

Inducción de lluvia mediante sembrado de nubes con yoduro de plata en la región norte-centro de México en la temporada de lluvia 2012*

Stimulation of rain using silver iodide cloud-seeding over northern central Mexico during the 2012 wet season

Guillermo Medina-García^{1§}, Francisco G. Echavarría-Chairez¹, Gabriel Diaz-Padilla², José Ariel Ruiz-Corral³, Jesús Soria-Ruiz⁴ e Ignacio Sánchez-Cohen⁵

¹INIFAP Campo Experimental Zacatecas, km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, Calera, Zacatecas, 98600, México. (echavarría.francisco@inifap.gob.mx). ²INIFAP Campo Experimental Cotaxtla, km 34.5 Carretera Veracruz-Córdoba, Medellín de Bravo, Veracruz, México. (diaz.gabriel@inifap.gob.mx). ³INIFAP Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, km 8 Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, Tepatitlán, Jalisco, 47600, México. (ruiz.ariel@inifap.gob.mx). ⁴INIFAP Sitio Experimental Metepec, km. 4.5 Carretera Toluca-Zitácuaro, Vialidad Adolfo López Mateos s/n, Zinacantepec, Estado de México, 51350, México. (soria.jesus@inifap.gob.mx). ⁵INIFAP CENID RASPA, km 6.5 margen derecha canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, 35140, México. (sánchez.ignacio@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: medina.guillermo@inifap.gob.mx.

Resumen

Desde octubre de 2010 en México se presentó una temporada de sequía, acentuándose en el verano de 2011. En la temporada de lluvia 2012 se implementó un programa de inducción de lluvia para mitigar los efectos de la sequía (21 de junio al 10 de septiembre). El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de yoduro de plata para inducir un incremento en la cantidad de lluvia. El trabajo se desarrolló en los estados de Zacatecas y Aguascalientes, México, para lo cual se realizaron 46 vuelos. Como medio de verificación de la precipitación se utilizaron estaciones climáticas automáticas. El promedio de lluvia en 24 h en todas las fechas de inducción fue de 11.9 mm y el promedio en el tiempo de inducción fue 3.5 mm (29.4%, $p < 0.05$). La suma de la precipitación en 24 h en todas las fechas fue de 81.0 mm, mientras que en el periodo de inducción fue 26 mm (32.1%). La precipitación promedio histórica de 1961 a 2009 en la temporada de lluvia es de 249.7 mm, la registrada durante la temporada 2012 fue 213.1 mm, esta cantidad se encuentra dentro del rango de precipitación normal pero resultó menor al promedio, lo cual representa entre 10 y 50% debajo de lo normal en la mayor parte del área de estudio. Pese al programa

Abstract

During October 2010, a drought was initiated in Mexico and worsened through the summer of 2011. A silver iodide (AgI) cloud-seeding program aimed at easing the effects of the drought was implemented during the 2012 wet season (21 June to 10 September). This study assesses the effect of that program in enhancing precipitation. The cloud-seeding program was conducted in the Mexican states of Zacatecas and Aguascalientes, and involved 46 cloud-seeding flights. Automatic weather stations were used to monitor the occurrence of rainfall. The average 24-hour rainfall on all seeding dates was 11.9 mm, and the average rainfall during the seeding period was 3.5 mm (29.4%, $p < 0.05$). The total 24-h precipitation on all dates amounted to 81 mm, with 26 mm being recorded during the seeding periods (32.1%). The average historical precipitation during the rainy season recorded for the years 1961-2009 was 249.7 mm, whereas during the 2012 wet season the rain amount recorded was 213.1 mm. Although within the normal precipitation range, this value falls below the average, being 10-50% less than normal values in most of the study area. Despite the seeding program,

* Recibido: mayo de 2014
Aceptado: septiembre de 2014

de inducción de lluvia, la precipitación registrada durante la temporada no fue generalizada y resultó inferior a lo normal, lo cual indica que esta inducción artificial de lluvia, al menos para su uso en la agricultura, no tiene un impacto significativo en el aumento de la cantidad de precipitación.

Palabras clave: incremento de lluvia, inducción de lluvia, yoduro de plata.

Introducción

La sequía es una condición natural en algunas regiones del mundo y no se debe ver como un problema, sino como una condición natural, producto principalmente de la ausencia o irregularidad de la precipitación y el exceso de la evaporación. México es muy vulnerable a la acción de las sequías debido a su localización geográfica. Se sabe que desde las primeras civilizaciones prehispánicas, se padecía de este fenómeno en sus diferentes manifestaciones. Desde octubre del 2010 en México se presentó una temporada de sequía, acentuándose en el verano de 2011, esto se debió a la anomalía presentada en las lluvias de verano. El estado de Zacatecas se localiza en la región semiárida del país, donde las sequías son frecuentes (Medina *et al.*, 2006) y en el mes de abril de 2011 fue declarado bajo una condición de sequía severa. Durante el mes de mayo, la condición de sequía permaneció y cubrió 86% del país. En los meses de junio, julio y agosto prevaleció la condición de sequía extrema en Zacatecas (Giner *et al.*, 2011).

Las actividades de modificación del clima con frecuencia se inician en tiempo de sequía, cuando existe una necesidad desesperada de agua (Bruitjes, 1999). El inicio de la era moderna de la modificación del clima comenzó con los descubrimientos de Schaefer en 1946 y Vonnegut en 1947 que encontraron que las nubes súper frías de agua líquida, se podrían convertir a cristales de hielo usando yoduro de plata (AgI) o hielo seco (Pendick, 2000). Para las décadas de 1960 y 1970, la estimulación artificial de lluvia se esparció por todo el mundo, incluyendo México. (Rangno y Hobbs, 1995). La siembra de nubes pretende potenciar un proceso natural que ya existe en la atmósfera, puede aumentar la formación de precipitación en nubes que se precipitan ya o están a punto de hacerlo. No puede ser utilizado para formar nuevas nubes o convertir pequeñas nubes no precipitantes, en nubes de lluvia. Colocar los químicos sin las condiciones de humedad, de presencia de gotas de nube o de corrientes ascendentes no produce ningún efecto. Sin embargo,

precipitation recorded during the 2012 wet season was not widespread and proved to be lower than normal, indicating that the cloud-seeding did not have a significant impact on increasing the amount of rainfall, at least not regarding its use for agricultural purposes.

Keywords: cloud-seeding, rainfall increase, silver iodide.

Introduction

Drought is a natural condition in many regions of the world, and should not necessarily be regarded as a problem but as a normal situation produced mainly by the absence or irregularity of rainfall and by excessive evaporation. Due to its geographical location, Mexico is very vulnerable to droughts, which have had to be endured from the earliest settlement of pre-Hispanic civilizations. A drought season started in Mexico during October 2010 and became more critical during the summer of 2011 due to summer rainfall anomalies. The state of Zacatecas, located in the semiarid region of Mexico where droughts are known to be frequent (Medina *et al.*, 2006), was declared in April 2011 to be under severe drought conditions. These conditions continued through May and extended to cover 86% of the country. During the months of June, July, and August 2011 this condition of extreme drought persisted in Zacatecas (Giner *et al.*, 2011).

Weather-modification activities have frequently been undertaken during droughts, when there is a desperate need for water (Bruitjes, 1999). Modern weather modification began with the discoveries of Schaefer in 1946 and Vonnegut in 1947, who found that supercooled liquid water clouds could be changed into ice crystals using silver iodide (AgI) or dry ice (Pendick, 2000). By the 1960's and 1970's, artificial stimulation of rain had become widespread around the world, and Mexico was no exception (Rangno and Hobbs, 1995). Cloud-seeding aims to enhance a natural process already existing in the atmosphere. Such seeding can increase rainfall from clouds about to precipitate or already precipitating. However, it can not be used to form new clouds nor to transform nonprecipitating clouds into rain clouds. No effect will be achieved by applying chemicals if the moisture conditions are inadequate, if no drops are present in the clouds, or if there are no ascending currents. Nevertheless, even slight increases in rainfall can be important in subtropical regions where rainfall is scarce

incluso pequeños aumentos pueden ser importantes para las regiones subtropicales donde la lluvia es escasa. (Rosengaus y Bruintjes, 2002; Levin, 2009). No todas las nubes pueden ser susceptibles de siembra, esta oportunidad parece estar limitada a nubes súper frías continentales con temperaturas entre -10° y -20° C, y con cantidades significativas de agua súper fría (Cooper y Lawson, 1984).

El propósito esencial de la estimulación artificial de lluvia por sembrado de nubes es, precisamente, colocar una proporción adecuada de núcleos de condensación (en sembrado higroscópico) o de cristalización (en sembrado glaciogénico) a fin de hacer más eficientes los mecanismos de conversión de vapor de agua a las fases líquida y sólida, respectivamente. Claro está que el incremento posible depende de la existencia natural de estos núcleos en la atmósfera (Rosengaus y Bruintjes, 2002). Muchas de las técnicas tradicionales de estimulación artificial de lluvia con yoduro de plata o hielo seco desarrolladas en países de latitudes medias y para lluvias de invierno consideran como su blanco ideal tormentas que se encuentran en su mayor parte en los niveles atmosféricos por arriba del nivel de congelación, puesto que en estos países y temporadas, este nivel se encuentra relativamente cerca del suelo.

En regiones tropicales, o inclusive sub tropicales en verano, la mayor parte de las tormentas en desarrollo está en regiones por abajo del nivel de congelación, ya que éste se encuentra a varios kilómetros sobre el nivel del mar por lo que no presentan fracciones significativas de cristales de hielo. No es pues sorprendente que la aplicación indiscriminada de estas técnicas glaciogénicas en regiones tropicales y subtropicales no hayan producido resultados positivos contundentes (Rosengaus y Bruintjes, 2002).

La siembra glaciogénica dispersa materiales productores de hielo en una nube que contiene gotas de agua a una temperatura por debajo de 0° C, estimulando la precipitación (Levin, 2009). Desde los primeros experimentos glaciogénicos de siembra de nubes en 1946 mediante la dispersión de hielo seco desde un avión entre las nubes, numerosos experimentos se han realizado con resultados diversos (Edwards y Evans, 1968; Gagin y Neuman, 1981; Braham 1986; Gabriel y Rosenfeld, 1990; Laiguang y Yangang, 1995). Varios agentes de siembra se han utilizado pero los más comunes son el uso de yoduro de plata (AgI) y hielo seco, ambos materiales aumentan las concentraciones de cristales de hielo en las nubes, ya sea por núcleos de nuevos cristales o gotitas de la nube congeladas (Hydro Tasmania, 2008).

(Rosengaus and Bruintjes, 2002; Levin, 2009). Not all clouds are susceptible to seeding, being limited to supercooled continental clouds with temperatures of -10 to -20° C and with significant amounts of supercooled water (Cooper and Lawson, 1984).

The concept behind artificially stimulating rain through cloud-seeding is to emplace an adequate proportion of condensation nuclei (hygroscopic seeding) or ice crystals (glaciogenic seeding) to render conversion mechanisms more efficient for transforming water vapor into liquid and solid phases, respectively. Possible increases in rainfall clearly depend on the natural existence of these nuclei in the atmosphere (Rosengaus and Bruintjes, 2002). Traditional techniques of artificial stimulation with AgI or dry ice, developed in mid-latitude countries and for winter rainfall, consider as an ideal target those storms found mainly at atmospheric levels with temperatures above freezing, since these levels are found relatively close to the ground in such countries during such seasons. In tropical or even subtropical regions during the summer, most developing rain storms are located in areas below the freezing level, because this level is found several kilometers above the sea and therefore these clouds do not present significant ice-crystal fractions. The indiscriminate application of glaciogenic techniques in these regions has not produced strong positive results (Rosengaus and Bruintjes, 2002).

Glaciogenic seeding disseminates ice-producing materials into clouds containing water drops and with temperatures below 0° C, stimulating rainfall (Levin, 2009). Many other experiments releasing dry ice among clouds from an aircraft have been conducted with varied results since the first glaciogenic seeding experiments in 1946 (Edwards and Evans, 1968; Gagin and Neuman, 1981; Braham 1986; Gabriel and Rosenfeld, 1990; Laiguang and Yangang, 1995). Several seeding agents have been used, but the most common have been AgI and dry ice. Both of these chemicals increase the concentrations of ice crystals in clouds, either as new crystal nuclei or as frozen cloud droplets (Hydro Tasmania, 2008).

Hygroscopic seeding disperses large hygroscopic particles (salt particles) into a cloud. The object of artificially introducing condensation nuclei is to condense water vapor in order to increase the size of water particles into drops (Murty 1989; Levin, 2009). The disadvantage of this method is the large amounts of salt that are necessary in the process (Murty 1989). The technique is widely used in Southeast

La siembra higroscópica dispersa grandes partículas higroscópicas (partículas de sal) en una nube. El objetivo de la introducción artificial de los núcleos de condensación, es que el vapor de agua se condense, provocando que las partículas de agua crezcan rápidamente y produzcan gotas (Murty 1989; Levin, 2009). La desventaja de este método es que grandes cantidades de sal son necesarias (Murty, 1989). Aunque esta técnica es ampliamente utilizada en los países en el sureste de Asia, numerosos experimentos se han realizado en otros países con resultados diversos (Braham 1986; Murty 1989; Rosengaus y Brintjes, 2002; Rosengaus y Calderón, 2004).

Los resultados generalmente han sido poco concluyentes, aunque algunos sugirieron efectos positivos. Estudios de inducción de lluvia higroscópica se implementaron en Sudáfrica (1991-1996), Tailandia (1995-1998) y México (1996-1998), los resultados iniciales fueron prometedores; sin embargo, experimentos posteriores no los corroboran. No obstante, los resultados de estos estudios sugieren que la lluvia en ocasiones puede ser aumentada (Levin, 2009).

En México los programas de inducción de lluvia han utilizado el sembrado glaciogénico a pesar de no ajustarse bien a las características de tormentas de verano (Rosengaus y Calderón, 2004). La Compañía Mexicana de Luz y Fuerza llevó a cabo experimentos de siembra de nubes con yoduro de plata desde 1949 hasta 1962 sobre la cuenca Necaxa y la parte alta del río Lerma. Las clases con menor precipitación registraron un aumento de lluvia, pero las categorías superiores registraron una disminución (Pérez and Ahumada, 1963).

Entre 1978 y 1982 en de la cuenca del río Nazas, en la región de La Laguna en México se llevó a cabo un programa de inducción de lluvia con el fin de aumentar las aportaciones de agua de lluvia a la presa Francisco Zarco, (El siglo de Torreón, 1978). Después de algunos años el programa terminó con resultados de incrementos de 15 a 20% en el embalse de las presas "El Palmito" y Francisco Zarco (El siglo de Torreón, 1982). De igual manera se han llevado a cabo programas de inducción de lluvia en los estados de Durango (1999) y Zacatecas (2001), pero no se cuenta con publicaciones en revistas especializadas. En respuesta a las severas condiciones de sequía a principios de 1990 en el norte de México, en la región Monclova, Coahuila, un programa científico se inició para evaluar la viabilidad de incrementar la lluvia a través de técnicas de siembra higroscópica de nubes. El programa se llevó a cabo de 1996 a 1998. Se encontró que las precipitaciones fueron mayores para las tormentas sembradas (Brant y Brintjes, 1999; Rosengaus y Calderón, 2004).

Asia, although many experiments have also been conducted in other countries, yielding varied results (Braham 1986; Murty 1989; Rosengaus and Brintjes, 2002; Rosengaus and Calderon, 2004). Although some of the experiments have suggested positive effects, the results have generally been inconclusive. Hygroscopic cloud-seeding studies have also been implemented in South Africa (1991-1996), Thailand (1995-1998), and Mexico (1996-1998), and even though their initial findings were promising, more recent experiments have not supported them. Nevertheless, results from these new studies suggest that rainfall can be increased on some occasions (Levin, 2009).

In Mexico, cloud-seeding programs have made use of glaciogenic seeding techniques, even though they are not particularly favored by summer storm characteristics (Rosengaus and Calderon, 2004). The Mexican Light and Power Company (Compañía Mexicana de Luz y Fuerza) conducted cloud-seeding experiments with AgI from 1949 to 1962 over the Necaxa watershed and the upper Lerma River valley. Lower-precipitation categories registered rainfall increases, but higher-precipitation categories recorded decreases (Pérez and Ahumada, 1963).

Between 1978 and 1982, a cloud-seeding program was conducted in the area of the Nazas River basin in the La Laguna region in northeastern Mexico, aimed at increasing the contribution of rainfall to the Francisco Zarco Dam reservoir (El Siglo de Torreón, 1978). After several years, the program ended, having led to a 15-20% volume increase in the reservoirs of the El Palmito and Francisco Zarco dams. Similar seeding programs were also conducted in the states of Durango (1999) and Zacatecas (2001), but their findings have not been published. At the beginning of 1990, in response to severe drought conditions in the Monclova (Coahuila) region in northern Mexico, a scientific program was launched to assess the feasibility of increasing rainfall through hygroscopic cloud-seeding techniques. The seeding program was implemented from 1996 to 1998, and it was found that precipitation amounts were higher for seeded rain storms (Brant and Brintjes, 1999; Rosengaus and Calderón, 2004).

Although several international studies have reported positive results on enhancing rainfall by cloud-seeding, no scientific consensus has been reached with regard to the effectiveness of cloud-seeding in modifying weather (U.S. Weather Modification Research and Operations, 2003; Orville *et al.*, 2004). An overall view of existing research programs

Apesar de que diversos estudios, a nivel internacional, reportan resultados positivos en el incremento de precipitación con la siembra de nubes, no existe un consenso científico sobre la eficacia de la siembra de nubes (U.S. Weather Modification Research and Operations, 2003; Orville *et al.*, 2004). Una visión general de los programas de investigación existentes muestra que, mientras que la siembra de nubes afecta a los procesos micro físicos de las nubes, hay poca evidencia de que afecta la cantidad de lluvia que cae sobre el suelo (Levin, 2009). En este contexto el objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de yoduro de plata en los estados de Zacatecas y Aguascalientes en la temporada de lluvia del año 2012.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló durante la temporada de lluvia 2012 en las zonas agrícolas más importantes de los estados de Zacatecas y Aguascalientes, México. Se realizaron 46 vuelos para la inducción de lluvia con yoduro de plata por un total de 90 horas. En cada evento se registró la fecha del vuelo, hora de inicio, hora de final del vuelo, hora de inicio de la aplicación, hora final de la aplicación, registro de la ruta de vuelo con GPS. El periodo de estudio fue del 21 de junio al 10 de septiembre de 2012.

Diariamente se consultó el servicio de satélite en la dirección <http://weather.rap.ucar.edu/satellite/> para observar la formación y el avance de la nubosidad, con imágenes reportadas por el satélite cada 15 minutos. Al mismo tiempo que las observaciones satelitales, se hicieron observaciones visuales a nivel local para identificar el tipo de nubosidad, sabiendo que las nubes adecuadas para la inducción son los cúmulos. Cuando se observó la suficiente formación de nubes tipo cúmulos en el área de interés, tanto en la imagen de satélite como en las observaciones visuales, se inició el vuelo, de lo contrario no se realizó. También se verificó la probabilidad de ocurrencia de lluvia en el sitio de interés, considerando el criterio de un mínimo de 30 y un máximo de 70% de probabilidad para realizar un vuelo de inducción de lluvia.

La aplicación se realizó con un avión bimotor equipado con dos generadores, acoplados en la parte inferior de cada una de las alas, cada generador con un depósito de 26 litros, con una mezcla de yoduro de plata y acetona. Cuando el avión llegó justo abajo de las nubes, se encendieron los generadores y mediante combustión se liberó el yoduro de plata, que al estar caliente sube hacia las nubes. Después de 15 a 30 min

indicates that even though cloud-seeding influences the microphysical processes occurring in clouds, there is very limited evidence that it affects the amount of rain falling on the ground (Levin, 2009). In this context, the objective of the present study was to assess the efficacy of AgI applications in the Mexican states of Zacatecas and Aguascalientes during the 2012 wet season.

Materials and methods

This work was developed during the 2012 rainy season in the major agricultural areas of the Mexican states of Zacatecas and Aguascalientes. Forty-six seeding flights with AgI were made, totaling 90 hours. Data registered for each event were the flight date, flight start and end times, seeding start and end times, and GPS-recorded flight routes. The study period of interest was 21 June to 10 September 2012.

The website <http://weather.rap.ucar.edu/satellite/> was consulted daily to monitor how clouds formed and traveled as shown by images reported by the satellite service every 15 min. Concurrently with satellite-image observations, visual inspections were made at a local level to identify cloud types, and cumulus clouds in particular as they are favorable for seeding. No flight was started until sufficient cumulus-type cloud formations were observed in the target area both in satellite images and through on-site inspections. Also, the probability of precipitation occurrence at the target site was determined; if the probability lay within the range of 30-70%, then a cloud-seeding flight was conducted.

Seeding was performed using a twin-engined airplane equipped with a generator mounted under each wing. A mixture of AgI and acetone was carried inside a 26-liter tank in each generator. When the plane was positioned directly under the clouds, the generators were started so that AgI could be released through combustion and thereby forced to travel upward into the clouds. According to the company performing the applications, depending on weather and cloud conditions, precipitation occurred 15 to 30 minutes after seeding had begun.

As a means for verifying rainfall, data were obtained from the agroclimatic monitoring networks of the Mexican National Institute for Agricultural, Livestock, and Forestry Research (INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones

(según la compañía que realizó la aplicación) y dependiendo de las condiciones del clima y de las nubes, se puede generar la precipitación.

Como medio de verificación de la precipitación se utilizó las redes de monitoreo agroclimático del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Fundaciones Produce (FP) Zacatecas y Aguascalientes. También se recopilaron los datos de la red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Zacatecas y Aguascalientes.

Las rutas de los 46 vuelos y las estaciones climáticas de los estados de Zacatecas y Aguascalientes, tanto de la CONAGUA como de INIFAP-FP, se presentan en la Figura 1A, de las cuales se seleccionaron las estaciones automáticas ubicadas dentro del área de influencia de cada ruta, quedando finalmente como se muestra en la Figura 1B.

Forestales, Agrícolas y Pecuarias) and the Zacatecas and Aguascalientes Produce Foundations (FP, Fundación Produce). Data were also obtained from the Zacatecas and Aguascalientes National Water Commission (CONAGUA, Comisión Nacional del Agua) weather station network in Zacatecas and Aguascalientes.

Figure 1A presents all 46 flight routes as well as the locations of the CONAGUA and INIFAP-FP weather stations located in Zacatecas and Aguascalientes. Figure 1B shows only the automatic stations that were eventually selected within the area of influence of each route.

Definition of measurement criteria

The INIFAP-FP automatic station networks record data every 15 min and, in addition to rainfall amounts, they also provide the hour in which precipitation occurs. Therefore,

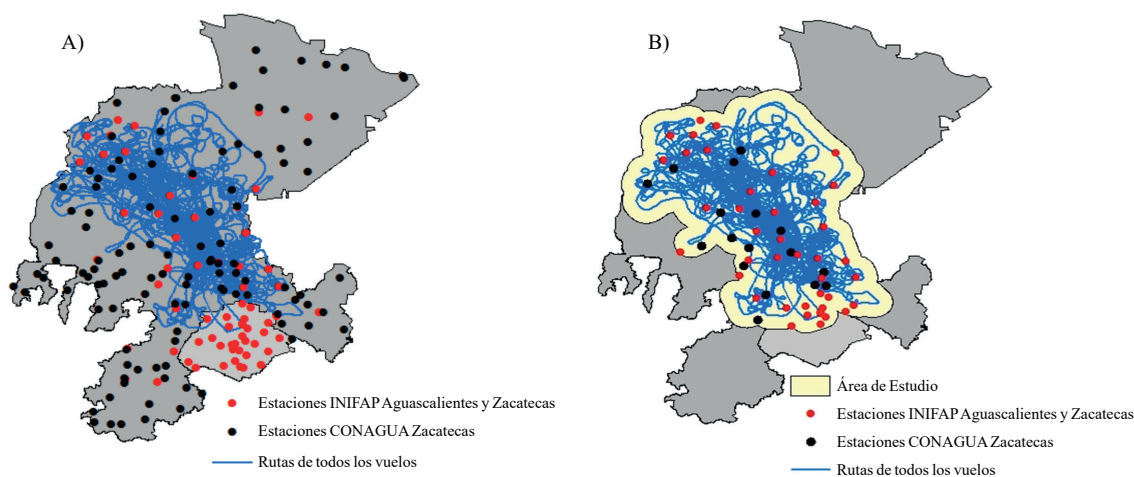


Figura 1. Rutas de los 46 vuelos y ubicación de las estaciones climáticas en los estados de Zacatecas y Aguascalientes (A) y estaciones seleccionadas dentro del área de influencia de las rutas de vuelo (B).

Figure 1. (A) The 46 flight routes of the cloud-seeding program and locations of weather stations in the states of Zacatecas and Aguascalientes. (B) Weather stations selected within the areas of influence of flight routes.

Definición de criterios de medición

Las estaciones automáticas de las redes INIFAP-FP, además de registrar la cantidad de lluvia, también registran la hora de ocurrencia, por lo que un primer criterio fue considerar lluvia debida a la inducción, si ésta se presentó en el lapso desde el inicio del vuelo y hasta una hora después de que terminó la inducción, es decir, un periodo de aproximadamente tres horas (Figura 2).

we established a first criterion that rainfall would be considered as having been due to seeding when it took place between the time the flight started and one hour after cloud-seeding ended, representing about a three-hour period (Figure 2). A second criterion was to consider whether or not rain had fallen over both the AgI seeding route and other areas simultaneously. In other words, if the precipitation was widespread, then it was not regarded as having been caused by cloud-seeding.

Un segundo criterio fue considerar que si llovió en la ruta de aplicación del yoduro de plata y en otros lugares también al mismo tiempo, es decir, si ocurrió lluvia generalizada, no se atribuyó al efecto de la inducción de lluvia.

Un tercer criterio fue que después de ubicar la ruta de vuelo registrada con el GPS, se definió una zona buffer o de influencia de la aplicación del yoduro de plata de 30 km; es decir, 15 km a cada lado de la ruta, esto con el fin de seleccionar las estaciones de clima ubicadas dentro de esta zona y tomando en cuenta el posible efecto del viento para dispersar el químico aplicado; de acuerdo a la velocidad del viento promedio de la zona, se consideró que el buffer definido cubría la mayoría de las posibilidades.

Un cuarto criterio se refiere a considerar como lluvia efectiva, para fines agronómicos, aquellas que rebasan los 5 mm de precipitación, puesto que una lluvia menor, debido a la evaporación que ocurre inmediatamente al caer el agua sobre el suelo, la humedad que llega hasta las raíces del cultivo es inapreciable (Serna *et al.*, 2011).

Se realizó un análisis estadístico de los datos para determinar si los resultados son significativamente diferentes a la precipitación normal. Se utilizó la prueba de chí-cuadrada y la prueba de "t" de student. Se obtuvo la precipitación histórica promedio de la temporada de lluvia (Medina *et al.*, 2004) (21 de junio al 10 de septiembre) de los años 1961 a 2009 de 21 estaciones de la CONAGUA y la precipitación promedio para la temporada 2012. Se generaron mapas de la temporada de lluvia 2012 y de su porcentaje con respecto al promedio histórico.

Resultados y discusión

Después de 15 a 30 min del inicio de la inducción y dependiendo de las condiciones ambientales y de la nube, en la mayoría de los casos algunas nubes comenzaron a precipitar. WMO (1999) reportó incrementos de la precipitación estimada con radar en el periodo de 30 a 60 min después de la siembra. Sin embargo, a simple vista se consideraron lluvias ligeras, muy localizadas y que en muchos casos fueron tan ligeras que no las registraron las estaciones climáticas. Esto concuerda con lo reportado por la Academia Nacional de Ciencias (1973) de que sólo una pequeña parte de la humedad disponible en nubes se transforma en precipitación que llega a la superficie del suelo.

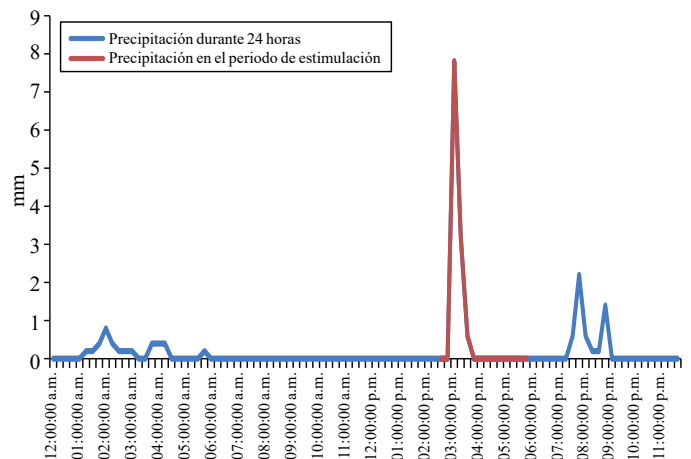


Figura 2. Gráfica de la precipitación ocurrida el día 24 de junio de 2012 en la estación Rancho Grande, Fresnillo y el periodo donde se consideró lluvia debida a la inducción.

Figure 2. Precipitation registered by the Rancho Grande Fresnillo weather station on 24 June 2012. The interval over which rainfall was considered to have been caused by seeding is shown in red.

As a third criterion, after locating the GPS-registered flight route, a 30- km AgI buffer or influence zone was established 15 km to each side of the recorded route. This allowed only those weather stations located within such an area to be selected for data, having taken into account the possible effect of the wind on the dispersion of the seeding chemical. According to the average wind velocity in the zones, it was considered that a buffer area established 15 km on either side of a recorded flight route would cover most eventualities. A fourth criterion considered the rainfall effective for agricultural purposes to be only those precipitation events over 5 mm, because lower amounts of rainfall provide negligible amounts of moisture for crop roots due to the evaporation that occurs when rainwater reaches the ground (Serna *et al.*, 2011).

Statistical analyses (chi-square tests and t-tests) were performed on the data to determine whether results were significantly different from normal precipitation. Average historical precipitation data were obtained (Medina *et al.*, 2004) from 21 CONAGUA stations for the wet seasons (21 June to 10 September) for years 1996-2009, as well as the average precipitation data for the 2012 season. Maps were made for the 2012 wet season, including of percentages computed with respect to historical averages.

Uno de los criterios establecidos antes de comenzar el estudio fue que si en alguna fecha de inducción se registraba lluvia generalizada, no se consideraría la lluvia ocurrida como efecto de la inducción. Esto ocurrió en cuatro de las 46 fechas de inducción de lluvia, por lo que no se consideraron sus datos en el análisis.

Debido a que las estaciones de la CONAGUA registran precipitación de 24 horas, no se puede separar la cantidad de lluvia ocurrida en el periodo de inducción. El porcentaje de lluvia en el periodo de inducción con respecto a la lluvia en 24 h fue de 29.2% en las estaciones INIFAP-FP, mientras que en las de CONAGUA fue 100%. Es por esto que sus datos no se consideraron en el análisis, debido a que no se tenía la certeza de que la lluvia hubiera sucedido en el periodo de estímulo y la precipitación pudo presentarse en cualquier momento del día debida a causas naturales.

En el Cuadro 1 se presenta el concentrado de las estaciones de la red INIFAP-FP. La suma de las estaciones en la ruta de vuelo de todas las fechas fue de 275, mientras que la suma de las estaciones con lluvia fue de 45; es decir, sólo en 16.4% de las estaciones se registró lluvia. Esta diferencia resultó estadísticamente diferente (Chi cuadrada, $p < 0.05$), lo que indica que fue menor el número de estaciones que mostraron un efecto positivo respecto del total.

Cuadro 1. Concentrado de las estaciones INIFAP-FP (Zacatecas y Aguascalientes) ubicadas dentro de la ruta de vuelo en cada una de las fechas de inducción (40 estaciones).

Table 1. Statistics for Zacatecas and Aguascalientes INIFAP-FP weather stations located within flight routes on all seeding dates (40 stations).

	Estaciones			Precipitación (mm)		
	En la ruta	Con lluvia	Lluvia >5 mm	En 24 h	En el periodo estimulado	Estimulado > 5 mm
Suma/media	275	45	9	11.9	3.5	2.6
Porcentaje	100	16.4	3.3	100	29.4	21.8

Se analizaron los datos con valores de precipitación mayores de 5 mm, ya que para las actividades agrícolas se considera lluvia efectiva si es mayor a este valor. En este caso solo ocurrió en 9 de las 275 estaciones, lo que corresponde a 3.3%, lo cual reduce drásticamente el porcentaje de estaciones con lluvia, e indica que en muchos de los casos las lluvias ocurridas debido al efecto de la inducción fueron lluvias ligeras, Bruintjes (1999) indica que la lluvia depende de las condiciones ambientales y de la nubosidad. Esta diferencia también resultó estadísticamente diferente (Chi cuadrada, $p < 0.05$), lo que indica que fueron muy pocas las estaciones que registraron lluvias efectivas para la agricultura.

Results and discussion

In most cases, depending on environmental and cloud conditions, some clouds started to produce rain 15 to 30 minutes after seeding had begun in the study area. Increases greater than radar precipitation estimates occur 30 to 60 min after seeding (WMO, 1999). However, an inspection reveals that these events in the present study were light, highly localized rainfall and, in many cases, were so light that they were not registered by weather stations. This agrees with the observation that only a small part of available moisture in clouds transforms into precipitation that reaches the surface (National Academy of Sciences, 1973).

One of the criteria established for the present study was that no precipitation would be considered as having been caused by seeding if it occurred during a period of widespread precipitation. Four out of the 46 cloud-seeding dates experienced widespread precipitation, and consequently those data were not included in the analysis.

Due to the fact that CONAGUA weather stations record 24-hour rainfall amounts, compared with the 15-minute reports of the automatic INIFAP-FP stations, it was not possible to distinguish the amount of rainfall occurring

during a seeding period. Rainfall percentage during seeding periods with respect to the 24-h precipitation was 29.2% as recorded by INIFAP-FP stations, whereas CONAGUA stations registered 100%. Therefore, the latter data were not included in the analysis, because there was no certainty that precipitation had actually occurred during the rainfall stimulation period and it might have happened at any moment due solely to natural causes.

Table 1 presents statistics for the INIFAP-FP weather station network. The total number of stations within the flight routes was 275 considering all dates, whereas the number of stations

El promedio de lluvia en 24 horas en todas las fechas de inducción fue de 11.9 mm y el promedio de lluvia en el tiempo de inducción fue de 3.5 mm, esto representa 29.4% de la lluvia registrada en 24 h (Prueba de T, $p < 0.05$). Esta diferencia indica que la lluvia debida a la inducción fue significativamente menor al total registrado en un día. El promedio de lluvia en el periodo de inducción pero con lluvias mayores a 5 mm (considerando las lluvias menores a esta cantidad como cero) fue de 2.6 mm disminuyendo el porcentaje respecto a la lluvia en 24 h a 21.8%, lo cual es similar a resultados de inducción en Tasmania (Morrison *et al.*, 2009).

De las estaciones de las redes INIFAP-FP en los estados de Aguascalientes y Zacatecas en el área de estudio (Figura 3b) se obtuvo el promedio de lluvia registrada en todas las estaciones en la ruta de inducción en cada una de las 42 fechas, tanto para la lluvia en 24 h como para la lluvia en el periodo de inducción. La suma de la precipitación en todas las fechas considerando 24 h fue de 81 mm, mientras que la suma en el periodo de inducción fue de 26 mm, lo que representa 32.1%.

Lo anterior concuerda con lo reportado por Sharon *et al.* (2008) quienes concluyeron que la siembra de nubes mejoró la cantidad de precipitación en 30% en tormentas que produjeron menos de 5 mm por día en Israel. Sin embargo, se han tenido resultados diversos, Rosengaus y Calderón (2004) tuvieron un incremento en la precipitación del orden de 66.8% en el volumen total de agua precipitada de las tormentas convectivas aisladas de verano en la zona de Monclova, Coahuila, en el noreste semiárido de México. Diversos estudios sobre la siembra de nubes en Tasmania, concluyen que la siembra de nubes es efectiva y que la precipitación se incrementa hasta en 8% por cada mes sembrado (Hydro Tasmania, 2008). En un experimento científico en Sudáfrica se concluye que el método produjo 20% de incremento en lluvia en promedio). (Rosengaus y Bruintjes, 2002). En un análisis de la siembra de nubes para el período 1960-2005 en una cuenca hidroeléctrica situada en el centro de Tasmania, Australia, los resultados indican un aumento de la precipitación mensual entre 5% y 14% (Morrison *et al.*, 2009).

Con el programa de inducción se esperaba un incremento de la precipitación en la región de estudio. Para verificar si ocurrió ese aumento se comparó la lluvia en el periodo de estudio que fue entre el 21 de junio y el 10 de septiembre, se obtuvo la lluvia promedio en este periodo de los años 1961 al 2009 para 21 estaciones de la CONAGUA. Este periodo corresponde básicamente a la temporada de lluvia en la región de estudio (Cuadro 2). Durante la temporada, la

for which rainfall was recorded was 45, meaning that only 16.4% of all stations recorded precipitation. This difference between the total number of stations (275) and the number of rainfall-recording stations (45) was statistically significant (Chi-square, $p < 0.05$), indicating that the number of stations recording rainfall was indeed smaller than the total.

Data with precipitation values above 5 mm were analyzed given that rainfall amounts in this range have agricultural significance. During the study period, such rainfall occurred at only 9 of 275 stations (3.3%), which drastically reduces the percentage of stations with rainfall and indicates that in many cases, precipitation occurring due to seeding was light. This difference was confirmed to be statistically significant (Chi-square, $p < 0.05$), indicating that very few stations recorded precipitation deemed effective for agricultural purposes.

The average 24-h rainfall on all seeding dates was 11.9 mm, and the average precipitation average during seeding-time was 3.5 mm, representing 29.4% of the precipitation recorded in 24 h (t-test, $p < 0.05$). This difference indicates that rainfall due to seeding was significantly lower than the total amount of precipitation recorded for the corresponding day. The average 24-h rainfall during the seeding periods, computed using only those days for which rainfall exceeded 5 mm (i.e., considering the dates with rain < 5 mm as zero), was 2.6 mm, and consequently the percentage with respect to 24-h precipitation decreased to 21.8%, similar to seeding results obtained in Tasmania (Morrison *et al.*, 2009).

INIFAP-FP network stations within the target area in the states of Aguascalientes and Zacatecas (Figure 3b) supplied the average rainfall data registered by all stations located under the seeding routes on each of the 42 dates for rainfall occurring during the 24-h periods as well as during the seeding periods. The total 24-h precipitation on all dates was 81 mm, whereas the total precipitation during the seeding period was 26 mm, or 32.1% of the total.

These data agree with those reported by Sharon *et al.* (2008), who concluded that seeding in Israel enhanced the amount of precipitation by 30% in storms producing less than 5 mm per day. However, other authors have obtained different results. For example, Rosengau and Calderón (2004) reported a 66.8% increase in total water volume precipitated by isolated summer convective storms in Monclova, Coahuila, in semiarid northeastern Mexico. Several cloud-seeding studies in Tasmania found that seeding was effective, with

precipitación media es de 249.7 mm y varía generalmente entre 155 y 345 mm ($s= 95$ mm, 38% de la media), en 38 de las 49 temporadas los totales de lluvia registrados están dentro de este rango.

La precipitación total media durante la temporada de lluvia 2012 fue de 213.1 mm, esta cantidad se encuentra dentro del rango de precipitación normal (Cuadro 2) pero resultó menor al promedio. Esto indica que a pesar de la inducción de lluvia, la precipitación no mejoró de tal manera que pudiera haber sido mayor al promedio. La alta variabilidad natural hace que sea extremadamente difícil de discernir los efectos de siembra de nubes. Incluso en los mejores experimentos, se ha tardado más de cien días sembrados para detectar con certeza, un aumento de 10% debido a la siembra (Bigg y Turton, 1988).

precipitation being increased by as much as 8% per seeded month (Hydro Tasmania, 2008). A scientific experiment in South Africa reported that cloud-seeding produced an average 20% increase in the amount of rainfall (Rosengaus and Bruintjes, 2002). Results of a 1960-2005 seeding of a hydroelectric basin located in central Tasmania, Australia, indicated a monthly precipitation increase of between 5% and 14% (Morrison *et al.*, 2009).

In the study region, increases in precipitation should be expected to occur during cloud-seeding programs. Rainfall data were compared to verify if such an increase had taken place during the study period of 21 June to 10 September 2012, corresponding to the rainy season of the study area. Average rainfall data were obtained for the same seasonal

Cuadro 2. Estadísticas básicas de la precipitación total de la temporada de lluvia (21 de junio al 10 de septiembre) durante los años 1961 a 2009 y durante el año de estudio.

Table 2. Basic total precipitation statistics for the rainy season (21 June to 10 September) during the years 1961–2009 and during 2012 (the year of the cloud-seeding study).

Periodo	n	Media	Desviación estándar (s)	Media \pm s
1961-2009	712	249.7	95	155 - 345
2012	57	213.1	63.8	

En la Figura 3A se observa que en la región de inducción, la lluvia total registrada, no solo la debida al efecto de inducción, fue entre 87 y 360 mm y comparando esta precipitación con el promedio histórico, en la Figura 3B se aprecia que llovió entre 10 y 50% debajo de lo normal en la mayor parte del área de estudio.

period for the years 1961 to 2009 from 21 CONAGUA weather stations (Table 2). From these data, the mean precipitation during the wet season is 249.7 mm and it generally fluctuates between 155 and 345 mm ($s= 95$ mm, 38% of the mean), with the rainfall lying within this range for 38 out of the 49 rainy seasons.

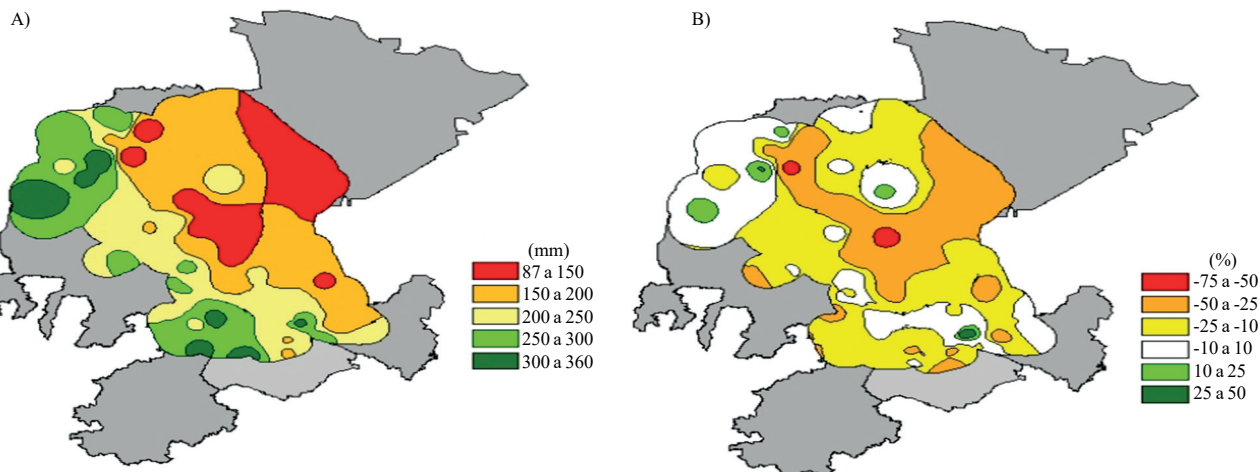


Figura 3. Precipitación de la temporada de lluvia (21 de junio al 10 de septiembre) 2012 (A) y su porcentaje con respecto al promedio histórico (1961-2009) del mismo periodo (B).

Figure 3. (A) Precipitation during the 2012 rainy season (21 June to 10 September). (B) Percentages for the 2012 rainy season with respect to rainy season historical averages (1961-2009).

La lluvia acumulada dentro del área estimulada debida al efecto de inducción y eventos mayores de 5 mm en el periodo de estudio fue de 20 mm; el promedio histórico de lluvia en la región de inducción en la temporada del 21 de junio al 10 de septiembre es de 249.7 mm, la lluvia registrada representa 8% adicional al valor histórico.

De manera general se puede decir que pese al programa de inducción de lluvia, la precipitación registrada durante la temporada de junio a septiembre en las estaciones de la red INIFAP-FPZ no fue de manera generalizada y resultó inferior a lo normal, lo cual indica que esta tecnología de inducción de lluvia, al menos para su uso en la agricultura, no tiene un impacto significativo en el aumento de la cantidad de precipitación.

Conclusiones

El programa de siembra de nubes destinada a mejorar la precipitación durante la sequía se implementó durante la temporada de lluvias de 2012 en los estados de Zacatecas y Aguascalientes, México. En la mayoría de los vuelos de inducción se comprobó que algunas nubes comenzaron a precipitar después de 15 a 30 min de iniciada la inducción, pero se consideraron lluvias ligeras y muy localizadas. La lluvia de todas las estaciones registrada durante 24 h y acumulada en todas las fechas de inducción fue de 81 mm, pero de estos, sólo 26 mm correspondieron al periodo de inducción, lo cual representa 32.1%.

Del total de estaciones de cada ruta y en todos los vuelos, el porcentaje de estaciones con lluvia dentro del periodo de inducción fue 16.4%; sin embargo, al considerar lluvia mayor de 5 mm, este porcentaje disminuye a 3.3%.

La lluvia acumulada dentro del área estimulada debida al efecto de inducción y mayor de 5 mm en el periodo de junio a septiembre fue de 20 mm, y el promedio histórico de lluvia en la región de inducción en estos meses es de 320 mm, la lluvia registrada representa 6.2% adicional al valor histórico.

De manera general se puede decir que pese al programa de inducción de lluvia, la precipitación registrada durante la temporada de junio a septiembre en las estaciones de la red INIFAP-FPZ no fue de manera generalizada y resultó inferior a lo normal, lo cual indica que esta tecnología, al menos para su uso en la agricultura, no tiene un impacto significativo en el aumento de la cantidad de precipitación.

The total precipitation during the 2012 rainy season, averaged over the seeded area, was 213.1 mm, an amount that lies within the normal precipitation range (Table 2) but which happens to be below average. This indicates that in spite of seeding, precipitation did not improve sufficiently to exceed the average. The high natural variability in rainfall renders it extremely difficult to discern the effects of cloud-seeding. Even the best experiments have needed more than 100 seeding days to detect with any confidence a 10% increase due to seeding (Bigg and Turton, 1988).

The total amount of rainfall recorded, including both natural rainfall and that due to seeding effects, was between 87 and 360 mm for the 2012 seeded area, depending on location within the seeded area (Figure 3A). Comparing this precipitation to the historical average, it is noted that rainfall was 10-50% below normal in most of the seeded area (Figure 3B).

The historical average precipitation in the seeded area during the rainy season (21 June to 10 September) is 249.7 mm. The precipitation that accumulated during the study period due to seeding effects and in events of > 5 mm was 20 mm, which represents 8% of the historical average.

Overall, it may be stated that in spite of the seeding program, precipitation recorded by the INIFAP-FPZ weather stations during the June to September 2012 wet season was not widespread and it turned out to be less than normal. We conclude that the cloud-seeding had no significant impact on increasing the amount of precipitation, at least not for agricultural purposes.

Conclusions

A cloud-seeding program aimed at enhancing precipitation during drought was implemented during the 2012 wet season in the Mexican states of Zacatecas and Aguascalientes. For most of the 46 seeding flights, it was found that some clouds began to precipitate 15 to 30 min after seeding started, although these events constituted light and highly localized rainfall. Rainfall recorded by all stations during 24 h and accumulated for all seeding dates was 81 mm, but only 26 mm of this total corresponded to seeding periods, representing 32.1%.

Literatura citada

- Bigg, E. K. and Turton, E. 1988. Persistent effects of cloud-seeding with silver iodide. *J. Appl. Meteorol.* 27:505-514.
- Braham, R. R. 1986. Precipitation enhancement -a scientific challenge. *Meteor. Monograph. Amer. Meteor. Soc.* 21:1-6.
- Bruintjes, R. T. 1999. A review of cloud-seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects. *Bulletin Am. Meteorol. Soc.* 80:5.
- Cooper, W. A. and Lawson, R. P. 1984. Physical interpretation of results from the HIPLEX-1 experiment. *J. Climate Appl. Meteor.* 23:523-540.
- Edwards, G. R. and Evans, L. F. 1968. Ice Nucleation by silver iodide: III. The nature of the nucleating site. *J. Atmos. Sci.* 25:249-256.
- El siglo de Torreón. 1978. Primeras lluvias artificiales en la Cuenca del Nazas. <http://h.elsiglodetorreon.com.mx/Default/Scripting/ArticleWin.asp?From=SearchandKey=EDT/1978/07/11/18/Ar01806.xml>.
- Gabriel, K. R. and Rosenfeld, D. 1990. The second Israeli rainfall stimulation experiment: Analysis of precipitation on both targets. *J. Appl. Meteor.* 29:1055-1067.
- Gagin, A. and Neuman, J. 1981. The second Israeli randomized cloud-seeding experiment: Evaluation of the results. *J. Appl. Meteor.* 20:1301-1311.
- Giner, R. A.; Fierro, L. C. y Negrete, L. F. 2011. Análisis de la problemática de la sequía 2011- 2012 y sus efectos en la ganadería y la agricultura de temporal. Documento de circulación interna. Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). Saltillo, Coahuila. 12 p.
- Hydro Tasmania. 2008. Effects of cloud-seeding on rainfall in the West Coast: background report 1. Hydro Tasmania and West Coast Council. 74 p.
- Levin, Z. 2009. On the state of cloud-seeding for rain enhancement. The cyprus Institute, Cyprus, 19 p.
- Laiguang, Y. and Yangang, L. 1995. Some microphysical characteristics of cloud and precipitation over China. *Atmos. Res.* 35:271-281.
- Medina, G. G.; Ruiz, C. J. A. and Bravo, L. A. G. 2006. Definición y clasificación de la sequía. *In: sequía: vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México.* (Comp.) Bravo, L. A.; Salinas, G. H. y Rumayor, R. A. INIFAP, CIRNOC, CEZAC. Libro técnico Núm. 4. Calera de V. R., Zacatecas., México. 300 p.
- Medina, G. G. y Ruiz, C. J. A. 2004. Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Zacatecas. (período 1961-2003). INIFAP-CIRNOC. Libro técnico Núm. 3. Calera de V. R., Zacatecas, Zac., México. 240 p.
- Morrison, A. E.; Siems, S. T.; Manton, M. J. and Nazarov, A. 2009. On the analysis of a cloud-seeding dataset over Tasmania. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 48:1267-1280.
- Murty, A. S. R. 1989. An overview of warm cloud modification research in India. *Proc. Fifth WMO conf. on weather modification and applied cloud physics, Beijing, China, World Meteorological Organization.* 521-524.
- For all weather stations on all flight routes, the percentage of stations with rainfall recorded during the seeding period was 16.4%; however, this percentage decreased to 3.3% when only those rainfall events with amounts over 5 mm were considered. The historical average in the seeded area during the wet season (June to September) is 249.7 mm. The accumulated precipitation during the study period within the seeded area due to seeding effects and in events over 5 mm was 20 mm, which represents 8% of the historical average.
- Overall, in spite of the cloud-seeding program, precipitation recorded during the June-September season by the INIFAP-FPZ network stations was not widespread and in fact was less than normal, indicating that the cloud-seeding did not have a significant impact on increasing the amount of precipitation, at least not for agricultural purposes.

End of the English version



- National Academy of Science. 1973. Weather and climate modification, problems and prospects. NASA/NRC, Washington, DC. 258 pp.
- Orville, H. D.; Boe, B.; Bomar, G.; Cotton, W. R.; Marler, B. L. and Warburton, J. A. 2004. The weather modification association's response to the national research council's report titled, "Critical issues in weather modification research". Weather Modification Association. Fresno, California. 52 p.
- Perez, S. E.; Ahumada, A. A. and Mosiño, P. A. 1963. Twelve years of cloud-seeding in the Necaxa Watershed, Mexico. *J. Appl. Meteor.* 2:311-323.
- Rangno, A. L. and Hobbs, P. V. 1987. Are-evaluation of the climax cloud-seeding experiments using NOAA published data. *J. Clim. Appl. Meteor.* 26:757-762.
- Rosenfeld, D. and Woodley, W. L. 1989. Effects of cloud-seeding in West Texas. *J. Appl. Meteor.* 28:1050-1080.
- Rosengaus, M. y Bruintjes, R. 2002. Estimulación de lluvia por sembrado higroscópico. *Ing. Hidraul. Mex.* 17:13-29.
- Rosengaus, M. M. y Calderon, G. J. J. 2004. Costo unitario del agua producida a través del sembrado higroscópico de tormentas. *Ing. Hidraul. Mex.* 19:17-26.
- Serna-Perez, A.; Zegbe-Dominguez, J. A. y Mena-Covarrubias, J. 2011. Rendimiento y calidad de chile seco Mirasol cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Rev. Chapingo Hortic.* 17(1): 19-24.
- Sharon, D.; Kessler, A.; Cohen, A. and Doveh, E. 2008. A note on the history and recent revision of Israel's Cloud-seeding Program. *Israel J. Earth Sci.* 57:1.
- World Meteorological Organization (WMO). 1999. Report of the WMO international workshop on hygroscopic seeding: experimental results, physical processes, and research needs. Brant F. G. and R. T. Bruintjes, Ed. Mazatlán, Mexico. 68 p.