

## DECLARACIÓN DE LA OMM SOBRE LA SITUACIÓN DE LA MODIFICACIÓN ARTIFICIAL DEL TIEMPO

### INTRODUCCIÓN

Desde hace miles de años, los seres humanos vienen realizando esfuerzos para modificar el tiempo y el clima para aumentar los recursos hídricos y atenuar las condiciones meteorológicas extremas. La tecnología moderna de modificación artificial del tiempo se remonta al descubrimiento, a fines del decenio de 1940, de que las gotas de nubes sobreenfriadas podían convertirse en cristales de hielo al insertárseles un agente enfriador como el hielo seco, o un núcleo de hielo artificial, como el yoduro de plata. A lo largo de más de cincuenta años de investigación se han logrado grandes avances en nuestro conocimiento de la microfísica, la dinámica y los procesos de precipitación de las nubes naturales (lluvia, granizo, nieve) y los efectos de las intervenciones humanas en esos procesos.

En la actualidad se llevan a cabo más de cien proyectos de modificación artificial del tiempo en decenas de países, en particular en regiones áridas y semiáridas, donde la falta de suficientes recursos hídricos limita su capacidad para satisfacer la demanda de alimentos, fibra y energía. El presente documento tiene por finalidad pasar revista a la situación en que se encuentra la modificación artificial del tiempo.

La energía que encierran los sistemas meteorológicos es de tal magnitud que es imposible crear artificialmente tormentas de lluvia o alterar la dirección de los vientos para llevar vapor de agua a una región. Por lo que respecta a la modificación del tiempo, la solución más realista es aprovechar las sensibilidades microfísicas que hacen posible que una pequeña perturbación en el sistema provocada por el ser humano puede alterar sustancialmente la evolución natural de los procesos atmosféricos.

Se ha demostrado en laboratorio la posibilidad de influir en las microestructuras de las nubes mediante simulación en modelos numéricos, y posterior verificación mediante mediciones físicas, en algunos sistemas naturales tales como niebla, capas de nubes y cúmulos. Sin embargo, se cuenta con muy pocas pruebas físicas directas de que la precipitación, el granizo, el rayo o los vientos, pueden modificarse significativamente empleando medios artificiales. La complejidad y variabilidad de las nu-

bes hace sumamente difícil comprender y detectar los efectos de los intentos de modificarlas artificialmente. A medida que avanzan los conocimientos de la física y la estadística de las nubes, y su aplicación a la modificación artificial del tiempo, se elaboran nuevos criterios de evaluación para valorar los experimentos de siembra de nubes. Esta cuestión ha cobrado una nueva dimensión con la creación de nuevos equipos – plataformas a bordo de aeronaves con sistemas de medición de aspectos microfísicos y del movimiento del aire, radares (entre ellos el radar Doppler y la capacidad de polarización), satélites, radiómetros de microondas, perfiladores del viento, redes automáticas, pluviómetros y estaciones de redes mesoescalares. Son igualmente importantes los progresos hechos en sistemas informáticos que permiten procesar grandes volúmenes de datos. El empleo de nuevas series de datos unido a modelos numéricos de nubes cada vez más refinados contribuyen a poner a prueba diversas hipótesis en materia de modificación artificial del tiempo. Los estudios químicos y de seguimiento de laminillas metálicas contribuyen a precisar el flujo de aire entrante y saliente en las nubes y la fuente de hielo o de nucleación higroscópica como agente de siembra. Con algunos de estos nuevos recursos se puede preparar una mejor climatología de las nubes y de la precipitación para poner a prueba las hipótesis de siembra antes de comenzar proyectos en materia de modificación artificial del tiempo.

Si se pudiese predecir con precisión la precipitación de un sistema nuboso, sería sencillo detectar el efecto de la siembra artificial de nubes en ese sistema. No obstante, los efectos esperados de esta siembra se sitúan casi siempre dentro del margen de la variabilidad natural (baja relación señal/ruido) y nuestra capacidad de predicción del comportamiento natural sigue siendo limitada.

La comparación de la precipitación observada durante los períodos de siembra con la observada durante períodos históricos plantea dificultades a causa de los cambios climáticos y de otro tipo que se han operado de un período a otro y, por consiguiente, no es una técnica fiable. La situación se hace aún más difícil al ser mayores

los indicios de que el cambio climático puede incidir en el volumen de precipitación en todo el mundo, así como en su redistribución espacial.

En la práctica de evaluación actualmente aceptada, los métodos de selección aleatoria (objetivo/control, área de cruzamiento o única) se consideran más fiables para detectar los efectos de la siembra de nubes. Para esas pruebas aleatorias se requieren algunos casos calculados rápidamente sobre la base de la variabilidad natural de la precipitación y la magnitud del efecto esperado. En caso de relación muy baja señal/ruido, puede ser necesario que la duración de los experimentos se sitúe en un margen de 5 a más de 10 años. Siempre que sea preciso realizar una evaluación estadística para establecer que un cambio importante es resultado de una determinada actividad de siembra, ésta ha de ir acompañada de una evaluación física para:

- a) confirmar que el cambio observado estadísticamente se debe probablemente a la siembra; y
- b) determinar las capacidades del método de siembra para producir los efectos deseados en condiciones diversas.

El efecto de variabilidad de la precipitación natural en la duración requerida de un experimento puede reducirse con el empleo de predictores físicos cuya eficacia está en proporción directa a nuestra comprensión del fenómeno. Por consiguiente, la búsqueda de predictores físicos sigue siendo una gran prioridad en la investigación de la modificación artificial del tiempo. Los predictores físicos pueden ser parámetros meteorológicos (por ejemplo, la estabilidad, la dirección del viento, los gradientes de la presión) o las cantidades de nubes (por ejemplo, el contenido de agua líquida, la velocidad de las corrientes ascendentes, las concentraciones de gotas grandes, la concentración de cristales de hielo o la reflectividad radárica).

Para verificar los métodos de modificación artificial del tiempo se preferirán las técnicas de medición objetiva de las cantidades de precipitación. Entre éstas figuran las mediciones directas en tierra (por ejemplo, los pluviómetros y las almohadillas de granizo) y las técnicas de teledetección (radáricas y satelitales). Las fuentes secundarias, como son los datos de las compañías de seguros (empleados en otro tiempo para mostrar los cambios en la intensidad del granizo) no se consideran satisfactorios (al menos por sí mismos), en la mayor parte de las situaciones.

Se deberían ejecutar programas operativos, con plena conciencia de los riesgos inherentes a una tecnología no totalmente desarrollada. Por ejemplo, no debería pasarse por alto que, en ciertas condiciones, la siembra puede provocar un aumento del granizo o disminuir la precipitación. Ahora bien, se intenta detectar y minimizar esos efectos adversos con proyectos adecuadamente diseñados y ejecutados. Por consiguiente, se alienta a los que tienen a su cargo la gestión de la modificación artificial del tiempo a que añadan a esta labor metodologías de evaluación científicamente aceptadas que deben ser realizadas por expertos independientes de los ejecutores prácticos.

En las secciones siguientes se presentan breves resúmenes de la situación actual de la modificación artificial del tiempo. Estos resúmenes se limitaron a exponer las actividades de modificación artificial del tiempo que parecen haberse basado en principios físicos aceptables

probados sobre el terreno.

### **DISPERSIÓN DE LA NIEBLA**

Para dispersar las nieblas calientes (es decir, la que se forma a temperaturas mayores de 0°C) y frías se utilizan diferentes técnicas. La aparición relativa de nieblas calientes y frías depende de la situación geográfica y de la estación.

Se ha demostrado que la técnica térmica que emplea fuentes de calor intenso (por ejemplo, motores de reacción) para calentar el aire directamente y evaporar la niebla, son eficaces en breves períodos para dispersar algunos tipos de nieblas calientes. Estos sistemas son de instalación y utilización costosas. También se ha utilizado la técnica de favorecer la penetración de aire seco en la niebla empleando helicópteros en vuelo estacionario o motores en tierra. Estas técnicas son también costosas para uso corriente.

Para disipar las nieblas calientes se ha intentado también la siembra con materiales higroscópicos. Si bien en esos experimentos se observa a veces un aumento de la visibilidad, el método y la localización de la siembra, así como la distribución por tamaños del material de siembra, son de importancia fundamental y difíciles de especificar. En la práctica, esta técnica rara vez es tan eficaz como sugieren los modelos. Sólo deben usarse los agentes higroscópicos que no planteen problemas ambientales o sanitarios.

La niebla fría (sobreenfriada) puede disiparse mediante el aumento y la sedimentación de cristales de hielo. Éstos pueden inducirse con gran fiabilidad mediante la siembra de la niebla con núcleos de hielo artificial, empleando sistemas terrestres o aerotransportados. Esta técnica se aplica operativamente en varios aeropuertos y autopistas donde la incidencia de la niebla sobreenfriada es relativamente alta. Las técnicas adecuadas dependen del viento, la temperatura y otros factores. Se ha utilizado corrientemente el hielo seco en sistemas aeroportados. En otros sistemas se emplea la expansión rápida de gas comprimido para enfriar el aire lo suficiente como para que se formen cristales de hielo. Por ejemplo, en algunos aeropuertos y autopistas se utiliza nitrógeno líquido o dióxido de carbono en sistemas con base en tierra. Una nueva técnica, que se ha demostrado en ensayos limitados, recurre a la explosión de hielo seco para crear cristales de hielo y fomentar su mezcla rápida dentro de la niebla. Como los efectos de este tipo de siembra se pueden medir con facilidad y los resultados son altamente predecibles, no se ha considerado necesaria en general la verificación estadística aleatoria.

### **INTENSIFICACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN (LLUVIA Y NIEVE)**

En esta sección se abordan las técnicas de intensificación de la precipitación que tienen un fundamento científico y han sido objeto de investigación. De vez en cuando se presentan otras técnicas no científicas y de eficacia no demostrada que deberían tratarse con la consiguiente desconfianza y cautela.

#### **Sistemas de nubes orográficas en fase de mezcla**

En el estado actual de nuestros conocimientos, se considera que la siembra glaciogénica de nubes formadas por el flujo de aire sobre las montañas presenta las mejores

perspectivas de intensificación de la precipitación de manera económicamente viable. La modificación de estos tipos de nubes suscita gran interés a causa de su potencial en lo que respecta a la gestión del agua, esto es, la posibilidad de almacenar agua en embalses o en el manto de nieve a elevaciones más altas. Existen pruebas estadísticas de que, en ciertas condiciones, se puede aumentar la precipitación orográfica desde nubes sobreenfriadas aplicando las técnicas existentes. Los análisis estadísticos de los datos de la precipitación de superficie obtenidos en algunos proyectos de larga duración indican que se han logrado aumentos estacionales.

Los estudios físicos en que se emplean de nuevos instrumentos de observación y modelización numérica indican que hay agua líquida sobreenfriada en cantidad suficiente para producir los aumentos de la precipitación observados, susceptible de aprovecharse si se aplicasen las tecnologías adecuadas de siembra. También se han observado directamente los procesos que culminan en un aumento de la precipitación en el curso de experimentos de siembra realizados en espacios limitados espacial y temporalmente. Si bien esas observaciones siguen avalando los resultados de los análisis estadísticos, hasta la fecha han sido de alcance limitado. No se ha probado documentalmente con totalidad la relación causa-efecto y, por consiguiente, no se puede evaluar el impacto económico de los aumentos.

Esto no quiere decir que se haya resuelto el problema de la intensificación de la precipitación en tales situaciones. Queda mucho por hacer para consolidar los resultados y producir pruebas estadísticas y físicas más sólidas de que hubo aumentos sobre la zona objetivo y a lo largo de un período prolongado de tiempo, así como en cuanto a tratar de encontrar efectos extrazonales. Se deberían mejorar los métodos actuales para determinar las oportunidades de siembra y los momentos y situaciones en los cuales no es aconsejable sembrar, optimizándose de este modo la técnica y cuantificando el resultado.

Asimismo, ha de reconocerse que la realización satisfactoria de un experimento u operación es tarea difícil que requiere el concurso de científicos y personal operativo cualificados. Es difícil y costoso emplear con seguridad aeronaves en regiones de nubes sobreenfriadas. Es también difícil fijar el objetivo del agente de siembra desde generadores en tierra o practicando la siembra en gran escala mediante aeronaves a barlovento de un sistema de nubes orográficas.

### **Nubes estratiformes**

Con la siembra de nubes estratiformes frías comenzó la era moderna de la modificación artificial del tiempo. Bajo ciertas condiciones se puede hacer que nubes estratiformes bajas produzcan precipitación, con el resultado frecuente de despejar los cielos en la región de la siembra. Los sistemas de nubes estratiformes profundas (pero con cimas de nubes a temperatura superior a  $-20^{\circ}\text{C}$ ) que acompañan a los ciclones y frentes producen cantidades importantes de precipitación. Algunos experimentos sobre el terreno y simulaciones numéricas han indicado la presencia de agua sobreenfriada en algunas regiones de estas nubes, y existen algunos indicios de que se puede aumentar la precipitación.

### **Nubes cumuliformes**

Las nubes cumuliformes son los principales productores de precipitación en muchas regiones del mundo. Esas nubes (desde pequeños cúmulos meteorológicos simples a nubes de tormenta gigantes) se caracterizan por tener fuertes velocidades verticales con elevadas tasas de condensación. Pueden encerrar el mayor contenido de agua condensada de todos los tipos de nubes y pueden producir las tasas más elevadas de precipitación. Los experimentos de siembra siguen sugiriendo que se han obtenido resultados muy diversos con la precipitación desde nubes convectivas uni y multicelulares. La variabilidad de las respuestas no se entiende completamente.

Se emplean técnicas de intensificación de la precipitación mediante siembra glaciogénica para afectar a los procesos de la fase del hielo, y se emplean técnicas de siembra higroscópica para influir en los procesos de lluvia caliente. Los métodos de evaluación de estas técnicas varían desde las mediciones directas con pluviómetros de superficie a las estimaciones indirectas de la precipitación derivadas de datos radáricos. Ambos métodos tienen sus propias ventajas e inconvenientes.

Durante los diez últimos años se han analizado con todo detalle los experimentos realizados con el método de siembra glaciogénica. Las respuestas a la siembra parecen variar en función de los cambios de las características de las nubes naturales, y en algunos experimentos parecen estar en contradicción con las hipótesis de siembra originarias.

Los experimentos de siembra glaciogénica en gran escala de nubes convectivas de base caliente (bases cuya temperatura es de  $10^{\circ}\text{C}$ , o superior) han dado resultados diversos. Tenían por objeto estimular las corrientes ascendentes mediante una mayor liberación del calor latente, lo que, a su vez, conduciría, según la hipótesis, a una mayor precipitación. Algunos experimentos parecen indicar que ejerce un efecto positivo en distintas células convectivas, pero aún no hay pruebas concluyentes de que esa siembra pueda aumentar la precipitación a partir de tormentas convectivas multicelulares. Muchos pasos en la hipotética cadena de sucesos físicos no se han documentado suficientemente con observaciones ni simulado en experimentos de modelización numérica.

En estos últimos años la siembra de nubes convectivas calientes y frías con sustancias químicas higroscópicas a fin de aumentar la precipitación intensificando los procesos de lluvia caliente (mecanismos de condensación/colisión-coalescencia/desglaciación) ha sido objeto de renovada atención con simulaciones de modelos y experimentos prácticos. Se han investigado dos métodos de aumento del proceso de lluvia caliente: el primero es la siembra con pequeñas partículas (núcleos artificiales de condensación de la nube de tamaños medios entre 0,5 y 1,0 micrómetros de diámetro), que se utiliza para acelerar la iniciación de la precipitación estimulando el proceso condensación-coalescencia modificando así favorablemente el espectro inicial de gotitas en la base de la nube; el segundo es la siembra con partículas higroscópicas más grandes (embriones de precipitación artificial de unos 30 micrómetros de diámetro) para acelerar el desarrollo de la precipitación estimulando los procesos colisión-coalescencia. Un experimento reciente en que se

empleó esta última técnica arrojó pruebas estadísticas del aumento de la precipitación atendiendo a estimaciones rádaricas. Ahora bien, los aumentos no coinciden con lo previsto en el modelo conceptual, sino que parecen producirse en fases posteriores (de una a cuatro horas más después de la siembra), desconociéndose la causa de este efecto.

Los experimentos realizados recientemente mediante siembra aleatoria con llamaradas que producen pequeñas partículas higroscópicas en las regiones de corrientes ascendentes de las nubes convectivas continentales en fase de mezcla han arrojado pruebas estadísticas de aumentos de la precipitación estimada por radar. Los experimentos se realizaron en diferentes partes del mundo, y el aspecto importante de los resultados fue la reproducción de los resultados estadísticos en una región geográfica diferente. Además, se obtuvieron mediciones físicas que sugieren que la siembra produjo un espectro de gotitas más amplio cerca de la base de la nube que intensifica la formación de grandes gotas en las primeras fases del período de vida de la nube. Estas mediciones fueron corroboradas con estudios de modelización numérica.

Si bien los resultados son alentadores y fascinantes, no se conocen los motivos de la duración de los efectos observados obtenidos con la siembra higroscópica de partículas, y siguen pendientes algunas cuestiones fundamentales. Es necesario hacer mediciones de las fases fundamentales en la cadena de acontecimientos físicos asociados a la siembra de partículas higroscópicas, para confirmar los modelos conceptuales de siembra y la variedad de la eficacia de estas técnicas en el aumento de la precipitación desde nubes convectivas calientes y en fase de mezcla.

Pese a las pruebas estadísticas de los cambios de la precipitación estimados por radar en los sistemas de nubes individuales tanto en las técnicas glaciogénicas como higroscópicas, no hay pruebas de que esa siembra permita aumentar la precipitación sobre zonas de importancia económica. No hay ninguna prueba de efectos extrazonales.

### **LUCHA ANTIGRANIZO**

El granizo causa considerables pérdidas económicas en cosechas y bienes materiales. Se han propuesto numerosas hipótesis para eliminar el granizo y se han realizado operaciones de siembra en muchos países. Las hipótesis físicas incluyen los conceptos de competencia beneficiosa (creando numerosos embriones de granizo adicionales que en realidad compiten con el agua sobreenfriada), disminución de la trayectoria (con objeto de reducir el tamaño de las piedras de granizo), y depuración prematura por la precipitación. Según estos conceptos, los métodos de siembra se concentran en las regiones periféricas de grandes sistemas de tormentas, y no en la corriente ascendente principal.

No tenemos aún suficiente conocimiento de las tormentas para poder predecir con confianza los efectos de la siembra sobre el granizo. Las posibilidades de aumentar o disminuir el granizo y la lluvia en ciertas circunstancias han sido objeto de discusión en la literatura científica. Se ha señalado que las tormentas supercelulares constituyen un problema especial. Las simulaciones con modelos numéricos de nubes han proporcionado atisbos de la complejidad del proceso del granizo, pero las simu-

laciones no son aún suficientemente precisas como para proporcionar respuestas definitivas. Los científicos que trabajan en programas operativos y de investigación están tratando de delimitar las horas y lugares favorables, así como las cantidades de material de siembra para lograr tratamientos eficaces de modificación.

Se han llevado a cabo algunos ensayos por selección aleatoria para la supresión del granizo utilizando medidas tales como la masa del granizo, la energía cinética, el número de piedras de granizo y la zona de caída de éste. No obstante, la mayor parte de las tentativas de evaluación se han realizado en programas operativos de selección no aleatoria. En estos últimos, se han usado con frecuencia las tendencias históricas de los daños causados por el granizo en las cosechas, a veces con zonas de control en la zona del objetivo y del lado del viento, pero tales métodos pueden ser no fiables. Muchos grupos han pretendido haber logrado grandes reducciones. El peso de las pruebas científicas obtenidas hasta la fecha no es concluyente, ni lo es tampoco afirmar o negar la eficacia de las actividades de la lucha antigranizo. Esta situación sirve de acicate para que en los programas operativos se refuercen los componentes físicos y de evaluación de sus esfuerzos.

En estos últimos años, han resurgido las actividades antigranizo con el uso de cañones para producir fuertes ruidos. Tampoco hay un fundamento científico ni hipótesis creíble que sustente tales actividades.

Los considerables progresos alcanzados en la tecnología en el curso del pasado decenio han abierto nuevas posibilidades para demostrar documentalmente y comprender mejor la evolución de las tormentas de extrema intensidad y del granizo. Es preciso realizar nuevos experimentos sobre la organización de las tormentas y la evolución de la precipitación, incluido el granizo.

### **MODERACIÓN DE OTRAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EXTREMAS**

Los ciclones tropicales contribuyen en gran medida a la precipitación anual en muchas zonas, pero también causan considerables daños materiales y numerosas pérdidas de vidas humanas. Por consiguiente, los objetivos de cualquier procedimiento de modificación deberían ser la disminución del viento, las mareas de tempestad y los daños causados por las lluvias, pero no necesariamente la precipitación total. En el decenio de 1960 y a principios del decenio de 1970 se llevaron a cabo experimentos de modificación de los huracanes. Ahora bien, no hay ningún modelo conceptual aceptado generalmente que sugiera que pueden modificarse.

Si bien es conveniente modificar los tornados o los vientos dañinos por motivos de seguridad y de economía, no hay en la actualidad ninguna hipótesis física aceptada que permita alcanzar tal objetivo.

La supresión de las descargas eléctricas ha suscitado algún interés. Entre los motivos de ello está la reducción de los incendios forestales causados por rayos y la disminución de este riesgo durante el lanzamiento de vehículos espaciales. El concepto que suele proponerse pretende reducir los campos eléctricos dentro de las tormentas, de modo que no lleguen a ser lo bastante fuertes

para que se produzcan descargas de rayos. Para lograrlo, se han introducido en las tormentas laminillas (fibras plásticas metalizadas) o yoduro de plata. Se supone que la laminilla proporciona puntos de descarga de la corona que reducen el campo eléctrico por debajo de los valores necesarios para que se produzca una descarga, en tanto que se supone que al aumentarse la concentración de cristales de hielo se cambia la tasa de acumulación de la carga, y su distribución en el interior de las nubes. Se han hecho experimentos sobre el terreno aplicando esos conceptos, con resultados de modelización numérica limitados que no tienen ninguna significación estadística.

### **MODIFICACIÓN NO DELIBERADA DEL TIEMPO**

Hay abundantes pruebas de que la quema de biomasa, y las actividades agrícolas e industriales modifican las condiciones meteorológicas locales, y a veces las regionales. Los cambios en la utilización de la tierra (por ejemplo la urbanización y la deforestación) modifican también el tiempo a escalas local y regional. Las grandes zonas urbanas afectan la calidad del aire, la visibilidad, el viento de superficie y a bajo nivel, la humedad y la temperatura, así como los procesos de nubes y de precipitación. A medida que mejoran la capacidad de vigilancia ambiental y la modelización atmosférica se hace cada vez más evidente que las actividades humanas producen importantes efectos en los parámetros meteorológicos y en los mecanismos climatológicos que influyen en nuestra salud, productividad e infraestructura social. Al diseñar y analizar los experimentos y las actividades en materia de modificación artificial del tiempo es preciso tener en cuenta los efectos no deliberados (por ejemplo, los cambios en la distribución de aerosoles de fondo que afecta a la estructura de las nubes y puede influir en los procesos de precipitación).

### **ASPECTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES DE LA MODIFICACIÓN ARTIFICIAL DEL TIEMPO**

Los países estudian a veces la posibilidad de modificar el tiempo artificialmente cuando hay necesidad de mejorar la economía en una rama determinada de actividad (por ejemplo, aumento del abastecimiento de agua para la agricultura o generación de energía) o de disminuir los riesgos que pueden acompañar acontecimientos peligrosos (heladas, nieblas, granizo, rayo, tormentas, etc.). Además de la incertidumbre actual relativa a la posibilidad de alcanzar esos objetivos, es necesario tener en cuenta los efectos en otras actividades o grupos humanos. Se deberían tener en cuenta los aspectos económicos, sociales, ecológicos y legales. Así pues, es importante tener presente la complejidad de todos estos importantes factores y reconocer la diversidad de posibles efectos durante la fase de diseño de una actividad.

Los aspectos legales pueden ser especialmente importantes cuando las actividades de modificación artificial del tiempo tienen lugar en las cercanías de fronteras de diferentes países. Ahora bien, cualquier sistema jurídico que tenga por fin fomentar o regular la modificación artificial del tiempo ha de reconocer que los conocimientos científicos en la materia siguen siendo incompletos.

Hay que evaluar las repercusiones para los ecosistemas de la ejecución de cualquier proyecto a largo plazo de mo-

dificación artificial del tiempo. Esos estudios podrían revelar cambios que hay que tener en cuenta. Durante el período de ejecución se deberían vigilar los posibles efectos ambientales como forma de control de los impactos previstos.

### **RESUMEN Y RECOMENDACIONES**

Para satisfacer la necesidad de disponer de más agua y disminuir el granizo en muchas regiones del mundo en los últimos diez años se han hecho algunos progresos en la ciencia y la tecnología de la modificación artificial del tiempo. Se llevan a cabo gran número de programas de dispersión de la niebla, lluvia, aumento de la nieve y supresión del granizo. En algunos países se realizan varios programas experimentales de investigación, que incluyen evaluaciones estadísticas aleatorias. La mejora de instalaciones, medios de observación, capacidades informáticas y modelos numéricos, unida a una más clara comprensión del problema permiten ahora examinar los procesos de las nubes y de la precipitación con más detalle que nunca y, por consiguiente, es posible hacer considerables avances. Se está comenzando a aplicar nuevas tecnologías y métodos que contribuirán a un mayor conocimiento y desarrollo en este campo.

A la vista de este examen de la situación de la modificación artificial del tiempo, se formulan las recomendaciones siguientes para los Miembros de la OMM interesados en este tema:

- a) deberían establecerse en todos los países climatologías de las nubes, la niebla y la precipitación como información esencial para los estudios y actividades en materia de modificación artificial del tiempo y recursos hídricos;
- b) se deberían reforzar los proyectos operativos de siembra de nubes permitiendo una evaluación independiente de los resultados de la siembra. Ello debería ir acompañado de mediciones de las variables de respuesta física y un componente estadístico de selección aleatoria;
- c) la enseñanza y la formación en física y química de las nubes y en otras ciencias conexas debería ser un componente esencial de los proyectos de modificación artificial del tiempo. Cuando no haya la necesaria capacidad al respecto, se deberían aprovechar los medios existentes en otros Miembros;
- d) es indispensable realizar antes del proyecto y en el curso de éste las mediciones básicas necesarias para apoyar y evaluar el material y la hipótesis de siembra propuesta para cualquier experimento de modificación artificial del tiempo;
- e) se alienta a que en los programas de modificación artificial del tiempo se utilicen nuevos instrumentos de observación y modelos numéricos para el diseño, realización y evaluación de los proyectos sobre el terreno. Como algunos Miembros podrían no tener acceso o recursos para aplicar estas tecnologías, se alienta a la colaboración entre Estados Miembros (por ejemplo, programas multinacionales de actividades prácticas, evaluaciones de expertos independientes, enseñanza, etc.) que podrían aportar los necesarios recursos para aplicar estas tecnologías.

## ANEXO IV

Anexo al párrafo 5.6 del resumen general

**DIRECTRICES PARA EL ASESORAMIENTO Y ASISTENCIA EN LA PLANIFICACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE MODIFICACIÓN ARTIFICIAL DEL TIEMPO**

1. Estas directrices están destinadas a los Miembros que solicitan asesoramiento o asistencia en las actividades de modificación artificial del tiempo. Contienen recomendaciones basadas en los conocimientos actuales obtenidos como resultado de estudios teóricos en todo el mundo, así como experimentos hechos en laboratorio y en condiciones reales. En la "Declaración de la OMM sobre la situación de la modificación artificial del tiempo" se presenta una síntesis de los principales conceptos básicos y de los resultados más importantes obtenidos en los programas de modificación artificial del tiempo. Esta declaración fue revisada durante la vigésima reunión del Grupo de expertos del Consejo Ejecutivo/Grupo de trabajo de la CCA sobre física y química de las nubes y modificación artificial del tiempo, y fue aprobado por la 53ª reunión del Consejo Ejecutivo en junio de 2001.

2. Los Miembros que deseen desarrollar actividades en materia de modificación artificial del tiempo deberían tener presente que la investigación y las aplicaciones operativas aún están en desarrollo. No se debería olvidar que, en ciertas condiciones, la siembra puede ser ineficaz y puede incluso intensificar un efecto indeseable (aumentar el granizo, disminuir la lluvia). No obstante, los proyectos adecuadamente diseñados y ejecutados tratan de detectar y reducir a un mínimo los efectos adversos. Se reconoce que la evaluación científica puede ser una tarea difícil, pero es la única vía disponible actualmente para evitar resultados negativos, cuantificar los efectos económicos positivos y llegar a comprender mejor los fenómenos y la metodología que se utiliza. En la Declaración revisada de la OMM sobre la situación de la modificación artificial del tiempo, a que se hace referencia en el párrafo 1, se establece una diferencia entre los diversos tipos de modificación artificial del tiempo y el grado de confianza respecto de la obtención del efecto deseado con la siembra de nubes. El nivel de confianza es muy alto en el caso de la disipación operativa de la niebla sobreenfriada y moderado, en cuanto al aumento de la precipitación de nieve de las nubes orográficas. El nivel de confianza no es alto en cuanto a la supresión del granizo.

3. La OMM recomienda que los proyectos de siembra de nubes destinados a modificar artificialmente la precipitación se diseñen de manera que sea posible evaluar los resultados de la siembra mediante mediciones físicas y controles estadísticos, que deben ir acompañados de cierto grado de distribución al azar de los episodios de siembra. Las mediciones físicas deberían abarcar la caracterización del material de siembra. Se debería tener cuidado de emplear en esta labor a un personal cualificado. La evaluación objetiva debería ser realizada por un grupo que sea independiente de la parte operativa. Esos programas deberían planificarse con un criterio de larga duración, dado que la variabilidad de la precipitación es por lo general muy superior al aumento o disminución que se pretende alcanzar con la modificación artificial del tiempo. La utilización de

modelos numéricos apropiados puede contribuir a disminuir el tiempo necesario para la evaluación del proyecto.

4. La OMM recomienda que se lleve a cabo un examen detallado de la adecuación del emplazamiento para la siembra de nubes, semejante al realizado en el Proyecto de Intensificación de la Precipitación (PIP), para lo cual se pueden consultar los informes pertinentes de la OMM. Para aumentar las posibilidades de éxito en esta situación específica, se debe verificar mediante estudios preliminares lo siguiente:

- a) que la climatología de las nubes y de la precipitación en el emplazamiento indica la posibilidad de condiciones favorables para la modificación artificial del tiempo;
- b) que las condiciones para las técnicas de modificación artificial disponibles son las adecuadas;
- c) que los estudios de modelización avalan la hipótesis de modificación artificial del tiempo propuesta;
- d) que para la frecuencia con la que se dan las condiciones idóneas, los cambios resultantes de la técnica de modificación pueden detectarse a un nivel aceptable de significación estadística;
- e) que se puede llevar a cabo una actividad a nivel operativo a un costo aceptablemente inferior al de los beneficios socioeconómicos que cabría esperar de ello.

Todos los estudios prospectivos requieren el análisis de expertos, y es de esperar que los resultados dependan del emplazamiento escogido y de la estación.

5. No hay ningún criterio cuantitativo para la aceptación de los resultados de un experimento de modificación artificial del tiempo. La aceptación dependerá del grado de objetividad científica y de la coherencia con la que se ejecutó el experimento y el grado en que ello queda demostrado. También son importantes la plausibilidad física del experimento, el grado en que se excluye errores sistemáticos durante la realización y el análisis del experimento y el grado de significación estadística alcanzado. Ha habido pocos experimentos de modificación artificial del tiempo que hayan satisfecho los requisitos de la comunidad científica en lo relativo a estos criterios generales. Sin embargo, hay excelentes posibilidades de hacer progresos en nuestra comprensión de las cuestiones relativas a la modificación artificial del tiempo utilizando modernos instrumentos de investigación, sobre todo los más avanzados radares, nuevos instrumentos a bordo de aeronaves y potentes modelos numéricos.

6. La modificación artificial del tiempo debe considerarse elemento de una estrategia integrada de gestión de los recursos hídricos. Es difícil conseguir un alivio inmediato de la sequía. En particular, si no hay nubes no se puede estimular artificialmente la precipitación. Es probable que las oportunidades de aumento de la precipitación sean mayores en períodos de precipitación normal, o por encima de la normal, que durante períodos secos.

7. Los Miembros deberían ser conscientes de que debido

a la magnitud de los esfuerzos que suponen el diseño, la ejecución o la evaluación de un programa de modificación artificial del tiempo, la Secretaría de la OMM no puede brindar asesoramiento detallado. Ahora bien, si se le solicita, el Secretario General puede prestar su ayuda (obteniendo el asesoramiento de científicos que trabajan en otros proyectos de modificación artificial del tiempo, o que tienen conocimientos técnicos

especializados) quedando entendido que:

- a) el país solicitante correrá a cargo de los costos originados;
  - b) la Organización no asumirá ninguna responsabilidad por las consecuencias del asesoramiento brindado por ningún científico o experto invitado;
  - c) la Organización no acepta responsabilidad legal alguna en cualquier conflicto que pudiera surgir.
- 
-