

Estimulación de lluvia por sembrado higroscópico

Michel Rosengaus

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Roelof Bruintjes

Centro Nacional de Investigación Atmosférica, Estados Unidos

La estimulación de lluvia ha sido un tema muy controvertido. Recientemente una nueva técnica, la de sembrado higroscópico, parece haber tenido significativos avances y presentar perspectivas interesantes para incrementar la disponibilidad del recurso agua para poblaciones siempre crecientes, pero en condiciones de latitud y clima afines a las de México. En este trabajo se presenta información asociada con un taller en el que participaron expertos mundiales tanto en física de nubes e instrumentación como en estimulación artificial de lluvia con bases científicas. Se presentan antecedentes y conceptos fundamentales para la comprensión del sembrado higroscópico y se describen tres experimentos científicos recientemente realizados. Se interpretan (con una visión de ingeniero hidráulico) las discusiones realizadas en dicho taller en términos de interrogantes aún activas y estudios que parece necesario realizar. Esta presentación del tema para la comunidad de ingeniería hidráulica y recursos hídricos se orienta a permitir una toma de decisiones balanceada y realista al respecto.

Palabras clave: precipitación pluvial, estimulación de lluvia, sembrado de nubes, sembrado higroscópico, física de nubes, modificación artificial del tiempo, tormentas convectivas.

Introducción

El hombre siempre ha soñado con tener control, o al menos influencia, en cuándo, cuánto y cómo llueve. Sus innumerables intentos por lograrlo, en conjunción con la aleatoriedad del fenómeno, en ocasiones lo han llevado a creer que en realidad tiene algún control o influencia sobre la precipitación pluvial. Y, por supuesto, siempre han existido los que, ya sea creyéndolo ellos mismos o no, pretenden frente a los demás que tienen dicho poder. El tema siempre ha sido uno que involucra mitología y magia, así como fe ciega o incredulidad absoluta.

La incursión de la ciencia moderna en el tema se puede rastrear hasta 1946, cuando en el Laboratorio de Investigación de General Electric, los investigadores Langmuir y Schaefer, estudiando el problema de depósito de hielo en alas de aeronaves, introdujeron hielo seco en una cámara *supersaturada*, produciendo de inmediato una pequeña *tormenta* de nieve (Pendick, 2000). Poco tiempo después, Vonnegut, del mismo equipo, introdujo la idea de que los cristales en el humo

de yoduro de plata incinerado (similares a cristales de hielo) aceleraban la cristalización de hielo en *nubes* frías *supersaturadas*. El tema desbordó rápidamente los ámbitos de laboratorios de investigación y universidades y para la década de 1950 numerosos proyectos operativos en los Estados Unidos ya eran una realidad, al punto de considerarse que hasta un 10% del cielo norteamericano se encontraba bajo programas de estimulación (Pendick, 2000). Con el retraso natural, para las décadas de 1960 y 1970, la estimulación artificial de lluvia se esparció por muchos lugares del planeta, incluyendo, por supuesto, a México. La velocidad a la que campañas operativas (*versus* las de investigación) se reprodujeron, con una aplicación indiscriminada de yoduro de plata y en menor grado hielo seco, a nubes de todos tipos, rápidamente produjo un gran cúmulo de experimentos no concluyentes y generó incredulidad en las comunidades científicas y de manejo de recursos hidráulicos. Dada la gran variabilidad natural de los procesos de lluvia, aun programas con mecanismos objetivos de verificación (por ejemplo INSISA, 1976, en México; Gagin y Neumann, 1981, y

Gabriel y Rosenfeld, 1990, en Israel) o han resultado no concluyentes o sus aparentemente positivos resultados se han criticado con severidad (Rangno y Hobbs, 1995). La desacreditación del sector ha sido tal, que para 1995 el gobierno federal de los Estados Unidos prácticamente había abandonado el fondeo de investigaciones sobre estimulación de lluvia, aunque todavía subsisten numerosos programas operativos. Actualmente, la polarización de opiniones dentro de las comunidades involucradas, entre los que creen en la estimulación de lluvia como acto de fe y aquellos que la descartan aun antes de evaluar la evidencia, no es conducente a la realización de estudios serios que clarifiquen este controvertido tema.

Recientemente, gracias a un descubrimiento fortuito en Sudáfrica (Mather, 1991), ha cobrado ímpetu una nueva variante de la estimulación de lluvia: el *sembrado higroscópico* con pequeñas partículas de sal producidas a través de bengalas. Se trata de una metodología más afín a las condiciones de regiones tropicales que el *sembrado glaciogénico* con yoduro de plata o hielo seco. En 1999, se llevó a cabo en Mazatlán, Sinaloa, México, un Taller Internacional sobre Sembrado Higroscópico, patrocinado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), el *National Center of Atmospheric Research (NCAR)* de los Estados Unidos y el gobierno del estado de Durango, donde se reunió un importante núcleo de expertos en física de nubes, estimulación artificial de lluvias con bases científicas e instrumentación pertinente a este tema. El propósito del presente trabajo es presentar la información compartida en dicho taller a la comunidad de tecnología en recursos hidráulicos de México y otros países de habla hispana. El enfoque será precisamente el de difundir dicha información a personas involucradas con la toma de decisiones en el ámbito de estimulación artificial de lluvia y no intenta tratar el tema en el contexto eminentemente científico y de investigación de la física de nubes y su modificación artificial por el hombre.

Para lograr esto, se inicia con la discusión de conceptos fundamentales sobre el proceso de lluvia y su modificación artificial, se procede a reportar los resultados de tres campañas recientes que han utilizado la metodología y, finalmente, se presentan los principales puntos discutidos en el mencionado taller. Cuando se recurre a lenguaje especializado se marca con *itálicas* y el concepto se explica en el glosario de términos al final del trabajo.

Conceptos fundamentales

La mayor parte del agua en la atmósfera se encuentra en forma de vapor de agua (hasta un 4% por peso total

en los trópicos). En contra de la creencia popular de que las nubes están formadas por vapor de agua, este gas es incoloro y completamente transparente en la atmósfera. Las nubes que se pueden ver están formadas por pequeñas gotas de agua, por cristales de hielo o por una combinación de ambos. El *perfil vertical de temperaturas* en la *troposfera*, reduciéndose del orden de 6.5°C por kilómetro de ascenso sobre la superficie terrestre (ilustración 1), hace que algunas nubes, o porciones de ellas, se encuentren a temperaturas arriba de la de congelación del agua (a niveles atmosféricos bajos) y otras estén a temperaturas por abajo de ésta (a niveles atmosféricos altos). Entre más alejada está la temperatura de este nivel atmosférico de congelación, mayor es el porcentaje de agua en el correspondiente estado (sólido para temperaturas bajas, líquido para temperaturas altas), pero sin implicar que no haya convivencia de estos dos estados del agua en extensos rangos verticales de las nubes. Resulta de interés para el tema de este trabajo puntualizar que muchas de las técnicas tradicionales de estimulación artificial de lluvias con yoduro de plata o hielo seco de-

Ilustración 1. Perfil vertical de temperaturas en la atmósfera (estándar y ejemplo al inicio del verano en Coahuila).

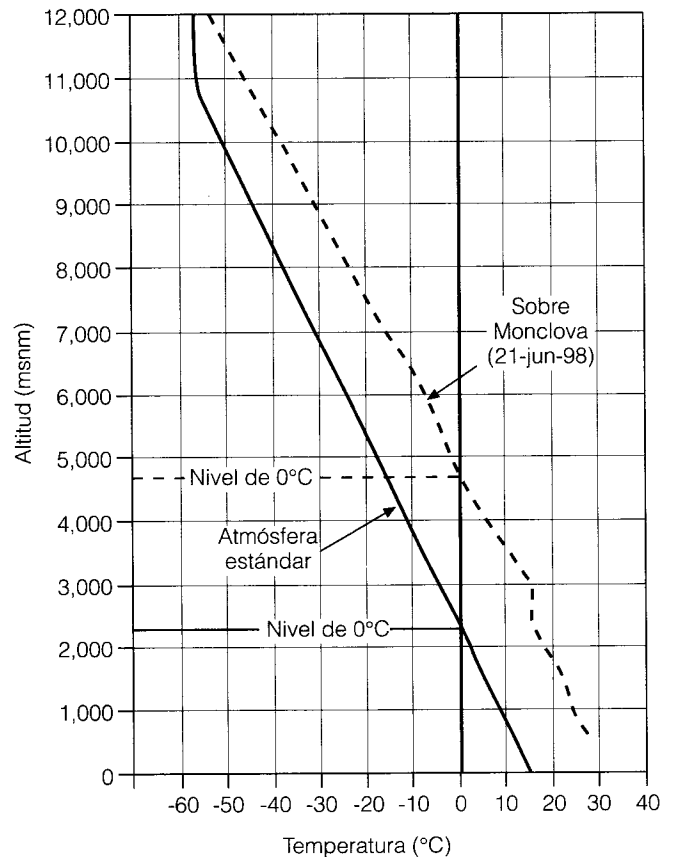
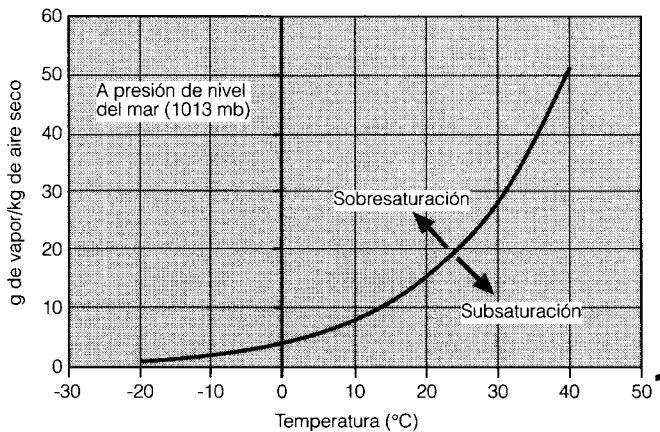


Ilustración 2. Capacidad máxima del aire para mantener vapor disuelto.

sarrolladas en países de latitudes medias y para lluvias de invierno consideran como su blanco ideal tormentas que se encuentran en su mayor parte en los niveles atmosféricos por arriba del nivel de congelación, puesto que en estos países y temporadas este nivel se encuentra relativamente cerca del suelo. En regiones *tropicales*, o inclusive *subtropicales* en verano, la mayor parte de las tormentas en desarrollo está en regiones por abajo del nivel de congelación, ya que éste se encuentra a varios kilómetros sobre el nivel del mar y, por lo tanto, no presentan fracciones significativas de cristales de hielo. No es pues muy sorprendente que la aplicación indiscriminada de estas técnicas *glaciogénicas* en regiones tropicales y subtropicales no hayan producido resultados positivos contundentes.

La capacidad del aire para mantener vapor de agua en solución depende fundamentalmente de su temperatura (ilustración 2): entre más alta sea, mayor cantidad de vapor de agua puede mantenerse en una parcela de aire sin condensarse (en gotas de agua) o cristalizarse (en hielo). Así pues, el proceso de formación de nubes, inicialmente, y de tormentas, posteriormente, se encuentra íntimamente asociado con el cambio de temperatura de las parcelas de aire húmedo, y dado el marcado perfil vertical de esta variable en la atmósfera (ilustración 1), se produce un cambio rápido de temperatura al darse el movimiento vertical. Una parcela con un determinado contenido de vapor de agua al ascender, y con ello bajar su temperatura, alcanza un nivel en el que se encuentra ya completamente saturada y empieza a condensar (o cristalizar) este vapor en pequeñas gotas de agua (o cristales de hielo). Es por ello que las bases de las nubes en una cierta región y tiempo tienen todas una altitud muy parecida; esto sólo es la manifestación de capas atmosféricas

bajas que tienen una humedad muy uniforme (en la horizontal) y el mencionado perfil vertical de temperaturas. El aislamiento relativo de las nubes *cúmulos* que se observa, no se debe a la falta de uniformidad de la humedad o de la temperatura en la horizontal, sino al hecho de que las corrientes ascendentes no se dan en todo sitio, tendiendo a formarse celdas (*convectivas*) en una forma no del todo ordenada. Sólo en los sitios con una corriente ascendente se forma la nube, aunque su base sí coincide en altitud con el de todas sus nubes vecinas. Existen varios mecanismos por los cuales se genera este movimiento vertical:

- Inestabilidad atmosférica:** los perfiles verticales de temperatura y humedad son tales que una parcela de aire húmedo a bajos niveles tiene tendencia a elevarse, esto se debe a que presenta mayor flotación que el aire ambiente a su alrededor. Es muy común que la elevación inicial se dé por calentamiento del aire por contacto con el suelo que, a su vez, tiene una elevada temperatura por radiación solar. También es muy común que las condiciones de inestabilidad se presenten sólo en un rango de altitudes en la vertical, y entonces este mecanismo se convierte en uno complementario al resto de los mecanismos en la lista a continuación. Si alguno de los otros mecanismos lleva a la parcela a los niveles inestables, la convección continuará en forma autónoma hasta que la parcela alcance nuevamente niveles que no favorecen la convección espontánea. Las condiciones de inestabilidad representan el extremo contrario del muy conocido proceso de *inversión térmica* que atrapa contaminantes en zonas urbanas en capas superficiales sumamente estables.
- Flujo atmosférico con *convergencia* en niveles bajos:** al converger aire en las capas superficiales, por continuidad asciende hacia niveles superiores. Esta condición de convergencia la gobierna el equilibrio de fuerzas (presión, Coriolis, centrífuga) atmosféricas en la región. Los centros con convergencia superficial son zonas con presión menor que la de sus alrededores. Cuando se conjuga con centros de alta presión en la parte superior de la *troposfera*, alrededor de los cuales diverge el aire, se dan las condiciones para una intensa convección. Ejemplos de este mecanismo son la *zona de convergencia intertropical* y los ciclones tropicales, aunque las tormentas individuales generan sus propias condiciones dinámicas de este tipo.
- Efecto de rampa por orografía:** cuando existe un flujo horizontal incidente sobre una barrera orográfica, el aire asciende para fluir alrededor de ésta.

d) Movimiento relativo entre dos masas de aire de características distintas. En estos casos, las masas frías (y usualmente más secas) penetran como cuña por debajo de las masas cálidas (y usualmente más húmedas), obligando a estas últimas a desplazarse en el sentido vertical. Ejemplo de esto son los llamados Nortes en el golfo de México (conocidos así por la dirección usual de la cual proviene el viento una vez que ha pasado la interfaz entre los mismos).

Todos estos mecanismos pueden elevar el aire cálido húmedo y con ello producir nubes, pero una vez que se presenta la condensación, el calor originalmente almacenado en la evaporación inicial es cedido al aire circundante, aumentando de alguna manera la flotación de la parcela y, con ello, retroalimentando el proceso de convección. Las gotas (o cristales de hielo) inicialmente formadas son muy pequeños (típicamente $20\ \mu\text{m}$) y no cuentan con peso suficiente para precipitar por efecto gravitacional (su velocidad terminal de caída es tan sólo del orden de $0.01\ \text{m/s}$); las corrientes ascendentes, e inclusive la turbulencia, las mantienen suspendidas dentro de la nube/tormenta. Sólo después de haber actuado diversos mecanismos que permiten que las gotas (o los cristales de hielo) se aglomeren en unidades mayores, es que ocurre la *precipitación* (en gotas de agua, co-pos de nieve o, bajo ciertas circunstancias, granizo). Una gota de lluvia típica mide del orden de $2,000\ \mu\text{m}$ y tiene una velocidad terminal de caída del orden de 6.5 metros por segundo.

Sin embargo, no basta con que una parcela de aire húmedo se enfríe hasta alcanzar la saturación para que el vapor se condense (o cristalice en hielo en su caso) espontáneamente. Tampoco es suficiente que las gotas de agua entren a una zona de temperatura por debajo de la de congelación para que se cristalicen en hielo de forma espontánea. En ambos casos, se requiere que la atmósfera tenga partículas sobre las cuales pueda realizarse esta condensación o cristalización. Por ejemplo, un núcleo de condensación típico tendría un tamaño de $0.2\ \mu\text{m}$, 100 veces menor a una gotita de nube y 10,000 veces menor a una gota de lluvia. Esto implica que existen regiones con sobresaturación, es decir, que temporalmente tienen más vapor de agua que el 100% de humedad, aunque este grado de sobresaturación nunca alcanza valores muy superiores. También existen, de manera temporal, regiones en las nubes con gotas de agua (líquida) *superenfriadas*, es decir a temperaturas menores a las de congelación. En ambos casos, la presencia de núcleos de condensación o de cristalización en una proporción adecuada disparan los procesos de condensación en

las zonas *supersaturadas* y de cristalización en las zonas *superenfriadas*. De hecho, bajo condiciones propicias, la condensación se inicia inclusive antes de alcanzar la saturación. Por supuesto, al ocurrir la condensación, con transferencia de vapor de agua en el aire a la fase líquida en las gotas inmersas en él, el contenido de este vapor en el aire se reduce. El continuo ascenso de la parcela de aire, al reducirse la temperatura, mantiene operando el proceso de condensación. Por el contrario, cuando las gotas de agua entran a zonas relativamente secas, empiezan a perder su contenido líquido al aire como vapor. También, cuando los cristales de hielo bajan a zonas con temperaturas mayores a las de congelación, se empiezan a licuar. El propósito esencial de la estimulación artificial de lluvia por sembrado de nubes es, precisamente, colocar una proporción adecuada de núcleos de condensación (en *sembrado higroscópico*) o de cristalización (en *sembrado glaciogénico*) a fin de hacer más eficientes los mecanismos de conversión de vapor de agua a las fases líquida y sólida, respectivamente. Claro está que el incremento posible depende de la existencia natural de estos núcleos en la atmósfera. Es importante enfatizar que la estimulación de lluvia por sembrado pretende, en todos los casos, potenciar un proceso natural que ya existe en la zona: no se pueden formar nubes donde no existen ni se puede hacer llover en zonas donde no iba a ocurrir este fenómeno. Colocar los químicos sin las condiciones de humedad, de presencia de gotas de nube o de corrientes ascendentes no produce ningún efecto.

Dadas las condiciones de latitud de México y el dominio del verano como temporada de lluvias, en adelante sólo se tratarán los conceptos asociados con nubes cálidas para las que el sembrado higroscópico parece el más apropiado, dejando los procesos en nubes frías (y el correspondiente sembrado glaciogénico) en un segundo plano. Esto es, el material presentado no se refiere a las lluvias de otoño e invierno por sistemas de aire frío que ocurren regularmente en la porción norte del país.

En general, las tormentas en zonas marítimas se consideran eficientes productoras de lluvia, mientras que las tormentas interiores a zonas continentales tienden a no ser eficientes productoras de lluvia. Al comparar el número de núcleos de condensación por unidad de volumen en ambientes marítimos y continentales, se observa que los núcleos en zonas marítimas (usualmente de sales provenientes del mar) son menos numerosos y cubren un rango mayor de tamaños que en el caso de tormentas continentales (usualmente partículas de polvo). Así, paradójicamente, la ineficiencia de las tormentas continentales no se debe a la esca-

sez de núcleos de condensación, por el contrario, poseen una gran cantidad de ellos y de tamaños relativamente pequeños y uniformes. ¿Por qué entonces no son eficientes productoras de lluvia? Precisamente porque la gran cantidad de núcleos, creando una gotita alrededor de cada uno de ellos, compiten todos por el vapor de agua disponible en el aire circundante. Pocas de estas gotas llegan a crecer a tamaños que faciliten la precipitación y todos ellos tienen tamaños relativamente uniformes. Esto hace que incluso cuando precipiten lentamente todas las gotas lo harán a velocidades verticales relativamente iguales, perdiéndose la oportunidad de colisiones entre ellas y de que se unan en gotas de tamaños mayores (*coalescencia*) (ilustración 3). Lo anterior es cierto aun cuando las gotas se encuentren (en la etapa de desarrollo de la tormenta) inmersas en corrientes ascendentes que les impiden caer, debido a que el proceso de *colisión/coalescencia* depende del valor de la velocidad de caída relativa entre diferentes gotas. Esto, en forma general, explica el hecho de que en el altiplano central semiárido de México sea muy común ver nubes, algunas de las cuales empiezan a desarrollarse como tormentas, pero que eventualmente producen baja o nula precipitación.

Así pues, la hipótesis básica del sembrado higroscópico es que núcleos de condensación de sales de yodo, potasio o calcio, producidas al quemarse bengalas especiales en partículas de alrededor de 1 μm (o en algunos casos dispersadas por medios mecánicos), colocados en la corriente ascendente apenas abajo de la base de la nube, competirán con ventaja contra los numerosos núcleos de condensación naturales en tormentas continentales, tomando una mayor proporción del vapor de agua disponible para formar rápidamente gotas de mayor tamaño. Esto es, el espectro de tamaños de gotas será más amplio y por ello

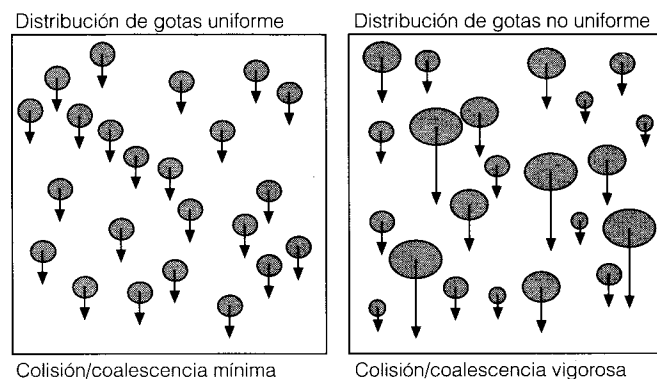
el proceso de colisión/coalescencia será más efectivo (ilustración 3). Esto, a su vez, producirá gotas cada vez mayores que efectivamente incrementarán la cantidad total de agua precipitada por la tormenta. Lo descrito representa un *efecto estático*, pero también es posible que existan *efectos dinámicos* en la tormenta. Al existir una mayor precipitación en la zona sembrada, las corrientes descendentes de la misma serán más vigorosas, con la posibilidad de facilitar la formación de celdas convectivas vecinas, aumentando la duración de la tormenta y quizá, su área total.

Desgraciadamente, demostrar con certeza que un cierto método de estimulación artificial funciona es sumamente difícil (Rosengaus, 1996). Esto se debe a que para hacerlo se requiere comparar lo que realmente sucedió en tormentas sembradas contra lo que hubiera sucedido en las mismas en caso de no haber sido sembradas. Ante la imposibilidad de hacer esto se recurre a análisis estadísticos entre muestras de tormentas sembradas y no sembradas donde, idealmente, la única diferencia estadística entre ambas muestras es precisamente el sembrado de las mismas. Considerando la enorme variabilidad que naturalmente ocurre entre tormentas, esto requiere de muestras con un gran número de casos y la definición bastante detallada de cada uno de ellos. Demostrar la efectividad del sembrado de tormentas (especialmente las convectivas aisladas que dominan el panorama mexicano), utilizando exclusivamente la instrumentación regular en un país resulta prácticamente imposible. Incluso es necesario realizar campañas científicas específicas, con instrumentación especial, para obtener los primeros indicios que hasta ahora se tienen.

Reporte sobre campañas recientes

Desde 1991 hasta la fecha, fundamentalmente se han realizado tres diferentes experimentos científicos para evaluar la efectividad del sembrado higroscópico. El primero de ellos se llevó a cabo de 1991 a 1996 en Sudáfrica, en los alrededores de Bethlehem y de Carolina (Mather, 1997), aunque a partir de 1995 también se han realizado campañas operativas que contribuyen con evidencia adicional en la Provincia del Norte de dicho país (Terblanche *et al.*, 2000). El segundo experimento se hizo en la zona noroeste de Tailandia entre 1995 y 1998 (Silverman y Sukarnjanaset, 2000). El tercer experimento fue en el noreste de México, alrededor de Monclova, Coahuila, entre 1996 y 1998, aunque originalmente estaba planteado que cubriera también 1999 (NCAR, 1999). En México continuaron estudios exploratorios iniciales similares en el estado de Durango durante 1999, pero sin resultados concluyentes.

Ilustración 3. Perfil vertical de temperaturas en la atmósfera (estándar y ejemplo al inicio del verano en Coahuila).



Puesto que los planteamientos y resultados individuales se encuentran plasmados en otras referencias, aquí los trataremos fundamentalmente desde un punto de vista comparativo, enfatizando sus similitudes y sus diferencias en relación con rubros distintos.

a) Características de las tormentas

Los tres experimentos tuvieron como blanco tormentas básicamente cálidas, dominadas por gotitas de agua sin cristales de hielo, todas ellas en la etapa de desarrollo inicial. Esto es totalmente cierto en el caso de las tormentas en Tailandia, que tienen muy poco desarrollo vertical. En el caso de Sudáfrica y México, las tormentas de verano son similares, excepto porque en Sudáfrica los vientos en altura son mayores, lo cual permite a las tormentas una mejor organización (corrientes ascendentes y descendentes no coincidentes) y, por lo tanto, mayor duración. En los tres casos, las bases de las nubes se encuentran claramente abajo del nivel de congelación (ver ilustración 1). Las características de las tormentas en Sudáfrica y México también resultaron bastante similares en cuanto a presencia de núcleos de condensación naturales y distribución de tamaños de gotas. En todos los casos se trata de tormentas convectivas aisladas, sin que esto signifique que no se presenten sistemas de tormentas en la zona; simplemente por razones de simplificar las condiciones de prueba, las tormentas que se escogieron fueron seleccionadas entre las de tipo aislado presentes.

b) Diseño experimental

En los tres casos, el diseño experimental fue aleatorio, donde las tormentas identificadas como buenos candidatos se seleccionan para ser sembradas o no sembradas a través de un mecanismo en el que no existe influencia de los operadores. Esto —bajo condiciones de muestras suficientemente grandes— implica que la única diferencia estadística entre las muestras de tormentas sembradas y de control es, precisamente, el sembrado en sí. Al menos en el caso de México, los 20 minutos previos al instante de decisión son también medidos y procesados para verificar que la afirmación anterior sea aproximadamente cierta. Este mecanismo es el mejor acercamiento que se conoce para poder comparar "lo que sucedió, contra lo que hubiera sucedido en caso de no haber existido el sembrado". En el caso de la campaña operacional en Sudáfrica, ya mencionada, también se simuló un diseño de este tipo al seleccionar un igual número de tormentas de características similares que no habían sido sembradas contra las cuales se realizaron estudios comparativos. Aun

así, en esta campaña no existe certeza de que las muestras que se comparan sean estadísticamente iguales en todo, excepto por el sembrado en sí.

c) Tamaño de muestra

En los cinco años del experimento científico en Sudáfrica se incorporaron un total de 127 tormentas (62 sembradas, 65 no sembradas) a la muestra estadística. En su etapa operacional posterior (1995 y 1996) se estudiaron 60 tormentas sembradas contra 60 tormentas más no sembradas. A partir de 1997, aún con cambios organizacionales que afectaron la estabilidad del financiamiento, 49 tormentas más han sido sembradas. En el caso de Tailandia, durante cuatro años se incorporaron un total de 67 tormentas a la muestra (34 sembradas y 33 no sembradas). En México, en el proyecto PARC, en Coahuila, el primer año (1996) se limitó a estudios de base y en los dos años siguientes se incorporaron a la muestra de estudio un total de 99 casos (47 sembrados y 52 no sembrados). Posteriormente, cinco de los casos sembrados fueron eliminados por no cumplir estrictamente con las condiciones preseleccionadas, quedando 94 casos (42 sembrados y 52 no sembrados).

d) Material sembrado

En los casos de Sudáfrica y México, el material utilizado para sembrar fue una combinación de núcleos de sales de cloruro de sodio y de potasio generados en gran número y tamaño aproximado de 1 μm por bengalas (fabricados por *Swartklip*). En contraste, en Tailandia se utilizaron sales de cloruro de calcio a granel (a una tasa de 21 kg/km), con núcleos de tamaños presumiblemente mucho mayores. En ambos casos se trata de sustancias altamente higroscópicas.

e) Mecanismo de siembra

En todos los casos, el material se sembró utilizando aeronaves. Simplemente, para tormentas convectivas aisladas, otros métodos —como quemadores en superficie— no se consideran suficientemente precisos en la colocación del material. En Sudáfrica y México, los núcleos se colocaron inmediatamente abajo de la base de la nube, al identificar la entrada a las corriente ascendente, esto a través del humo producido por las bengalas colocadas en adaptadores especiales detrás de las alas. En Tailandia, el material se dosificaba y dejaba salir del interior del avión a una altitud de uno a dos kilómetros sobre la base de la nube, también en la corriente ascendente.

f) Unidad experimental

Ya se comentó que la unidad experimental de análisis estadístico es la tormenta convectiva aislada, en contraste con otros experimentos que han utilizado zonas geográficas distintas (o alternantes) para sembrado y control. Pero existen diferencias al respecto entre los experimentos de Sudáfrica y México, por un lado, y el de Tailandia, por el otro. En los casos de Sudáfrica y México, el volumen atmosférico de análisis se mueve junto con la tormenta en cuestión; se trata del límite de 30 dBZ (*decibelios de reflectividad*) identificado por el radar para la tormenta en cuestión. En el caso de Tailandia, se trata de un volumen de análisis fijo de 20 km de radio alrededor del centroide de la tormenta inicialmente identificada como candidata. Todo lo que ocurre en el interior de dicho volumen se considera como la unidad de análisis. En lo que respecta a la duración, en los casos de Sudáfrica y México, se considera desde que se identifica a la tormenta en el radar (con un núcleo suficientemente grande de 30 dBZ o mayor) hasta que se disipa bajo el mismo criterio. En el caso de Tailandia, se intentaba tomar la decisión inclusive antes de que la tormenta produjera reflectividad identificable en el radar o apenas esto ocurría. La duración se consideraba hasta que cesaba la actividad en el volumen seleccionado.

g) Medición de efectos

En los tres casos, la evaluación de diferencias entre muestras sembradas y no sembradas depende totalmente del radar meteorológico, el cual detecta, ubica y categoriza regiones atmosféricas con presencia de gotas de agua de tamaño suficiente para, en general, estar precipitando (Rosengaus, 1995). Su uso permite dar seguimiento continuo a las tormentas convectivas aisladas, sujetos de estos experimentos desde un punto de vista integral, lo que resulta imposible hasta con las más densas redes pluviográficas en superficie. La evaluación a través de mediciones de lluvia en superficie sólo resulta factible para lluvias de cobertura extensa y únicamente acumulando efectos en intervalos largos de tiempo. Es importante puntualizar que los experimentos planteados evalúan la efectividad del método en términos de la precipitación estimada con el radar y alguna de las relaciones de reflectividad a intensidad de lluvia estándar, no con la verdadera precipitación ocurrida en tierra. Desde el punto de vista relativo esto es aceptable, pero introduce limitaciones fuertes al tratar de evaluar los efectos en términos absolutos. El experimento PARC (en México) incluyó mediciones de precipitación en la superficie terrestre para

permitir una calibración local de la relación reflectividad a intensidad de lluvia (Rosengaus y Calderón, 2000; Rosengaus, 2000). Existen algunas diferencias entre los diversos experimentos. En Sudáfrica, la identificación de la tormenta se realizaba con base en el barrido más bajo posible (con la proyección bidimensional de la tormenta), mientras que en Tailandia y México, se realizó en forma tridimensional con barridos volumétricos (en México en forma completamente automática y objetiva con el *software TITAN*, Dixon y Weiner, 1993). El radar utilizado en Tailandia fue *banda S*, mientras que en Sudáfrica y México se trató de *banda C*. La frecuencia de mediciones con radar en los tres casos fue del orden de 12 barridos por hora.

h) Procesamiento estadístico

Con base en las mediciones de radar, se calcularon diferentes parámetros de las tormentas, cuasi-instantáneos con respecto al tiempo, pero integrales en cuanto al espacio. Los más interesantes, desde el punto de vista de este trabajo, fueron los siguientes: flujo total de precipitación (m^3/s), masa líquida total en la tormenta (Ton) y área total de la tormenta (km^2). El análisis estadístico se realizó de manera independiente para cada uno de los instantes de medición, considerando al instante de decisión como el tiempo $t = 0$. Las comparaciones entre las muestras sembradas y de control no se realizaron en términos de las medias, ya que un análisis de este tipo implica un alto riesgo de que los resultados se encuentren exageradamente influidos por unas cuantas tormentas extremas. En los tres casos se recurrió a un análisis comparativo por cuartiles, es decir, se comparan las tormentas típicas de los percentiles 25, 50 y 75%. Por ejemplo, la tormenta del percentil 75% es una que resulta en tamaño mayor al 75% de las tormentas en la muestra y menor al 25% de las mismas.

i) Mediciones adicionales de física de nubes

En los tres casos, durante los experimentos se realizaron mediciones de física de nubes, no con el propósito de brindar una demostración de la efectividad del método, sino para obtener evidencia en relación con la hipótesis básica de operación del mismo. Esto es, las mediciones fundamentales de radar pueden demostrar la efectividad, pero bajo un enfoque de caja negra. Sin la comprensión adicional sobre los procesos involucrados que brindan las mediciones de física de nubes, la extensión de la metodología a condiciones no idénticas a aquellas donde fue demostrado resulta científicamente endeble. Estas mediciones incluyen

concentración de núcleos de condensación, distribución de tamaños de gotas, contenido total de agua líquida, etcétera, tanto en tormentas sembradas como en no sembradas. En general, se utilizaron las mismas aeronaves que para realizar el sembrado, por lo que obviamente se encuentran restringidas a lo permisible bajo el plan experimental. Dada la dificultad de muestrear adecuadamente la totalidad de una tormenta, hasta ahora estas mediciones han producidos indicios, más que evidencias concluyentes.

j) Resultados obtenidos

En general, los resultados son muy alentadores. De hecho, resultan mejores que aquello que podría justificarse con la hipótesis de partida de cada uno de los experimentos, al punto de motivar una reunión especial de expertos promovida por la Organización Mundial de Meteorología. En el experimento científico en Sudáfrica se concluye que el método produjo un 20% de incremento en lluvia en promedio. Más aún, en la campaña operativa con el método de control antes descrito, el resultado indica un incremento de 60%. En la ilustración 4 se pueden observar las evoluciones en el tiempo de los cuartiles 25, 50 y 75 para tormentas sembradas y no sembradas en el experimento científico del lado izquierdo y para la campaña operacional del lado derecho, en términos de masa líquida total en las tormentas. En el caso de Tailandia, las tormentas sembradas muestran un incremento relativo de 109% en cuanto a volumen de agua total precipitado, 64% en cuanto a área de la tormenta y 61% en relación con el flujo total de precipitación. En el caso de México (Coahuila), la duración de las tormentas sembradas parece incrementarse apreciablemente, como se indica en la ilustración 5, donde se grafica la fracción de tormentas aún activas al transcurrir el tiempo. Los resultados en

Ilustración 4. Resultados del experimento científico (izquierda) y de la campaña operacional con verificación (derecha) en Sudáfrica, comparando la evolución de las tormentas sembradas (s) vs. las de control (c) para iguales cuartiles de las muestras.

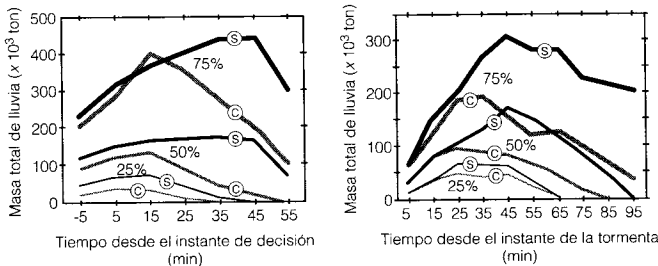
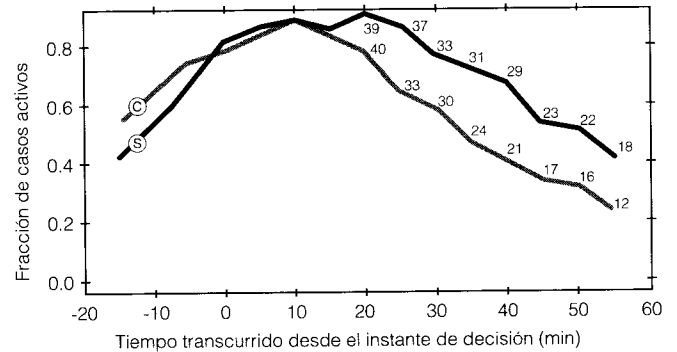


Ilustración 5. Resultados del experimento en México (Monclova) en términos de la fracción de casos totales activos, comparando las muestras de tormentas sembradas (s) vs. la de control (c). Las anotaciones junto a las curvas representan el número absoluto de casos aún activos.



formato similar a los de la ilustración 4 se presentan para el caso de México en la ilustración 6 en términos de flujo de precipitación y en la ilustración 7 en términos de área de la tormenta. Las diferencias resultan significativas a un nivel de confianza de 95% a partir de los 30 minutos después del instante de decisión. Como puede observarse, existe gran similitud en el comportamiento de los resultados en Sudáfrica y en México. Es importante puntualizar que, en forma inesperada para los planeadores y ejecutores del experimento en Tailandia, las diferencias observadas no ocurrieron en la celda convectiva directamente sembrada, sino en celdas convectivas de segunda, tercera y hasta cuarta generación, engendradas a partir de la celda sembrada. Esto implica efectos eminentemente dinámicos:

Ilustración 6. Resultados del experimento en México (Monclova) en términos del flujo total de precipitación, comparando las muestras de tormentas sembradas (s) vs. la de control (c) para iguales cuartiles de la muestra.

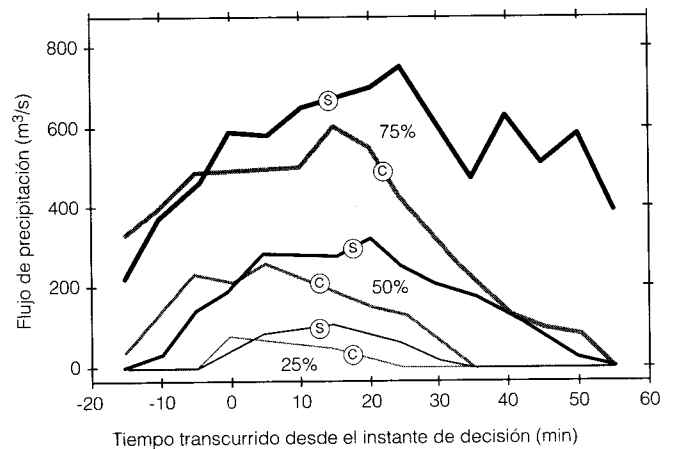
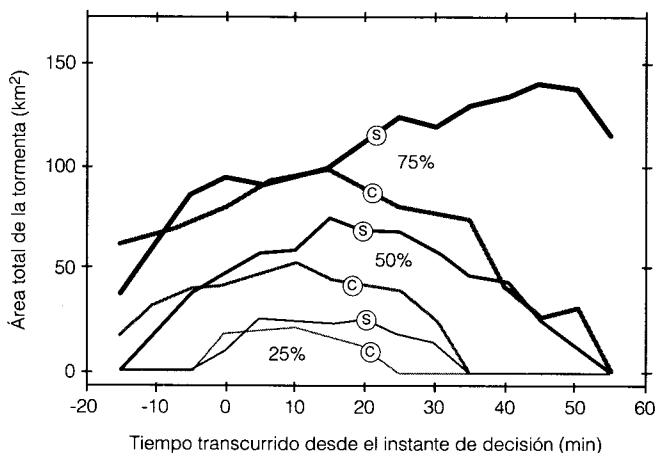


Ilustración 7. Resultados del experimento en México (Monclova) en términos del área total de la tormenta, comparando la muestra de tormentas sembradas (s) vs. la de control (c) para iguales cuartiles de la muestra.



precipitaciones más rápidas y concentradas en el tiempo producen corrientes descendentes más violentas, que a su vez facilitan la formación de celdas convectivas posteriores más vigorosas que en el caso natural.

Más allá de las similitudes y diferencias entre los tres experimentos descritos, resulta notable que el experimento en México (Coahuila) replica exitosamente al experimento en Sudáfrica, lo que no había sucedido anteriormente en la historia de la estimulación artificial de lluvia. La ausencia de réplicas en áreas geográficas distintas es una de las principales causas de la desconfianza que se ha tenido sobre la estimulación artificial de lluvia en el pasado (Pendick, 2000).

Interrogantes que persisten

Persisten muchas preguntas aún sin respuesta en términos de la comprensión del detalle de los mecanismos activos en diferentes condiciones para la producción de lluvia. Esto hace que la simple aplicación operativa de una técnica que ha mostrado ser efectiva en un sitio/temporada a condiciones distintas, tenga una alta probabilidad de no producir los efectos positivos deseados. Más aún, dado el delicado balance involucrado en la producción natural de lluvia, es perfectamente posible que una aplicación inadecuada de químicos para estimular la lluvia produzca una disminución en la misma. A continuación se presentan algunas de las interrogantes planteadas por el grupo de expertos durante el mencionado Taller Internacional sobre Sembrado Higroscópico, celebrado en 1999. Previamente se hace necesario señalar que muchas de estas interrogantes no son exclusivas del tema de estimulación

artificial de lluvias, sino que se comparten con el más amplio campo de física de nubes en general. La comprensión de los procesos que llevan a la formación de lluvia por el hombre, aunque ha avanzado mucho, todavía tiene lagunas importantes. El sembrado higroscópico se orienta a intervenir en sólo uno de los procesos involucrados en la cadena que finalmente produce lluvia. Una explicación física completa implica evaluar los efectos de este proceso modificado sobre los demás procesos activos dentro de las tormentas, lo que aún no es un problema resuelto en física de nubes en general.

1. Resulta extremadamente difícil obtener de manera experimental la caracterización completa de una tormenta en todas sus regiones y a lo largo de su evolución en el tiempo. Actualmente, las mediciones posibles son muestras detalladas de las características (por ejemplo, la distribución de tamaños de gotas) en una porción muy pequeña (la trayectoria de vuelo de la aeronave al cruzar la tormenta) o, alternativamente, se mide en forma integral a la tormenta, pero en forma indirecta y a baja resolución (con la reflectividad del radar meteorológico). El uso de la modelación numérica de los procesos resulta indispensable. Con estos modelos numéricos se prueba la viabilidad de ciertas hipótesis, se obtiene intuición sobre los procesos y se planean eficientemente las mediciones experimentales directas. En general, las mediciones directas sólo brindan indicadores o evidencias parciales de que, en efecto, el comportamiento es similar al pronosticado con el modelo numérico. Como en todas las otras áreas del conocimiento, estos modelos numéricos sólo son aproximaciones a la realidad. Los modelos más simples son los llamados de *parcela*, en los cuales se sigue la conversión del vapor de agua a gotas de lluvia (o cristales de hielo) —así como la evolución de los tamaños de éstas y su eventual precipitación— sobre una parcela de aire húmedo ascendente que no presenta intercambio de masa con su exterior (más que la pérdida de agua líquida por precipitación). Modelos más complejos intentan manejar tormentas completas únicamente en la vertical cuando son unidimensionales, en la vertical y en una dirección horizontal cuando son bidimensionales (de dovelas o axisimétricos) y, en general, cuando son tridimensionales. Estos modelos permiten manejar algunos procesos que con los de parcela no resulta posible como, progresivamente: el efecto de las gotas que precipitan desde arriba por colisión/coalescencia y fragmentación de gotas, el mezclado de la pluma de químicos de estimulación, la interacción con el aire no saturado del exterior de la tormenta, etcétera. Los modelos tridimensionales en fi-

sica de nubes aún se encuentran en su infancia. Dada la dependencia del tema sobre estos modelos numéricos de tormenta, el primer obstáculo se encuentra en las capacidades de los mismos y en la posibilidad de alimentarlos con datos suficientemente representativos de las condiciones reales.

2. Con base en mediciones experimentales, se calcula que el número total de núcleos higroscópicos mayores a $10\ \mu\text{m}$ que se introducen en una tormenta por sembrado con bengalas es del orden de 10^{10} partículas. Si, en forma optimista, cada una de estas partículas creciera a una gota de lluvia con diámetro de $3\ \text{mm}$, la cantidad total de lluvia producida por este efecto sería muy pequeña y equivaldría a una lámina de $0.1\ \text{mm}$ en un área de $1\ \text{km}^2$. Por otro lado, se calcula que tal crecimiento tomaría del orden de 10 a 20 minutos, lo que resulta ser una parte significativa de la vida de una celda convectiva. Es claro que a partir de los resultados de las campañas antes mostrados, el incremento de lluvia se produce por un proceso más complejo que el simple crecimiento de cada partícula sembrada a una gota de lluvia. Se ha presentado la hipótesis de que el sembrado acelera la formación de una gran cantidad de gotas pequeñas (de llovizna), mismas que se transportan y se dispersan hacia las partes superiores de la tormenta y que al recircularse a la misma cel-

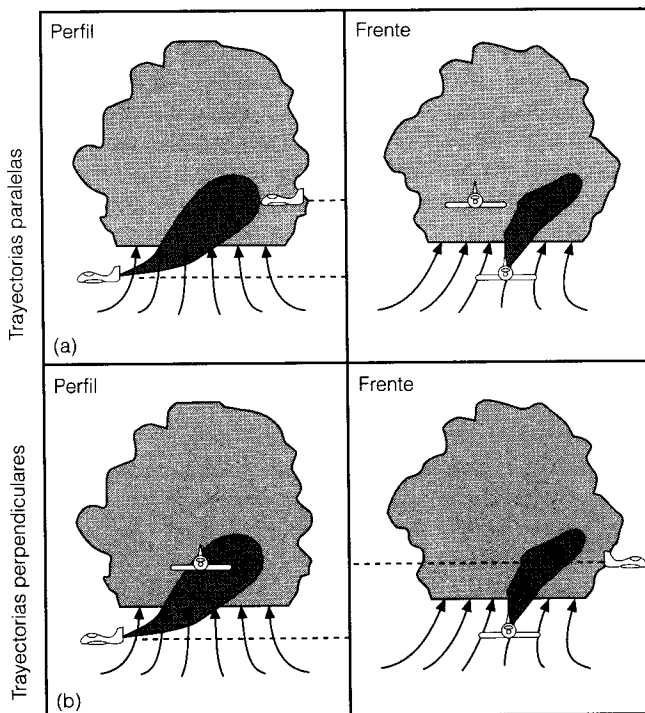
da o al pasar a otra celda vecina vigorizan los procesos involucrados en la producción de lluvia, especialmente la colisión/coalescencia, y que es este proceso el que incrementa significativamente la lluvia. Sin embargo, ello permanece como una hipótesis; no existen mediciones que lo confirmen.

3. No se conoce bien el movimiento de la pluma de núcleos sembrados al ser transportados por la corriente ascendente. Cálculos gruesos indican que no debe esperarse demasiada dispersión lateral de la pluma: del orden de 10 minutos o de 3 a 6 km de ascenso para que la pluma alcance una dimensión lateral de tan sólo un kilómetro, lo cual indica nuevamente que la recirculación es esencial en el mezclado de estos químicos en una parte significativa del volumen total de la tormenta. Esto no resulta fácil de medir, pues se requieren al menos dos aeronaves (la de siembra y la de medición) coordinadas y aún así es difícil asegurar que la aeronave de medición al pasar por arriba de la zona sembrada (en trayectorias paralelas) realmente está obteniendo una muestra de la pluma de químicos (ilustración 8a). Una forma de contrarrestar esto es utilizando trayectorias perpendiculares, en las que al menos en una porción de la trayectoria, la aeronave de medición sí cortaría la pluma de químicos sembrados (ilustración 8b).

4. El mecanismo del sembrado higroscópico pretende ensanchar el espectro de tamaños de gotas presentes para así vigorizar el proceso de colisión/coalescencia. Pero existen otros mecanismos que pueden lograr este ensanchamiento, el más obvio es el de entrada de aire (con sus respectivos núcleos de condensación) de la parte externa de la tormenta a través del mezclado con su medio ambiente. La existencia de esta entrada lateral es indicada por mediciones de gotitas de tamaños sumamente pequeños a niveles sobre la base de la nube, tamaños que no deberían existir bajo el proceso normal de condensación sobre núcleos que provienen de la corriente ascendente. Estos hallazgos son más comunes en la periferia de la tormenta. Esta entrada lateral tiene también un efecto negativo, pues el aire introducido no se encuentra saturado y su mezclado reduce el *contenido de agua líquida* disponible. El balance entre el efecto positivo al ensanchar el espectro de gotas y el negativo al evaporar parte del agua líquida no se ha evaluado. De todas formas, se trata potencialmente de un efecto similar al del sembrado higroscópico y por ello resulta importante en este contexto.

5. Experimentos numéricos con dos de los modelos disponibles (Cooper *et al.*, 1997, y Levin *et al.*, 1999) coinciden en indicar que el tamaño ideal de las partículas higroscópicas debe ser mayor o igual a $1\ \mu\text{m}$. La

Ilustración 8. Dos técnicas de sembrado y medición coordinadas.



introducción de partículas de menor tamaño sólo produce un incremento en la competencia de los núcleos pequeños (naturalmente presentes) por el vapor de agua disponible, lo que en sí es causa de la ineficiencia de las tormentas continentales. Sin embargo, los modelos no coinciden sobre qué orden de magnitud es más adecuado, el de 1 μm , el de 10 μm (o aun mayores). El modelo de parcela de Cooper *et al.* (1997) indica que aunque las partículas de 10 μm crecen muy rápidamente a gotas de lluvia y precipitan, tienen un efecto de recolección de las gotas de llovizna que autolimitan rápidamente la producción de más lluvia. Por el contrario, el modelo bidimensional de Levin *et al.* (1999) indica que el efecto de partículas de 10 μm sí resulta efectivo en el incremento de lluvia. En general, las campañas experimentales descritas no atacaron el problema de comparar efectos diferenciados al sembrar con partículas de diversos tamaños, aunque en todas se cubre el rango de 1 a 10 μm . También existen incógnitas sobre el papel que los núcleos ultragigantes (>50 μm) pueden tener en el proceso de producción de lluvia.

6. Hasta ahora, la evaluación de la efectividad del sembrado higroscópico ha sido realizada a través de radar, suponiendo una relación de reflectividad a intensidad de lluvia ($z-R$) invariante entre tormentas sembradas y no sembradas, usualmente la de Marshall-Palmer (Rosengaus, 1995). Sin embargo, se sabe que el sembrado higroscópico produce una transformación de la distribución de tamaños de gotas de una alta concentración de tamaños pequeños y uniformes a una menor concentración de tamaños más grandes y variados. Puesto que el eco que percibe el radar es proporcional a la sumatoria de los diámetros equivalentes de las gotas elevados a la sexta potencia, el sembrado higroscópico en sí implica un cambio en la reflectividad medida por el radar. Aunque el cambio de la distribución de tamaños razonablemente también involucra un cambio en la intensidad de lluvia, es altamente improbable que la relación $z-R$ se mantenga invariante. Esto indica que las tormentas sembradas podrían requerir una relación $z-R$ diferente que las tormentas naturales, al calcular la intensidad de lluvia a partir de la reflectividad. Esto pone en duda la veracidad del aparente incremento en flujo de precipitación, por ejemplo en la ilustración 6, entre tormentas sembradas y no sembradas para un instante dado cualquiera. Sin embargo, el incremento en duración y área de las tormentas es indudable. Las evaluaciones cuantitativas del incremento de precipitación pueden requerir ser corregidas, pero la magnitud de tal corrección es todavía una incógnita. Otro factor por considerar que proviene del uso del radar se encuentra asociado con la impre-

cisión característica del radar al evaluar intensidad de lluvia instantánea y puntual (Rosengaus, 2000). Esta imprecisión no cancela la validez de los resultados mostrados, pero indica que, para un valor dado de nivel de significancia, el tamaño de la muestra requerida puede ser mayor o, alternativamente, que las diferencias encontradas resultan significativas con una menor confianza que la expresada por los respectivos autores (Mather *et al.*, 1997; Silverman y Sukarnjanaset, 2000; NCAR, 1999).

7. Finalmente, aunque en las tormentas estereotipo de interés la porción por arriba del nivel de congelación es muy pequeña (o nula) en etapa de desarrollo, ya en su etapa de madurez puede existir una apreciable interacción entre los cristales de hielo en la parte superior y las gotas de agua en la inferior. Por ejemplo, el incremento en el tamaño de las gotas (a diámetros mayores a 24 μm) que ascienden a la parte superior de la tormenta (por arriba de -5°C) puede facilitar la formación y el crecimiento de cristales de hielo, y con ello la producción final de lluvia y la longevidad de la tormenta. El hecho de que las tormentas tratadas en Tailandia no sean muy profundas y por ello no presenten cristales de hielo, e incluso así parecen haber respondido al sembrado higroscópico, indica que esta interacción probablemente no es determinante, pero no se puede descartar que tenga alguna influencia digna de consideración. Simplemente no se sabe lo suficiente al respecto para poder juzgarlo.

Mediciones, estudios e investigaciones necesarios

En términos de las interrogantes que aún persisten de la sección anterior, el grupo de expertos reunidos en el Taller Internacional de Sembrado Higroscópico propuso una lista de mediciones, estudios y actividades necesarios para iniciar la obtención de respuestas. Esta lista, interpretada por el autor en términos de los intereses de la comunidad de ingeniería y recursos hidráulicos, se presenta a continuación.

El radar parece ser una herramienta esencial para avanzar en dicha área del conocimiento. Sin embargo, la complejidad del fenómeno estudiado requiere de las técnicas más avanzadas en el uso del radar, algunas de las cuales no se aplican todavía en forma operacional para el monitoreo atmosférico. El problema principal con el radar convencional es que la *reflectividad* que se mide con él no brinda información sobre la distribución de tamaños de gotas; por el contrario, suponiendo una cierta distribución de tamaños de gotas, ofrece una medición indirecta de la intensidad de lluvia. Entre otras características, se requiere de radares de calidad de investigación, con alta resolución espa-

cial y temporal, con capacidades de doble longitud de onda y de doble polarización, radares milimétricos de visión vertical, etcétera. Los primeros sitios de la lista se dedican a este tipo de instrumentos.

1. Al propagarse a través de la atmósfera, las ondas electromagnéticas sufren atenuación. Específicamente las microondas, banda en la que opera el radar, son afectadas primordialmente por las gotas de agua que encuentran en su camino. Pero la atenuación que sufren es diferente, dependiendo de la *longitud de onda* de la que se trate. Así pues, un radar que pueda operar con dos longitudes de onda distintas (por ejemplo en la banda *S* con $\lambda \approx 10$ cm y en la banda *X* con $\lambda \approx 3$ cm) recibe mayor información sobre los *hidrometeoros* en la atmósfera que un radar convencional. Específicamente, la diferencia en las señales recibidas en ambas bandas se relaciona con el *contenido de agua líquida* (LWC) en el blanco, variable que no es obtenida con un radar convencional. Por otro lado, con *D* igual al diámetro equivalente de las gotas de agua, el hecho de que la reflectividad (*z*) depende de D^6 mientras que la atenuación depende de D^3 permite, con un radar de doble longitud de onda, obtener en principio un "tamaño característico de gotas vía radar" (D_{rad}), más directamente relacionado con cambios producidos con el sembrado higroscópico que la reflectividad de un radar convencional. Sin embargo, la aplicación de estas técnicas en zonas de la tormenta donde conviven hielo y agua líquida aún es un problema por resolver. Actualmente no existen en México radares con longitud de onda múltiple.

2. La falta de una relación determinística entre las mediciones de reflectividad simple (polaridad horizontal) de un radar convencional con la intensidad de lluvia puede ser parcialmente subsanada utilizando un radar de doble polarización, es decir, uno que pueda emitir y recibir pulsos electromagnéticos polarizados tanto en orientación horizontal como vertical. Resulta que la forma aplanada (como un platillo orientado horizontalmente) de las gotas de lluvia grandes al caer hace que las ondas electromagnéticas con polarización horizontal se vean ligeramente retrasadas en su camino con respecto a las ondas con polarización vertical. Un procesamiento especializado de las señales de pulsos de polarización horizontal y vertical permite obtener una medida de este retraso (K_{DR}), que ha demostrado tener una relación estadística más fuerte con la intensidad de lluvia que la reflectividad simple. Lo anterior está asociado con el defasamiento relativo entre ambas señales, pero también hay información útil al respecto en la diferencia de amplitud de ambas señales (reflectividad diferencial o Z_{DR}). Las gotas grandes

presentan una forma más aplanada al caer que las gotas pequeñas y por ello producen un eco mayor al paso de ondas polarizadas horizontalmente que al paso de ondas polarizadas verticalmente. Esto es, Z_{DR} resulta mayor para gotas grandes que para gotas chicas. Puesto que una de las incógnitas que persisten es qué tamaño de núcleos de condensación dominan el proceso (y con ello incrementa la reflectividad), el radar de doble polarización resulta una herramienta útil al respecto. Además, los parámetros que tradicionalmente han sido utilizados para clasificar precipitación pluvial (en llovizna, chubasco, nieve o granizo), Z_{DR} y la relación de depolarización lineal (LDR) pueden resultar útiles en zonas de las tormentas con convivencia de precipitación en varias fases. No existen en México radares capaces de proveer el parámetro K_{DR} , ni se operan para obtener productos de Z_{DR} o LDR.

3. Los radares con capacidad *Doppler* (12 de ellos existen en México) utilizan el corrimiento de la frecuencia de la señal recibida con respecto a la frecuencia de la señal transmitida para medir el espectro de velocidades de las partículas blanco en la dirección radial (operativamente utilizado para estimar el campo de vientos o el nivel de turbulencia atmosférica). Sin embargo, los radares meteorológicos convencionales operan en longitudes de onda de 3 a 10 cm, por lo que se encuentra optimizado para detectar gotas de suficiente tamaño para ya estar en precipitación. Con el mismo principio *Doppler*, aplicado a un radar de longitud de onda milimétrica y apuntando verticalmente hacia arriba, se puede obtener con gran detalle el espectro de velocidades de caída de las gotas de agua, aunque éstas sean aún muy pequeñas para precipitar. Esta medición contiene, en forma mezclada, las velocidades de caída de las gotas en sí con respecto a su entorno, el flujo (ascendente o descendente) en el que se encuentran embebidas e inclusive los efectos de turbulencia. Técnicas recientes de procesamiento permiten separar estos efectos. Así, bajo la hipótesis de que las gotas se encuentran a su velocidad terminal de caída (con respecto a su entorno), el espectro de velocidades de caída puede convertirse directamente a la tan buscada distribución de tamaños de gotas. Esto sería aplicable tanto a la distribución de tamaños de gotitas de nube en una capa arriba de la base de la misma, como a la distribución de tamaños de gota de lluvia en la columna de precipitación bajo ella. Sin embargo, persisten problemas prácticos de aplicación, como la manera de colocar (y mantener colocado) el instrumento bajo la tormenta de interés. La instalación en una plataforma aérea (viendo verticalmente hacia abajo) también es complicada, por el hecho de requerirse tiempos de promediación relativamente lar-

gos y una definición muy precisa de la velocidad vertical de la aeronave. De todas formas es importante explorar la utilización de este *disdrómetro* del siglo XXI. La extensión directa del principio al *lidar* (un radar operando en la longitud de onda de luz) es aplicable a partículas incluso mucho menores (como *aerosoles*).

4. Actualmente, el mejor uso de mediciones de percepción remota por satélite parece ser en estudios de climatología de la convección en la zona de interés. La naturaleza misma del fenómeno dicta que los satélites a utilizar sean los *geoestacionarios* debido a la frecuencia de obtención de sus imágenes y sondeos. Satélites de órbita (pseudo) polar avanzados con sensores de interés en precipitación pluvial como el *SSM/I* y el *TRMM* simplemente no cubrirían una zona de interés con suficiente frecuencia. Aun bajo este limitado papel, resulta importante incorporar ya a nuevas campañas experimentales las mediciones de satélite, con el propósito de calibrar diferentes técnicas, aprovechando los instrumentos locales operando en la zona. Es necesario no subestimar la labor potencial de las mediciones por satélite para monitorear y supervisar campañas puramente operativas de bajo presupuesto en el futuro.

5. Es evidente que la modelación numérica jugará un papel preponderante en el desarrollo del tema que nos ocupa. Simulaciones numéricas que varían de resolución de 10 km y cobertura de 1,000 km hasta resolución de 10 m y cobertura de 10 km serían necesarias, aunque difíciles de implementar en corridas únicas o con mallas anidadas. Hasta ahora, las simulaciones se han realizado sobre casos estándar, es decir, independientes a las particularidades de campañas experimentales específicas. Las futuras campañas harían bien en incorporar esfuerzos de modelación numérica directamente orientados a los casos e interrogantes en cuestión. Por ello, las campañas experimentales también deben dirigirse a obtener datos adecuados y suficientes para alimentar estos modelos de simulación. En este contexto, se recomiendan radares múltiples *Doppler* (para lograr el campo de vientos, Rosengaus, 1995) con haces angostos.

6. Dadas las similitudes en metodología y resultados de las tres campañas experimentales mencionadas, resulta atractivo emprender un estudio de reanálisis de sus datos bajo formatos y algoritmos uniformes para los tres casos. Esto implicaría una reinterpretación de las mediciones de radar de Tailandia con el paquete *TITAN* que fue utilizado en Sudáfrica y México. También parece razonable analizar sus mediciones de microfísica de nubes bajo una óptica común. Con el propósito de evaluar qué tan extrapolables son los resultados positivos obtenidos en otras regiones, es con-

veniente ubicar las tormentas prototipo que fueron sembradas (o utilizadas como control) en el contexto de una climatología de tormentas de las zonas tratadas, utilizando primordialmente las mediciones de radar. Estos estudios también brindan información útil sobre el posible resultado alcanzable en campañas operativas de gran escala en el futuro.

7. Se percibe la necesidad de realizar estudios sistemáticos sobre las características de las bengalas que se utilizan en sembrado higroscópico; se sabe que aquellas elaboradas por diversos fabricantes presentan diferencias importantes tanto en término de los químicos higroscópicos como de los químicos para lograr la combustión. Tales estudios deben concentrarse tanto en la distribución de tamaños de núcleos producidos como en la concentración de los mismos para técnicas de colocación típicas y que pueden hacerse con dos aeronaves coordinadas en campo, pero en forma más controlada y económica también en túneles de viento en tierra. Asimismo, parece razonable explorar la posible influencia que pueden tener los químicos de combustión en la formación de cristales de hielo al migrar a partes frías de la tormenta. Debe ser explorada la posibilidad de colocar trazadores en las mismas bengalas, detectables por medios independientes y con características de arrastre/dispersión similares a los núcleos higroscópicos. Esto facilitaría significativamente la realización de estudios de migración de los químicos dentro de las celdas convectivas, e inclusive a celdas y tormentas vecinas.

Perspectivas

Los resultados obtenidos en las campañas de sembrado higroscópico en Sudáfrica, Tailandia y México resultan alentadores. Tan es así, que han despertado interés y sospecha por parte de la comunidad científica, al ser mejores que lo que las hipótesis iniciales básicas podrían sugerir como posibles.

La opinión actual de la comunidad científica especializada con respecto al sembrado higroscópico es cautelosamente optimista. Sin una explicación plausible y convincente de cómo actúa el sembrado higroscópico, dicha comunidad no se encuentra en la posición de recomendar la aplicación operativa de esta metodología de estimulación de lluvia. Más aún, persiste el riesgo de que la comunidad operativa tome los resultados parciales actuales y vuelva a cometer el error del intervalo de 1950 a 1980 al utilizar indiscriminadamente el sembrado glaciogénico hasta el punto de desacreditarlo.

Entre la comunidad científica especializada existe un consenso general sobre la posibilidad de realizar un

nuevo experimento científico de mayor envergadura, esta vez con participación internacional y multiinstitucional, en el que coincidan las mejores tecnologías disponibles. Éste, inclusive, podría darse en México para el año 2002, bajo los auspicios de la Organización Mundial de Meteorología. Por supuesto, dicha empresa depende de pactar una multitud de paquetes de financiamiento a través de un gran número de instituciones. No obstante, no deja de resultar fascinante la idea de hacer un uso eficiente y concentrado de todos los recursos de conocimiento y tecnología de medición en el mundo para encontrar respuestas en el contexto de este problema de gran interés para la población en general, incluyendo especialmente a la del altiplano del norte de México.

La cautela indicada arriba no debe interpretarse como pesimismo. Esto resulta especialmente importante en el contexto de la existencia de otras técnicas para estimular lluvia, frecuentemente sin ninguna base o comprobación científica, que compiten en el ámbito operacional por los mismos fondos necesarios para completar los estudios ya descritos en cuanto a sembrado higroscópico. Bajo el enfoque de tomadores de decisiones sin entrenamiento científico formal, estas otras técnicas pueden resultar tan o más atractivas que el sembrado higroscópico, bajo el espejismo de promesas de resultados rápidos e inmediatos. Si se trata de responder a presiones socio-político-económicas bajo condiciones emergentes de déficit de agua, aparentando que las autoridades correspondientes sí hacen algo al respecto, estas otras técnicas pueden cumplir el cometido. Pero si se trata de, efectiva y sistemáticamente, ampliar la disponibilidad del recurso agua a largo plazo, el sembrado higroscópico, hoy por hoy, resulta una alternativa mucho más promisoría en las condiciones de México.

Agradecimientos

Se acredita y agradece la revisión del manuscrito por el maestro en ingeniería Roberto Mejía Z., por el maestro en ciencias Arturo Valdés M. y por el oceanógrafo Fernando Oropeza R., así como la de los árbitros anónimos.

Recibido: 23/08/2000
Aprobado: 17/01/2001

Referencias

Cooper, W.A., R.T. Bruintjes y G.K. Mather, "Calculations Pertaining to Hygroscopic Seeding with Flares", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, núm. 11, 1997, pp. 1449-1469.

- Dixon, M.J. y G. Weiner, "TITAN-Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting—A Radar-Based Methodology", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 10, 1993, pp. 785-797.
- Gabriel, K.R. y D. Rosenfeld, "The Second Israeli Rainfall Stimulation Experiment: Analysis of Rainfall on Both Target Area", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 29, 1990, pp. 1055-1067.
- Gagin, A., y J. Neumann, "The second Israeli Randomized Cloud Seeding Experiment: Evaluation of Results", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 20, 1981, pp. 1301-1311.
- INSISA, *Informe final sobre el programa experimental de estimulación de lluvia en Ensenada, B.C.N. y sus alrededores*, INSISA Consultores S.A., México D.F., 1976, 110 pp.
- Levin, Z., Y. Yin, T. Reisin y S. Tzivion, "Comparison of the Effects of Hygroscopic and Glaciogenic Seeding on the Evolution of the Spectra of Cloud and Precipitation Particles in Convective Clouds: A Numerical Study", *WMO 7th Conference on Weather Modification*, Chiang Mai, Tailandia, 1999, pp. 73-75.
- Mather, G.K., "Coalescence Enhancement in Large Multicell Storms Caused by the Emissions from a Kraft Paper Mill", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 30, 1991, pp. 1134-1146.
- Mather, G.K., D.E. Terblanche, F.E. Steffens y L. Fletcher, "Results of the South African Cloud-Seeding Experiments Using Hygroscopic Flares", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, 1997, pp. 1433-1447.
- NCAR, *Report on Third Year Activities of PARC*, Research Applications Program, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1999, 67 pp.
- Pendick, D., "Cloud Dancers", *Scientific American presents Weather*, vol. 11, núm. 1, 2000, pp. 64-69.
- Rangno, A.L. y P.V. Hobbs, "A New Look at the Israeli Cloud Seeding Experiments", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 34, 1995, pp. 1169-1193.
- Rosengaus, M., "Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos (primera parte) y aspectos modernos (segunda parte)", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. X, núm. 1, 1995, pp. 55-74 y núm. 2, pp. 59-78.
- Rosengaus, M., y G. Reza, *Informe anual del proyecto: HG-9622: verificación de campañas de estimulación de lluvias*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, 1996, 34 pp.
- Rosengaus, M., y J.J. Calderón, *Informe final de los proyectos TH-9082 y TH-9083: participación en las campañas de estimulación de lluvia*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000, 47 pp.
- Rosengaus, M., "Precisión y exactitud del radar meteorológico como instrumento para medir lluvia", ponencia núm. 20, *Memorias del 5º Congreso de Meteorología*, Comisión Federal de Electricidad, México, D.F., 2000, pp. 20/1-20/10.

- Rosengaus, M., "Estimulación artificial de lluvia en Coahuila", *Anuario 1999*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, 2000, pp. 42-51.
- Silverman, B.A. y W. Sukarnjanaset, "Results of the Thailand Warm-Cloud Hygroscopic Seeding Experiment", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 39, 2000, pp. 1160-1175.
- Terblanche, D.E., F.E. Steffens, L. Fletcher, M.P. Mittermaier y R.C. Parsons, "Towards the Operational Application of Hygroscopic Flares for Rainfall Enhancement in South Africa", en prensa, *Journal of Applied Meteorology*, 2000, vol. 30, núm. 11, pp. 1811-1821.

Glosario

Aerosol: pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera (menores a 10 μm).

Banda C: rango de longitudes de onda de alrededor de 5.6 cm en las microondas del espectro electromagnético.

Banda S: rango de longitudes de onda de alrededor de 10 cm en las microondas del espectro electromagnético.

Coalescencia: proceso de integración de dos gotas de agua al ponerse en contacto.

Colisión: impacto de gotas de agua vecinas, normalmente por diferencias en su velocidad de caída

Contenido de agua líquida: concentración de agua en fase líquida en el aire, en $g_{\text{agua}}/g_{\text{aire}}$. Se acostumbra denominar como LWC por sus siglas en inglés.

Convección: en el contexto meteorológico se refiere al ascenso de aire húmedo cálido.

Convergencia: condición de flujo horizontal que concentra masa en un cierto punto o región, usualmente desahogada a través de una corriente vertical.

Cúmulos: tipo de nube con apariencia como de pompa de algodón, predecesora de las tormentas convectivas aisladas.

Decibelios: forma de expresión de magnitud relativa de una cantidad con respecto a otra, muy utilizada en electrónica, instrumentación y telecomunicaciones. Implica una escala logarítmica decimal. Específicamente, la colocación de dB (como si fuera unidad) después de la variable a implica que se expresa $10 \log_{10} (a/b)$, donde b es una magnitud de referencia convencional. La reflectividad con radar se expresa como dBZ , que implica $10 \log_{10} (z/1 \text{ mm}^6/\text{m}^3)$ con $z =$ reflectividad.

Disdrómetro: instrumento que mide la distribución de tamaños de gotas que se precipitan a tierra.

Efecto estático: se refiere a un efecto directo del sembrado que no transforma la dinámica general de la tormenta, por ejemplo la simple condensación de agua sobre un núcleo y su crecimiento hasta precipitar.

Efecto dinámico: se refiere a un efecto que sí transforma la dinámica general de la tormenta, por ejemplo creando corrientes descendentes más vigorosas, que pueden facilitar la formación de celdas convectivas vecinas.

Geoestacionario: órbita ecuatorial de satélites que permite que den una vuelta a la Tierra en exactamente 24 horas, manteniéndose con ello siempre sobre un mismo punto de la misma.

Hidrometeoro: partículas de agua que caen hacia tierra. Se refiere a las gotas de lluvia.

Inestabilidad: condición en la que una parcela de aire, por su temperatura y humedad en relación con su vecindad, presenta flotación natural que induce su ascenso espontáneo.

Inversión térmica: estabilidad vertical extrema de una parcela por un perfil de temperaturas ascendente en la dirección vertical (capa de aire frío y pesado abajo de capa de aire cálido y ligero arriba).

Lidar: instrumento que opera bajo el mismo principio que el radar, pero a frecuencias (o longitudes de onda) correspondientes a la luz.

Longitud de onda: distancia entre dos crestas de una onda electromagnética; las longitudes de onda de los radares se encuentran en el orden de magnitud de 0.1 a 10 centímetros.

μm : abreviación de micra, millonésimo de metro, milésimo de milímetro.

Nube: aglomeración de pequeñas gotas de agua, cristales de hielo o ambos con tamaños suficientemente pequeños como para no precipitar. En el contexto de este trabajo se refiere más a nubes tipo cúmulos de las cuales se desarrollan las tormentas convectivas.

Parcela: paquete de aire atmosférico con fronteras a través de las cuales no hay transferencia de masa.

Perfil vertical de temperaturas: gráfica de la temperatura atmosférica *versus* altitud.

Precipitación: partículas de agua, hielo o combinaciones que por su tamaño precipitan a tierra.

Reflectividad: propiedad de la atmósfera detectada por el radar convencional a través de la detección de la potencia recibida de ecos atmosféricos (eminente-mente gotas de agua). Resulta igual a la sumatoria de las sextas potencias de los diámetros equivalentes de las gotas en cada unidad de volumen atmosférico.

Sembrado glaciogénico: colocación de núcleos que favorecen la cristalización de hielo en zonas superenfriadas de tormentas.

Sembrado higroscópico: colocación de núcleos fuertemente atractores de condensación de agua en las zonas cercanas a la saturación en tormentas en estado de desarrollo.

SSM/I: *Special Sensor Microwave/Imager*, satélite con un sensor pasivo en la banda de microondas.

Subtropical: se refiere a las bandas terrestres sobre o apenas afuera de los trópicos de Cáncer y Capricornio.

Superenfriada: condición de una nube en la que existe agua líquida inclusive a temperaturas menores a la de congelación.

Supersaturación: condición de una nube en la que existe una humedad relativa mayor al 100%, es decir, que temporalmente existe una mayor cantidad de vapor de agua que en la condición de equilibrio.

Tormenta: desarrollo de una nube al punto de ya producir precipitación considerable. En el contexto de este trabajo se refiere más a una nube tipo cumulonimbos.

TRMM: *Tropical Rain Measuring Mission*, satélite con un instrumento activo de microondas (radar sobre plataforma satelital).

Tropical: se refiere al cinturón de la Tierra que se encuentra entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio, cerca del ecuador.

Troposfera: parte baja de la atmósfera, aquella que se encuentra meteorológicamente activa. Su límite superior está dado por una inversión térmica (la tropopausa) y no es constante ni en distribución espacial ni en tiempo. A la latitud de México normalmente se considera la capa de los 10 km más superficiales de la atmósfera.

Zona de convergencia intertropical: banda terrestre donde inciden los vientos alisios del hemisferio norte (del NE hacia en SW) y los vientos alisios del hemisferio sur (del SE hacia el NW). Se puede considerar una especie de ecuador térmico de la Tierra, con desplazamientos en cuanto al ecuador geográfico.

Abstract

Rosengaus, M. & R. Bruintjes, "Rain Enhancement by Hygroscopic Seeding", Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish), vol. XVII, num. 1, pages 13-29, January-March, 2002.

Rain enhancement has always been a very controversial topic. Recently a new technique, the hygroscopic seeding, has made significant advances and shows interesting perspectives for the increase of the water resource for the ever increasing populations, but for conditions of latitude and climate similar to the ones in Mexico. In this paper information associated with a workshop on the topic, where many world experts in cloud physics, instrumentation and scientifically based rain enhancement participated is presented. Background and fundamental concepts for the understanding of hygroscopic seeding are given, as well as a description of three scientific experiments recently carried out. It continues with an interpretation (from a hydraulic engineering point of view) of the discussions that took place in terms of questions still standing and required new studies. This presentation of the topic for the hydraulic engineering and water resources community is geared towards allowing a balanced and realistic decision making in this regard.

Key words: rainfall, rain enhancement, clouds seeding, hygroscopic seeding, cloud physics, artificial weather modification, and convective storms.

Dirección institucional de los autores:

Michel Rosengaus

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Tecnología Hidrológica
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
Progreso, Jiutepec,
Morelos,
C.P. 62550,
México.
Teléfono: (52) (777) 319 4000, extensión 526
Correo electrónico: mickros@terra.com.mx

Roelof Bruintjes

Applied Science Group
Research Applications Program
National Center of Atmospheric Research
3450 Mitchell Lane
Boulder, Colorado 80301
USA.
Teléfono: (303) 497 8909
Fax: (303) 497 8401
Correo electrónico: roelof@ucar.edu