



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFIA

**BREVE ESTUDIO DE LA ESTIMULACION ARTIFICIAL
DE LA PRECIPITACION EN MEXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

LICENCIADO EN GEOGRAFIA

P R E S E N T A

CLOTILDE OLIVA PARADA HERNANDEZ

MEXICO, 1984



**FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFIA**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TABLA DE CONTENIDOS

	Pag.
Introducción	iv
1. ANTECEDENTES DE EXPERIMENTOS DE ESTIMULACION ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACION A NIVEL MUNDIAL	7
2. LOCALIZACION DE REGIONES CON CLIMA HUMEDO, SECO Y SEMISECO EN LA REPUBLICA MEXICANA, Y PROYECTOS DE ESTIMULACION ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACION QUE SE HAN REALIZADO.	19
3. OTRAS APLICACIONES DE LA SIEMBRA DE NUBES: SUPRESION DE GRANIZO, DISIPACION DE NIEBLA Y MODIFICACION DE HURACANES.	35
4. ASPECTOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EFECTUAR EXPERIMENTOS DE ESTIMULACION ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACION.	48
5. COMPROBACION DEL EFECTO DE SIEMBRA DE NUBES	62
CONCLUSIONES	lxxvii
Referencias Bibliográficas	lxxx
Bibliografía	lxxxiv

INTRODUCCION.

Debido a la gran dependencia que el hombre tiene del tiempo atmosférico, ya que afecta todas las actividades económicas y productivas, se ha visto la necesidad de modificarlo para su beneficio, principalmente la precipitación, nubosidad y temperatura.

Los intentos para modificarlo se han realizado desde que el hombre apareció en la Tierra, por métodos mágicos, religiosos y científicos, éstos últimos con el apoyo de la Física de Nubes y el Método Científico.

En México, por su situación geográfica y aspectos físicos, ocurre una distribución heterogénea de la precipitación y grandes extensiones del país tienen climas secos o semisecos, a esto hay que agregar las variaciones naturales de la precipitación, lo cual afecta principalmente la agricultura (sobre todo de temporal), ganadería, industria, comercio, la cantidad de agua en las presas, la producción de energía hidroeléctrica, el abastecimiento de agua en las ciudades, y en general, la vida del ser humano.

Las pérdidas que se han tenido por la variación de la precipitación se repiten con frecuencia, por lo que producen en nuestro país gran interés por estimular artificial

mente la precipitación, de manera que los estragos ocasionados por el tiempo atmosférico sean de gran magnitud.

El objetivo principal de este trabajo, es de presentar los que se hizo y se está haciendo en México para estimular artificialmente la precipitación, dando mayor importancia a los proyectos con fines experimentales a partir de 1949.

En experimentos realizados en laboratorio se tiene evidencia del crecimiento de los cristales de hielo a partir del vapor de gotitas de agua superenfriada cuando ambas fases estan juntas, y de la actividad de los núcleos de congelación. Se supone que la siembra, de nubes superenfriadas con núcleos de congelación tiene como consecuencia el incremento del tamaño de la nube y por lo tanto, de la precipitación. O bien a partir de la siembra con núcleos de condensación en nubes calientes, provocando el mecanismo de la coalescencia.

Pero el sembrado con cualquiera de éstos núcleos, no garantiza que la precipitación sea incrementada como se piensa, ya que en algunos casos pueden inhibirla ó bien no presentar ninguna alteración en la nube.

En otros países se ha tratado de modificar el tiempo atmosférico, suprimir el granizo, disipando niebla y reduciendo la intensidad de los vientos en huracanes. Los múltiples problemas, tanto teóricos como técnicos han pro-

piado el desarrollo de nuevas técnicas y métodos de comprobación.

El estudio es importante a mi parecer en la Geografía de México, para señalar los avances que se han tenido sobre este tema y las repercusiones que pueda tener en la economía del país. Además han sido pocos los estudios realizados en México, y no se ha dado hasta ahora la importancia que merece.

La metodología de este trabajo se basó en la investigación y recopilación de información bibliográfica, proporcionada por el Departamento de Física de Nubes del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, y archivos del Departamento de Estimulación Artificial de la Precipitación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

1. ANTECEDENTES DE EXPERIMENTOS DE ESTIMULACION ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACION A NIVEL MUNDIAL.

Desde los principios de la civilización, el hombre ha dependido de la lluvia para vivir, y para desarrollar sus actividades económicas. Así que los intentos y esfuerzos para incrementar la precipitación se han realizado desde la antigüedad hasta nuestros días, y se pueden clasificar en tres grupos: a) mágico-religiosos, b) de charlatanería y c) científicos.

En las primeras observaciones en cuanto a la formación de las nubes, se notó que los incendios forestales ocasionaban corrientes convectivas, resultando nubes cúmulos; fué el meteorólogo James Pollard Espy, quién mencionó la importancia de las corrientes convectivas en la formación de nubes y la precipitación en su libro titulado "Philosophy of Storms", publicado en 1841.

En 1971, el ingeniero civil Powers publicó su libro "War and Weather", en donde menciona que después de grandes combates se presentaban precipitaciones ocasionadas tal vez por la pólvora ó el sonido de los cañones, con ésta hipótesis en 1891 se realizó una serie de demostraciones en Texas, bajo la dirección del Departamento de Agricultura.

En ese mismo año, Louis Gathmann sugirió el uso de sustancias frías como el dióxido de carbono líquido, liberado desde un globo para conseguir un rápido enfriamiento que

podría propiciar la condensación y la precipitación.

En épocas modernas y con la fabricación del avión, se realizaron nuevos experimentos para incrementar la precipitación; como el de rociar dentro de las nubes diferentes sustancias químicas, arena, agua, jabón, etc.

En 1930 en Holanda, Veraart sembró nubes con hielo seco y hielo seco con agua, pero sus observaciones no fueron tomadas en cuenta.

En 1933 el Dr. Tor Bergeron afirma que la presencia de cristales de hielo formados en la nube ó transportados por corrientes convectivas en la misma, son importantes para la formación de la precipitación.

Ya en 1938 el físico alemán, Walter Findeisen, re-enfatizó que la coexistencia de cristales de hielo y gotitas de agua superenfriada en la proporción conveniente es una condición necesaria para la formación de la precipitación en la nube y reafirmó la importancia del proceso de sublimación. Luego vió la posibilidad de producir lluvia y suprimir granizo en nubes superenfriadas, mediante la introducción de núcleos artificiales de congelación. (1)

Más tarde Schaefer trabajando para General Electric Company, puso a prueba las teorías de Bergeron y Findeisen; dejando caer el 13 de noviembre de 1946 aproximadamente 1,300 Kg de hielo seco molido a lo largo de una línea aproximada de 5 Km en una región de altocúmulos con temperaturas aproxima

das a -20°C . El Dr. Irving Langmuir observó estando en tierra, caer nieve desde la nube en una distancia aproximada de 600 m., antes de evaporarse en aire seco.(2)

De 1947 a 1951 los primero que informaron sobre la siembra con hielo seco en nubes cúmulos superenfriados en Australia fueron Krauss, Squires y Bowen. Las observaciones se llevaron a cabo con equipo de radar aerotransportado, las conclusiones fueron que era posible iniciar lluvia.(3)

En 1948 el Dr. Bernard Vonnegut descubrió que el humo de yoduro de plata produce mejores núcleos de congelación que los que existen ordinariamente en la atmósfera y en cantidades muy grandes, 10^{13} /gramo, después los científicos de General Electric, dan la primera evidencia de que el humo de yoduro de plata puede modificar nubes superenfriadas realizando el siguiente experimento:

a) Distribuyeron 30 gramos de yoduro de plata en carbón de madera, b) encendieron el carbón y lo dejaron caer en nubes estratos superenfriados de espesor aproximado de 300 metros y con temperaturas de -10°C , y c) observaron que aproximadamente 10 Km^2 se transformaron en cristales de hielo. (4)

Entre 1948 y 1949 D. Coons y Ross Gunn de la Oficina Meteorológica de los Estados Unidos, demostraron que por lo general no se podía iniciar una lluvia por siembra a

menos que ya hubiera nubes precipitando dentro de un radio de 45 Km., y que la cantidad de lluvia de las nubes sembradas era muy pequeña; además no era favorable desde el punto de vista económico.

Las observaciones se llevaron a cabo por medio de radar, fotografías y mediciones pluviométricas. (5)

En 1948 en Honduras se realizaron experimentos en nubes calientes, motivados por la teoría de Langmuir, sembrándose los topes de las nubes con rocío, la nube creció y más tarde se presentó un aguacero, no registrándose lluvias en regiones cercanas. (6)

En este mismo año se llevaron a cabo experimentos en las islas Hawaii y Filipinas, sembrándose con hielo seco, rocío de agua de mar, y soluciones salinas; se registró modificación en las nubes y precipitaciones intensas en ambas regiones. (7)

Se realizaron experimentos en Bolivia (1951), Taiwan (1951-1954) y Africa Oriental Inglesa (1951-1952), utilizando como material nucleante yoduro de plata y hielo seco. Excepto en Bolivia, los resultados fueron "favorables", utilizando como métodos de comprobación análisis de regresión. (8)

A partir de 1953 se llevaron a cabo los siguientes experimentos: en Madagascar (1953-1956) que utilizó sal molida, observándose modificación en las nubes sembradas; los

resultados se analizaron por razón simple siendo alentadores. (9)

En Perú y Cuba durante los años de 1953 a 1959 se llevaron a cabo experimentos utilizándose yoduro de plata, los resultados se analizaron por medio de regresión, concluyendo que había aumentado la precipitación durante el período sembrado. (10)

Durante 1954 y 1955 los experimentos se realizaron en Paquistán, Congo Belga y Africa Ecuatorial Francesa. Para Paquistán y Africa Ecuatorial Francesa se utilizó sal y rocío de agua, en ambos casos se observó un incremento en la precipitación durante el período sembrado, los resultados se analizaron por el método de razón simple. (11)

En el Congo Belga se utilizó yoduro de plata en la zona de blanco, (zona de inseminación de nubes) comparando los resultados con la zona de control, existiendo un aumento de precipitación en la zona de blanco durante el período de operaciones.

De 1956 a 1957 se empleo yoduro de plata al sureste de Florida, las observaciones se hicieron por medio de rã dar, registrándose incrementos en la precipitación:

En 1957 y 1958 los experimentos realizados en la In dia con solución salina rociada en el aire a razón de un ga lón por minuto, mostraron un apreciable aumento en la preci

pitación durante la siembra. En este mismo período, en Arizona se registra un incremento del 30% en la precipitación del área sembrada con yoduro de plata. (12)

De 1955 a 1959, en Australia se realizaron experimentos con yoduro de plata en un área de 90 Km², los resultados mostraron un incremento en la precipitación alrededor de 20% con respecto al área de control durante los períodos de siembra. (13)

Años después Bowen llega a la conclusión provisional, de que la siembra podría aumentar las lluvias sólo en situaciones muy especiales de tiempo atmosférico. (14)

De los resultados antes mencionados debe aclararse, que en algunos de éstos los incrementos de la precipitación fueron únicamente observados (no se evaluaron científicamente), en otros, las evaluaciones que se llevaron a cabo fueron por medio de regresiones entre la zona de blanco y la zona de control, no siendo éste un método satisfactorio para evaluar este tipo de eventos. (En el capítulo 6 se mencionarán las pruebas estadísticas más confiables para efectos de comprobación).

Se siguen realizando proyectos con fines experimentales y comerciales, para tratar de incrementar la precipitación pluvial artificialmente en todo el mundo; a continua

ción se mencionan algunos de los proyectos que se están realizando, no teniéndose hasta la fecha resultados finales.

La siguiente información tiene como referencia la World Meteorological Organization 1981. (15)

En 1971 en Argentina se inicia el Proyecto Nacional de supresión del granizo, se usaron cohetes con yoduro de plata dispersando de 100 a 400 grs por Km²; en la República Federal Alemana, en 1975 se inicia el proyecto "Rosenheim", para supresión del granizo, utilizándose yoduro de plata que fué sembrado en la base de la nube, en una proporción de 1,500 grs/h. En 1978 se inicia el proyecto "Oberschwaben", para tratar de suprimir el granizo, utilizando dos aviones con generadores de yoduro de plata cada uno, la siembra se realiza en la base de nubes cúmulos superenfriados.

El proyecto "Stutgard" en 1979 complementa a los dos anteriores. Para suprimir el granizo, se utilizan dos aviones equipados con bengalas de yoduro de plata, la siembra se realiza en la base y cúspide de las nubes. En Australia en 1979 y 1980 se realizan estudios de las nubes en la zona norte del país, sembrándose con hielo seco desde avión y yoduro de plata con quemadores instalados en tierra. Durante 1975 en Austria se inician en el sur de Styria experimentos para incrementar la precipitación, y en 1981 el proyecto de granizo, ambos proyectos se realizaron con que

madores de yoduro de plata instalados en tierra.

Brasil inicia en 1971 el proyecto "Modard" para estimular la precipitación por medio de la siembra con cloruro de sodio y nitrato, con quemadores instalados en tierra. En 1975 el proyecto "Moclíma" tiene por objetivo la modificación del clima, dispersando en el aire partículas de carbón.

En Bulgaria se inicia el proyecto de "Supresión del Granizo" en 1969, utilizando cohetes de yoduro de plomo. En Canadá inician en 1970 el proyecto "Alberta", para intentar suprimir el granizo, con dispersor de hielo seco y yoduro de plata. Durante 1977 se continúa el mencionado proyecto abarcando la estimulación de la precipitación, con generadores de yoduro de plata dispersado por avión y generadores instalados en tierra. Durante 1974, China trata de incrementar la precipitación por medio de cohetes con yoduro de plata y suprimir el granizo por medio de un cañón con bengalas de yoduro de plata, instalados desde tierra, el proyecto fue llamado "Gu-Tien".

En 1976 Chile principia sus experimentos de "Estimulación de la Precipitación", con cohetes de yoduro de plata instalados en tierra. Francia, realiza estudios de las condiciones atmosféricas, con generadores de yoduro de plata, y la modificación del microclima para reducir las heladas durante 1981.

Hungría lleva a cabo experimentos para estimular la lluvia artificialmente sembrando nubes con yoduro de plomo durante 1976. La India inicia en 1973 programas de Física de nubes y modificación del tiempo atmosférico, con cloruro de sodio dispersado por medio de avión. En 1975 Italia inicia los proyectos "Grossursuch", "Proyecto Experimental Tripartita", con colaboración de Francia y Suiza, para suprimir el granizo y estimular la precipitación, empleando cohetes Oblakov e Italrrazzi, con yoduro de plata. Madagascar inicia en 1981 programas para la estimulación de la precipitación, usando DC 3, dispersando cloruro de sodio. Durante 1978 y 1979 Malasia realiza experimentos en nubes superenfriadas con el proyecto "Temengor", utilizando cloruro de sodio, nitrato de amonio, cloruro de calcio y hielo seco, dispersado desde avión.

Durante el verano de 1973, Negeria realiza experimentos de estimulación de lluvia, lanzando cohetes de yoduro de plata.

Tailandia realiza en 1981 estudios y experimentos de estimulación artificial de la precipitación con cloruro de sodio, urea, cloruro de calcio, óxido de calcio y hielo seco.

En la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas se inicia a partir de 1965 proyectos para suprimir el granizo, en las Repúblicas de Georgia, Tadjikistán, Moldavia, Armenia,



Fig. 2 Generadores de yoduro de plata instalados en tierra.

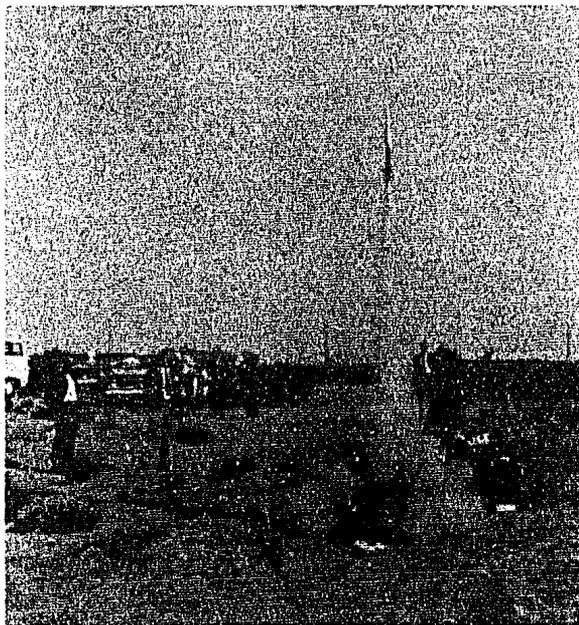


Fig. 3 Cohete Italrazzi

Azerbaiján, Uzbekistán, Lituania y en el norte del Cáucaso, sembrando con yoduro de plata las nubes superenfriadas usando cohetes y granadas.

En 1979 se siembra nubes nimbostratos, en la base con yoduro de plata, utilizando generadores en proporción de 0.3 Kg de yoduro de plata por nube.

En 1980 se realizan siembras de nubes en frentes fríos, con hielo seco, y en 1981 se continúan los programas de supresión de granizo. Yugoslavia, realiza proyectos de estimulación de la precipitación con yoduro de plata, cloruro de sodio durante 1970.

En 1973, Zimbabwe inicia experimentos de lluvia artificial, dispersando yoduro de plata por pirotécnicos. Y Noruega realiza experimentos para disipar niebla a partir de 1964, con hielo seco.

En Estados Unidos de 1972 a 1981, se han realizado 45 proyectos (registrados en la World Meteorological Organization), para estimular la precipitación, suprimir el granizo, disipar nieblas y modificar huracanes, utilizando yoduro de plata, propano líquido, yoduro de plomo y hielo seco, dispersados por generadores instalados en tierra, en avión, cohetes y bengalas.

2 LOCALIZACION DE REGIONES CON CLIMA HUMEDO, SEMISECO Y SECO, EN LA REPUBLICA MEXICANA, Y PROYECTOS DE ESTIMULACION ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACION QUE SE HAN REALIZADO.

En la República Mexicana existe un predominio de climas secos y semisecos, con precipitaciones que oscilan entre los 200 mm. y 700 mm. anuales. Esto se debe fundamentalmente a la situación del país con respecto al Ecuador, al gran número de cordilleras y depresiones que modifican grandemente la distribución de la precipitación.

Por otro lado, el país está limitado por dos grandes océanos que dan lugar a que durante el verano y otoño se presenten masas de aire húmedo de tipo monzónico que junto con fenómenos de convección local ascendente, provocan la condensación de vapor de agua que llevan esas masas de aire, provocando fuertes precipitaciones.

Durante los meses de junio a octubre, la lluvia se incrementa por ciclones (originados en el Pacífico), huracanes (originados en el Atlántico), y en el invierno debido a la mezcla de masas de aire frío del norte y masas de aire caliente procedentes del Golfo de México, se presentan los llamados "nortes", que ocasionan lloviznas en la mayor parte de la República Mexicana. Estas serían algunas de las

razones del por qué se distribuye la precipitación de la siguiente manera:

La mayor cantidad de lluvia con valores medios de 1,100 mm. anuales y que llegan a alcanzar 3,000 mm. anuales, se localiza en la zona costera del Golfo de México; en la porción comprendida entre el Puerto de Tampico y la Ciudad de Campeche, desde la costa del mar hasta alcanzar las altas cimas de la Sierra Madre Oriental, Sierra de Oaxaca y el Norte de Chiapas.

En el resto de la costa del Golfo de México, regiones montañosas de Chiapas y Oaxaca, en las partes altas de la Sierra Madre del Sur, los valles meridionales del país, la Sierra Madre Occidental y sitios aislados del norte de Sonora, la precipitación se encuentra entre 600 mm anuales que llegan a valores máximos de 1,100 mm anuales.

El centro del país tiene en su mayor parte valores inferiores a 1,000 mm anuales, solamente en las altas serranías se observan valores de mayor importancia.

La región del país con climas secos, donde las precipitaciones anuales raramente exceden los 750 mm anuales, se localiza en la región de El Salado, en la Altiplanicie Septentrional y en regiones que se encuentran entre Tijuana y Ensenada en la Península de Baja California, se observan promedios generales de 300 mm. anuales. En el resto de la Península, los valores registrados son aproximadamente de

150 mm. anuales, el descenso es más acentuado al noroeste de Sonora en el Desierto de Altar, con precipitaciones de 100 mm. anuales. (16)

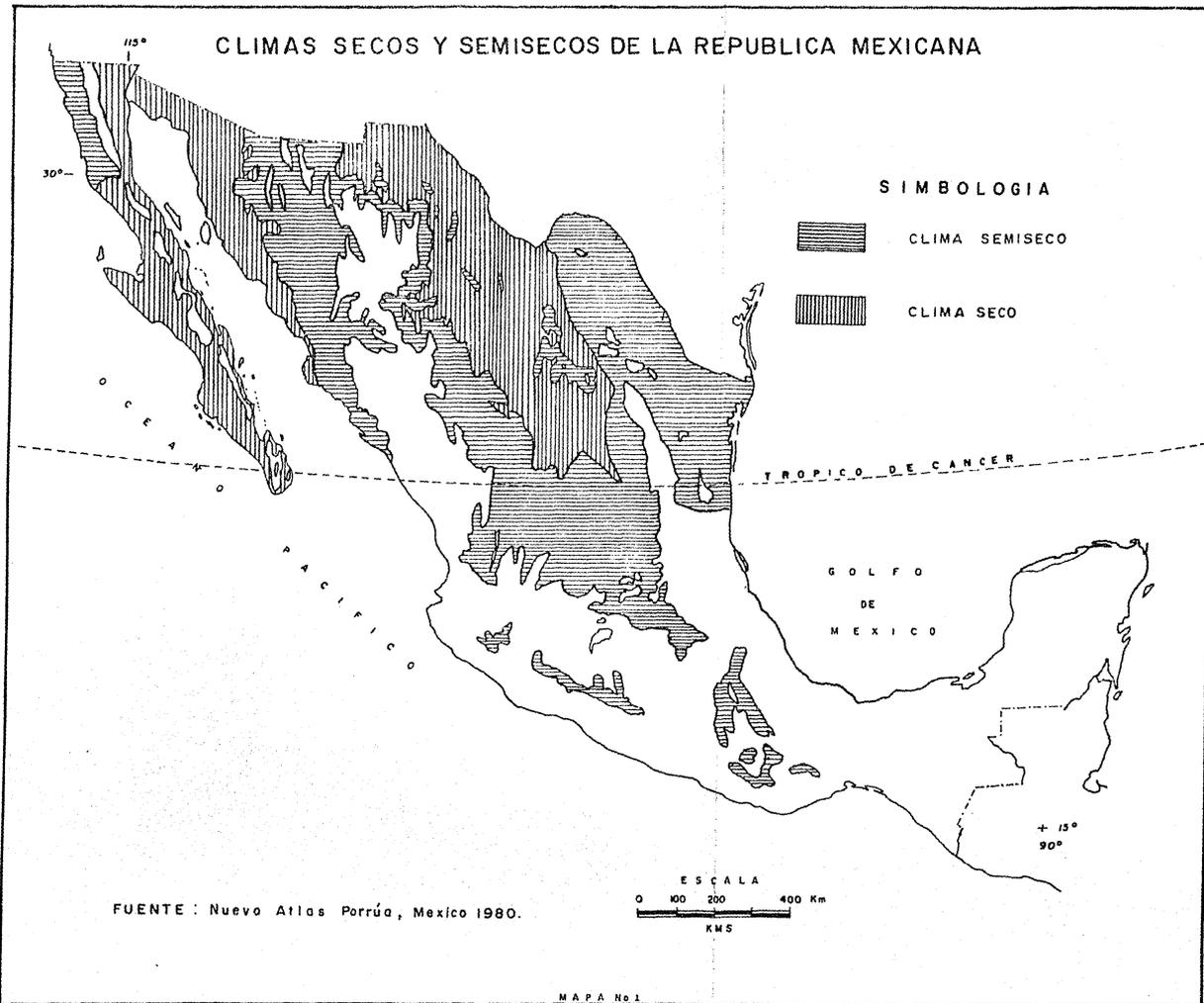
Debido a que los climas secos y semisecos abarcan más del 60% del territorio nacional (17), ver Mapa 1, y además a que se presentan severas sequías que cubren grandes zonas del país y afectan todo tipo de actividad económica, principalmente la agricultura de temporal, al igual que en todo el mundo, en la República Mexicana se ha tratado de incrementar la precipitación por medio de siembras de nubes con algún material nucleante, obteniéndose diferentes resultados que a continuación se detallan.

En México se han realizado proyectos de estimulación artificial de la precipitación, empleando como material nucleante cloruro de sodio (NaCl), en nubes con temperaturas sobre 0°C y, yoduro de plata (IAg), para nubes superenfriadas, siendo éste el utilizado con mayor frecuencia.

El objetivo en todos los proyectos fue el de incrementar la precipitación pluvial.

Durante los años de 1953 a 1955 la Secretaría de Recursos Hidráulicos trató de incrementar la precipitación pluvial en el Norte de México, especialmente en los estados de Chihuahua, Nuevo León, Durango y Tamaulipas, durante los meses de julio a septiembre; dispersando hielo seco (CO₂) por medio de avión en nubes cúmulos superenfriados.

CLIMAS SECOS Y SEMISECOS DE LA REPUBLICA MEXICANA



En 1954 y 1955 se sembró con la misma técnica únicamente en los estados de Chihuahua y Durango. No se realizaron pruebas estadísticas confiables, siendo los resultados totalmente subjetivos por lo que el proyecto se suspendió. (18)

En el Capítulo 6 se explicarán las pruebas estadísticas óptimas para evaluar este tipo de eventos.

En 1956 la misma Secretaría, inició otro proyecto experimental en las zonas aledañas a la Presa Calles, en el estado de Aguascalientes. En los tres primeros años de operación se utilizaron generadores de yoduro de plata instalados en tierra. El problema principal de este proyecto, fue de que no se llevó un control adecuado de operaciones, que finalmente no permitió una evaluación estadística confiable, por lo que también se suspendieron. (19)

Durante los meses de junio a septiembre de 1957 y 1958, el Instituto de Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional Autónoma de México, realizó una serie de experimentos de precipitación artificial en la Presa Lázaro Cárdenas, en el estado de Durango, con el propósito de aumentar el almacenamiento de agua.

Se sembraron nubes con temperaturas sobre 0°C utilizando cloruro de sodio, dispersado por medio de avión; el análisis efectuado no mostró resultados significativos, y nuevamente se suspendieron las actividades. (20)

Las operaciones de mayor duración en México y en el

mundo, corresponden a las realizadas por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., en la Cuenca de Necaxa, estado de Puebla.(Mapa 2)

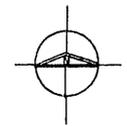
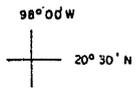
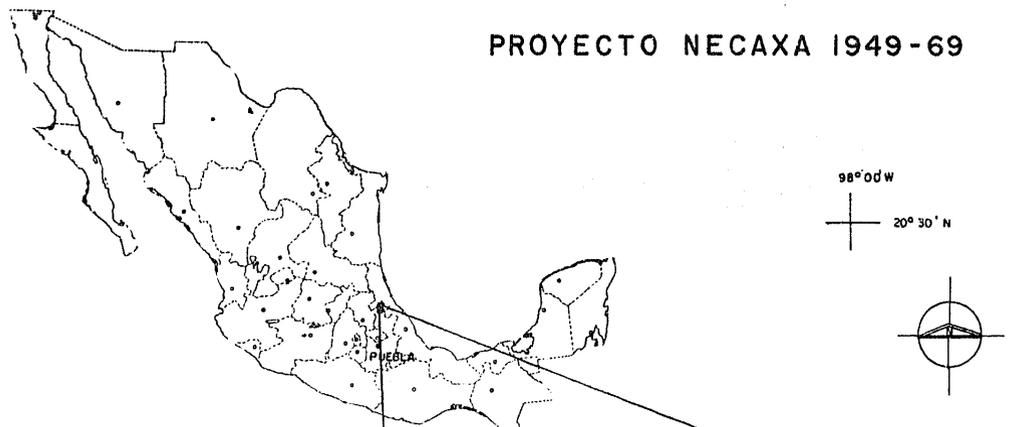
Las actividades se realizaron durante el período de lluvias, de junio a octubre, durante los años de 1949, 1950, 1951, 1953, 1954; las operaciones de siembra se hicieron con avión dispersando yoduro de plata en nubes donde se suponía existían buenas perspectivas de éxito; la siembra se realizaba de una a dos horas entre las 10 A.M. y las 14 P.M. Pero existieron numerosas interrupciones causadas principalmente por fallas del equipo.

En el avión se instaló un generador de arco eléctrico que quemaba de 25 a 50 gramos/hora de yoduro de plata sobre la zona de blanco. A partir de 1955 y hasta 1969, la siembra de nubes se realizó con quemadores de yoduro de plata instalados en tierra, estos fueron dos de arco eléctrico y seis de gas.



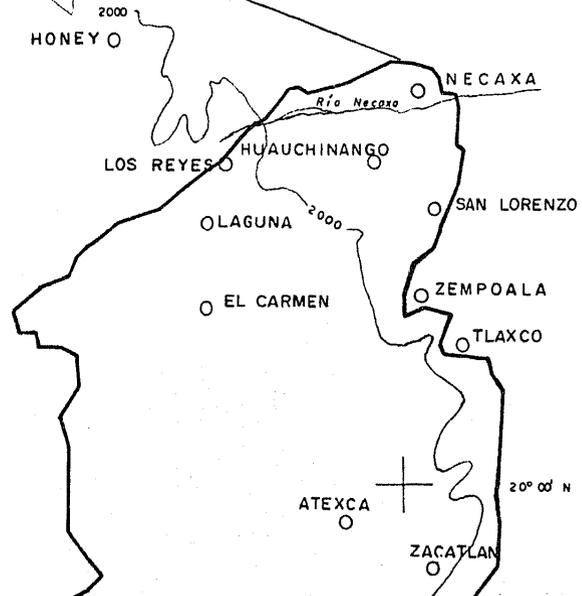
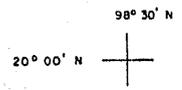
Figura 4 Quemador de yoduro de plata

PROYECTO NECAXA 1949-69

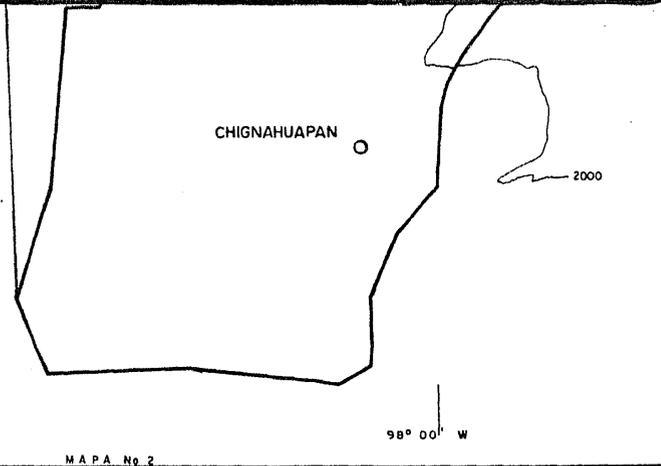


SIMBOLOGIA

-  LIMITE DE LA CUENCA
-  RIO
-  PRESA
-  ASENTAMIENTOS HUMANOS
-  CURVAS DE NIVEL



FUENTE: Cía. de Luz y Fuerza Motriz, S. A.
Operaciones de Estimulación de lluvias en las
Cuencas de Nacaxa (PUE.) y Lerma (MEX).
MEXICO 1962.



MAPA No. 2

Los quemadores eran puestos a funcionar de las 9 A.M. a las 15 P.M., en días escogidos al azar en la zona de blanco, en un área aproximada de 656 Km².

La razón de sembrar con yoduro de plata en la Cuenca de Necaxa, no se conoce, se considera que la siembra debería basarse en la temperatura de las cimas de las nubes que se forman en la zona de blanco (debido a la latitud y condiciones atmosféricas, se supone un predominio de nubes con temperaturas aproximadas a los 0°C.)

Un argumento a favor de la siembra de nubes con yoduro de plata en la Cuenca de Necaxa, es que llueve con más frecuencia durante la noche, y es muy probable que las nubes sí tengan cimas superenfriadas, pero las siembras se efectuaban de las 10 A.M. a las 15 P.M.

Un argumento en contra es que las granizadas sobre la Cuenca de Necaxa casi no ocurren, excepto en las primeras y últimas lluvias de temporada, aunque se hace notar que este es un índice mínimo de si las nubes alcanzan temperaturas bajo cero. (21)

Las conclusiones obtenidas por curvas de porcentaje de anomalías, indican que durante ese período de siembras, la lluvia se distribuyó beneficiando el Valle de Tulancingo, y la zona de Apan, y no se descarta la posibilidad de que los efectos hayan sido por el efecto de la siembra. (22)

Posteriormente esta conclusión fue discutida, ya que se detectó que el incremento de la lluvia en la zona oeste de la Cuenca de Necaxa si es significativo, sin que esto implique que es por efecto de la siembra. (23)

Otra conclusión fue que de los datos obtenidos estadísticamente, el aumento de la precipitación que se presentó en la Cuenca de Necaxa durante los veinte años de operaciones, está dentro de la variabilidad natural de la precipitación. (24)

La misma Compañía llevó simultáneamente otro proyecto en la Cuenca Alta del Río Lerma, los resultados no han sido cuantificados.

De 1967 a 1970 la Secretaría de Recursos Hidráulicos, la Comisión de Agua Potable de Monterrey y la Universidad de Nuevo León, efectuaron un proyecto de estimulación artificial de la precipitación en una zona de Monterrey y sus alrededores; utilizando generadores de yoduro de plata instalados en tierra.

Los dos primeros años del programa fueron enfocados a obtener resultados bajo ciertas condiciones meteorológicas específicas, determinadas a través de estaciones radio-sonda, localizadas en esa entidad, que aparecían como propicias.

En los años siguientes se ampliaron las operaciones

incrementándose el número de días sembrados e incorporándose un mayor número de generadores de núcleos de yoduro de plata.

Los resultados presentados no tuvieron validez, ya que no se obtuvieron con pruebas estadísticas confiables. (25)

Se desarrolló un programa experimental por parte de la Secretaría de Recursos Hidráulicos para el período 1970-1976, con el objeto de incrementar la precipitación en un área de 6,400 Km² que abarca las cuencas de los ríos Santa Clara, San Carlos, Ensenada, San Antonio, Guadalupe y la Cuenca Alta del río Las Palmas en el Noroeste de la Península de Baja California.

La siembra se realizó de octubre de 1970 a febrero de 1971, utilizando generadores de acetona-propano, el material usado para la siembra fue una mezcla de yoduro de plata, yoduro de amonio y acetona.

Durante el primer año hubo un aumento efectivo de la precipitación en la zona de blanco; por lo que se decidió continuar el experimento por los años restantes, para después efectuar una evaluación adecuada; pero por falta de recursos económicos, no se siguieron efectuando los experimentos, se concluyó que no eran significativos estadísticamente los resultados obtenidos, debido a la corta duración del proyecto (26)



Generador de yoduro de plata
Figura No. 5

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Comisión de Aguas del Valle de México dependiente de la Secretaría de Recursos Hidráulicos; desarrollaron un programa experimental de estimulación de la precipitación en el Valle de México, durante los años de 1973 a 1979.

El objetivo fue el de incrementar la precipitación de la Sierra de Chichinautzin, localizada al sur del Valle, para tratar de aumentar los niveles de pozos de la zona, cuyas aguas serían útiles para la Ciudad de México.

Las siembras se realizaron de junio a octubre, utilizando yoduro de plata dispersado por generadores instala-

dos en tierra, siendo cinco de arco eléctrico y cinco de mecha impregnada con yoduro de plata y quemada con gas butano, (similares a los que aparecen en la figura número 4) sembrándose de las 9 A.M. a las 15 P.M.

El rendimiento de los quemadores fue de un 50%, siendo los principales problemas la falta de material, fallas de luz eléctrica, falta de inspección, y olvido de operadores de encender los generadores, siendo la zona de blanco de 35,000 Km² aproximadamente.

Las evaluaciones estadísticas se hicieron en base de la razón de la precipitación en días sembrados/días no sembrados; delimitando las zonas de incremento y decremento de la zona.

La selección de días sembrados se llevó a cabo antes de que principiaran las operaciones de cada año, por computadora y al azar, teniéndose además períodos históricos de la precipitación para comprobación.

Con los resultados obtenidos se rechazó la hipótesis nula (H_0), donde hay diferencia entre las poblaciones de días sembrados y días no sembrados, y si las hay, es por la variabilidad natural de la lluvia, y se aceptó la hipótesis alterna (H_1), donde sí existe diferencia entre los datos obtenidos de días sembrados y días no sembrados por efecto de la siembra, aplicando un nivel de significancia de 5%. (Las hipótesis H_0 y H_1 , se utilizan para efectos de com

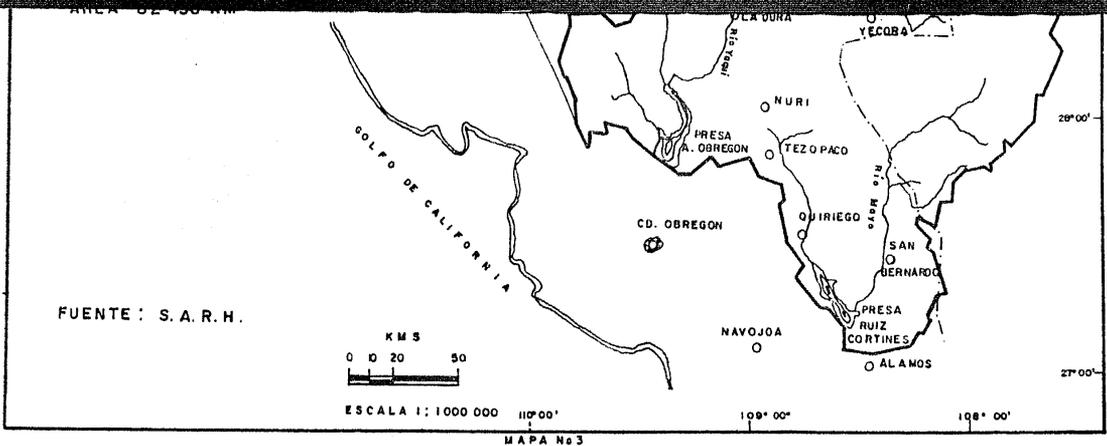
probación en pruebas estadísticas).

La prueba estadística que se utilizó fue U Mann Whitney, de los siete años correspondientes al período, en dos no se operó por falta de presupuesto, y a lo largo del desarrollo de los años siguientes, el presupuesto se redujo cada año y se incrementó el costo de material y la mano de obra, limitando la investigación científica. (27)

En 1980 la Comisión de Aguas del Valle de México, hizo una evaluación de los primeros tres años de 1974 a 1976 de siembra, y reportó resultados muy significativos; pero en 1981 se hizo también una evaluación por parte del Departamento de Física de Nubes del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde se detecta por métodos estadísticos aceptables, que no fue el efecto de la siembra, sino la variación natural de la precipitación lo que causó la diferencia en la precipitación; además se hizo una crítica del mal control y diseño del experimento. (28)

En 1976 y durante el período de lluvias de julio a septiembre, la Secretaría de Recursos Hidráulicos del estado de Sonora, patrocinó el proyecto de estimulación artificial de la precipitación en las cuencas de los ríos Sonora, Yaqui y Mayo. (Mapa 3)

Entre los objetivos de este programa estaban:



a) el determinar las condiciones atmosféricas bajo las cuales se podría incrementar artificialmente la precipitación en las mencionadas cuencas y b) evaluar los resultados en función de análisis estadísticos.

En la cuenca del río Sonora, la siembra se realizó desde tierra con generadores de yoduro de plata en sitios donde existían corrientes de aire ascendentes, no se precisaba si el yoduro de plata llegaba a la parte superenfriada de la nube, simultáneo a éste método se realizaba la siembra por medio de avión dispersado el yoduro de plata por pirotécnicos. Las siembras se realizaron en un área aproximada de $20,340 \text{ Km}^2$ y realizándose por 37 días. En las cuencas de los ríos Yaqui, y Mayo con un área aproximada de $62,000 \text{ Km}^2$, se sembraron los topes de nubes cúmulos superenfriados con avión equipado con pirotécnicos de yoduro de plata.

Se realizaron cuarenta y siete vuelos, sembrándose más de cuatrocientos sistemas nubosos, las observaciones visuales, y de radar para las tres cuencas durante el período de siembra, determinaron visualmente incremento del tamaño en algunas nubes sembradas, y en algunos casos se detectó precipitación.

Este proyecto fue de tipo operacional, adoptado debido a la sequía que durante esos meses afectaba al estado, ya que se había reducido el almacenamiento de agua en las

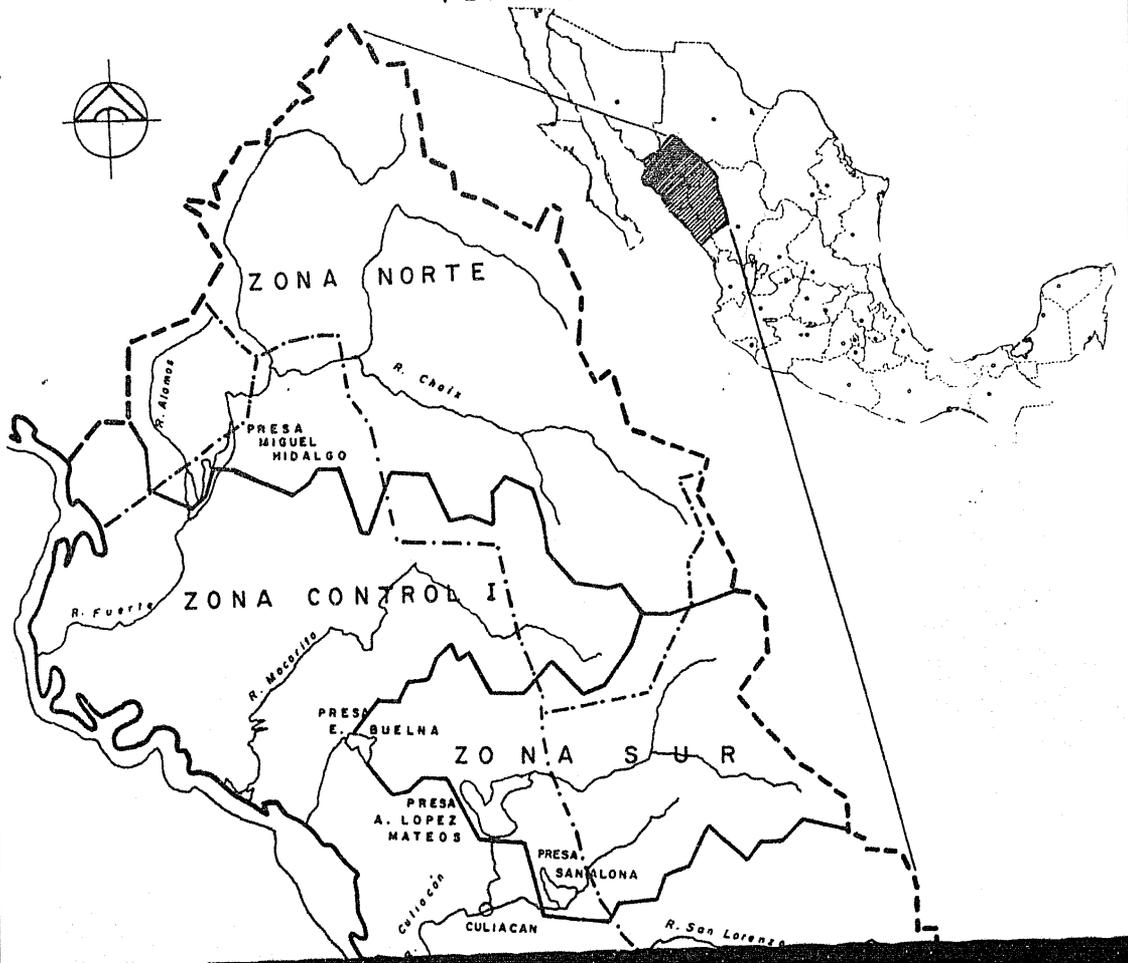
presas a niveles muy bajos. No se realizó ningún tipo de prueba estadística, y debido a que las observaciones se realizaron por radar y visualmente, no se pudo concluir que la siembra de yoduro de plata modificara la estructura de la nube e incrementara la precipitación. (29)

Más tarde la Secretaría de Recursos Hidráulicos y el Comité Directivo de Riego No. 10, 74 y 75 acordaron llevar en conjunto un programa para estimular la lluvia en el estado de Sinaloa, debido a la escasez de agua que se presentaba en esa región.

Este programa se dividió en dos temporadas, la primera durante el verano; iniciándose el 14 de julio y finalizando el 10 de octubre de 1977. Las operaciones de siembra en la temporada de verano, se efectuaron sobre dos zonas, una que comprende las cuencas de los ríos Fuerte y Alamos, sembrándose durante sesenta y seis días favorables; y la otra abarcando las cuencas de los ríos Humaya, Tamazula y Mocorito, en donde se sembraron setenta y cinco días favorables. (mapa 4)

Se utilizó un avión equipado con pirotécnicos de yoduro de plata depositándose en el tope de nubes cúmulos superenfriados. Posteriormente y a fines de diciembre de 1977, se decidió iniciar un proyecto piloto para estimular la lluvia durante los meses de la estación de invierno. Del 14 de enero al 1° de marzo de 1978, se sembraron las

PROGRAMA DE ESTIMULACION DE LLUVIA EN EL ESTADO DE SINALOA
VERANO - INVIERNO 1977 - 78



SIMBOLOGIA

--- LIMITE ESTATAL

— LIMITE DE LA ZONA DE SIEMBRA

~ RIO

~ PRESA

O CAPITAL ESTATAL

ZONA CONTROL II

FUENTE: S.A.R.H. 1978.

MAPA No 4

mismas cuencas que durante la estación de verano, en nubes cúmulos superenfriados con bengalas de yoduro de plata durante ocho días que se consideraron favorables.

Para fines estadísticos y de comprobación del proyecto, se contó con zonas de blanco y zonas de control siendo éstas las Cuencas de los ríos Elota, Piaxtla y Sinaloa, la prueba estadística que se utilizó fue la de U Mann Whitney.

Según resultados publicados en el informe final del Programa de Estimulación de lluvias del estado de Sinaloa, se incrementó la precipitación entre un 6 y 14% durante los dos períodos sembrados (verano e invierno).

Debido a la corta duración del proyecto en ambas estaciones del año se pudo concluir que el incremento presentado en la precipitación, está dentro de la variabilidad natural de la lluvia y es mínima la probabilidad de que haya sido por la siembra de nubes (30)

De julio a octubre de 1977 y 1978 realizó la misma Secretaría tres proyectos de estimulación artificial de la precipitación, en los estados de Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosi y Durango; sembrándose nubes cúmulos superenfriados por medio de pirotécnicos de yoduro de plata instalados en avión.

No se publicaron conclusiones por carecer de resultados confiables.

A partir de 1980 el Departamento de Estimulación Artificial de la Precipitación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, ha realizado una serie de programas en varios estados de la República, para tratar de incrementar la precipitación; entre estos estados están: Aguascalientes, San Luis Potosí, Zacatecas, Durango Norte y Durango Sur, abarcando aproximadamente un área de 14.8 millones de hectáreas con un presupuesto de veinte millones de pesos para ese año de operaciones. En ese mismo año, la Secretaría efectuó otros programas de estimulación de lluvia por contrato en los estados de Hidalgo, Guanajuato, Nuevo León, Chihuahua, Sonora y Baja California Sur, sembrando en nubes cúmulos superenfriados con pirotécnicos de yoduro de plata, instalados en avión. (Mapa 5)

En el año de 1981 el mismo Departamento continuó durante los meses de junio a octubre los proyectos de estimulación artificial de la precipitación en los estados de Aguascalientes, Durango, San Luis Potosí, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla y Zacatecas, cubriendo un área de 25.01 millones de hectáreas, con un costo aproximado de 46,180 millones de pesos.

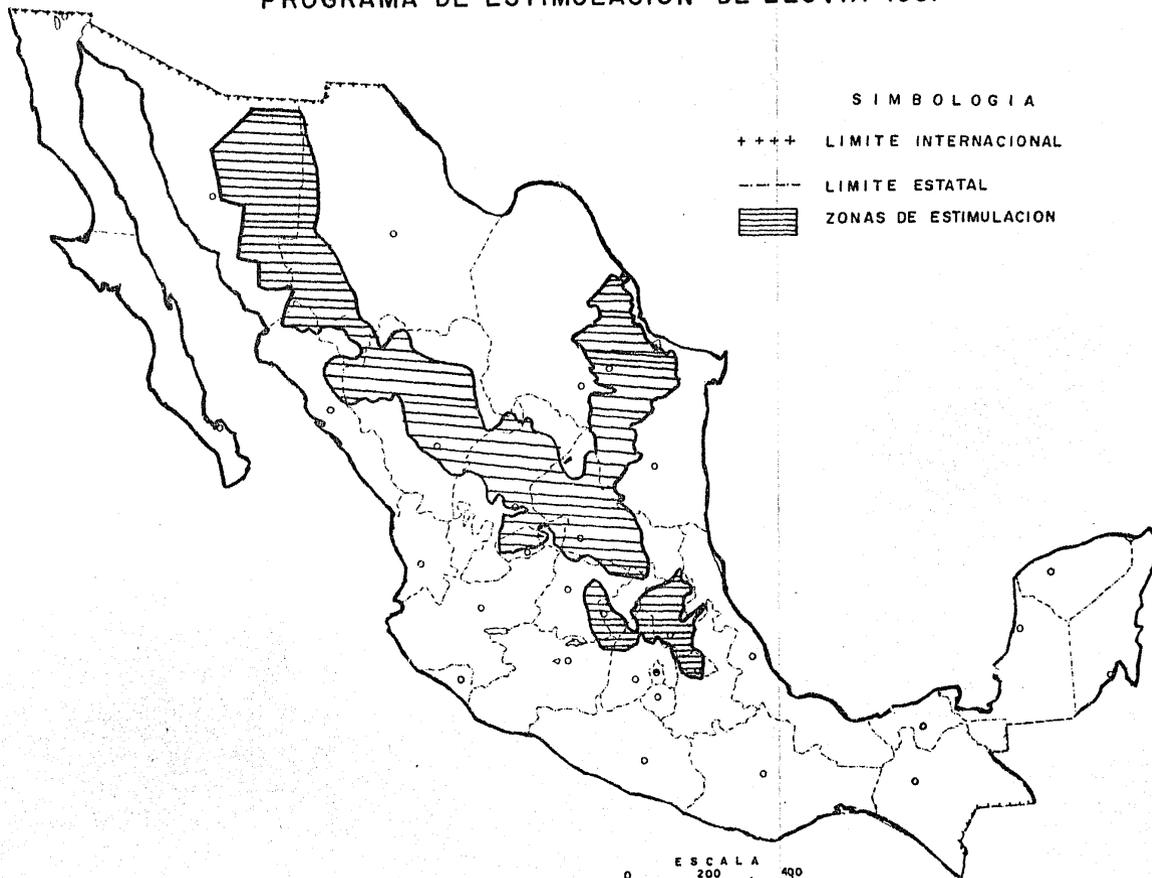
En ese mismo año se realizaron proyectos especiales por severas sequías en los estados de Sinaloa y Sonora. (Mapa 6) La siembra se realizó con yoduro de plata dispersado desde avión y quemadores situados en tierra.

PROGRAMA DE ESTIMULACION DE LLUVIA 1980



FUENTE : SARH

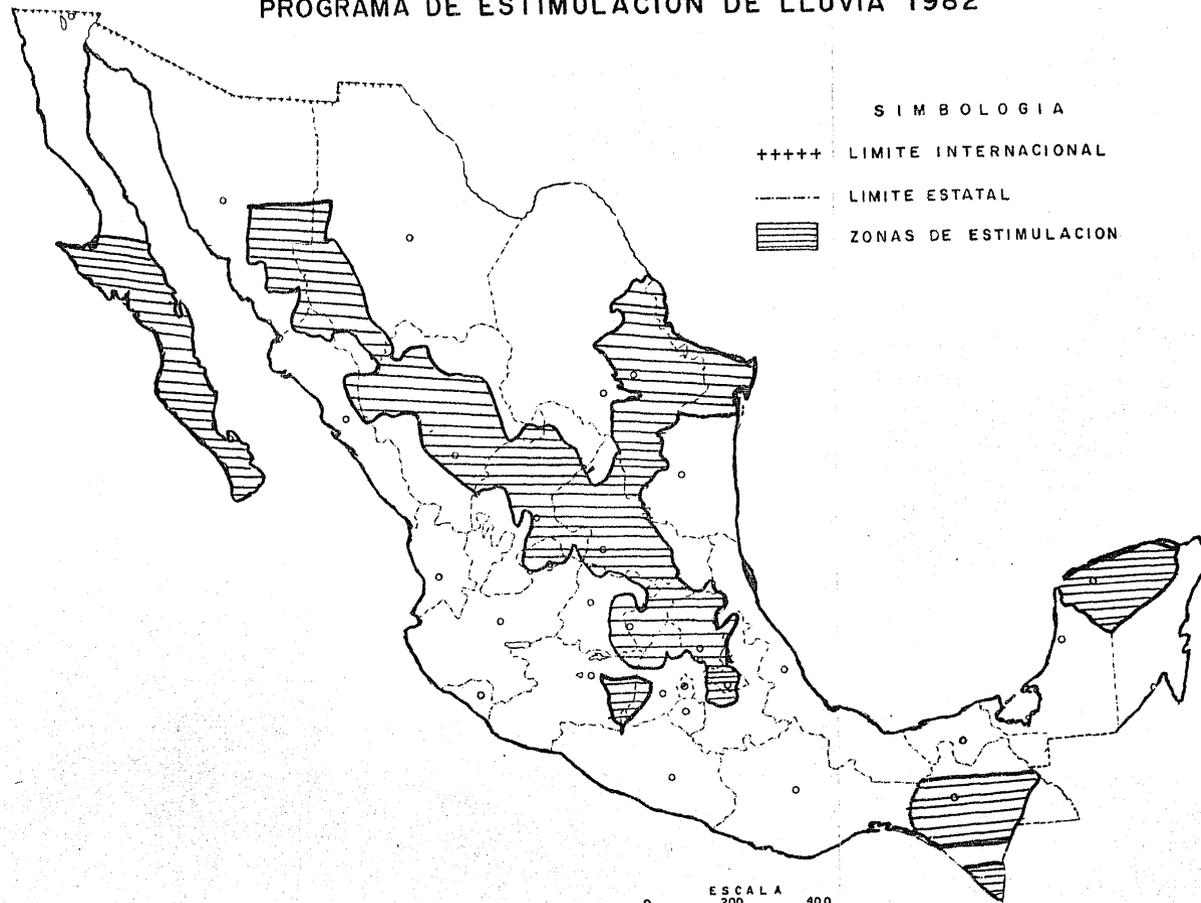
PROGRAMA DE ESTIMULACION DE LLUVIA 1981



Continuaron los experimentos en 1982 en los estados de : Aguascalientes, San Luis Potosí, Durango, Puebla, Hidalgo, Guanajuato, Nuevo León, Sinaloa, Zacatecas y Tamaulipas, e iniciándose en Baja California Sur, Estado de México, Yucatán, Chiapas y Sonora. (Mapa 7) Las operaciones se realizaron de junio a septiembre, el material nucleante utilizado fue yoduro de plata, sembrado en nubes cúmulos superenfriados por medio de avión y quemadores instalados en tierra. (31)

No se han publicado las conclusiones y resultados de los proyectos efectuados durante los años de 1980, 1981 y 1982; por lo que no se puede estimar si existió variación en la precipitación por efecto de la siembra de nubes.

PROGRAMA DE ESTIMULACION DE LLUVIA 1982



SIMBOLOGIA

+++++ LIMITE INTERNACIONAL

----- LIMITE ESTATAL

▨ ZONAS DE ESTIMULACION

FUENTE : SARH



3. OTRAS APLICACIONES DE LA SIEMBRA DE NUBES: SUPRESION DE GRANIZO, DISIPACION DE NIEBLA Y MODIFICACION DE HURACANES.

Además de los experimentos de estimulación artificial de la precipitación, se realizan experimentos sobre disipación de nieblas, supresión de granizo y modificación de huracanes.

Respecto a la niebla que causa daños principalmente en carreteras y aeropuertos, disminuyendo la visibilidad y ocasionando accidentes, se realizan experimentos en diferentes países para disiparla, siendo en algunos de ellos los resultados favorables.

Entre las técnicas empleadas se encuentra la de producir aire caliente ya que se necesita energía para convertir las gotitas de niebla en vapor de agua; y el aire del ambiente debe ser suficientemente caliente para contener el vapor de agua sin llegar a la saturación ó sobresaturación. La cantidad de calor que se requiera, dependera de la densidad de la niebla y la temperatura del aire.

En 1936 en Inglaterra, se creó el sistema Fog Intensive Dispersal Of (FIDO), el cual consiste en rociar combustible por medio de pipas perforadas a lo largo de la pista de aterrizaje y encenderlo, produciendo así calor. En va-

rias ocasiones el sistema sobre pistas de aterrizaje se utilizó, dando resultados satisfactorios.

Más tarde, en 1949, se implantó este sistema en el aeropuerto civil de Los Angeles y después de cinco años se suspendió. La técnica demostró ser inadecuada para nieblas densas, terminando de operar en citado aeropuerto. Se continuaron las investigaciones para disipar la niebla caliente, empleándose helicópteros, los cuales producen fuertes corrientes de aire caliente que se mezclan con la niebla, ya sea delgada ó espesa, disipándola; la técnica fue aplicada en varias ocasiones con resultados satisfactorios, pero cuando se aplicó a grandes aeropuertos, el número de helicópteros debía ser proporcional a la superficie cubierta por la niebla, por lo que surgió el problema del tráfico aéreo. Así éste método se emplea en pequeños lugares con niebla no muy densa.

Se ha sembrado también nieblas calientes con núcleos higroscópicos como la sal común. Las partículas de sal propician la formación de grandes gotas que precipitan, se disminuye la presión del vapor de agua en el aire y las gotitas de nube pequeñas pueden evaporarse más rápido, no se presentaran movimientos ascendentes, por lo que se necesita de importantes cantidades de material nucleante; las partículas de sal deben tener un tamaño específico que depende de las condiciones microfísicas de las nieblas, si

las partículas higroscópicas son grandes, éstas caeran a tierra más rápido y no reducirá la humedad, si éstas son muy pequeñas el resultado será ineficiente. (32)

Otro problema con el sembrado de sal es la corrosión excesiva sobre instalaciones del aeropuerto y aviones. También la urea es empleada, pero el costo de este material es excesivo, por lo que no es empleada con frecuencia, y los resultados son muy semejantes a los que se obtienen con la sal.

Con el uso del jet, se presenta la posibilidad de calentar el aire, por los gases que proporciona el motor, A partir de 1970 la Fuerza Aérea Americana, desarrolló un sistema similar al del motor del jet, construyó un quemador empleando bajas temperaturas para la combustión, reduciendo el riesgo de explosión. Para la disipación de nieblas calientes también se ha epleado partículas cargadas eléctricamente, pero las investigaciones continúan.

Por otro lado la técnica más utilizada y efectiva, para disipar nieblas superenfriadas es la de Bergeron-Findeisen, cuando los cristales de hielo están formados crece ran a expensas de las gotas superenfriadas, el calor latente es liberado evaporando otras gotitas de niebla y otras caeran como copos de nieve.

También se ha empleado el hielo seco, pero se re-

quieren de mayores cantidades de este material, cuya temperatura es de -80°C .

Se han realizado experimentos en laboratorio, mezclando propano líquido y yoduro de plata, se supone que es mucho más efectivo que el propano puro a temperaturas superiores de -4°C . (33)

Supresión del Granizo.

Han sido muy cuantiosos los daños ocasionados por el granizo en el mundo, por esta razón se han llevado a cabo experimentos para tratar de suprimirlo empleando diferentes métodos, se mencionan en este trabajo sólo algunos de ellos:

En 1896 Albert Stiger empleó un cañón de grandes dimensiones, éste método se extendió por Europa Central, en 1902 se efectuó una conferencia para evaluar esta técnica seguida por la supervisión científica de experimentos, el resultado fué que el cañón no servía para tal efecto.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el general francés F.L. Ruby desarrolló un pequeño cohete con rango limitado de altitud que transportaba explosivos, pero se le dió mayor importancia comercial que científica, por lo que los experimentos se suspendieron por carecer de evaluaciones estadísticas.

De 1948 a 1952 se realizaron experimentos a gran escala en Tessin, Suiza, empleándose cohetes explosivos, se observaron diferencias en regiones protegidas y no protegidas, los resultados no fueron cuantificados. Más tarde en Estados Unidos, agencias comerciales de supresión del granizo dieron su teoría de sobresiembra, según la cual ésta producía mayor número de granizos, pero de menor tamaño siendo éstos menos peligrosos, ó bien llegarían al suelo en forma de lluvia; esta es una teoría que prevalece actualmente. (34)

En la República Popular China son empleados varios métodos para suprimir el granizo, siendo el más utilizado el llamado "National Guns"; consiste en un tubo de hierro de a proximadamente dos metros de longitud que está montado en soportes, el cañón apunta con dirección a la nube cuando se supone que pudiera precipitar granizo (tomando en cuenta el color y espesor de la nube), y se protege la región disparando con el cañón cohetes de yoduro de plata,

En opinión de varios expertos, este método es efectivo ya que interrumpe el desarrollo del granizo, desafortunadamente no se ha realizado un control estricto de los resultados y por esto es difícil dar estimaciones científicas.

En Italia se utiliza un cohete con yoduro de plata llamado "Italrazzi", este tipo de experimentos también se han realizado en Francia, Bulgaria, Yugoslavia y otros países a-

fricanos. Dos ó tres cohetes son disparados después de haber caído los primeros granizos sobre la tierra; después de la explosión de los cohetes se observa que el tamaño del granizo decrece considerablemente.

El uso del cohete "Italrazzi" no tiene bases científicas, ya que el decremento en el tamaño del granizo puede ser parte de procesos naturales, y no causado por las explosiones. Algunos científicos explican que el efecto de supresión del granizo por medio del cohete, se debe a la onda de sonido que resulta de la explosión de éste. En base a cálculos teóricos mostraron que cuando el agua está comprimida en un espacio limitado de una masa de hielo, la onda del sonido produce vibraciones sobre el agua, rompiéndose la capa de hielo; debido a la temperatura el granizo llegará al suelo en forma de lluvia. La mayoría de los científicos no están de acuerdo con este método.

En la Unión Soviética se empleó un gran número de cohetes con yoduro de plata, depositándose en la región de la nube donde se piensa que se está formando el granizo, se han reportado resultados satisfactorios, pero no desde el punto de vista científico.

Existen tres teorías básicas para suprimir el granizo: "Glaciación, Distribución Benéfica y Reducir la Trayectoria". (35)

Teoría de Glaciación.

El desarrollo del granizo dependerá de una cantidad adecuada de agua superenfriada, si ésta cantidad se redujera considerablemente, el desarrollo del granizo, podría ser retardado convirtiendo el agua superenfriada en partículas de hielo. Existen dos métodos para que esto se realice:

a) Reducir la cantidad de agua superenfriada existente en la zona de desarrollo del granizo, convirtiéndolo en cristal de hielo.

b) Reducir la cantidad de agua superenfriada en la zona de formación de los embriones, que tal vez ya no lleguen a la zona de desarrollo del granizo. (36)

La glaciación puede ser inducida por el sembrado de yoduro de plata, hielo seco ó propano líquido. Se requiere sembrar aproximadamente 1,000 gr/min. de yoduro de plata, en la zona de desarrollo del granizo, tal proporción de sembrado podría reducir el tamaño de los granizos, ó suprimir su desarrollo, pero se requieren grandes cantidades de material nucleante, por lo tanto este método no es recomendable.

En la zona de formación del granizo se necesitan menores cantidades de material nucleante y puede suprimirse su formación; existe el riesgo de incrementar al máximo el tamaño del granizo, si el agente nucleante no está presente en suficientes cantidades ó no es dispersado adecuadamente. Para ambos casos se emplea un avión el cual lleva el material

a la base de la nube, permitiendo que las corrientes ascendentes lo lleven a la región superenfriada de la nube.

Teoría de Distribución Benéfica.

El objetivo es incrementar el número de embriones, distribuyendo el agua superenfriada disponible entre ellos, resultando granizos de menor tamaño que causarían menos daños y en algunas ocasiones llegaran a tierra en forma de lluvia.

Hay que tomar en cuenta en la Distribución Benéfica la modificación del embrión de grandes tamaños. El tamaño del espectro del embrión producido en la zona de formación del granizo es determinado por el mecanismo de crecimiento de las gotas, si existe coalescencia, el tamaño de las gotas será considerable debido a las corrientes de aire ascendente y descendente en la nube.

Una vez que se ha formado el granizo se desarrolla principalmente por acreción, llegando a tener un tamaño donde puede empezar a coleccionar gotas de agua. El proceso de desarrollo por sublimación tenderá a reducir el tamaño del espectro; el proceso de acreción tenderá a aumentar su tamaño. Se lleva a cabo la sobresiembra para aumentar el número de granizos y lograr la difusión del agua disponible en éstos, los cuales no se desarrollarán de gran tamaño y por lo tanto causarían menores daños. (37)

Teoría Reduciendo la Trayectoria.

Los granizos ya formados realizarán cortas trayectorias en esta zona por lo que el tamaño del granizo será pequeño y menos perjudicial.

Se requieren grandes cantidades para agotar el agua superenfriada que se localiza en la zona de desarrollo; las partículas realizarán cortas trayectorias a través de la zona de desarrollo; por lo que el tamaño del granizo disminuirá.

Para algunos investigadores lo más acertado es sembrar un núcleo de yoduro de plata por litro, otros sugieren el sembrado de cien núcleos por m^3 .

Se ha realizado un gran número de experimentos para suprimir el granizo, a la fecha no existen conclusiones al respecto, por lo que se siguen elaborando teorías que tal vez logren resolver el problema.

Modificación de Huracanes.

La fuerza destructiva de los huracanes ocasionará inundaciones, muertes y destrozos, aunque en el caso de México beneficie las actividades agropecuarias, industriales, abastecimiento de presas, mantos acuíferos, etc., y que, con la ausencia de éstos se presentarían estragos irremediables en el país.

En otros países se ha tratado de disminuir su fuerza, principalmente de los vientos, pero han sido pocos los resultados positivos por lo que se realizan continuamente investigaciones al respecto.

Los primeros experimentos de Modificación de Huracanes se efectuaron el 13 de octubre de 1947 por Langmuir, empleando hielo seco cerca del ojo de un huracán localizado al este de Jacksonville en Florida, después de sembrado el huracán cambio repentinamente de dirección. (38)

Se realizó una serie de proyectos entre los que se encuentra el "Stormfury", que se inició en 1961, comandado por el Departamento de Comercio (NOAA) y el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el principal objetivo era el de explorar la estructura y mecánica de los huracanes y la susceptibilidad de que éstos pudieran ser modificados, realizando siembras experimentales con yoduro de plata, para determinar hasta que punto puede utilizarse ésta técnica con el objeto de alterar las características de las tormentas.

Entre 1961 y 1974 se realizaron modificaciones en cinco huracanes; siendo Esther el primer huracán sembrado del proyecto: se utilizaron pocas cantidades de yoduro de plata, hubo una reducción aparente de los vientos en un 10%. Este experimento se efectuó en septiembre de 1961.

En agosto de 1963 experimentos similares se realizaron en el huracán Beulah, se redujeron los vientos entre

10 y 14%. En agosto de 1969 se efectuaron nuevos experimentos en el huracán Debbie, sembrándose un total de cinco veces, con un período de dos horas entre cada siembra en un lapso de ocho horas. Después de cinco horas, los vientos habían disminuido de 180 a 125 Km/h; el huracán, días más tarde había incrementado sus vientos a 185 Km/h, sembrándose nuevamente hasta obtener una reducción en los vientos hasta 155 Km/h. (39)

La probabilidad de que la intensidad del viento haya decrecido en ambas ocasiones en forma accidental es muy pequeña. (40)

El problema más grande en la evaluación de estos experimentos es que el cambio en la velocidad de los vientos máximos (de 10 a 15%) causado por el sembrado está dentro de la variabilidad natural de la fuerza de los huracanes. (41)

Entre el 17 y 18 de agosto de 1969 fué sembrado el huracán Camille, "reviviendo" su intensidad ocasionando su entrada a tierra en los estados de Mississippi y Luisiana en Estados Unidos. (42)

En 1971 se sembró el último huracán de este proyecto, Ginger, las nubes sembradas estaban bastante lejos del centro de la tormenta, por lo que sólo se obtuvieron efectos locales.

Después de 1973, el Departamento de Defensa de los

Estados Unidos, decidió que la modificación de los huracanes no era de su responsabilidad y discontinuó el programa por su parte.

Observaciones de radar indican que muchas nubes que se encuentran lejos del ojo del huracán, contienen grandes cantidades de agua superenfriada, a estas nubes se les siembra con yoduro de plata, congelándose el agua superenfriada y liberando calor latente, repiéntose este proceso, el aire se expande y se enfría al mismo tiempo que ocurre la condensación y la sublimación, liberando más calor latente. El resultado es que las nubes sembradas crecen hasta llegar a niveles altos donde deja de ser parte de la tormenta, produciendo un menor circuito convectivo que intercepta al aire en dirección hacia el centro, debilitando a éste.

Del 15 de junio al 23 de septiembre de 1974, la Organización Mundial de Meteorología, organizó el Experimento Tropical del Atlántico del GARP (Global Atmospheric Research Program), continuación del proyecto Stormfury, la mayoría de los experimentos se llevaron a cabo en el Mar Caribe, en septiembre de ese mismo año se originó el huracán Fifi, que pasó por la zona de experimentación y entrando el 18 de septiembre a Honduras ocasionó grandes daños, se supone que fué afectado por el experimento. (43)

Durante la realización del proyecto Stormfury

(1961-1974) se han presentado varias sequías en el territorio mexicano, entre las más severas están la de 1971 y 1972 en estos años no se presentaron huracanes. En 1973 y 1974 las sequías afectaron los estados de Sonora, Chihuahua y Coahuila. La siembra de huracanes disminuyó la lluvia durante septiembre y a lo largo de todo el año en diversas regiones de México durante el período de operaciones.(44)

No se puede comprobar científicamente que las sequías ocurridas en México durante el proyecto Stormfury hayan sido consecuencia de la siembra de huracanes, ya que las precipitaciones varían a través del tiempo, y no se ha comprobado estadísticamente cuanto pueden ser modificados este tipo de fenómenos.

Se siguen realizando experimentos para confirmar las teorías del proyecto Stormfury. Al mismo tiempo se elaboran otras teorías como el de reducir la evaporación del océano durante la época de formación de huracanes, cubriendo la superficie del mar con una capa de aceite ó alguna otra sustancia química, la cual se rociaría cuando la superficie del océano no estuviese muy agitada, ya que el aceite no se mezclaría rápidamente con el agua. El área a ser tratada podría tener una extensión de 100 Km² y la membrana de aceite solamente unos cuantos centímetros, esta hipótesis no se ha llevado a la práctica. (45) Se espera que esto no se lleve a cabo ya que el índice de contaminación aumentaría en los océanos.

4. ASPECTOS QUE SE DEBEN CONSIDERAR PARA EFECTUAR EXPERIMENTOS DE ESTIMULACION ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACION.

Para la realización de un Proyecto de Estimulación Artificial de la Precipitación, ya sea con fines de investigación ó comerciales, deben tomarse en cuenta los conocimientos y experiencias en modificación del tiempo de científicos de la Atmósfera, en Meteorología Sinóptica, Climatología, Física de Nubes y Dinámica, para diseñar un buen proyecto.

La Organización Meteorológica Mundial propone desarrollar el siguiente proyecto que debe observar estos puntos:

I. Revisión , análisis y evaluación de factores climatológicos en la zona de experimentación.

II. Determinar los tipos de nubes que serán ó podrán ser sembrados.

III. Desarrollo del criterio para la siembra de nubes.

IV. Determinación de técnicas para el tratamiento de nubes.

a) Agentes de siembra que podrán ser empleados.

b) Localización de la parte de la nube en donde se sembrará, base, nivel medio, tope de la nube.

c) Método de dispersión de la nube (generador de yoduro de plata, pirotécnicos, cohetes, dispersor de hielo seco)

- d) Hora del día para sembrar
- e) Duración de la siembra en cada operación.

V. Requerimientos y equipo

- a) Centro operacional
- b) Equipo meteorológico
- c) Aviones
- d) Generadores en tierra
- e) Diversos tipos de material nucleante

I. Revisión, análisis y evaluación de factores climatológicos en la zona de experimentación.

Estos deberán estar basados en conceptos meteorológicos aceptables que puedan ser calculados en base a una rutina con suficiente frecuencia y aproximación de acuerdo a las necesidades del proyecto de siembra.

Se deberá determinar la época del año en que predominan los regímenes de precipitación en la zona prevista para el experimento, tomando en cuenta si es de origen orográfico, ciclónico ó convectivo.

Se elaborarían tablas que muestren frecuencias de la precipitación por meses, dirección del viento durante períodos lluviosos y de diferentes niveles durante todo el año.

Se realizarán estudios de correlación de precipitación, humedad y temperatura entre las estaciones situadas en

la zona propuesta para realizar el experimento y las de las zonas de control.

II. Determinar los tipos de nubes que serán ó podrán ser sembrados.

Los tipos de nubes dependerán del propósito de la siembra, el clima de la zona de blanco y la temporada del año. Para esto se elaboran tablas que muestren la frecuencia con la que se ha observado nubes bajas, nubes medias y nubes de desarrollo vertical; tanto en la zona de blanco como de control.

Se debe obtener el registro de alturas de la base y cúspide de las nubes, por encima del nivel del mar y con respecto a la altura de la estación, así como temperatura, espesor, tamaño de las gotas de la nube y la cantidad de humedad existente en el ambiente, donde se desarrolla ésta.

III. Desarrollo del criterio para la siembra de nubes.

Este criterio debe estar basado en registros meteorológicos aceptables y en la aplicación de la información útil obtenida por medio de climatología sinóptica de nubes, precipitación, sistema de tormentas y otros factores apreciables en la zona de blanco.

IV. Determinación de técnicas para el tratamiento de nubes.

a) Agentes de siembra que podrán ser empleados.

Dependiendo del tipo de nubes y objetivos del pro-

yecto, se emplearan diferentes nucleantes, ya sea de condensación ó congelación.

a.1) Núcleos atmosféricos de condensación.

En nubes cálidas donde la temperatura es mayor de 0°C. se siembra con núcleos de condensación, los que en de terminadas circunstancias facilitan la formación de la pre- cipitación, por el proceso de coalescencia.

En la atmósfera existen varios tipos de aerosoles, partículas determinantes en la formación de las gotitas. Es tos se forman por las siguientes causas:

- Por condensación y sublimación de vapor durante la formación de humo por calentamiento y combustión.
- Por desintegración mecánica y materia dispersa en la superficie de la Tierra.
- Por coagulación de núcleos para la formación de grandes partículas de combustión mixta.

Por otra parte los aerosoles pueden clasificarse de pendiendo de su afinidad por el agua en: higroscópicos, neu- tros e hidrofobos.

La nucleación sobre un aerosol neutro necesita de la misma sobresaturación que en el caso de la nucleación ho- mogénea; sobre un aerosol hidrofobo el cual no es mojable ó parcialmente mojable, la nucleación es más difícil y requie re de mucha mayor sobresaturación que en las partículas hi- groscópicas que son solubles y que tienen afinidad por el a

gua; son el polvo, las partículas procedentes de la combustión y las partículas de sal.

Dependiendo del tamaño, los núcleos de condensación pueden clasificarse en: núcleos de Aitken, núcleos grandes y núcleos gigantes.

Los núcleos de Aitken son producto de la combustión, procedente de reacciones naturales que tienen lugar en la atmósfera, los núcleos grandes y gigantes se piensa son partículas de sal liberada por la dispersión de espuma marina, con tamaños superiores de una micra. En núcleos de condensación continentales se ha encontrado sulfato, que se puede presentar en forma de dióxido sulfúrico ó combinado en forma de sal; sulfato amónico que predominan en los núcleos de 0.1 a 1 micra, y partículas insolubles que posiblemente proceden del suelo.

Como en la atmósfera siempre existen éstos núcleos de condensación, se necesitan corrientes de aire ascendente y suficiente humedad para que se formen las nubes.

La sal es empleada en la siembra de nubes, porque ésta ya no permite que las gotitas requieran de mayor sobresaturación.

Cuando ya está formada la nube, en su interior crecerán muchas gotitas a la vez, en las cuales se distribuye el vapor de agua disponible, cuando las gotitas tienen cierto tamaño caerán por gravedad más rápido que las pequeñas.

Las gotas grandes colectaran en su caída algunas de las gotas pequeñas que encuentran en su trayectoria y otras serán desviadas por las corrientes de aire que existe al rededor de la gota.

Así eficiencia de colisión será la relación entre el número real de choques y el de gotas existentes en el espacio barrido por la gota colectora en su caída, dependiendo del tamaño de la gota colectora y la gota capturable.

Se debe hacer mención que las colisiones no siempre producirán coalescencia, ya que cuando dos gotitas chocan se podrán presentar los siguientes resultados:

- Separarse tras el choque
- Unirse permanentemente por coalescencia
- Después de unirse por coalescencia, volver a separarse recuperando sus identidades iniciales
- Después de una coalescencia temporal, fraccionarse en cierto número de gotitas más pequeñas.

(46)

Así en nubes calientes, el crecimiento por difusión resulta demasiado lento para que pueda dar lugar ni siquiera a gotitas de llovizna en tiempo razonable, en estas nubes es indispensable la coalescencia para que se produzca lluvia.

El agua es sembrada en la nube cuando en ésta el espectro de gotitas es estrecho, el agua ocasionará diferencia de tamaños, iniciándose la coalescencia.

a.2) Núcleos de Congelación.

Los núcleos de congelación más empleados son el yoduro de plata (I_{Ag}) y el dióxido de carbono (CO₂) ó hielo seco, de acuerdo a las teorías de Bergeron-Findeisen, para nubes superenfriadas, aplicable en nubes que se extienden por arriba del nivel de los 0°C.. La teoría de Bergeron-Findeisen dice que cuando existen cristales de hielo en presencia de gotitas de agua superenfriada, la situación es inestable, por que la presión del vapor que requieren las gotitas de agua superenfriada para subsistir es mayor que la que requiere el cristal de hielo a la misma temperatura, por tanto las gotas de agua superenfriada se evaporan y el vapor se adhiere al cristal de hielo, haciendolo crecer y presentándose liberación de calor latente.

Cuando el tamaño del cristal es grande, empezará a descender por gravedad, presentándose choques con otras gotitas y cristales (acreción), resultando copos de nieve que más tarde dependiendo de la temperatura del medio ambiente, pueden caer en forma de lluvia.

El yoduro de plata es una sal con estructura cristalina similar al hielo, de color amarillo pálido, inodora

e insípido, que se oscurece al exponerlo a la luz, insoluble en agua, y de todos los núcleos de congelación empleados, actúa en la nube cuando ésta tiene temperaturas inferiores a -5°C .

El dióxido de carbono sólido (hielo seco), es soluble en agua, de color blanco, empleado en nubes calientes, pero principalmente en nubes superenfriadas, actúa de igual manera que el yoduro de plata; con la diferencia de que se requieren mayores cantidades de hielo seco y que la nube tenga muy bajas temperaturas, para obtener resultados similares.

- b) Localización de la parte de la nube en donde se sembrará: base, nivel medio, tope de la nube.

Existen tres razones que determinan por qué medios y en que lugar será sembrada una nube ó sistema de nubes, éstas son:

- Dependiendo del presupuesto obtenido para el proyecto.
- Por las condiciones condiciones meteorológicas
- Por la orografía.

Cuando un proyecto de estimulación artificial cuenta con un presupuesto reducido y el objetivo es el de disipar niebla baja, ó el de aumentar la precipitación en terreno accesible, se sembrará con quemadores instalados en

tierra, ya que es mucho más económico que el sembrado por medio de avión.

Cuando se usa este método, la probabilidad de que el material nucleante llegue a la nube es mínima, es de su ponerse que los quemadores se colocaron en dirección de las corrientes aire de preferencia próximos a las montañas, en horas indicadas en que se haya observado la formación de las nubes.

Exactamente no se sabe que porcentaje de material nucleante llega a la nube. Si la base de la nube tiene temperaturas de -5°C , y el material nucleante es yoduro de plata, los resultados serán positivos; si en la nube el ni vel de congelación se localiza en la parte media: posible mente el yoduro de plata sea absorbido por las gotas exis tentes ó probablemente sirva como núcleo de condensación, cuando ocurran sobresiembras de varios cientos por ciento.

Los quemadores instalados en tierra pueden ser u tilizados para disipar niebla baja, cuando el método para colocar el material nucleante se realiza por avión, se po drá sembrar la base, la parte media ó el tope de la nube; dependiendo del objetivo del proyecto y condiciones meteo rológicas de la nube.

Si el objetivo es disipar niebla alta, se deberá sembrar el tope de la nube, ya que no existiran corrientes ascendentes y con el uso de generadores la niebla no sería disipada.

En una nube con corrientes ascendentes, se podría sembrar en cualquier parte, ya que la corriente se encargará de distribuir el material nucleante.

Si en una nube con desarrollo vertical el nivel de congelación se localiza en la parte media, deberá sembrarse en el tope de la nube ó bien donde se localizen los -5°C .

c) Método de dispersión en la nube.

Diversos tipos de generadores trabajan con el principio de combustión de una solución de yoduro de plata en acetona condensándose por enfriamiento y obteniendo cristales de yoduro de plata con diámetros menores de una micra.

Existen generadores de arco eléctrico que emplean dos carbones, en donde uno de ellos es impregnado con yoduro de plata que generalmente se evapora en la flama.

Se debe de tener cuidado de evitar la prolongada exposición de yoduro de plata a los rayos del Sol ya que se deactiva, suponiéndose que por esta razón no se obtendrían resultados positivos en la estimulación de la precipitación. (47)

Otros generadores empleados son el de acetona, utilizado por Vonnegut en 1950, en donde el yoduro de plata se mezcla con acetona, añadiendo yoduro de potasio ó yoduro de amonio. La solución de yoduro de plata y ace

tona se rocía dentro de la flama, el yoduro se vaporiza formando millones de pequeños núcleos de congelación, de igual es empleado el propano líquido y gasolina.

Existen los generadores de combustible sólido como el caso donde el yoduro de plata es impregnado en píldoras de coque, las que son encendidas y dispersadas en la nube.

Otro tipo de generador es el de impregnar una cuerda de algodón con solución de yoduro de plata y acetona, la cuerda está controlada por un mecanismo de relojería, siendo ésta quemada en la flama de gas propano.

Los pirotécnicos con los que también se producen núcleos de yoduro de plata, pueden quemarse en tierra ó en el aire, pueden lanzarse desde el avión que vuela sobre las nubes ó dispersarse a ellas desde tierra, por medio de cohetes.

d) Hora del día para sembrar y

e) Duración de la siembra en cada operación.

Estos aspectos dependerán de la frecuencia de formación de las nubes a determinada hora, y estarán en función de la técnica que se emplee, que puede ser por generadores instalados en tierra, por medio de avión ó por cohetes, etc., considerando el número de generadores necesarios de acuerdo al tipo de nube ó sistema de nubes que serán sembrados.

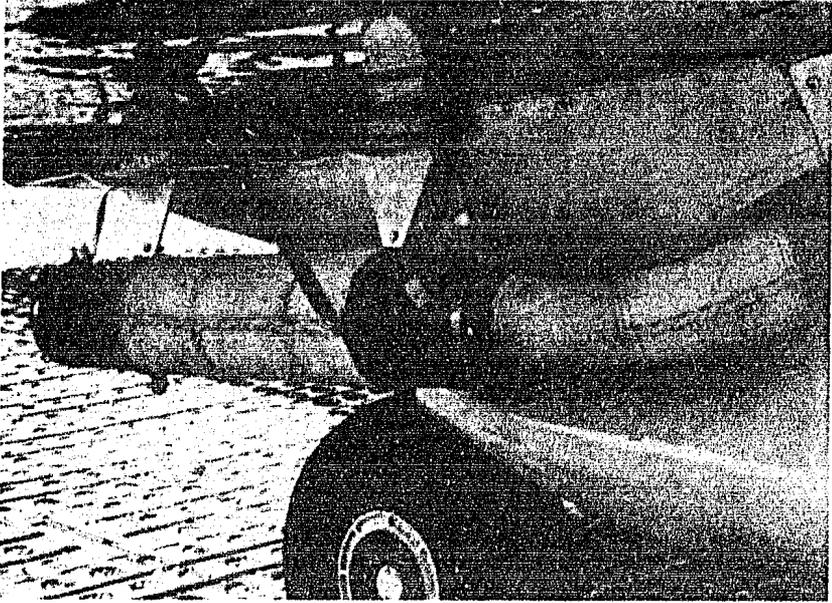


Figura. No. 6 Generador de yoduro de plata
instalados en avión.

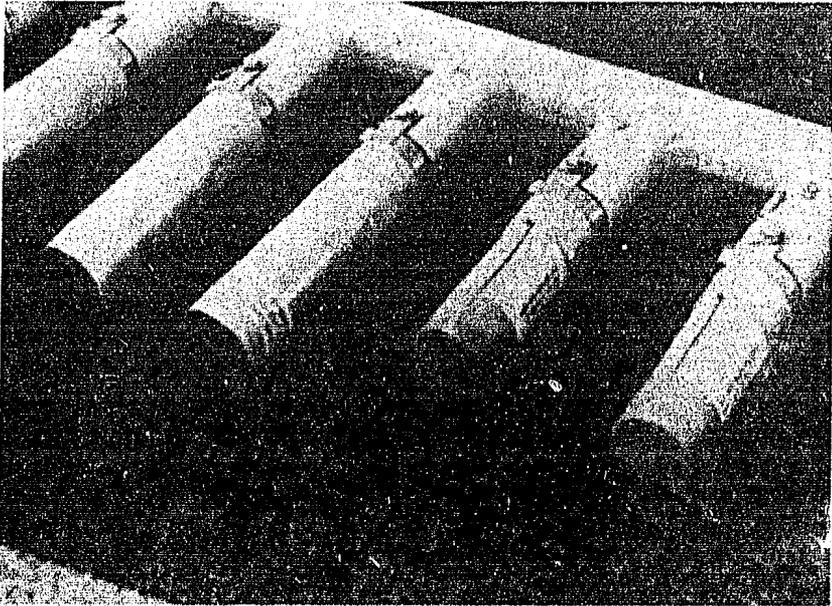


Figura No. 7 Pirotécnicos de yoduro de plata.

V. Requerimientos y Equipo

Es indispensable un centro operacional, con espacio adecuado para personal y equipo meteorológico, este equipo dependerá de los objetivos del proyecto, si es comercial ó experimental y del presupuesto; el equipo mínimo consta de radar, que es indispensable para el estudio de tormentas y el desarrollo de las precipitaciones, se han construido equipos completos de radar, conectados a computadoras, siendo algunos de los objetivos el determinar la distancia y dinámica de las nubes, región de la nube donde se formaran los primeros ecos, tiempo entre la siembra y la formación de la lluvia.

También se requiere de un monitor para ayudar a saber si existen oportunidades ó no de siembra, reconociendo con anticipación tormentas, granizadas y previendo su intensificación y disipación por la siembra.

Entre otros requerimientos se encuentran las cartas del tiempo, fotografías de satélite, pluviógrafos, pluviómetros, termómetros, higrómetros, anemómetros, veleta, radio-sonda, contadores de núcleos y otros instrumentos.

Los aviones que son adaptados para la siembra, generalmente se contratan por períodos determinados, dependiendo del presupuesto del proyecto. Se emplean el tipo de generadores y material nucleante adecuado, todo esto dependiendo del objetivo del proyecto.

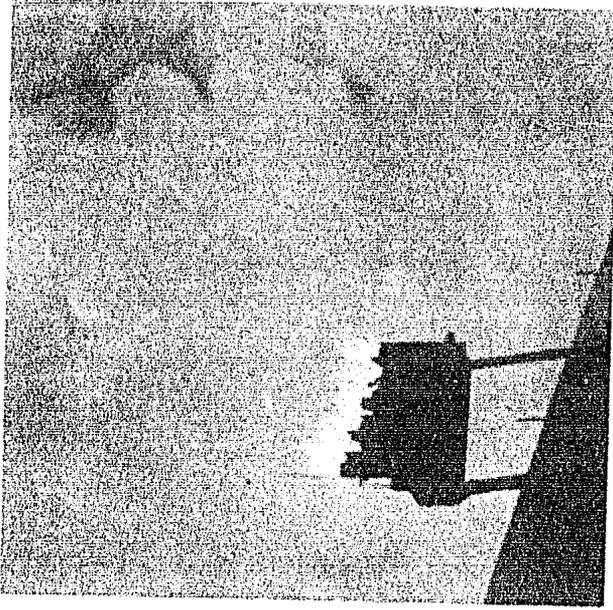


Figura No. 8 Pirotécnicos de yoduro de plata instalados en avión



Figura No. 9 Radar para determinar la distancia y dinámica de las nubes.

5 COMPROBACION DEL EFECTO DE SIEMBRA DE NUBES.

Uno de los problemas que se presentan en una unidad experimental ó de observación (una nube, tormenta, sistema de nubes) sembrada con algún material nucleante, es comprobar el efecto de la siembra usando un resultado observado, este resultado puede ser una medida cuantitativa de una ó varias propiedades como: espesor de la nube y sus cambios, ecos del radar, lluvia promedio de varios pluviómetros, etc.

Al obtener los resultados del experimento de estimulación artificial de la precipitación, se formulan las siguientes preguntas:

a) ¿Es el resultado del experimento diferente al que pudo haber ocurrido si no se hubiese efectuado la siembra?

b) Si existe diferencia en la cantidad de precipitación, ¿estará dentro de la variabilidad natural de la lluvia?, ó bien ¿será significativa esta diferencia en una prueba estadística?

c) Si existió aumento, ¿qué probabilidad existe de que haya sido por la siembra? , y ¿qué probabilidad existe de que hayan influido otros factores?

d) ¿Se podrían presentar en las mismas condiciones, los mismos resultados?

Si la contestación a todas las cuestiones excepto "c", es sí, y en "c" la probabilidad de que haya sido por la

siembra es muy grande, y la probabilidad de que hayan sido otros factores es muy pequeña; se puede concluir que en la siembra experimental de nubes demostró un efecto de la modificación del tiempo, pero si una ó más de las preguntas es negativa ó incierta, el experimento será difícilmente valuable.

La validez de los resultados de experimentos de siembra de nubes, frecuentemente estará basada en la aleatoriedad de las unidades, en grupos sembrados y no sembrados. Dependiendo de los objetivos del proyecto puede utilizarse en una zona de blanco, ó zonas de blanco y control.

Zona de Blanco.

En la que una sola zona es seleccionada para la siembra de nubes, esto forma la base para los programas operacionales, en donde todas las unidades son sembradas. No es muy utilizada es operaciones experimentales de siembra de nubes, ya que no se pueden comparar las unidades experimentales, a menos que los efectos de siembra de nubes produjeran incrementos enormes ó disminuciones muy marcadas durante el período del proyecto.

Zona del Blanco y Zona de Control.

Una zona es seleccionada para la siembra, y se denominará zona de blanco, y una segunda zona próxima a la zona de blanco, para control, y se denominará zona de control; esto hace necesario tener como recurso, de ser posible, un

período histórico de datos para preveer una estimación de la variación de la lluvia esperada en las zonas de blanco y control.

Si en las dos zonas, de blanco y de control llueve en forma similar, esto es, existe alta correlación en la lluvia de dichas zonas, puede obtenerse una línea de regresión para predecir la lluvia en la zona de blanco a partir de la lluvia en la zona de control, ambas zonas deben tener homogeneidad en lo orográfico y climatológico, por lo que debenencontrarse relativamente cerca.

Diseño Intercambiable.

Se seleccionan dos zonas, en las cuales la aleatoriedad es invariablemente incorporada en la decisión de cual zona se sembrará en cada unidad experimental; sembrándose en todas las ocasiones favorables.

Desde el punto de vista estadístico esta aleatoriedad es mejor que la de blanco-control, visto anteriormente y puede reforzarse si una tercera zona de control es considerada en la que nunca se sembrará.

Tanto el Diseño Zona de Blanco-Control y Diseño Intercambiable, son potencialmente susceptibles a problemas de contaminación, donde el material nucleante que es dispersado sobre la zona de blanco puede llegar a la zona de control, se ha propuesto el uso de múltiples zonas de control y de blanco, para comprobar en ambas las precipitaciones esperadas

en la zona de blanco y en una zona extra, fuera de los efectos de la zona de blanco.

Los métodos de comprobación difieren dependiendo de las hipótesis planteadas, dándose dos errores: rechazar una hipótesis experimental cuando sea cierta, error tipo I. ó el de aceptar una hipótesis cuando sea falsa, error tipo II; esto dependerá del nivel de significancia, tamaño de las muestras por analizar y del tipo de prueba que se realice.

Existen dos tipos de pruebas estadísticas; las no-paramétricas y las paramétricas, siendo las primeras las más utilizadas en la actualidad.

Entre las pruebas no-paramétricas para evaluar experimentos de siembra de nubes se mencionan algunos métodos históricos:

1. Método de Comparación.

La cantidad de precipitación observada después del sembrado de nubes se compara con la distribución de la frecuencia de la precipitación natural en la misma zona observada en el pasado. El método no es confiable, ya que la precipitación varía año con año.

2. Análisis de Porcentaje Normal.

Cuando existe únicamente zona de blanco, en la zona donde se siembra, se obtiene la precipitación "normal" de un período más ó menos grande de siembra, que se compara con la precipitación obtenida después de la siembra, de

pendiendo de la diferencia se determina si existió ó no incremento durante el período sembrado.

Este método es poco confiable ya que durante estos períodos (histórico y el de siembra), se pudieron presentar otros fenómenos meteorológicos que pudieron alterar los resultados, por lo que la precipitación es variable en el tiempo.

3. Análisis de Regresión.

Este método se utiliza cuando se efectua siembra en la zona de blanco, y se cuenta con una ó varias zonas de control para su comprobación.

Antes del experimento se plantean las hipótesis, H_0 que indica que no existió ningún efecto por la siembra y H_1 que indica que existió efecto por la siembra, tomando en cuenta los períodos históricos de la zona de blanco y de las zonas de control, se calcula el coeficiente de correlación (r) entre las lluvias de ambas zonas, y si este es aceptable a un cierto nivel de significancia, se ajusta la línea de regresión (para el período histórico). Terminando el período de siembra, también se calcula la línea de regresión y se comparan ambas líneas, aceptándose ó rechazándose la hipótesis nula, de acuerdo a la diferencia de las pendientes de ambas líneas, y de acuerdo al nivel de significancia propuesto.

Cuando el proyecto requiere zonas de blanco y de con.

trol, existen varios problemas y entre los cuales está el siguiente:

Dado a la similitud que deben presentar ambas zonas, normalmente se encuentran muy próximas una de la otra, y como ya se mencionó, es muy probable que la zona de control sea contaminada, por lo que los resultados obtenidos por este método no tendrán la suficiente confiabilidad, siendo el otro problema, que la lluvia no se distribuye normalmente.

De los métodos más empleados recientemente se cuentan:

4. Análisis de Curva Doble Masa.

Este método consiste en graficar la precipitación acumulada en una zona, contra el tiempo en período histórico, siguiendo el mismo procedimiento en el período de operaciones.

Considerando que L_1 es la línea poligonal en el período histórico y L_2 la correspondiente al período de operaciones; si en lo general las pendientes de ambas líneas no son muy diferentes; se puede suponer que la situación en cuanto a la precipitación es normal. Pero si se observa que después, en el período de operaciones, cambia la pendiente de la línea poligonal, entonces se puede determinar si el ángulo que marca este cambio puede ocurrir al azar ó no. Para esto se aplica una prueba de hipótesis, lo cual equivale a un

análisis de regresión.

5. Análisis de Razón Simple.

Método empleado cuando se tiene solamente la zona de blanco y la siembra es aleatoria, por lo que se tendrán "días sembrados" y "días no sembrados", tomando en cuenta que el número de días sembrados y no sembrados son iguales.

Se obtendrá la suma de las precipitaciones (x) de los días sembrados, y (y) de los días no sembrados. Dando la siguiente relación:

$$R_s = \frac{\sum x}{\sum y} \quad (1)$$

Si $R_s < 1$ el efecto de la siembra será negativo

Si $R_s = 1$ no hubo efecto por la siembra

Si $R_s > 1$ el efecto de la siembra será positivo

$$= R_s - 1$$

Cuando por circunstancias meteorológicas ó técnicas no son iguales el número de días sembrados y no sembrados se utiliza:

$$R_s = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad (2)$$

Obteniéndose la razón simple pero, ¿cómo saber que la siembra fue la que produjo la modificación?, para tratar de resolver esta pregunta se utiliza el método de Monte Carlo, que consiste en simular varias razones simples por medio de computadora, las que grafican mostrando el grado de probabilidad existente de que la precipitación se haya presen-

tado por los efectos de siembra.

Es un método más confiable que los anteriores, pero, ¿quién asegura que los días sembrados y no sembrados fueron iguales en condiciones atmosféricas?

6. Análisis de Diseños Experimentales.

Algunos de los resultados más significativos se han obtenido combinando información física de modelos de nubes en diseños estadísticos de evaluación.

El requerimiento esencial es incluir datos estadísticos en la etapa inicial del experimento; como el diseño de tallado de las mejores técnicas posibles siendo fuertemente dependiente de las condiciones de lluvia natural que prevalecen en la zona.

De esta forma, el Diseño Experimental y las técnicas estadísticas pueden complementarse para tener un mejor resultado en los eventos experimentales, dado el régimen de lluvia local.

Para diseñar un experimento de siembra de nubes que resulte realmente efectivo, es necesario considerar ciertas propiedades cuantitativas y cualitativas de las nubes, para detectar el cambio que se desea en el incremento de la precipitación.

La siembra de nubes puede cambiar ó alterar ciertas propiedades de la misma como:

- a) Concentración en cristales de hielo

- b) Masa de hielo por M^3 en varios niveles
- c) Espesor de la nube por incremento de la velocidad vertical de la corriente ascendente.
- d) Intensidad en el eco del radar
- e) Concentración de gotas de lluvia y espectro de tamaños en la nube.
- f) Cantidad de lluvia
- g) Corrientes de flujo
- h) Niveles de mezcla
- i) Recolección húmeda sobre condiciones de tensión.

6.1 Propiedades de pruebas estadísticas y uso en la etapa de planeación.

Existen tres variables que juntas determinan la precisión del experimento. La primera de estas " Φ ", esta es, de hecho la variable que mide el resultado de la siembra y cuyo valor es probado, pero en esta etapa ciertos valores estimados pueden asignarse a éste.

En términos de promedio de lluvias sembradas y no sembradas \bar{x} y \bar{y} , introducidas inicialmente:

$$\Phi = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad (3)$$

así por ejemplo, si el resultado de la siembra fuera un promedio de 40% de incremento, Φ debe ser 1.40, mientras de un 10% de decremento puede ser representado por $\Phi = 0.90$. Esto puede ser alternativamente el incremento, si la hipótesis

aditiva del efecto se considera válida.

Las otras dos variables son parámetros estadísticos interrelacionados, el nivel de significancia α , y la potencia de la prueba $1 - \beta$.

Los valores asignados comunmente a α son de 0.01, 0.05 ó 0.10 y permiten la probabilidad de decir erróneamente que la siembra tiene un efecto cuando en realidad no la tiene. Esto es, ϕ tiende a ser naturalmente unitario (es decir que no hay efecto $\phi = 1$), y si el experimento se obtiene una $\phi \neq 1$, habrá una probabilidad de que ésta diferencia de ϕ con la unidad sea debida al azar, si ésta probabilidad es menor que el valor preasignado de α , aceptamos que ϕ es debida a la siembra de nubes.

β se calcula de α y ϕ , y es una medida de la probabilidad de cometer el error tipo II, es decir que ocurrió al azar una ϕ diferente de 1. Esta es verdaderamente real, así $1 - \beta$, es la probabilidad de que cuando un efecto real es producido por la siembra este es reconocido como real y no es asignado al azar. Una característica común a todos los diseños estadísticos es que cuando asignamos un valor pequeño a α (asegurando así que solamente cuando hay menos de 1% de probabilidad, debido al azar para el valor de ϕ observado, decimos que lo más probable es que este fue producido por la siembra), β aumenta y tendremos una alta probabilidad de cometer el error tipo II.

La siguiente ecuación para obtener el parámetro de asimetría de la distribución normal, τ , muestra claramente como está relacionado a las condiciones experimentales, a la magnitud esperada del efecto que se desea y a la variable de las condiciones naturales: (48)

$$\tau = \Delta [Np(1-p)]^{\frac{1}{2}} \ln \Phi \quad (4)$$

En Φ se incluye la magnitud del efecto que es deseable detectar y corresponde a la razón simple (como mencionamos antes, ésta puede ser también la razón simple para cualquier otra propiedad afectada por la siembra). La razón simple igual a 1 es el valor mínimo al que tiende cuando el número de eventos es infinito considerando que no existe efecto de la siembra, pues con el incremento a detectar, ejemplo un 10% para determinar entonces Φ debería ser 1.10, mientras que si es el 40% de incremento, se trataría de detectar entonces $\Phi = 1.40$, por tanto, el valor más pequeño de Φ que se desea detectar también es más difícil y esto hace que τ sea grande. Los parámetros N y p son respectivamente, el número de unidades experimentales necesario para obtener el incremento supuesto y la probabilidad de siembra, y p se fija frecuentemente igual a 0.5 de manera que:

$$\sqrt{p(1-p)} = 0.5 \quad (5)$$

mostrando la aleatoriedad con base en la siembra de aproximadamente la mitad de las unidades experimentales, y es 2/3

partes de las unidades son sembradas el valor de $\sqrt{p(1-p)}$ será reducido solamente un poco a 0.47 .

El factor Δ en la ecuación número (4), es de importancia particular para producir un valor grande para el parámetro de asimetría τ y es uno de los más esenciales para un diseño experimental cuidadoso. Es una medida de homogeneidad ó predictibilidad de la variable en observación, que depende de factores climatológicos.

Para la lluvia, Δ está muy relacionada a la cantidad media de precipitación por unidad experimental y así para períodos largos como días ó tormentas, ésta tenderá a ser muy grande.

Otras características de Δ , que son importantes en el diseño de un experimento son:

a) Esta es previamente dependiente de la forma de la distribución de la lluvia no sembrada.

b) Tenderá a ser relativamente grande para áreas de regular ó consistente cantidad de lluvia y pequeña donde la lluvia es poco frecuente.

c) Esta varía de región a región y tenderá a ser algo más grande para regiones grandes comparadas con otras pequeñas.

d) Puede variar entre períodos diferentes de datos históricos para la misma área, muy posiblemente viene a ser más pequeña durante sequía que en extensas regiones

con lluvia más frecuente.

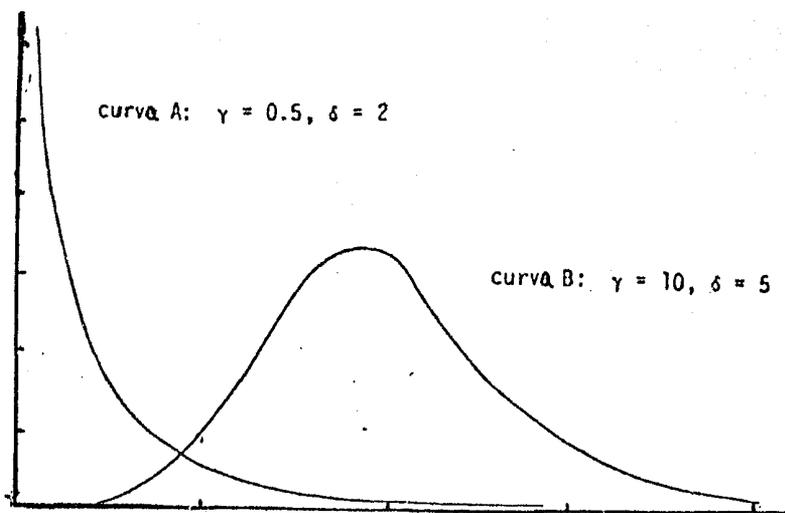
e) La final y más importante, Δ se incrementará grandemente si cualquier variable predictora puede ser usada para pronóstico, ó también para indicar aproximadamente la lluvia que puede ser esperada durante una unidad particular experimental.

Un mejor procedimiento en el diseño de un experimento de siembra de nubes será intentar estimar Δ , y las otras variables que determinan τ para detectar que número de unidades experimentales, N , debe ser considerado para prever un alto grado de precisión en la detección de cualquier efecto significativo que pueda esperarse de la siembra de nubes. En muchos casos, como el ejemplo de la tabla siguiente se muestra, que es entonces necesario encontrar variables predictoras útiles para llevar el experimento a límites prácticos de duración.

Para $\alpha = 0.1$ y $\beta = 0.80$

Magnitud del efecto, $\Theta =$	1.05	1.10	1.20	1.30	1.40
Valor de Δ	N	N	N	N	N
0.5	42,000	11,000	3,000	1,450	880
1.0	10,500	2,750	750	360	220
2.0	2,600	690	190	90	55
3.0	1,160	310	85	40	25

Para estimar Δ de los datos de la lluvia de la región bajo estudio, es necesario ajustar las cantidades a una curva normal, o a algún otro tipo de distribución. La curva que parece resolver mejor ésta situación es una distribución Gamma γ la cual tiene en general la apariencia de las curvas que se muestran en el diagrama siguiente. (49)



Donde γ es el factor de forma de la distribución Gamma y δ el factor de escala; ambos pueden ser calculados directamente de las observaciones. En particular si los totales de la lluvia diaria son las unidades de la curva tendríamos el factor f dando una alta frecuencia para cero y pequeñas cantidades.

Si escogemos un período de tiempo muy grande, por

ejemplo, los totales mensuales, su distribución será similar a la curva B.

En la ausencia de otros valores predictores, Δ , puede ser encontrada de tales curvas experimentales y para la distribución gamma se estima por:

$$\Delta = \gamma^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

El problema de diseñar un experimento efectivo de duración real será aparente, con distribuciones diarias (ó tormentas aisladas) de lluvia producirá valores para γ que son generalmente menores que la unidad, Δ estará entre 0.5 y 1.0 con $N = 42,000$. La precisión para determinar incrementos con la lluvia más bajas que el 5% al menos casi es imposible, por el número de eventos necesarios.

El uso de grandes períodos como unidades experimentales, por ejemplo, dos ó tres días producirán grandes valores para Δ , y por tanto reducirán N y el número de unidades experimentales por año será reducido, así mismo previniendo probablemente la pequeña duración del tiempo requerido para obtener un resultado estadístico confiable.

. CONCLUSIONES.

En años recientes, el interés por modificar el tiempo atmosférico ha sido mayor, ya que de ser así se podría solucionar el problema de escasez de agua, ó reducir la fuerza de los vientos de los huracanes, disipar niebla y suprimir granizo, se conoce que los experimentos realizados para tal efecto han sido innumerables, y las técnicas empleadas son cada vez más sofisticadas, pero realmente no se conoce el momento preciso en que una nube debe ser sembrada, para que se incremente la precipitación.

Teóricamente el sembrado de nubes con nucleantes puede modificar el tiempo atmosférico, sin embargo en medios naturales esto no ha podido ser completamente comprobado.

En México, al igual que en otros países, el número de investigadores dedicados a la modificación del tiempo atmosférico y principalmente a la estimulación artificial de la precipitación se ha incrementado cada vez más, y de los experimentos realizados en nuestro país, se puede concluir que existen aún deficiencias que limitan la confiabilidad de los resultados de los proyectos, siendo algunos de los principales problemas la falta de diseños y evaluaciones confiables por falta de conocimiento en el

campo, de estos proyectos las observaciones han sido únicamente visuales y aunque se dice que se observó modificación en las nubes sembradas no ha podido comprobarse que esto haya sido por causa de la introducción de material nucleante en la nube. La falta de un control adecuado durante las operaciones, que posteriormente no permiten una correcta evaluación estadística, además de la falta de presupuesto ha ocasionado la suspensión de proyectos antes de lo previsto y que los resultados no hayan tenido la suficiente confiabilidad para indicar si en medios naturales se ha podido ó se puede incrementar la precipitación.

Solamente en algunos proyectos se han realizado evaluaciones estadísticas confiables, de donde se concluye que los incrementos en la precipitación han estado dentro de su variabilidad natural.

A medida que se han realizado los experimentos, las técnicas de sembrado y métodos de evaluación se han desarrollado, hasta simular por medio de computadoras nubes que sirvan como control, para detectar las diferencias de una nube sembrada.

Los intentos por disipar niebla, suprimir granizo y reducir la velocidad de los vientos en los huracanes realizados hasta ahora no han dado resultados científicos satisfactorios.

A pesar de que aparentemente no se tienen grandes avances en la estimulación artificial de la precipitación, los experimentos continúan para encontrar técnicas y métodos de evaluación satisfactorios que puedan demostrar científicamente la modificación del tiempo atmosférico, que no es una tarea fácil.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- (1) Final Report of the Advisory Committee on Weather Control Volume 1 - año 1957 Pags. 59-63
- (2) Mason, B.J. The Physics of Clouds, Clarendon Press Oxford 1971. Pag. 370
- (3) Mason, B.J. Nubes, Lluvia y "Lluvia Artificial", Eudeba, Buenos Aires 1972. Pags. 98, 99
- (4) Mason, B.J. Op. Cit., p. 375
- (4) Breuer Georg, Weather Modification: Prospects and Problems, Cambridge University Press, Pags. 29-31
- (5) Mason, B.J. Op. Cit., Pags. 372, 373
- (6) Langmuir Irving, The Production of Rain by a Chain Reaction in Cumulus Clouds at Temperatures above Freezing. Journal of Meteorology Pags. 175-192
- (7) Webber John, Report on Experiment: Artificial Propagation of Rain, Philippine Weather Bureau Pags. 3-5
- (8) Meteorological Service, Bolivian Government- Informe Personal Communication 1959, Pags. 75-79
- (9) Augustin H. Les Recherches du Service Meteorologique de Madagascar dans le domaine de la Pluie Provoquée de 1953 a 1956, Angola Servico Meteorologico, Miscelanea Geofisica Pags. 194-205
- (10) Howell W.E. Associates- Summary Evaluation of Cloud Seeding Operation in Cuba 1952 , Pags. 25-27
- (11) D'Albe Fournier, E.M., A.M.A. Lateef and I.H. Zaidi, The Cloud Seeding Trials in the Central Punjab, Jul-Sep. 1954. Royal Meteorological Society, Quarterly Journal, 81 (350) Pags. 574-581
- (12) Rain and Cloud Physics Research Unit National Physical Laboratory of India, 1959: Rain-Making Trials at Delhi During Monsoon Months, July to September Pags. 147-153

- (13) Battan J. Louis: Física y Siembra de Nubes, Editorial Universitaria de Buenos Aires 1965, Pags. 128-130
- (14) Battan J. Louis Op. Cit., 136,137
- (15) World Meteorological Organization Register of National Weather Modification Projets, Pags. 28-45
- (16) Bassols E. Angel: Recursos Naturales de México, Teoría-Conocimiento y Uso, México, Nuestro Tiempo Pag. Tamayo, L. Jorge: Geografía Moderna de México, México, Trillas Pags. 82-113
- (17) Bassols, E. Angel Op. Cit., Pags. 101-128
- (18) Secretaría de Recursos Hidráulicos, Dirección General de Planeación, Departamento de Estudios Especiales, Ingeniería y Sistemas, S.A.: Informe Final- Estudio Experimental de Estimulación de Lluvias en Ensenada, B.C. y sus Alrededores, Pag. 3
- (19) S.R.H.-INSISA, Art. Cit., Pag. 3
- (20) Idem, Pag. 3
- (21) Estrada, B. Jorge: Siembra de Nubes en la Cuenca de Necaxa, Puebla, Anales del Instituto de Geofísica, Vol. 21 Pag. 63
- (22) Pérez, S. Emilio: 19 Años de Operaciones de Estimulación de Lluvias en las Cuencas de Necaxa y Lerma, Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. Informe 1949-1968 Pags. 3-10
- (23) Estrada B. Jorge: Evaluación de la Zona Oeste de Necaxa, Weather Modification, Vol. 10 Núm. 1, Abril Pags. 185, 186
- (24) Garduño Héctor y Valencia Alberto: Evaluación de la Estimulación de Lluvias en la Cuenca de Necaxa, Puebla, Informe Pag. 15
- (25) S.R.H.-INSISA, Art. Cit., pag. 3
- (26) Idem. pags. 5-43
- (27) Secretaría de Recursos Hidráulicos, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México: Estimulación de la Lluvia en el Valle de México, Comisión de Aguas del Valle de México Pags. 1-19

- (28) Estrada B. Jorge y Villaseñor D. Isabel: Siembra de Nubes al Sureste de la Ciudad de México, Weather Modification, Vol. 13 Núm. 1 Pags. 200-202
- (29) Secretaría de Recursos Hidráulicos, Programa de Estimulación de Lluvias, Proyecto Sonora. Vol. VI, Num. 2 Pags. 105-125
- (30) Secretaría de Recursos Hidráulicos, Programa de Estimulación de Lluvias en el Estado de Sinaloa, Temporada Verano-Invierno, 1977-1978. Pags. 1-21
- (31) Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Programas de Estimulación de Lluvias Realizadas en México 1980-1981-1982. Pag. 1-30
- (32) Houghton, H.G. A Preliminary Quantitative Analysis of Precipitation Mechanisms. Journal Of Meteorology 7 Pags. 363-369
- (33) Breuer Georg, Op. Cit., Pags. 44, 45
- (34) Idem, pags. 75-77
- (35) Sulakvelidze, G.K. Formation of Precipitation and Modification of Hail Processes. Pags. 162-170; 185-197
- (36) Borland and Snyder- Effects of Weather Variables on Prices of Great Plains Croplands, Journal of Applied Meteorology 14 Pag. 686-693
- (37) Gokhale, N.R. Hailstorms and Hailston Growth. State University, New York Press, Albany. Pag.325-329
- (38) Gentry, R.C. Weather and Climate Modification, J.E. Hass (Editor) 332-345.
- (39) Breuer Georg, Op. Cit., pags. 92,93
- (40) Gentry, R.C. Op. Cit., pag. 348
- (41) Sheets Robert C. Proyecto Stormfury: Preguntas y Respuestas, National Oceanic and Atmospheric Administration, Coral Globes, Florida Pags. 1-25
- (42) Vivó A. Jorge: Sobre Experimentos en los Huracanes, Anuario de Geografía, año XIX - 1979 pag. 450
- (43) Idem pags. 448, 449
- (44) Idem. pags. 449 450

- (45) Breuer Georg, Op. Cit., 94, 95
- (46) Rogers, R.R.: Física de Nubes. Barcelona, Reverté,
Pag. 97, 98
- (47) Fletcher N.H.: The Physics of Rain Clouds, Cambridge
University Press, 1969. Pags. 322-325
- (48) Neyman J. and Scott E.L.: Asymptotically Optimal Tests
of Composite Hypotheses for Randomized Experiments
with Noncontrolled Predictor Variables. J. Amer.
Statistics and Probability, Berkely and Los Angeles,
University of California Press, Vol. 5 Pags. 371-
384.
- (49) Neyman J. and Scott E.L. Op. Cit., Pags. 371-384

- Estrada B. Jorge y Villaseñor D. Isabel (1981): Siembra de Nubes al Sureste de la Ciudad de México, Weather Modification, Vol. 13 Número 1.
- Fletcher, N. M. (1969): The Physics of Rain Clouds, Cambridge, at the University Press.
- Garduño, H. y Valencia A. (1981): Evaluación de la Estimulación de Lluvias en la Cuenca de Necaxa, Pue. Informe.
- Gentry, R.C. (1974): Weather and Climate Modification, J.E. Hass (editor), New York, pag. 791.
- Gokhale, N.R. (1975): Hailstorms and Hailstons Growth, State University, New York, Press.
- Houghton, H.G. (1950): A Preliminary Cuantitative Analysis of Precipitation Mechanisms. Journal of Meteorology 7 Pag. 363 - 369
- Howell, W.E. and Associates (1953): Summary Evaluation of Cloud Seeding Operations in Cuba 1952. Informe.
- _____, (1956): Evaluation of Cloud Seeding Program for the Cane Areas of Central Victoria, Canovas and Fajardo of the Fajardo Company, September 1955-January 1956.
- Institute, Taipe, Taiwan (1956): Rain Stimulation Research. Informe.
- Langmuir Irving. (1955): Widespread Control of Weather by Silver Iodide Seeding. Informe.

- Luna, B.L. and Halstead H.M.: First Trials of the Schaefer-Langmuir Dry-Ice Cloud Seeding Technique in Hawaii.
- Mason, B.J. (1971): The Physics of Clouds, Clarendon Press, Oxford 671 p.
- , (1972): Nubes, Lluvia y "Luvia Artificial", Eudeba, Argentina. 150 pag.
- Meteorological Service Bolivian Government (1959): Summary Seeding of Cloud. Personal Communication.
- Mordy, W. (1959): Computation of the Growth by Condensation of a Population of Cloud Deoplets.
- National Science Foudation (1957): Final Report of the Advisory Committe on Weather Control. Dicember.
- Neyman, J. and Scott E.L. (1967): Asymptotically Optimal Test of Composite Hipoteses for Randomized Experiments with Noncontrolled Predictor Variables. J. Amer. Statidtics and Probability, Berkely and Los Angeles, University of California Press. Vol. 5 Pag. 371-384
- Pérez S. Emilio (1969): 19 Años de Operaciones de Estimulación de LLuvias en las Cuencas de Necaxa y Lerma. Compañía de Luy y Fuerza del Centro, S.A. Informe 1949-1968, junio
- Pire, J.J. (1954): Essais de Pluies Artificielles A' Temvo, Congo Belgue en Mars 1954. Belguium, Academie Royale Des Sciences Coloniales, 25 (5), 1560-1575 p.
- , (1956): Essais de Stimulatio Artificiell de Pluie A' Telly, Congo Belgue, Janvier 1955, Belgium Academie Royale de Sciences Coloniales, Bulletin des Seances, 230-244 p.

- Research Unit National Physical Laboratory of India (1959): Rain and Cloud Physics. Rain Marking Trials at Delhi during Monsson Months, July to September (Personal Comunication from A.K. Roy)
- Rogers, R.R. (1977): Física de Nubes, Editorial Reverté, S. A., Barcelona, 248 pag.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, Ingeniería y Sistemas, S.A. (1971): Estudio Experimental de Estimulación de Lluvias en Ensenada, B.C. y sus Alrededores. Dirección General de Planeación, Departamento de Estudios Especiales.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1977): Programa de Estimulación de Lluvias, Proyecto Sonora. Vol. VI Núm. 2
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1978): Programa de Estimulación de Lluvias en el Estado de Sinaloa, Temporada Verano-Invierno, 1977-1978. Informe Marzo.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, (1981): Programa de Estimulación de la Lluvia en el Valle de México. Comisión de Aguas del Valle de México, Informe Final.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, (1982): Programa de Estimulación de Lluvia Realizados en México, 1980, 1981, 1982, Departamento de Estimulación Artificial de la Precipitación.
- Sheets Robert C. (1977): Proyecto Stormfury: Preguntas y Respuestas, National Oceanic Atmospheric Administration

BIBLIOGRAFIA

- Augustin, J. (1954): Repport Technique Sur les Operations de Pluie Artifielle a Madagascar 1953.
- Bassols, B. Angel (1979): Recursos Naturales de México, Teoría-Conocimiento y Uso, Editorial Nuestro Tiempo.
- Battan, J.L. and Kassander A.R. (1959): Artificial Nucleation of Orographic Cumuli, Paper Presented at the Conference on Physics of Precipitation Held at Woods Hole-Oceanographic Intitution, Woods Hole, Mass. June 3-5, 1959.
- Battan J.L. (1965): Física y Siembra de Nubes Ed. Eudeba.
- Borland and Snyder (1975): Effects of Weather Variables on Prices of Great Plains Croplands, Journal Of Applied Meteorology 14 pag. 686-693.
- Breuer Georg. (1980): Weather Modification: Prospects and Problems. Cambridge University Press.
- Brouhns, G., (1954): La Pluie Provoquee. Bulletin Agricole du Congo Belgue, Belgium. Direction Generale de L'Agriculture, 45 (3) pag. 775-780.
- D'Albe Fournier y Colaboradores. (1955): The Cloud Seeding Trials in the Central Punjab, July-September 1954
- Estrada, B. Jorge (1975): Siembra de Nubes en la Cuenca de Necaxa, Pue. Anales del Instituto de Geofísica, Vol. 21
- , (1978): Evaluación de la Zona Oeste de Necaxa, Weather Modification, Vol. 10 Número 1, Abril

Sulakvelidze, G.K.: Formation of Precipitation and Modification of Hail Processes.

Tamayo, L. Jorge (1981): Geografía Moderna de México, Editorial Trillas, México.

Webber, J.P. (1948): Report on Experiment Artificial Propagation of Rain Philippine, Weather Bureau.

World Meteorological Organization (1981): Register of National Weather Modification Projects.

Vivó A. Jorge (1978): Sobre Experimentos en los Huracanes, Anuario de Geografía, año XIX-1979, pag. 447-455

Young C. Kenneth (1978): A Numerical Examination of Some Hail Suppression Concepts. Abstract Intitute of Atmospheric Physics University of Arizona, Tucson.



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA