F. Gamboa, V. Petrov, B. Koloskov, B. Danielan 2006: Diseño del experimento de siembra aleatorizada de nubes convectivas en áreas extensas en Camagüey, Cuba. (En este volumen)

Pérez, M., O. Rodríguez, A. Peña, R. Naranjo, L. Fernández, A. Barreiro, A. Martínez, 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.

Woodley, W.L, D. Rosenfeld and B.A. Silverman, 2003: Results of on-top glaciogenic cloud seeding in Thailand. Part I: The demonstration experiment. Jour. Appl. Meteor., 42, 7, 920-938.