

Artículo



Revista

Ciencia  
y Naturaleza

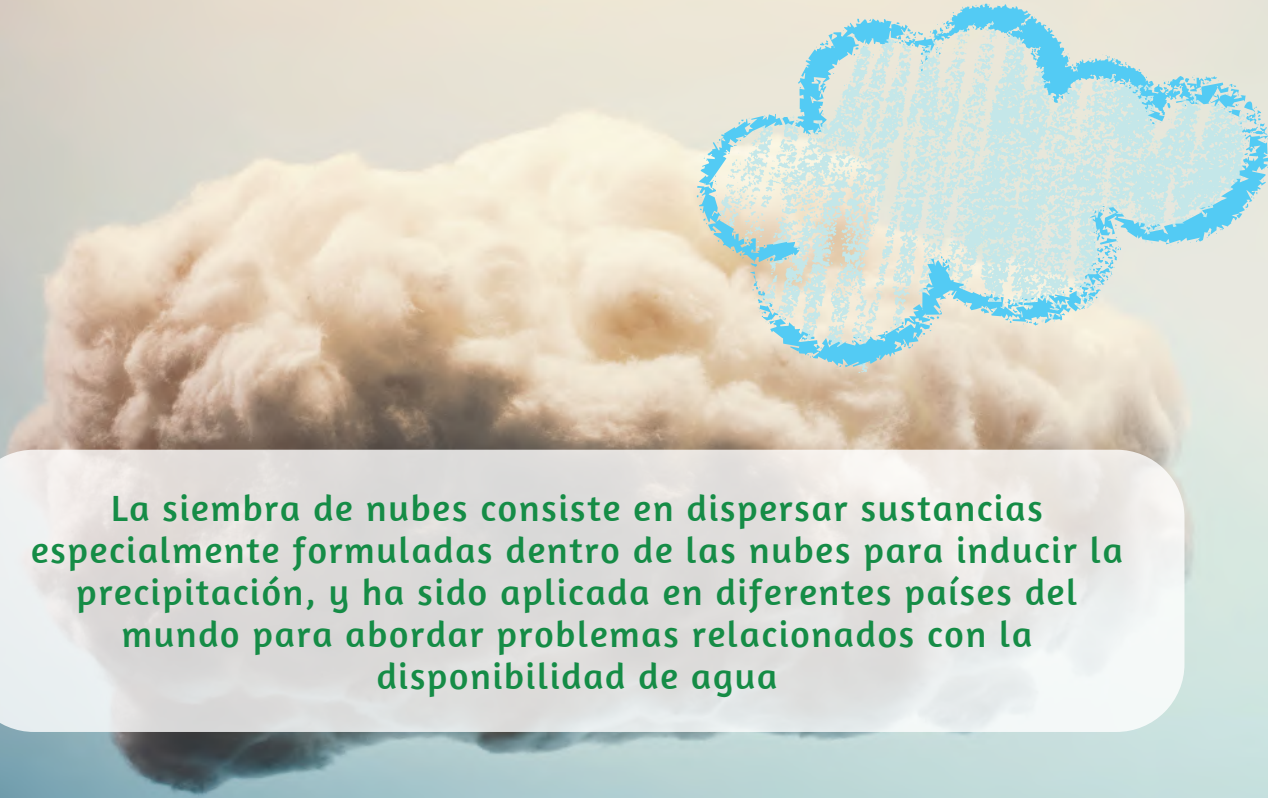
# ¿Cómo hacer llover? la siembra de nubes

David Ortega-Gaucin

1109



# ¿Cómo hacer llover? la siembra de nubes



La siembra de nubes consiste en dispersar sustancias especialmente formuladas dentro de las nubes para inducir la precipitación, y ha sido aplicada en diferentes países del mundo para abordar problemas relacionados con la disponibilidad de agua



**Cómo citar este artículo:** Ortega-Gaucin D. 2024. ¿Cómo hacer llover? la siembra de nubes. Revista Ciencia y Naturaleza (1109).





Desde tiempos ancestrales, la humanidad ha dependido de los ciclos de lluvia, elemento fundamental para la agricultura y la supervivencia de las comunidades. Por ello, con el propósito de influir en las condiciones meteorológicas adversas, ha buscado modificarlas, recurriendo inicialmente a la creación de deidades, a las cuales se les atribuye el poder de generar lluvia.



Por ejemplo, los dioses *Tláloc*, *Chaac* y *Cocijo*, presentes en las mitologías azteca, maya y zapoteca, respectivamente, eran venerados mediante ceremonias y ofrendas para asegurar buenas cosechas y la llegada de las lluvias en el momento oportuno.



En la actualidad, las severas y prolongadas sequías que se presentan cada vez con mayor frecuencia en muchas regiones del planeta, han impulsado a la comunidad científica a buscar alternativas y soluciones para mitigar sus impactos. Es así que, desde hace algunas décadas, se han venido investigando y aplicando herramientas que permiten reducir algunos de estos impactos, dentro de las cuales destaca la estimulación artificial de lluvias mediante la siembra de nubes. Esta estrategia implica la intervención humana en los procesos atmosféricos con el objetivo de modificar ciertos aspectos de las variables meteorológicas y generar precipitación.



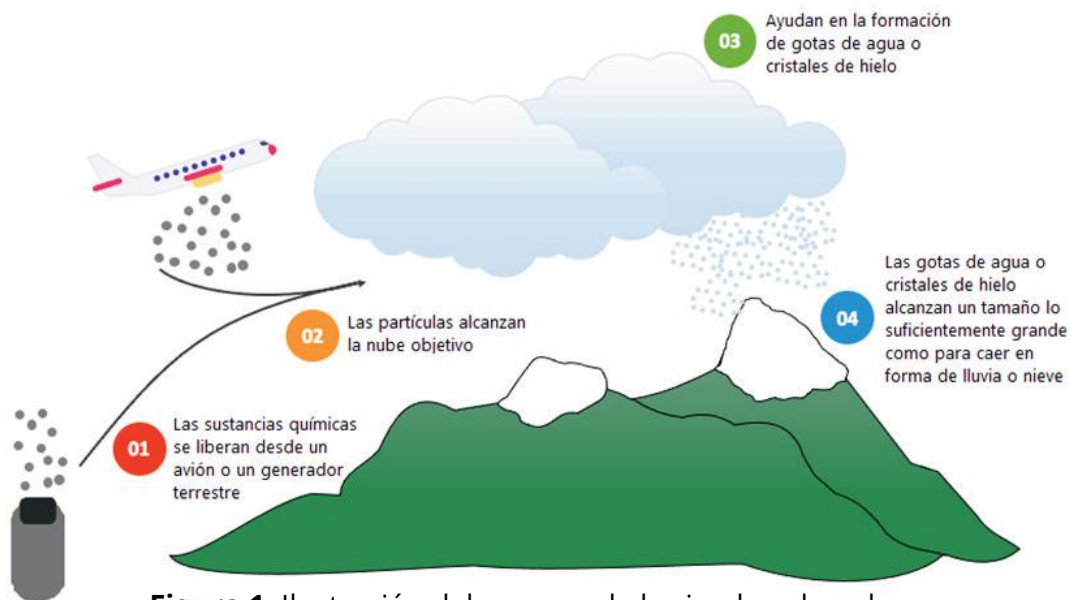
En este artículo se presentan los conceptos básicos y los fundamentos de la siembra de nubes, así como la situación científica actual de este método utilizado para aumentar las precipitaciones. Es importante destacar que, aunque el financiamiento de los estudios científicos ha disminuido sustancialmente durante la última década, los programas operativos han aumentado.

### *¿En qué consiste la siembra de nubes?*

En su forma más común, consiste en dispersar sustancias especialmente formuladas dentro de las nubes para inducir la precipitación. Esta se ha aplicado en diferentes países del mundo para abordar problemas relacionados con la disponibilidad de agua. Además, también se utiliza con otros fines, como disipar la niebla, mitigar daños por granizo, y lograr otros efectos intencionales.



Específicamente, cuando se realiza la siembra de nubes con el propósito de estimular la lluvia, el proceso involucra la dispersión de sustancias químicas como yoduro de plata, cloruro de sodio o hielo seco (dióxido de carbono sólido) en las nubes. Estas sustancias actúan como núcleos de condensación o cristalización alrededor de los cuales se forman gotas de agua o cristales de hielo, que pueden chocar entre sí, y crecer lo suficiente como para caer en forma de lluvia o nieve, dependiendo de las condiciones atmosféricas (Figura 1).



**Figura 1.** Ilustración del proceso de la siembra de nubes.  
Fuente: adaptada de PSIBERG (2022).

En otras palabras, la siembra de nubes consiste en depositar dentro de las nubes ya formadas y en crecimiento, elementos químicos que se conocen como “nucleantes”, los cuales son partículas sólidas que actúan como núcleos de condensación o nucleación, es decir, actúan como centros alrededor de los cuales se forman gotas de agua o cristales de hielo en la atmósfera, facilitando así la formación de nubes y la precipitación (Figura 2).

Ese es el proceso al que se le llama “sembrar”, pero es importante aclarar que en ningún momento se hace llover artificialmente, debido a que las nubes ni la lluvia se producen de manera artificial, sino que solamente se facilita la formación de gotas de agua dentro de las nubes y, eventualmente, se propicia la precipitación.



**Figura 2.** Ilustración sobre la siembra de nubes mediante yoduro de plata, cuya estructura molecular es similar a la de los cristales de hielo. Fuente: generada con Bing AI.

## *Orígenes y desarrollo de la siembra de nubes*

Las técnicas de siembra de nubes tienen su origen en los años 40's del siglo pasado. En 1946, en el laboratorio de investigación de la empresa estadounidense General Electric, se estudiaba el problema del depósito de hielo en las alas de los aviones, para lo cual se introdujo hielo seco en una cámara sobresaturada, con lo cual se produjo rápidamente una pequeña tormenta de nieve.



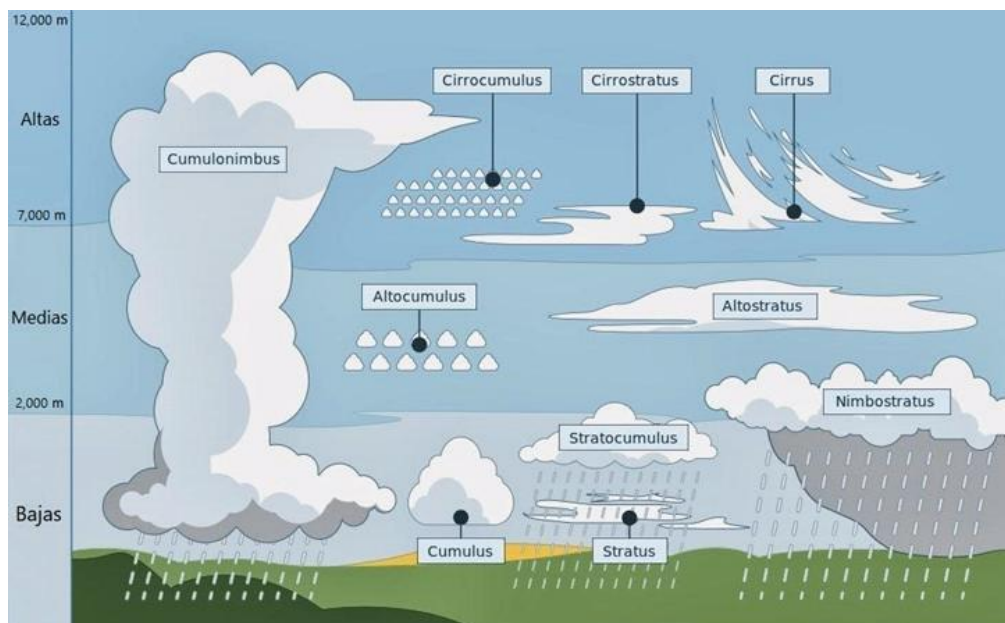
Unos meses después, en el mismo laboratorio, surgió la concepción de que los cristales presentes en el humo resultante de la incineración de yoduro de plata (que se asemejan a cristales de hielo) facilitaban el proceso de cristalización del hielo en las nubes frías que se encontraban en un estado sobresaturado.

Así, debido al interés que provocaron estas investigaciones, pronto se vislumbró su aplicación en la estimulación de lluvia mediante la siembra de nubes con yoduro de plata, por lo que durante la década de 1950 se pusieron en marcha numerosos proyectos operativos en los Estados Unidos, incluso llegando al punto de pensar que aproximadamente el 10% del espacio aéreo norteamericano estaba involucrado en programas de estimulación. Desde entonces, las técnicas de siembra de nubes se han desarrollado a través de la experimentación con diversas sustancias químicas en muchos países del mundo, realizando pruebas en áreas geográficas que van desde unos pocos hasta cientos de kilómetros cuadrados.

## *¿Qué tipo de nubes se utilizan para la estimulación de lluvias?*



En principio, es importante señalar que existen distintos tipos de nubes, las cuales se clasifican en función de su altura y formación (Figura 3), pero sólo hay dos tipos capaces de producir lluvia abundante: los **nimbostratus** y los **cumulonimbus** (Figura 4), que son los que se utilizan en la siembra de nubes.



**Figura 3.** Diferentes tipos de nubes según su altura y formación.

Los **nimbostratus** son nubes bajas, que se encuentran a una altura de 0 a 2 km y que se extienden en gruesas capas horizontales cubriendo amplias áreas del cielo. Por lo general, estas nubes tienen un color grisáceo debido a su densidad y la cantidad de agua que contienen; su característica distintiva es su capacidad para producir precipitación continua, que puede ser en forma de lluvia, llovizna, nieve o incluso aguanieve.

Por su parte, los **cumulonimbus** son nubes de desarrollo vertical y con una apariencia impresionante, a veces en forma de yunque, que puede extenderse por varios kilómetros a través de la tropósfera, la capa más baja de la atmósfera terrestre. Aunque la cima de un cumulonimbo puede alcanzar altitudes muy elevadas (hasta 8 km), la base suele encontrarse a altitudes más bajas (0 a 2 km), lo cual permite la presencia de una columna de aire cálido y ascendente que impulsa el desarrollo vertical de la nube.



Este tipo de nubes están asociadas con condiciones meteorológicas severas, que incluyen lluvias intensas, tormentas eléctricas, granizo y fuertes vientos.



**Figura 4.** Nimbostratus y cumulonimbus, los tipos de nubes utilizados para la estimulación de lluvia.

Por otro lado, con fines de estimulación artificial de la lluvia, las nubes se dividen en “frías” y “cálidas”, lo cual no se refiere a un tipo específico de nubes, pero se utiliza para describir nubes asociadas con las condiciones meteorológicas imperantes en el lugar donde se ubican.

Las nubes frías son aquellas que contienen agua y, a pesar de encontrarse a una altitud donde la temperatura es inferior a  $0^{\circ}\text{C}$ , el agua no se congela, sino que permanece “sobreenfriada”.

Por lo tanto, a estas nubes se les llama frías o sobreenfriadas. Estas nubes muestran la presencia de cristales de hielo antes de precipitarse, a diferencia de las nubes cálidas, que no exhiben cristales de hielo en ninguna etapa de su desarrollo o, en su defecto, su desarrollo no alcanza la altitud donde la temperatura es de  $0^{\circ}\text{C}$  o menos. Es importante mencionar que las nubes cálidas no están limitadas exclusivamente a zonas tropicales, pues se forman en una variedad de regiones y climas en todo el mundo.





Las nubes cálidas, en el sentido de que contienen agua en estado líquido en lugar de hielo, pueden encontrarse en una amplia gama de latitudes y condiciones climáticas. Y lo mismo sucede con las nubes frías, las cuales no están limitadas exclusivamente a las zonas polares, ya que pueden formarse en una variedad de entornos y climas en función de las condiciones locales y atmosféricas específicas.

## *Técnicas utilizadas para la siembra de nubes*

De acuerdo con el tipo de sustancias que se utilizan para sembrar las nubes, existen dos técnicas principales: la siembra **higroscópica** y la **glaciogénica**, las cuales se describen a continuación.

- *Siembra higroscópica*

Consiste en dispersar en las nubes partículas higroscópicas (sales) que tienen la propiedad de absorber fácilmente la humedad circundante y actúan como núcleos de condensación. El enfoque convencional es producir partículas de cloruro de sodio (sal común), o sales marinas de tamaño microscópico, y liberarlas mediante medios mecánicos y explosivos (generadores terrestres, aviones y cohetes) en la base de las nubes.

Estas partículas crecen por deposición de vapor y alcanzan fácilmente el tamaño suficiente como para iniciar o participar en la formación de lluvia por colisión y coalescencia, que es el proceso mediante el cual dos o más gotas de agua se fusionan para formar una gota más grande hasta que son lo suficientemente grandes como para caer en forma de lluvia. Este método es muy efectivo en las zonas tropicales, donde son más comunes las nubes cálidas.





- *Siembra glaciogénica*

La idea de esta técnica es provocar la producción de hielo en nubes sobreenfriadas, lo que conduce a la precipitación. Esta se realiza generalmente dispersando eficientes núcleos de cristalización, como partículas de yoduro de plata o hielo seco (dióxido de carbono sólido) en las nubes, provocando una nucleación heterogénea del hielo. Otra posibilidad es utilizar dióxido de carbono líquido que enfría la nube lo suficiente como para que las gotas de agua sobreenfriada se congelen de manera homogénea.

Este tipo de sembrado se aplica generalmente a nubes convectivas (que se forman por el ascenso de aire cálido y húmedo desde la superficie), como los cumulonimbus, o a nubes orográficas invernales (que se forman cuando el aire húmedo asciende sobre una cadena montañosa), como los nimbostratus.

Por otro lado, de acuerdo con la forma en que se realiza el sembrado, las técnicas para realizar la siembra de nubes se agrupan en dos grandes métodos: estático y dinámico.



- *Método estático*

Este método implica esparcir la sustancia a sembrar dentro de las nubes, por medio de cohetes fijos en tierra que “bombardean” las nubes, o con auxilio de aviones, desde donde se queman bengalas que contienen yoduro de plata u otros agentes (Figura 5). Estas sustancias proporcionan partículas sólidas alrededor de las cuales la humedad puede condensarse. La humedad ya está presente en las nubes, pero el agente sembrado hace que las nubes sean más efectivas para dispensar su humedad.



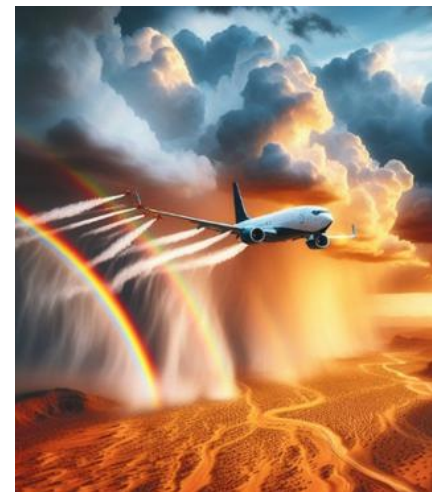


Así, el concepto fundamental de este método es que la precipitación puede aumentar en las nubes al mejorar su eficiencia para producir gotas de lluvia, aunque también es inevitable que se produzcan alteraciones en la dinámica o el movimiento de aire en las nubes debido a la liberación de calor latente de partículas de hielo en crecimiento, redistribución de agua condensada y evaporación de la precipitación. Sin embargo, las alteraciones en la dinámica de las nubes no son el objetivo principal de la estrategia.

- *Método dinámico*

A diferencia del método estático, el enfoque del método dinámico de siembra de nubes es mejorar las corrientes de aire verticales en las nubes y, por lo tanto, procesar verticalmente más agua a través de las nubes, lo que resulta en una mayor precipitación. La principal diferencia en la implementación de la estrategia es que se introducen cantidades mayores de material de siembra en las nubes (hasta cien veces más que en el método estático). La implementación de este método se realiza con el apoyo de aviones, los cuales penetran dentro de las nubes que tienen desarrollo vertical (cumulonimbus) para dispersar dentro de ellas el agente nucleante.

La aplicación de la sustancia o la liberación de los cartuchos que la contienen se realiza en el seno de la corriente de aire ascendente, la cual se encarga de dispersarla por toda la nube, dando lugar a la formación de numerosos núcleos de condensación o cristalización que favorecen la precipitación.



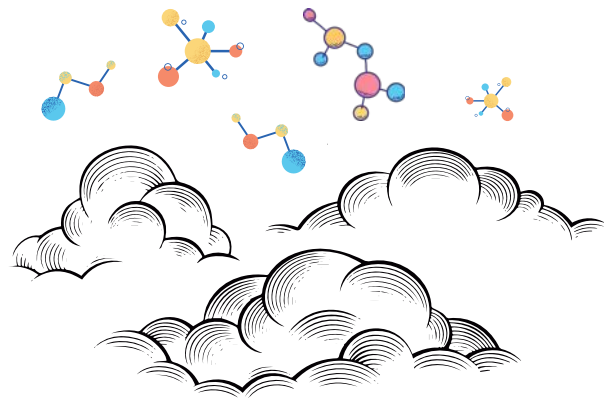
**Figura 5.** Ilustración del proceso de siembra de nubes para la estimulación de lluvia mediante el uso de aviones.



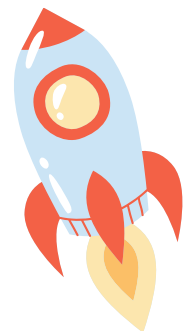
## *Factores que afectan la siembra de nubes*

En cualquier proceso de estimulación artificial de lluvias, habrá situaciones en las que la siembra de nubes no será efectiva. Hay diversos factores que pueden afectar el proceso, entre los cuales se encuentran: los tipos de nubes, las técnicas usadas en la dispersión de los químicos, y los materiales usados en la siembra. Como se mencionó, no todos los tipos de nubes son capaces de producir lluvia, por lo que la siembra funciona sólo con ciertos tipos de nubes y en rangos específicos de temperaturas; por ello, se deben analizar estos factores y tomarlos en cuenta antes de llevar a cabo cualquier experimento.

Por otro lado, se deben utilizar los dispositivos adecuados para obtener una dispersión precisa de los agentes de siembra. Por lo general, se usan cohetes o bengalas, aunque los estudios recientes sugieren que es mejor utilizar aviones para dispersar los reactivos en forma de soluciones volátiles que se esparcen en las nubes.



Con respecto a los materiales de siembra, es muy importante tomar en cuenta la calidad y selección de las sustancias químicas adecuadas ya que, por ejemplo, el yoduro de plata –que tiene cristal hexagonal, similar al hielo– sólo puede utilizarse para provocar la nucleación; pero las sales higroscópicas son capaces de absorber humedad del ambiente por lo que actúan como núcleos de condensación (Cuadro 1).



**Cuadro 1.** Principales sustancias químicas usadas en la siembra de nubes.

Sustancia	Características principales	Función	Forma de uso
Yoduro de Plata	Es insoluble en agua y tiene una estructura molecular muy similar al hielo.	Se libera como partículas en las nubes para promover la formación de cristales de hielo.	Se utiliza en la siembra glaciogénica de nubes, provocando una nucleación heterogénea del hielo.
Hielo seco	Es el dióxido de carbono en estado sólido, a temperatura de $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es inodoro e incoloro.	Produce un congelamiento de las gotitas de agua sobre-enfriada facilitando el crecimiento de las partículas con hielo.	Se utiliza en el sembrado glaciogénico para crear núcleos de cristalización alrededor de los cuales se forman cristales de hielo.
Cloruro de Sodio	Es la sal común, y tiene la característica de ser higroscópica y soluble en agua.	Sus partículas actúan como núcleos de condensación alrededor de los cuales se forman gotas de agua.	Se utiliza principalmente en la siembra higroscópica de nubes, donde actúa como nucleante.
Cloruro de Calcio	Es una sal higroscópica, altamente soluble en agua.	Favorece la condensación y nucleación de gotas de lluvia.	Se utiliza en el sembrado higroscópico de nubes, sobre todo en nubes cálidas.
Nitrato de Sodio	Es una sal higroscópica, no tóxica, muy soluble en agua.	Actúa como nucleante para la formación de gotas de lluvia.	Se usa en la siembra higroscópica de nubes, en nubes cálidas de origen continental o marítimo.

## *Ventajas y desventajas de la siembra de nubes*

La siembra de nubes tiene diversas ventajas y desventajas. Dentro de las ventajas, evidentemente la más importante es que, en condiciones de escasez de agua y sequía, contribuye a generar precipitaciones, aunque no siempre es efectiva. Los gobiernos de distintos países han implementado programas de estimulación de lluvia principalmente en zonas áridas que se caracterizan por tener muy poca precipitación.





Además, puede ser efectiva para extinguir incendios forestales de menor escala y en áreas geográficas específicas, pero en incendios forestales de gran magnitud, es difícil influir en las condiciones meteorológicas locales. Y finalmente, la siembra de nubes podría ser parte de estrategias más amplias de gestión integrada de recursos hídricos, especialmente en áreas que enfrentan problemas relacionados con la disponibilidad de agua.



Por otro lado, entre las principales desventajas de la siembra de nubes se puede destacar que los productos químicos utilizados pueden dañar potencialmente el medio ambiente, especialmente las plantas que se pretende proteger. Lo cierto es que no hay estudios a profundidad sobre las implicaciones del yoduro de plata en el medio ambiente, pero se infiere que este químico, por ser salino, puede aumentar la salinidad del suelo y las aguas superficiales.



Además, en concentraciones elevadas, el yoduro de plata puede causar "iodismo", un tipo de envenenamiento por yodo que provoca secreción nasal, dolor de cabeza, erupción cutánea, anemia y diarrea, entre otros. Además, como se ha mencionado, la siembra de nubes no es infalible, pues depende de la presencia de nubes capaces de producir lluvia, y no funciona con cualquier otra formación nubosa. Y eventualmente las nubes sembradas pueden desplazarse a otra ubicación y no causar precipitación en el lugar previsto, por lo que se puede cuestionar si la siembra de nubes es realmente efectiva para producir lluvia en el lugar indicado.



De igual forma, se puede argumentar que es muy costoso producir lluvia de manera artificial, debido a que los productos químicos deben ser dispersados al aire mediante aviones, que son difíciles de conseguir en lugares o países con ingresos muy bajos. Por ello, los países menos desarrollados que padecen sequías o hambrunas pueden necesitar financiamiento externo para realizar la siembra de nubes.



Finalmente, si no se regula o controla de manera adecuada, la siembra de nubes puede causar condiciones meteorológicas indeseables, o potencialmente destructivas, como inundaciones, tormentas, riesgos de granizo, etc. Los lugares que de manera natural no reciben mucha lluvia, por lo general no tienen la infraestructura para manejar tanta precipitación, por lo que estas áreas pueden inundarse rápidamente, causando más daño que beneficio.

### *¿Qué tan efectiva es la siembra de nubes?*

La evaluación de los resultados de la siembra de nubes puede ser complicada debido a la variabilidad natural y la dificultad para aislar sus efectos de otros factores meteorológicos. Algunos proyectos han reportado cierto éxito en la generación de lluvia adicional, pero la efectividad a largo plazo es difícil de determinar.

Además, la comunidad científica sigue debatiendo sobre la eficacia y la ética de esta técnica, pues la siembra de nubes no siempre garantiza resultados consistentes y puede tener limitaciones en términos de aplicación práctica y sostenibilidad a largo plazo.







A pesar de todo, la siembra de nubes ha sido aplicada en diversas partes del mundo con resultados variables. Por ejemplo, en varias regiones de Estados Unidos se han realizado experimentos desde la década de 1950, como en el oeste para aumentar la precipitación y en el este para reducir la formación de granizo. En los últimos años, estados como California, Idaho, Nevada, Utah y Wyoming, han iniciado sus propios programas de siembra de nubes invernales.

Mientras que Texas y Dakota del Norte tienen programas de verano cuyo objetivo es aumentar las lluvias y disminuir el granizo, respectivamente. La efectividad de estos programas ha sido variable, pues algunos estudios indican un aumento en la precipitación, mientras que otros no han encontrado evidencia de resultados positivos. En promedio, se observa un aumento del 10 al 15% en las precipitaciones en la temporada de verano.



Por su parte, Sudáfrica inició en 1990 un programa de estimulación de lluvia, el cual continuó durante 15 años, mediante el uso del método higroscópico. Los resultados del experimento científico indicaron que mediante este enfoque se logra un aumento promedio de 20% en la cantidad de lluvia.

En China, se ha invertido significativamente en programas de siembra de nubes, especialmente con el objetivo de aumentar la precipitación en regiones áridas. En este país se han informado algunos éxitos en la generación de lluvia adicional, aunque también ha habido debates sobre la eficacia y la calidad de los resultados, debido a que la efectividad ha variado según la región y las condiciones meteorológicas específicas.



En Emiratos Árabes Unidos se han implementado programas de siembra de nubes para abordar la escasez de agua. En 2017, se informó que un proyecto en Abu Dhabi generó lluvias significativas. Sin embargo, la magnitud del aumento en la precipitación no siempre se cuantifica con precisión en términos de porcentaje.

De igual manera, en Australia se han realizado experimentos de siembra de nubes para abordar la sequía y aumentar la precipitación. Algunos proyectos han reportado resultados positivos, aunque la efectividad sigue siendo un tema de investigación, pues depende de factores específicos de cada región.

En Tailandia se han llevado a cabo programas de siembra de nubes para aumentar la lluvia, especialmente durante la temporada de cultivo de arroz. Algunos informes sugieren cierto éxito en la generación de precipitación adicional.

En México se han llevado a cabo experimentos y programas de siembra de nubes en varios estados de la república y en diferentes momentos, desde la década de 1950 hasta la actualidad, para abordar problemas de sequía y mejorar la disponibilidad de agua. Los experimentos se han centrado principalmente en zonas áridas y semiáridas que sufren de escasez de agua de manera recurrente.



Por ejemplo, en el noreste del país, alrededor de Monclova, Coahuila, se realizó un experimento de sembrado higroscópico de nubes entre 1996 y 1998, donde en general los resultados obtenidos fueron alentadores: la duración de las tormentas sembradas y el flujo de precipitación se incrementaron apreciablemente.



Asimismo, en los últimos años (2020 a 2023), el gobierno de México ha implementado programas de estimulación de lluvia en algunos estados del norte como Sonora, Chihuahua y Sinaloa; y de acuerdo con los informes de los proyectos, se estima que la precipitación se incrementó con los tratamientos de estimulación y con relación a las expectativas (pronósticos) en rangos que oscilaron entre 26 y 45%.



**“El experimento funciona, pero no sabemos qué va a salir de él porque no tenemos conocimientos suficientes sobre los procesos de desarrollo de las nubes; la variabilidad natural es enorme, cercana al 30%, es decir, que de forma natural nubes idénticas pueden precipitar o no, por tanto, no podemos determinar que eso se deba al sembrado artificial.”**

**Fernando García, experto en Física de las Nubes  
(El País, 5 de septiembre de 2021)**



### *Para llevar*

A pesar de las múltiples incertidumbres científicas que aún persisten, la siembra de nubes para la estimulación artificial de lluvia se ha convertido en una actividad muy practicada en muchas regiones del mundo. Pero es importante destacar que la efectividad de esta técnica se sigue debatiendo. Los resultados pueden depender de diversos factores, como las condiciones atmosféricas locales, la elección de las sustancias sembradoras y la logística de implementación.



Además, existen preocupaciones éticas y medioambientales, así como la necesidad de comprender completamente las posibles consecuencias antes de llevar a cabo estas intervenciones en gran escala.

Un experimento exitoso en una región no garantiza que la siembra en otra región sea exitosa a menos que se reproduzcan todas las condiciones ambientales, así como la metodología de siembra.



La Organización Meteorológica Mundial, afirma que la modificación planificada del clima mediante la siembra de nubes debe considerarse como parte de una estrategia integrada de gestión de los recursos hídricos, y no como una solución en sí misma para el alivio instantáneo de la sequía. Asimismo, recomienda que se realice un análisis detallado de las condiciones del sitio para la siembra de nubes, y que los programas operativos se diseñen de tal forma que permitan realizar una evaluación física y estadística de los resultados.

Así, para que la siembra de nubes con fines de estimulación de lluvias pueda ser aceptable de manera universal, es necesario que esté sustentada en principios teóricos y metodológicos que determinen una tecnología con resultados cada vez más consistentes, replicables y predecibles. Mientras tanto, se puede decir que la siembra de nubes aún se encuentra en fase de investigación y no puede utilizarse como una estrategia que garantice salvar al mundo de las sequías. 🍀

## Para Consulta



- Cotton WR. 2000. Weather modification by cloud seeding-A status report 1989-1997. Colorado State University, Department of Atmospheric Science. Fort Collins, CO. [\[Link\]](#).
- Dahl D. 2014. The effects of artificial clouds on climate. [\[Link\]](#)
- Ecología Verde. 2023. Tipos de nubes: nombres, características y fotos. [\[Link\]](#)
- Malik S, Bano H, Rather RA, et al. 2018. Cloud seeding; its prospects and concerns in the modern world A review. International Journal of Pure & Applied Bioscience 6(5): 791-796.
- Morán C. 2021. México vuelve a bombardear las nubes para atraer la lluvia. El País, 5 de septiembre de 2021. [\[Link\]](#)
- PSIBERG. 2022. Cloud seeding: history, types, and impacts. [\[Link\]](#)
- Pendick D. 2000. Cloud dancers: will efforts to change the weather ever attain scientific legitimacy? Scientific American 11(1): 64-69.
- Rosengaus M, Bruintjes R. 2002. Estimulación de lluvia por sembrado higroscópico. Ingeniería Hidráulica en México XVII(1): 13-29. [\[Link\]](#)
- Rosengaus M, Calderón JJ. 2004. Costo unitario del agua producida a través del sembrado higroscópico de tormentas. Ingeniería Hidráulica en México XIX(1): 17-26. [\[Link\]](#)
- Science Direct. 2022. Cloud seeding. [\[Link\]](#)
- Startup Renaissance. 2023. Servicios de estimulación de llluvias. [\[Link\]](#)

Crédito de imágenes en orden de aparición: SonerCdem (Getty Images, GI), Angelo-F (GI), inhauscreative (Getty Images Signature, GIS), Juancho7, Bebee, Andrei (Pexels, P), David de Lossy, Tomolo Tavano (GI), Magtira Paolo (Sketchify, S), Hanosio, artverau (Pixabay, pi), siluetstrip, STILLFX (GI), Notionpic, Thomas Dutor, Sandi Smolker (GI), Ihrishy, EdYazbeck (GI), Christiana, Decade Studio, PublicDomainPicture (pi), Davidluu, Sketchify Education, Chalabala (GI), Natali Barbani, Mikaella Berati, Pgiam (GI), yupiramos, jemastock2, magbug (GI), Shidiq Kuswara, irasutoya, likeceoo (pi), Icons8, Comstock, Jamie Cabatit, DAPA Images, amethyststudio, Kevinsphotos (pi), Leremy Gan, Genaro Servin (P), Arvindesigns, Mac99 (GI). Crédito de figuras: Fig. 1 adaptada de PSIBERG (2022), Fig. 2, 4 y 5 generadas con Bing AI, Fig. 3 adaptada de Ecología Verde (2023). Cuadro 1 elaboración propia con base en referencias.

**Dra. Nuvia Katún Moreno**  
Editor Asociado Revista CyN

*Diseño de publicación: Yareli Fiburcio*

## Conceptos

**Coalescencia:** Proceso mediante el cual dos o más gotas de agua pequeñas se combinan para formar una gota más grande en las nubes.

**Condensación:** Proceso mediante el cual el vapor de agua en la atmósfera se transforma en agua líquida.

**Cristalización:** Proceso mediante el cual las partículas nucleantes, como el yoduro de plata, proporcionan un sustrato alrededor del cual se forman cristales de hielo en las nubes.

**Glaciogénico:** Capacidad de una sustancia de inducir la formación de cristales de hielo en las nubes.

**Higroscópico:** Capacidad de una sustancia de absorber o retener la humedad del aire.

**Nucleante:** Partícula o sustancia que actúa como núcleo de condensación o cristalización alrededor del cual se inicia la formación de gotas de agua o cristales de hielo en la atmósfera.

**Nucleación heterogénea:** Proceso físico que implica la formación de gotas de agua o cristales de hielo alrededor de partículas o impurezas extrañas presentes en la atmósfera.

**Sobreenfriada:** Se refiere a la condición en la cual el agua permanece en estado líquido a temperaturas por debajo de su punto de congelación normal. En otras palabras, el agua está en forma líquida, aunque se encuentra a una temperatura en la que, bajo condiciones normales, se esperaría que estuviera en estado sólido (hielo).

**Sobresaturado:** Se refiere a una condición en la que el aire contiene más vapor de agua del que podría retener a una temperatura y presión específicas sin alcanzar la saturación. En otras palabras, la humedad relativa del aire es superior al 100%, lo que indica que hay más vapor de agua en el aire de lo que teóricamente podría contener en esas condiciones.

## David Ortega-Gaucin

Es investigador del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Sus líneas de investigación se enfocan hacia la gestión integral del riesgo por sequía, la seguridad hídrica y el cambio climático. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del Conahcyt.

contacto: [dortega@tlaloc.imta.mx](mailto:dortega@tlaloc.imta.mx)

