

# “ESTADO DEL ARTE DE LA INGENIERÍA CLIMÁTICA” Proyecto TH1203.1

## Informe final

HIDROLOGÍA  
HIDROMETEOROLOGÍA

**Realizado por:**

Mtra. Olivia Rodríguez López  
Dr. Ricardo Prieto González  
Mtra. Gabriela Colorado Ruíz

**Con la colaboración de:**

Ing. María Del Rosario Ayala Enríquez  
Ing. Maricela Hernández Acevedo  
Ing. Luis Alberto Sánchez Hernández  
Ing. Sinué Benjamín Bravo Ramírez  
Lic. Nadia Araceli Pineda Flores

## CONTENIDO

Resumen ejecutivo.....	3
Capítulo 1. Introducción.....	4
Capítulo 2. Objetivo.....	5
Capítulo 3. Antecedentes.....	6
Capítulo 4. Metodología.....	7
Capítulo 5. Revisión bibliográfica.....	8
Capítulo 6. Técnicas de modificación artificial de la atmósfera y del clima.	
6.1. Lluvia artificial con rayos láser.....	13
6.2. Antigranizo.....	17
6.3. Tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias.....	19
6.4. Captura de carbono.....	20
Capítulo 7. Resultados.....	21
Capítulo 8. Conclusiones.....	29
Bibliografía.....	31

## ANEXOS

Anexo 1. La lluvia artificial en entredicho.....	33
Anexo 2. Los científicos han descubierto cómo crear lluvias en el desierto.....	36
Anexo 3. Nuevos intentos en la tecnología de producción de lluvias.....	39
Anexo 4. Científicos chinos apuestan a provocar lluvia y nieve artificial.....	42
Anexo 5. ¿Cómo conseguir aliviar al medio ambiente?.....	44
Anexo 6. Crear lluvia artificial desde el avión.....	45
Anexo 7. Resumen Extenso enviado al XXI Congreso Mexicano de Meteorología - VI Congreso Internacional de Meteorología, Mérida, Yucatán, Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C., 2012.....	46
Anexo 8. Presentación realizada en el XXI Congreso Mexicano de Meteorología -	

VI Congreso Internacional de Meteorología, Mérida, Yucatán, Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C., 2012.....	58
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología empleada para la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima.....	7
Figura 2. Condensación inducida por láser en una cámara de niebla atmosférica (T=24°C y RH=230%).....	15
Figura 3. Barrido del laser a través del cielo.....	16
Figura 4. Esquema de un sistema antigranizo móvil.....	18
Figura 5. Mapa de navegación del sitio web.....	22
Figura 6. Submenú de conceptos básicos.....	22
Figura 7. Autenticación de usuarios.....	23
Figura 8. Documentos.....	23
Figura 9. Videos.....	24
Figura 10. Tablas Comparativas “Mitigación del cambio climático y la reducción atmosférica del CO <sub>2</sub> ” del sitio web del proyecto.....	25
Figura 11. Tablas Comparativas “Tecnologías CDR (Carbon Dioxide Removal) Seleccionadas” del sitio web del proyecto.....	26
Figura 12. Enlaces de interés.....	27
Figura 13. Contacto y ubicación.....	28

## TABLA

Tabla 1. Intentos para modificar el clima en el siglo XX.....	9
---	---

## Resumen ejecutivo

Debido a la variabilidad que tienen las condiciones meteorológicas y la gran dependencia de ellas de los recursos hídricos que son utilizados para consumo y uso humano, agricultura, ganadería e industria, los seres humanos han intentado realizar esfuerzos para modificar el tiempo y clima de forma tal que puedan obtener beneficios para la realización de sus actividades. Uno de los descubrimientos más importantes que dieron pie al desarrollo de tecnologías de modificación artificial del tiempo y del clima fue el realizado en los años 1940s (Brownlee, 1960), donde se encontró 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.

El presente trabajo tiene como objetivo el conocer y evaluar diversas tecnologías en materia de ingeniería climática para la modificación artificial de la atmósfera en el ámbito internacional.

La metodología para el cumplimiento del objetivo consiste en la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima, realizando la revisión de algunas de las técnicas como el sembrado de nubes, electrificación de la atmósfera, captura de carbono, entre otros y conocer el punto de vista de expertos e instituciones relacionadas en el tema, como por ejemplo el Panel Intergubernamental de Cambio de Climático (IPCC) y Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Como resultado de este trabajo se desarrolló un sitio web para la recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima. Su administración es como un gestor de contenidos en el cual se va armando de manera dinámica, cuenta con el uso de contraseña para adjuntar archivos y, según sea, el caso también para restringir el acceso a un archivo. Los documentos y videos adjuntados son ordenados dependiendo el método, la categoría y la fecha, facilitando su acceso, incluso dentro del listado de archivos se pueden ordenar por fechas o nombre de los documentos de manera ascendente o descendente.

Este sitio web facilitará la difusión y la consulta de la de información relacionada a la ingeniería climática, recopilando diversas opiniones y evaluaciones de expertos sobre el tema. El usuario de la información contará con una diversidad de puntos de vista sobre las distintas tecnologías de la modificación artificial del clima, y conocerá los conceptos generales de las ciencias atmosféricas que están involucradas en diversas técnicas propuestas para la modificación artificial del tiempo atmosférico y el clima.

## Capítulo 1. Introducción.

Ha pasado muy poco tiempo, científicamente hablando, desde que en 1930 el holandés Veraart utilizase nieve carbónica y agua subfundida para sembrar nubes, marcando el inicio de lo que podría denominarse investigación en la modificación artificial del tiempo. Y menos tiempo todavía, desde el concluyente descubrimiento de Vincent Schaeffer, en 1946, respecto a la facilidad que posee la nieve carbónica para producir millones de cristales de hielo (mecanismo por el que se inician, al parecer, las precipitaciones) cuando es inseminado dentro de una niebla de agua subfundida (líquida por debajo de cero grados).

Desde el punto de vista sociopolítico, las acciones de modificación artificial del tiempo se necesitan ahora, en virtud de las apremiantes necesidades de agua que presentan muchos países, por un lado, y por el deseo de amortiguar al máximo los efectos negativos de ciertos fenómenos meteorológicos, como el granizo o los ciclones tropicales. El problema es que los conocimientos que actualmente posee la ciencia en estos terrenos no son precisamente exhaustivos.

Además existen serias dudas tanto sobre la rentabilidad de algunas de las acciones que se llevan a cabo en este sentido en diferentes países, como sobre la posibilidad de que lo que puede ser interesante para una comarca o nación (aumentar las precipitaciones, por ejemplo) sea negativo para la comarca o nación adyacente (favorecer indirectamente la sequía, en el caso anterior). Todo ello obliga en la actualidad a replantear la actuación de las diferentes comunidades en el terreno de la modificación artificial del tiempo.

## Capítulo 2. Objetivo.

- Conocer y evaluar las tecnologías en materia de ingeniería climática para la modificación artificial de la atmósfera en el ámbito internacional.
- Fomentar la discusión sobre las posibles ventajas y desventajas de financiar y/o implementar técnicas de geoingeniería para la modificación artificial de la atmósfera.

## Capítulo 3. Antecedentes.

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. Las teorías científicas que abordan el problema del cambio climático formulando técnicas especialmente desarrolladas para influenciar el clima terrestre estipulando como su propósito combatir el calentamiento global, como la remoción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

En la actualidad se llevan a cabo numerosos 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. 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 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 nubes hace sumamente difícil comprender y detectar los efectos de los intentos de modificarlas artificialmente.

## Capítulo 4. Metodología.

La metodología consiste en la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima, realizando la revisión de algunas de las técnicas como el sembrado de nubes, electrificación de la atmósfera, captura de carbono, entre otros y conocer el punto de vista de expertos e instituciones relacionadas en el tema como por ejemplo el Panel Intergubernamental de Cambio de Climático (IPCC) y Organización Meteorológica Mundial (OMM).

En la figura 1 se muestra la metodología empleada para la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima.



**Figura 1.** Metodología empleada para la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima.



## Capítulo 5. Revisión bibliográfica.

En la Edad Media, se llevaban a cabo diferentes ejercicios mágicos destinados a controlar los elementos naturales, como la lluvia, las tormentas o el viento. Éstos se realizaban mediante invocaciones de diferentes entidades demoníacas o angélicas. De igual modo las rogativas al panteón cristiano fueron numerosas. En España no han desaparecido todavía, siendo famoso un canto en tierras alicantinas que decía “Agua Señor, te lo pedimos por favor.”

En el siglo XVI las prácticas mágicas no cesaban ejemplo fueron las siguientes: (Jiménez, 2011).

- Dorpar, por ejemplo, Rusia, para producir lluvia gateaban tres magos a lo más alto de los abetos de un bosque sagrado: uno golpeaba con un martillo sobre un caldero o pequeño barril para imitar el trueno; el segundo entrechocaba dos hachones encendidos para que volasen las chispas, imitando el relámpago; y el tercero, el “hacedor de lluvia”, aspergaba agua en todas direcciones, con un puñado de ramitas.
- Los natchez de Norteamérica compraban a los hechiceros el buen tiempo, y éstos, si necesitaban lluvia, ayunaban y bailaban con sus pipas llenas de agua en la boca; pipas perforadas a modo de regadera, por lo que el “hacedor de lluvia” soplabla agua en dirección de las nubes; si quería tiempo raso, subía al techo de su choza, y con los brazos extendidos soplabla para alejar las nubes.
- Los chinos fabricaban enormes dragones de papel y madera, que representaban dioses de lluvia, y los llevaban en procesión. Si no llovía, los despedazaban y execraban.
- Para cesar lluvias se cortaban ramas, se las prendía fuego, y se rociaba con agua la rama ardiendo. O se colocaba la rama ardiendo en la tumba de quien hubiera muerto de quemaduras, apagándose también la rama con agua. Los sulka de Nueva Britania calentaban piedras en una hoguera, y las exponían a la lluvia, o arrojaban ceniza caliente al aire.

Posteriormente en el siglo XIX se llevaron actuaciones en las que mediante redobles de tambor, cañonazos y el lanzamiento de explosivos, se pensaba que podrían producir lluvia. No fue hasta la llegada tecnológica del siglo XX que los intentos serios para modificar el clima tuvieron lugar. Se enlistan algunos de ellos:

**Tabla 1.** Intentos para modificar el clima en el siglo XX

<b>Intentos para modificar el clima en el siglo XX</b>
<p>Emory Leon Chaffee de la Harvard University sembró con arena desde un aeroplano, un frente nuboso en 1924, intentando con ello modificar las precipitaciones (Standler, 2002).</p>
<p>Charles Hatfield fue un viajante de maquinaria para sembrado de cereales, nacido en Kansas, que en los primeros años del siglo XX, ideó una secreta mezcla de 23 productos químicos a los que bautizó con el pomposo nombre de Acelerador de humedad. Según él, cuando se evaporaba esta mezcla en un lugar, a partir de grandes tanques que la contenían, las nubes experimentaban extrañas metamorfosis y llovía (<a href="http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html">http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html</a>)</p>
<p>Su mayor éxito (aunque algo dramático) se produjo en 1916. El condado de San Diego le propuso que provocara lluvia suficiente para poder llenar una especie de embalse construido cerca del llamado Lago Morena. Hatfield construyó un depósito para su mezcla química en los alrededores y el día de Año Nuevo de 1916 empezó el proceso de evaporación (<a href="http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html">http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html</a>)</p>
<p>W. Veraart en 1930 bombardeó con hielo seco (anhídrido carbónico CO<sub>2</sub>) diferentes nubes con intención de modificar el clima. (Standler, 2002).</p>
<p>Prof. Henry G. Houghton del Massachusetts Institut Technology, MIT, pulverizó una suspensión higroscópica con intención de hacer desaparecer la niebla. Corría el año 1938. (Standler, 2002)</p>
<p>Técnica de la “estimulación de precipitaciones”, experiencia desarrollada en Chile desde el año 1940 a nivel de ensayo o como proyectos a baja escala (Rivero, 1999)</p>
<p>Cuba fue probablemente el segundo país en el mundo en utilizar la lluvia provocada con hielo seco, a fines de la década de los 40 en Santiago de Cuba (Rivero, 1999)</p>
<p>En noviembre de 1946, los doctores Langmuir y Bernard Vonnegut descubrió que los cristales de yoduro de plata (AGI) forman, en presencia de vapor de agua, cristales de hielo, en unos experimentos auspiciados por General Electric Research Laboratory. Ésta empresa obtuvo varios contratos sobre dichos descubrimientos, con el Ejército norteamericano (Standler, 2002)</p>
<p>Los contratos entre General Electric y el Ejército norteamericano, iniciaron proyectos de utilización de yoduro de plata y hielo seco (CO<sub>2</sub>) en Alburquerque, en octubre de 1948 y</p>

julio de 1949, creando lluvias sobre Kansas y Nuevo México. Las tremendas inundaciones de 1951 hicieron interrumpir las experiencias, si bien los meteorólogos no encontraron relación directa entre las mismas y el empleo de yoduro de plata. Sin embargo el doctor Langmuir pensaba que el uso de dicho compuesto químico podía afectar al clima en lugares distantes ([http://www.aquabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_rojo/TC-159.htm](http://www.aquabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_rojo/TC-159.htm))

En la década de los 50 una compañía privada hizo campañas en áreas de centrales azucareros, tanto desde el aire como con yoduro de plata desde tierra (Rivero, 1999).

Década de los 50 programa de modificación de huracanes denominado Proyecto Stormfury. El proyecto Stormfury fue abandonado en los años 80 después de un gasto de cientos de millones de dólares. En 1952 el doctor Vonnegut hizo una comparecencia en el Senado norteamericano, en relación a legislar sobre la modificación climática directa. Vonnegut opinó que en efecto, unos pocos kilos de yoduro de plata lanzados a la atmósfera, podrían producir una profunda influencia sobre el clima de cientos de kilómetros alrededor de punto de “sembrado”, pudiendo producir efectos positivos o negativos. Es por ello que únicamente debería llevarse a cabo estas prácticas por el Gobierno y no por particulares (Standler, 2002).

La siembra de nubes para provocar lluvia se puso de moda en los años 50-60 del siglo pasado. La Oficina Meteorológica Federal americana puso en marcha el Proyecto Cirrus sobre modificaciones del tiempo y el posible control de los huracanes atlánticos. Se crearon compañías para explotar estos resultados, teniendo en algunos casos resultados espectaculares. Se probaron nuevas sustancias de siembra como la urea e incluso se llegó a utilizar la técnica en la guerra del Vietnam, como una arma bélica más (<http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html>)

Chile, años de la década del 60. El Ministerio de Agricultura realiza las primeras experimentaciones, con el Programa META (Modificación Experimental del Tiempo Atmosférico). Este Programa se basa en la aplicación de yoduro de plata, aplicado desde una aeronave ([http://www.aquabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_rojo/TC-159.htm](http://www.aquabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_rojo/TC-159.htm)).

1961 que se desarrollaron las primeras pruebas, durante el huracán Esther, con un avión de la marina que le lanzaba cristales de yoduro de plata. Algunos informes indicaron que se logró reducir la intensidad de los vientos entre el 10 y el 30%. Durante el proyecto Stormfury, los científicos también diseminaron esas partículas en huracanes en 1963, 1969, y 1971 en el océano Atlántico

(<http://www.infoclima.com.ar/servicios/noticias.asp?id=178>)

El yoduro de plata está clasificado, según la Directiva del año 1967, con el número quinientos cuarenta y ocho, está clasificado como una sustancia no peligrosa. Para que ustedes se hagan una idea, he cogido algún dato con respecto a la ecotoxicidad, medida por una de las normas que hay, la F50, y se ha medido en crustáceos y en protozoos, y hablan de daños de 2,7 miligramos por litro. ([http://www.cortesaragon.es/bases%5Cdisca2.nsf/\(ID\)/84F82E7D4D5F2419C1256D72003D1F51?OpenDocument](http://www.cortesaragon.es/bases%5Cdisca2.nsf/(ID)/84F82E7D4D5F2419C1256D72003D1F51?OpenDocument))

El huracán Debbie, en 1969, fue "sembrado" de cristales de yoduro de plata durante cuatro días por varios aviones. Los científicos advirtieron que su intensidad variaba hasta el 30% (<http://www.infoclima.com.ar/servicios/noticias.asp?id=178>).

En la década del 70 nuevamente y asesorados por norteamericanos se vuelve a reiniciar el programa chileno de Modificación Experimental del Tiempo Atmosférico ([http://www.aguaboliivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_rojo/TC-159.htm](http://www.aguaboliivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_rojo/TC-159.htm)).

Por todo ello, la lucha antigranizo en Aragón tiene ya treinta años de historia. Se inició, en 1971, en la zona de Gallocanta. Ya en 1973, se cambió el sistema implantado, el método Dessens, basado en las estufas de yoduro de plata disuelto en acetona, sistema que se ha mantenido hasta hoy, excepto en el bienio 1984-1985, en que la siembra de yoduro se realizó con avionetas.

Después del triunfo de la Revolución se hicieron muchas actividades (relacionadas con la creación artificial de lluvia), la más grande fue la realizada en Camagüey desde 1979 hasta 1991 (Rivero, 1999).

En 1980 se llevaron a cabo campañas de lluvia provocada con sal común en Santiago de Cuba. Para trabajar con sal son utilizadas otros tipos de nubes cúmulos que no tienen agua sobreenfriada. Es un método alternativo a las que se trabaja con hielo seco o yoduro de plata (Rivero, 1999).

Década de los noventa. La Comisión Asesora del Presidente de la República para la Sequía, y la Unidad de Emergencias Agrícolas, comparte responsabilidades y financiamiento de Programas de Inducción de Lluvias por medio de aeronaves y también por quemadores terrestres.

Diferentes comarcas de Zaragoza y Teruel, así como de su federación. La zona cubierta llegó, en el año 1994, a las ochocientas seis mil novecientas cuarenta y cinco hectáreas, con ciento cincuenta y un generadores. Ello permitía cubrir ciento sesenta y seis términos

municipales.

El programa permanente que en 1999 cumplió 25 años de aplicación ininterrumpida, en el Estado de Kansas en los EE.UU de Norteamérica fue evaluado económicamente en el año 1996 y demostró una relación de Beneficio / Costo de US\$ 37:1. **En países avanzados en el mundo, esta tecnología se aplica muy seriamente** encausada y se invierte en ella considerables, recursos, anualmente.

Programa estimulación Artificial de Precipitaciones Cuenca del Cachapoal, temporada 2000.

19 de septiembre del año 2000, el Partido Popular presentó una proposición no de ley, la 129 de 2000, sobre la lucha antigranizo, que decía prácticamente lo siguiente: «Las Cortes de Aragón instan al Gobierno de Aragón para que, en colaboración con ayuntamientos, OPAs y asociaciones de productores de las zonas de mayor riesgo, estudie y, en su caso, apoye técnica y económicamente la lucha antigranizo.

El lote inicial de las veintitrés estaciones generadoras, así como la estación central, fueron adquiridas en el último trimestre del año 2000, y el material se encuentra embalado en almacén, a la espera de ser instalado en sus lugares definitivos.

Los presupuestos del 2001 y del 2002 ya vemos la partida, simbólica, según algunos, e importante, según otros, pero por lo menos representativa para dar servicio a lo que las comarcas demandan para intentar paliar ese riesgo. Esos seis millones de los dos años, yo creo que nos animan a todos los que estamos en este mundillo a colaborar en esta asociación antigranizo.

22 noviembre 2006, un avión de la Fuerza Aérea Portuguesa soltó en la atmósfera cristales de **cloruro de calcio y yoduro de** sobre la región de Benavente y Coruche. (20 minutos, 2005)

El Gobierno chino ya ha prometido que ejecutará este tipo de bombardeos sobre Pekin los días previos al inicio de los Juegos Olímpicos (8 de agosto de 2008), como una forma de garantizar que no lloverá en la jornada inaugural. En esta misma órbita hay quien identifica el uso de yoduro de plata con el hecho de que nunca llueve en la parada militar del 1 de mayo en la Plaza Roja de Moscú.

## Capítulo 6. Técnicas de modificación artificial de la atmósfera y del clima.

### 6.1 Lluvia artificial con rayos láser.

El calentamiento global y el agotamiento del ozono estratosférico tiene demostrado que las actividades humanas pueden alterar significativamente el clima de la Tierra. Sin embargo, el potencial de alterar localmente o incluso controlar el clima sigue siendo objeto de intensos debates.

La solución a la escasez de agua podría estar un poco más cerca de la realidad luego que científicos demostraran que con rayos láser se puede inducir la condensación del agua en la atmósfera. Ha habido desde hace mucho tiempo esfuerzos dedicados a la siembra de nubes con partículas de sal de plata para estimular la precipitación.

En la antigüedad se bailaba la danza de la lluvia, pero en un futuro quizás podremos invocarla gracias a la tecnología láser. Durante más de 50 años, los esfuerzos para intentar inducir lluvias artificialmente se habían concentrado en la denominada siembra de nubes (método creado en 1946 por Vicente Schaefer). Esta técnica consiste en esparcir pequeñas partículas de yoduro de plata en el aire para que actúen como núcleos de condensación, unos centros alrededor de los cuales se pueden formar las gotas de lluvia. “El problema es que todavía no se tenía claro que la siembra de nubes funcionara eficientemente”, además de los productos químicos empleados que se propagaban eran potencialmente perjudiciales para el medio ambiente.

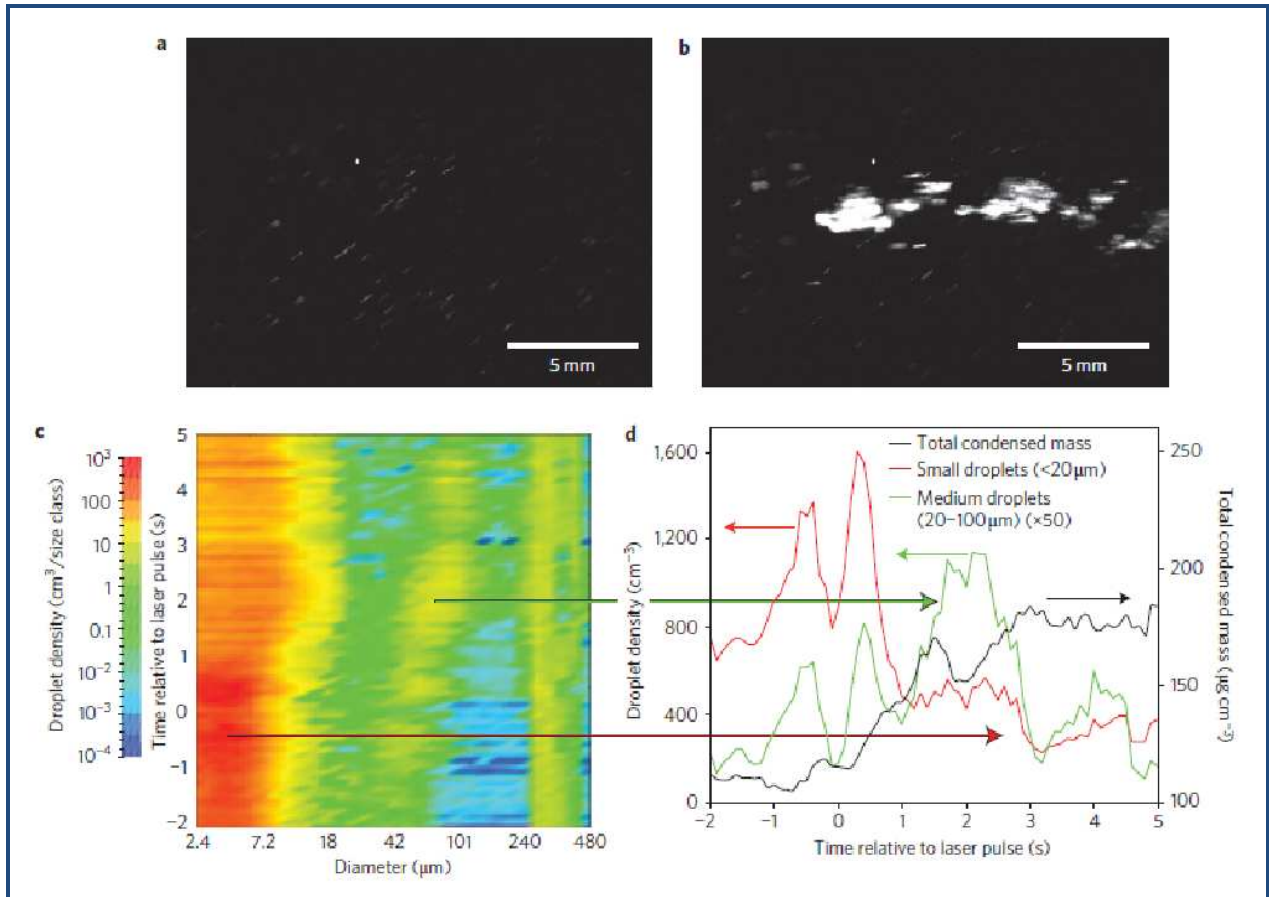
El control de la meteorología es una ambición de la humanidad desde tiempos inmemoriales. En el transcurso de la historia del ser humano se han realizado enormes esfuerzos por dar con formas de provocar la lluvia. Los intentos más recientes de propiciar precipitaciones o de eliminar la niebla se han basado en el uso de aviones o cohetes para diseminar partículas de sal de plata o hielo seco en las nubes. Una descarga de pulsos cortos y potentes de rayos láser en el aire ioniza las moléculas de nitrógeno y de oxígeno para crear un plasma de moléculas ionizadas. Estas moléculas ionizadas podrían actuar como núcleos de condensación natural.

Investigadores europeos han demostrado por primera vez que los láseres pueden utilizarse para formar nubes y provocar la caída de gotas de lluvia. Mediante el uso de un láser gigantesco han logrado crear gotas de agua en el aire, en un primer paso hacia lo que podría llevar en el futuro al ser humano a decidir cómo, cuándo y dónde llueve, así como también poder acceder a otros secretos de los ciclos climáticos relacionados con la condensación del agua. En esta investigación reciente, dirigida por el Dr. Jérôme Kasparian, de la Universidad de Ginebra, Suiza y Físico del laboratorio de espectrometría iónica y biología molecular, usó un instrumento denominado Téramobile que consiste en emitir impulsos de láseres extremadamente potentes y ultracortos para generar filamentos ionizados autoguiados.

Para comprobar si esta técnica realmente puede inducir gotas de lluvia, los investigadores han disparado, en condiciones controladas en el laboratorio, un láser de alta potencia en una cámara de aire altamente saturada a 24 grados Celsius bajo cero. La cámara fue iluminada con un segundo láser de baja potencia, pronto se formaron nubes lineales, como la estela de un avión en miniatura. El láser generó nubes por extracción de electrones de los átomos en el aire, que favorecen la formación de radicales hidroxilo. Estos convierten los dióxidos de sulfuro y nitrógeno en el aire en partículas que actúan como semillas para cultivar las gotas de agua. Cada pulso del láser trabaja a una intensidad equivalente a la de 1.000 plantas de energía. Aun así, las gotas fueron demasiado pequeñas para provocar una verdadera precipitación. Después del experimento, las condiciones de humedad en una temperatura tan extremadamente baja aumentaron un 50% y dentro de las nubes el volumen de agua condensada se había incrementado cien veces.

Después, los científicos destinaron impulsos del láser Téramobile directamente hacia el cielo sobre la capital alemana, Berlín, en un momento en el que se registraba una humedad cercana al 90%. A continuación, se tomaron medidas mediante Lidar ('light detection and ranging') para observar la concentración de aerosoles en la atmósfera y detectar alteraciones en las condiciones meteorológicas. En consecuencia, la visibilidad empeoró, la humedad subió al 93% y la concentración de aerosoles de agua aumentó. No se observó ninguna nube a simple vista, pero los investigadores pudieron comprobar que las gotas se estaban formando.

El siguiente paso de los científicos es utilizar el láser en un movimiento de barrido a través del cielo para tratar de inducir la condensación en un área más amplia. También tratarán de aumentar su eficacia mediante el ajuste de enfoque del láser, la longitud de onda y la duración del pulso, (ver figura 2).

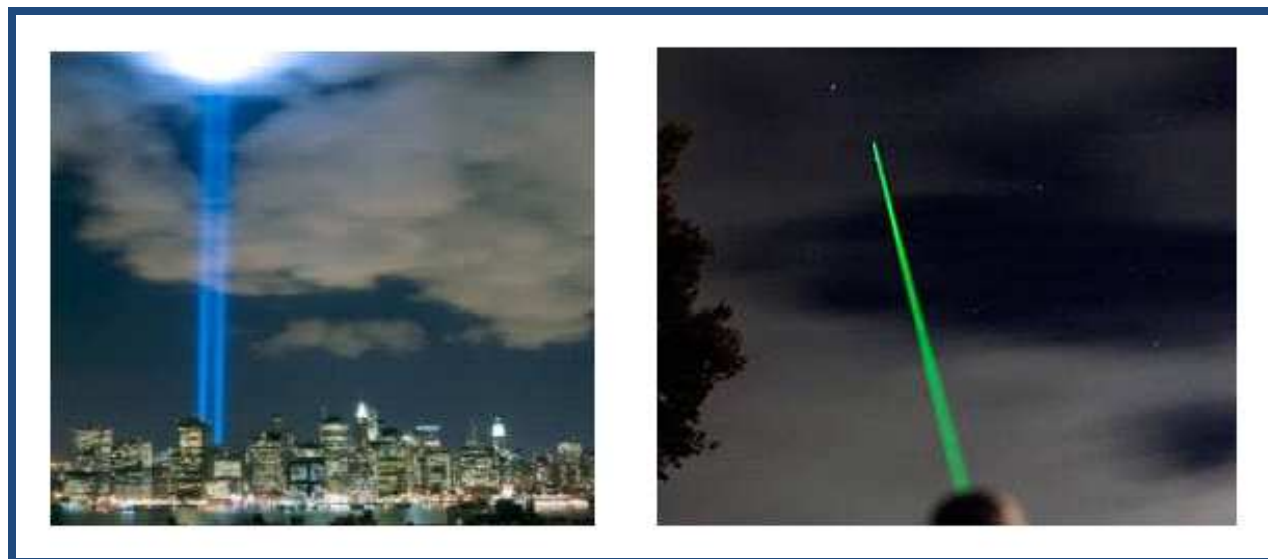


**Figura 2.** Condensación inducida por láser en una cámara de niebla atmosférica ( $T=24^{\circ}\text{C}$  y  $\text{RH}=230\%$ ).

Dentro de la cámara antes de (a) y después (b) disparo de un conjunto de tres disparos de láser a intervalos de 100-ms. Los filamentos del láser inducen la condensación de gota macroscópicamente visible, como es evidente por el aumento masivo de la dispersión de la luz (véase también la película complementaria).c, d, Efecto de un par de disparos de láser lanzados en la cámara en  $t = 0$  y  $t = 0.1$  s.

La evolución temporal de la distribución del tamaño de partículas (c) y la cantidad de pequeñas gotas y medio (d, eje de la izquierda), así como la masa total de agua condensada (d, eje derecho) por unidad de volumen. Las flechas indican la correspondencia entre los modos de la distribución de tamaño en el panel C, y la visualización de las curvas su modo integrado en el panel de la densidad de las gotas d.





**Figura 3.** Barrido del laser a través del cielo.

El siguiente paso de los científicos es utilizar el láser en un movimiento de barrido a través del cielo para tratar de inducir la condensación en un área más amplia. También tratarán de aumentar su eficacia mediante el ajuste de enfoque del láser, la longitud de onda y la duración del pulso. Éste es el primer experimento en demostrar que un láser es capaz de generar condensación y así los miembros del equipo confían en que esta técnica de láser pueda emplearse para modificar las condiciones meteorológicas de una zona concreta. De esta forma, estos investigadores han demostrado experimentalmente que se puede favorecer la condensación de agua por medio de filamentos autoguiados generados por impulsos de láser ultracortos, incluso en una atmósfera que se encuentre por debajo de la saturación.

Sin embargo, otros científicos han mostrado sus dudas acerca de la posibilidad de que esta técnica termine siendo útil para provocar la lluvia. John Latham, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Boulder, EEUU, quien califica a la nueva metodología de "inteligente", pero cree que "la producción de lluvia requiere muchas condiciones". Thomas Leisner, físico atmosférico del Instituto de Tecnología Karlsruhe (Alemania) mantiene una actitud escéptica acerca de la viabilidad futura de esta técnica para este propósito. Pero también afirma que esta tecnología podrá tener otros usos. Explica que los investigadores podrían calibrar la relación entre la cantidad de condensación producida por el láser y las condiciones atmosféricas imperantes. "Podrían utilizar la cantidad de condensación producida por el láser como una medida de la saturación del agua y así mejorar las actuales técnicas de pronóstico de lluvia".

## 6.2 Cañones antigranizo.

Los fundamentos de los cañones antigranizo están basados en accionar disparos desde la superficie terrestre a la atmósfera en dirección vertical, produciendo una onda sonora que asciende en el aire. La hipótesis de su funcionamiento para reducir la producción de granizo es esencialmente desestabilizar la formación de los cristales de hielo a través de las ondas sonoras.

En México se han realizado algunos análisis de esta tecnología, entre los que se encuentran:

1. Informe de investigación 2010: Consideraciones del cañón antigranizo con gas acetileno y sus efectos en la cantidad y calidad de lluvia en el estado de Michoacán. Realizado por el Grupo de Nutrición del aguacate del INIFAP. En este estudio se evalúa el efecto del cañón antigranizo en la cantidad y calidad de la precipitación en huertas de aguacate de Michoacán. Dentro de las conclusiones del estudio se menciona que no hay evidencia de que el funcionamiento del cañón disminuya la precipitación en las localidades estudiadas. (Anexo 1).
2. El Informe de la visita del personal del Servicio Meteorológico Nacional a Uruapan, Michoacán. Con el fin de participar en la reunión de productores de aguacate y presentar la variabilidad climática en dicha zona; así como visitar una huerta con sistema antigranizo. (Anexo 2). Dentro de las Recomendaciones de este informe se menciona: “Con el fin de proteger del efecto del granizo al sector agrícola, principalmente el producto del aguacate, se recomienda utilizar procedimientos de supresión de granizo, que no afecten el medio ambiente, ni la distribución espacial de las lluvias”.
3. El informe denominado “Sobre los posibles efectos del sistema antigranizo conocido como Hailstop Equipment Inc. Sobre el régimen de lluvias en las áreas adyacentes al sitio donde el equipo opera” (Anexo 3). Dentro de las conclusiones de este informe se menciona: “Los efectos del cañón antigranizo conocido como Hailstop Equipment Inc. son locales afectando un área de un radio de 1 Km aproximadamente. Su uso no disminuye la cantidad de agua en las nubes tratadas ni tampoco disminuye las precipitaciones en su área de influencia”.

Este tipo de sistemas antigranizo remonta sus orígenes más de 100 años, pues en 1905 se utilizaba en las regiones vinícolas de Francia para proteger los viñedos del granizo (Southland Times, Volumen 30, Issue 19676, 30 Septiembre 1905).

La Organización Meteorológica Mundial en su declaración sobre la situación de la modificación artificial del tiempo, publicada en 2001 (Anexo 4), manifiesta que en años recientes han re-emergido el uso de cañones antigranizo, y que no existe una base científica o una hipótesis creíble que soporte estas actividades.

En nuestro conocimiento, no existe una comprobación científica del funcionamiento de estos cañones para reducir el granizo, y la misma requeriría de un estudio muy detallado de laboratorio y de campo a diversas escalas espaciales (desde microscópicas hasta de miles de metros).

Debido a la complejidad de los procesos atmosféricos de escala microscópica que se dan dentro de las nubes, las hipótesis que maneja la tecnología antigranizo de los cañones son difíciles de ser comprobadas en su relación causa-efecto en la naturaleza. Con el grado tecnológico que se tiene en cuanto a instrumentación de medición atmosférica, esta tecnología no se puede ni verificar, ni descartar con métodos experimentales in situ. Sólo se pueden tener estudios estadísticos como el realizado por el INIFAP mencionado anteriormente.

En el caso de que exista una posible desestabilización de la formación de los cristales de hielo (la cual no ha sido verificada), sólo podría funcionar para sistemas nubosos que puedan ser susceptibles de desestabilización. Adicionalmente no existe la comprobación de que esa desestabilización no se extienda a la formación de gotas de lluvia. Actualmente se desconoce la proporción de los sistemas nubosos que pueden desestabilizarse respecto al total de los que se dan en la atmósfera de México (u otra parte del planeta) y, en particular, en la de Tancítaro, Michoacán.



Figura 4. Esquema de un sistema antigranizo móvil.

## 6.3 Tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias.

Durante el año 2011 tuvieron lugar dos seminarios sobre la tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias.

En diversos estados de la República Mexicana se ha utilizado la tecnología de electrificación local de la atmósfera para producir condiciones favorables de precipitación; sin embargo, aún no hay una seguridad sobre la utilidad de las antenas ionizadoras para producir lluvia. La hipótesis de trabajo detrás de esta técnica es la siguiente: “los iones producidos artificialmente en la atmósfera, desarrollan aerosoles que servirán como núcleos de condensación para generar lluvia”.

En estos seminarios se discutió la técnica de electrificación local de la atmósfera y su posible relación causa-efecto con la producción de lluvias en regiones semiáridas del territorio nacional. Esta discusión ayudó a explorar si esta técnica tiene elementos científicos suficientes que sustenten su hipótesis de producir lluvias en nuestro país.

A estos dos seminarios se convocó a personal con formación académica y experiencia profesional en las áreas de Meteorología, Clima, Física, Física de la Atmósfera, Física de Nubes y Electricidad, asistiendo personal adscrito a diversas instituciones tales como la Universidad Nacional Autónoma de México, la Comisión Federal de Electricidad, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Estos seminarios fueron impartidos por el Dr. Víctor Manuel Ramos González de la Compañía Soluciones Climáticas Avanzadas, S.A. de C.V., quien realizó las ponencias que explican su punto de vista sobre la teoría de la electrificación local de la atmósfera y los trabajos realizados con el fin de la producción de lluvias con esta tecnología, discutiendo distintas experiencias, entre otras, el caso de trabajos realizados por la compañía en la que trabaja en la isla de Cuba durante el periodo 2005-2008.

Se solicitó a los asistentes a los seminarios expresar verbalmente sus preguntas y dudas sobre el material presentado durante estos eventos, además de contestar de manera opcional un cuestionario escrito, incorporando si así lo deseaban, el material que considerasen importante.

Varios de los asistentes hicieron llegar al IMTA las opiniones escritas sobre los temas discutidos.

Los comentarios de los asistentes recibidos por escrito, en general, muestran opiniones desfavorables en cuanto a la aplicación de la tecnología para la producción de lluvias, así como algunas dudas sobre un sustento científico sólido de la tecnología.

A partir de las discusiones realizadas en estos seminarios sobre la tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias, es necesario responder algunas de las principales dudas planteadas por los asistentes. Sin embargo, la mayor parte de las inquietudes requieren explorar áreas del conocimiento que se encuentran en desarrollo dentro de la Física de la atmósfera, la Física de nubes y el electromagnetismo, lo cual consideramos es un esfuerzo de largo plazo (probablemente décadas), que además no debe de estar orientado a esta tecnología en sí, sino a un avance general del conocimiento científico en estas áreas, involucrando no únicamente a una institución, si no a un grupo de instituciones nacionales y extranjeras.

## 6.4 Captura de carbono.

Debido a que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera está alcanzando niveles cercanos a los 390 ppm, existe una necesidad de reducir estas concentraciones hacia un nivel más seguro de alrededor de 350 ppm para el año 2050. La captura y almacenamiento de carbono ofrecen una tecnología para la mitigación que podría ser esencial para reducir el calentamiento global, así como asegurar el obtener un flujo de energía continuo. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) define la captura de carbono como un proceso que involucra lo siguiente (IPCC, Grupo de Trabajo III, 2005):

- i. Separación de CO<sub>2</sub> de fuentes industriales y de producción de energía.
- ii. Transporte de CO<sub>2</sub>.
- iii. Almacenamiento de CO<sub>2</sub> en aislamiento de la atmósfera en el largo plazo.

La tecnología de captura de carbono obtiene el CO<sub>2</sub> de una planta que quema carbón. El CO<sub>2</sub> capturado es transportado para su almacenamiento por tuberías en forma gaseosa o en forma de gas licuado. El almacenamiento de CO<sub>2</sub> puede realizarse en cavernas, en el océano o en minerales.

## Capítulo 7. Resultados.

Se desarrolló un sitio web para la recopilación de información sobre el estudio del estado del arte en ingeniería climática, que contenga algunas de las técnicas de modificación artificial al clima tales como el sembrado de nubes, electrificación de la atmósfera, captura de carbono, entre otros.

Su administración es parecida a un gestor de contenidos el cual se va armando de manera dinámica, cuenta con el uso de contraseña para adjuntar archivos y, según sea, el caso también para restringir el acceso a un archivo.

Los documentos y videos adjuntados son ordenados dependiendo el método, la categoría y la fecha, facilitando su acceso, incluso dentro del listado de archivos se pueden ordenar por fechas o nombre de los documentos de manera ascendente o descendente.

Este sitio web facilitará la difusión y la consulta de la de información relacionada a la ingeniería climática, recopilando diversas opiniones y evaluaciones de expertos sobre el tema.

El usuario de la información contará con una diversidad de puntos de vista sobre las distintas tecnologías de la modificación artificial del clima, y conocerá los conceptos generales de las ciencias atmosféricas que están involucradas en diversas técnicas propuestas para la modificación artificial del tiempo atmosférico y el clima.

La estructura del sitio web del proyecto se muestra en el mapa de navegación del sitio, (ver figura 5).

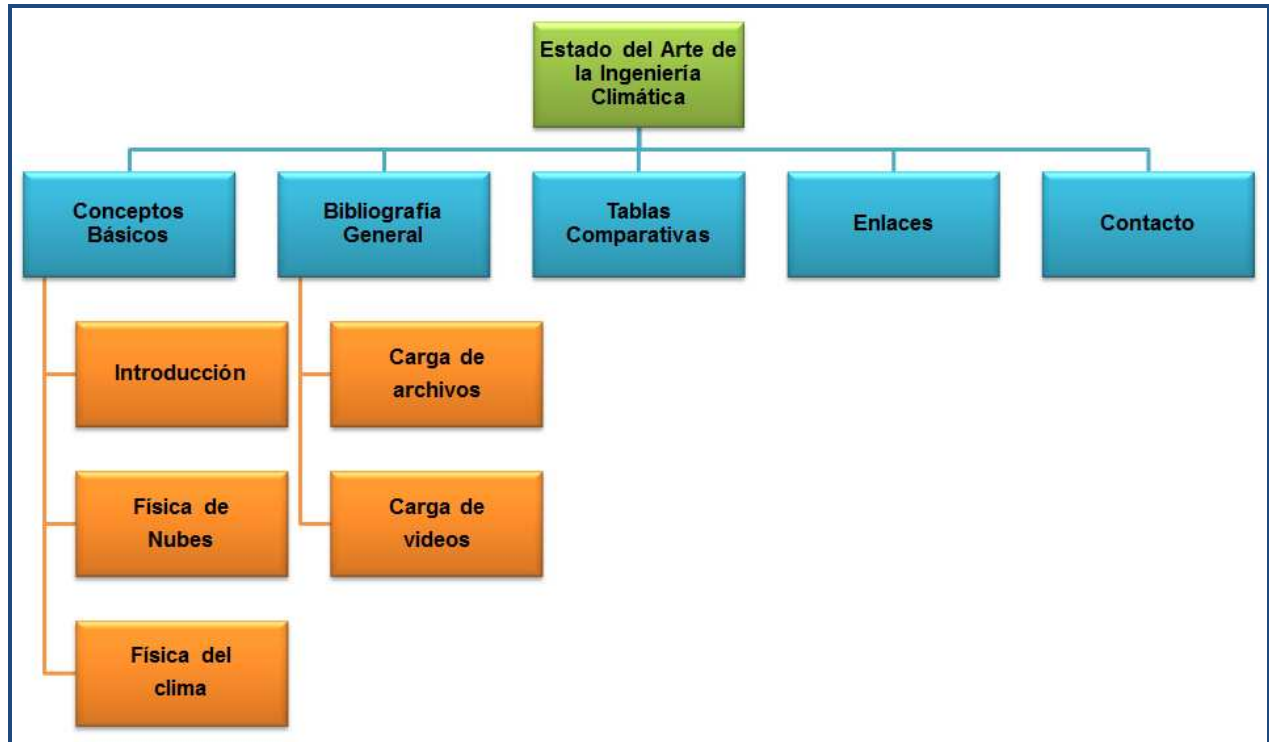


Figura 5. Mapa de navegación del sitio web.

El sitio cuenta con los siguientes módulos:

1. **Conceptos Básicos:** consta de un submenú que contiene Introducción, Física de Nubes y Física del Clima.

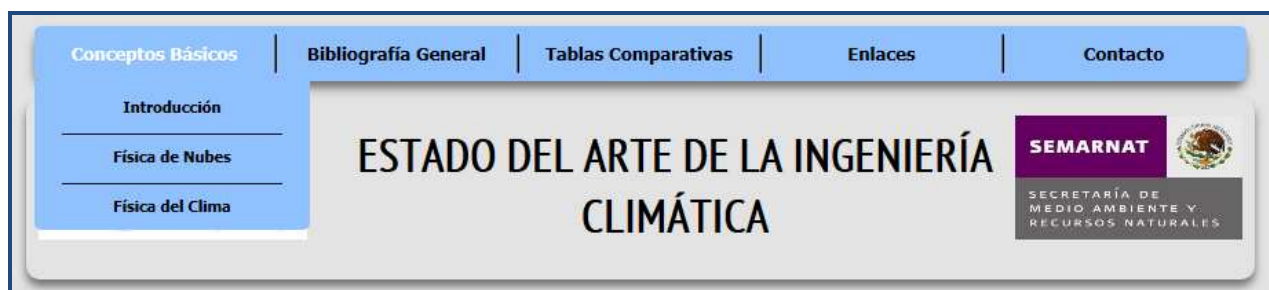


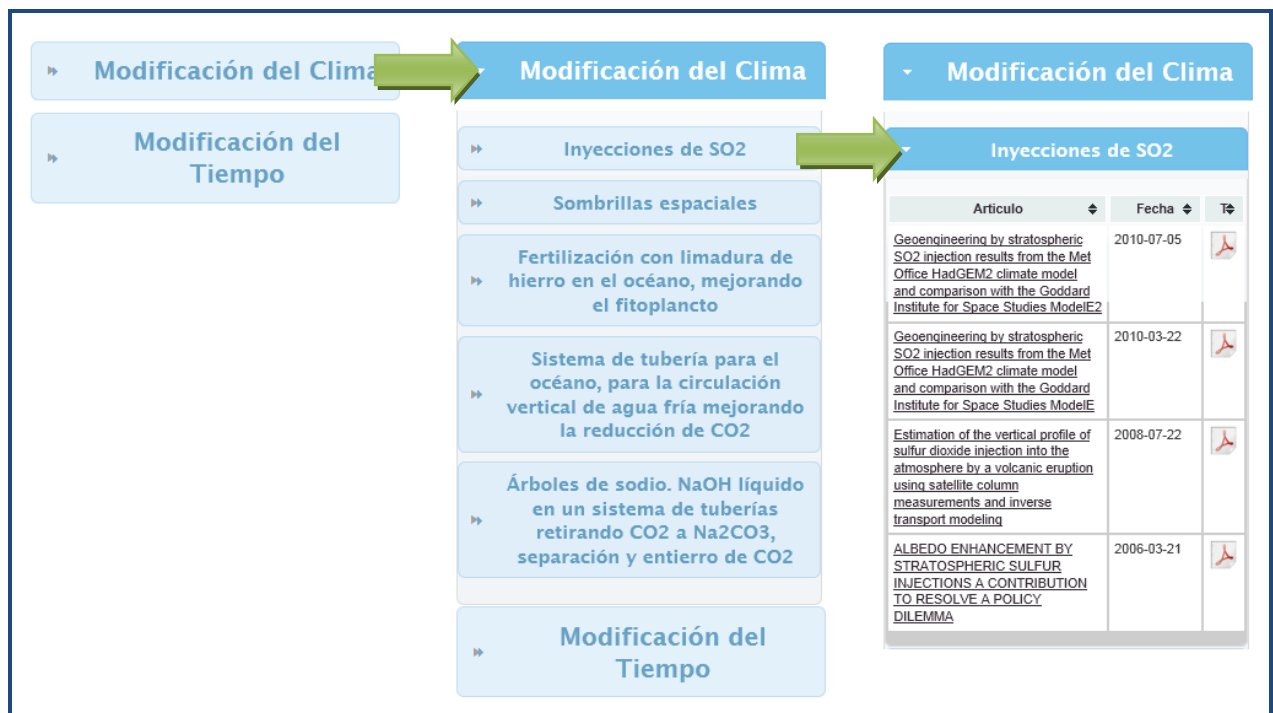
Figura 6. Submenú de conceptos básicos.

2. **Bibliografía General:** para acceder a este modulo es necesario proporcionar una clave de usuario, (ver figura 7). Una vez realizada la autenticación se visualizan los documentos y vídeos contenidos en el sitio web en forma clasificada, (ver figura 8), así como las opciones de carga de archivos y carga de vídeos, (ver figura 9).



The screenshot shows a login interface with the IMTA logo on the top left and SEMARNAT logo on the top right. The main heading is "ESTADO DEL ARTE DE LA INGENIERÍA CLIMÁTICA". Below it is a password field labeled "Contraseña:" and two buttons: "Iniciar sesión" and "Cancelar". At the bottom, the address "Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, CP 62550, Jiutepec, Mor. Tel.: +52 (777) 329 3600." is displayed.

Figura 7. Autenticación de usuarios.



The screenshot shows a hierarchical menu on the left with options: "Modificación del Clima", "Modificación del Tiempo", "Inyecciones de SO2", "Sombrillas espaciales", "Fertilización con limadura de hierro en el océano, mejorando el fitoplancto", "Sistema de tubería para el océano, para la circulación vertical de agua fría mejorando la reducción de CO2", "Árboles de sodio. NaOH líquido en un sistema de tuberías retirando CO2 a Na2CO3, separación y entierro de CO2", and "Modificación del Tiempo". A green arrow points from "Modificación del Clima" to a detailed view of "Inyecciones de SO2". This view contains a table of documents:

Artículo	Fecha	
Geoengineering by stratospheric SO2 injection results from the Met Office HadGEM2 climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE2	2010-07-05	
Geoengineering by stratospheric SO2 injection results from the Met Office HadGEM2 climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE	2010-03-22	
Estimation of the vertical profile of sulfur dioxide injection into the atmosphere by a volcanic eruption using satellite column measurements and inverse transport modeling	2008-07-22	
ALBEDO ENHANCEMENT BY STRATOSPHERIC SULFUR INJECTIONS A CONTRIBUTION TO RESOLVE A POLICY DILEMMA	2006-03-21	

Figura 8. Documentos.



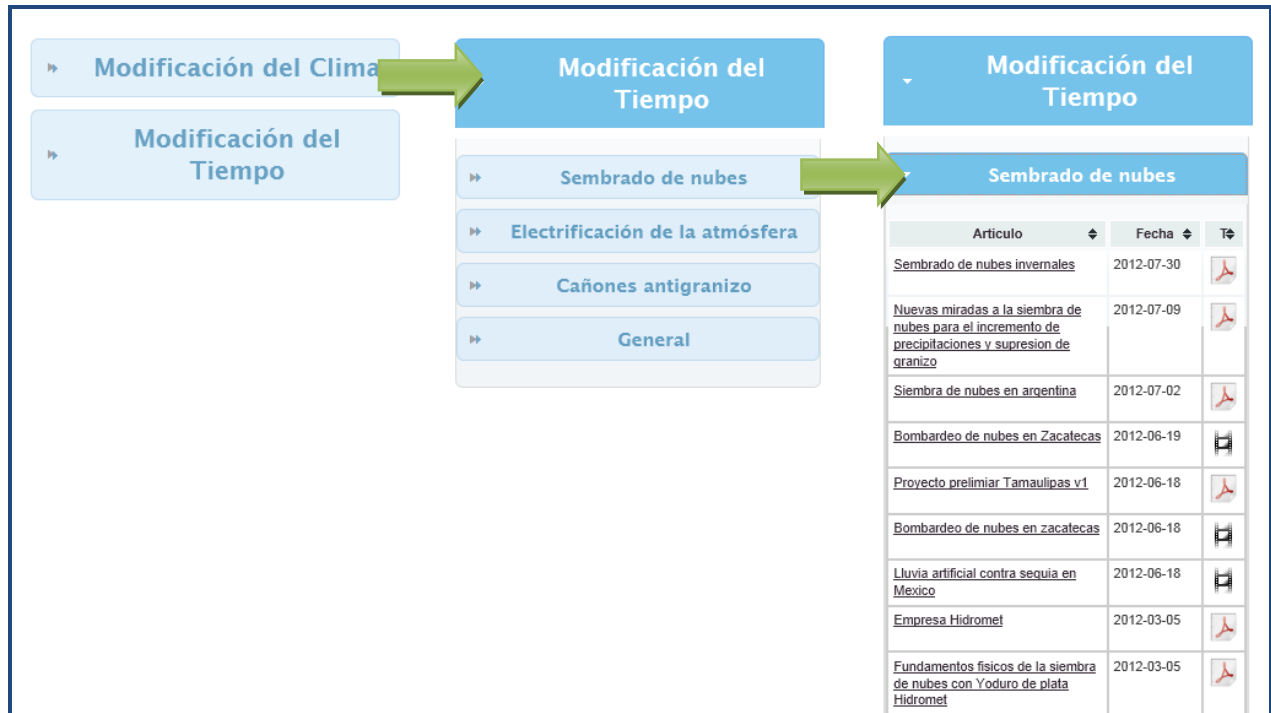


Figura 9. Videos.

3. **Tablas Comparativas:** muestra información sobre las diferentes tecnologías aplicadas en la Ingeniería Climática haciendo, como su nombre lo indica, comparación de dicha información en forma de tablas (ver figura 10 y figura 11).

## Mitigación del cambio climático y la reducción atmosférica del CO<sub>2</sub>

(Extraído de Adrew Glikson, 2010, *Geoengineering the Climate? A Southern Hemisphere perspective, A Symposium organised by the National Committee for Earth System Science, Climate Change Mitigation And Atmospheric CO<sub>2</sub> Draw-Dwon*, pag. 42)

Método	Supuestas Ventajas	Problemas	Referencias
<b>Inyecciones de SO<sub>2</sub></b>	Aplicación rápida y económica.	Tiempo de residencia atmosférica de pocos años; acidificación de los océanos; retraso de precipitaciones y monzones.	<a href="http://www.essc.psu.edu/essc_web/seminars/fall2006/WigleySci06.pdf">http://www.essc.psu.edu/essc_web/seminars/fall2006/WigleySci06.pdf</a> <a href="http://www.atmos-chem-phys.net/8/5881/2008/acp-8-5881-2008.pdf">http://www.atmos-chem-phys.net/8/5881/2008/acp-8-5881-2008.pdf</a>
<b>Sombrillas y espejos espaciales</b>	Aplicación rápida. No hay un efecto directo sobre la química del océano.	Tiempo limitado de residencia en el espacio. Posicionamiento incierto en el espacio. No reduce la acidificación en curso de los océanos por las emisiones de carbono.	<a href="http://physicsworld.com/cws/article/news/2009/sep/01/geoengineering-could-be-needed-to-halt-climate-change">http://physicsworld.com/cws/article/news/2009/sep/01/geoengineering-could-be-needed-to-halt-climate-change</a> <a href="http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/4762720.stm">http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/4762720.stm</a> <a href="http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/un-cientifico-propone-construir-una-sombrilla-espacial-contr-a-el-calentamiento-global">http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/un-cientifico-propone-construir-una-sombrilla-espacial-contr-a-el-calentamiento-global</a>
<b>Fertilización con limadura de hierro en el océano mejorando el fitoplancton</b>	Reducción de CO <sub>2</sub>	No hay evidencias de que el fitoplancton muerto no libera CO <sub>2</sub> de vuelta a la superficie del océano	<a href="http://www.laondedigital.com/laonda/laonda/451/82.htm">http://www.laondedigital.com/laonda/laonda/451/82.htm</a> <a href="http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/science/newsid_7961000/7961165.stm">http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/science/newsid_7961000/7961165.stm</a> <a href="http://www.ozean-der-zukunft.de/fileadmin/user_upload/pdf/ocean-iron-fertilization.pdf">http://www.ozean-der-zukunft.de/fileadmin/user_upload/pdf/ocean-iron-fertilization.pdf</a>
<b>Sistema de tubería para el océano, para la circulación vertical de agua fría mejorando la reducción de CO<sub>2</sub></b>	Reducción de CO <sub>2</sub>	No hay pruebas de que el agua fría que circula de nuevo a las profundidades del océano impida al CO <sub>2</sub> regresar a la superficie.	*target="blank" <a href="http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7014503.stm">http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7014503.stm</a> <a href="http://www.ison21.es/2007/10/09/enfriar-el-oceno/">http://www.ison21.es/2007/10/09/enfriar-el-oceno/</a>
<b>"Árboles de sodio" – NaOH líquido en un sistema de tuberías retirando CO<sub>2</sub> a Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, separación y entierro de CO<sub>2</sub></b>	Reducción de CO <sub>2</sub> estimado por Hansen en el 2008 en ~ \$ 500 por tonelada de CO <sub>2</sub>	Eficiencia no probada; necesaria para enterrar CO <sub>2</sub> ; costo de miles de millones (difícilmente no mas que los actuales gastos militares)	<a href="http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/science/newsid_6377000/6377267.stm">http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/science/newsid_6377000/6377267.stm</a> <a href="http://www.nature.com/news/2008/081217/full/news.2008.1319.html">http://www.nature.com/news/2008/081217/full/news.2008.1319.html</a>
<b>Enterrar/Biochar Carbono en el suelo</b>	Medio eficaz de controlar el ciclo del carbono (plantas + el intercambio del suelo con la atmósfera mas de 100 GtC por año)	Requiere un gran esfuerzo internacional por una fuerza de trabajo de millones de granjeros.	<a href="http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/03/120321_secuestro_carbono_mit_am.shtml">http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/03/120321_secuestro_carbono_mit_am.shtml</a> <a href="http://www.youtube.com/watch?v=bPG50rSkR7A">http://www.youtube.com/watch?v=bPG50rSkR7A</a> <a href="http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61770102.pdf">http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61770102.pdf</a> <a href="http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=67&amp;Itemid=7&amp;limit=1&amp;limitstart=1">http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=67&amp;Itemid=7&amp;limit=1&amp;limitstart=1</a>
<b>Reducción de CO<sub>2</sub> Serpentina</b>	Reducción de CO <sub>2</sub>	Posible escala desconocida	<a href="http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3137/1/42649-1.pdf">http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3137/1/42649-1.pdf</a> <a href="http://www.powerplantccs.com/ccs/sto/nc/min/directsequestration.html">http://www.powerplantccs.com/ccs/sto/nc/min/directsequestration.html</a> <a href="http://josesarachaga.ilimdo.com/captacion-y-almacenamiento-de-co2/carbonatati%C3%B5n/carbonatati%C3%B5n-mineral/">http://josesarachaga.ilimdo.com/captacion-y-almacenamiento-de-co2/carbonatati%C3%B5n/carbonatati%C3%B5n-mineral/</a>

Figura 10. Tablas Comparativas "Mitigación del cambio climático y la reducción atmosférica del CO<sub>2</sub>" del sitio web del proyecto.

## Tecnologías CDR Seleccionadas

(Extraído de United States Government Accountability Office, 2011, *Climate engineering, Technical status, future directions, and potential responses*, pp. 15-19)

Tecnología	Madurez	Efectividad Potencial	Factores de Costo	Consecuencias Potenciales
<b>Captura aérea directa de CO2 con reducción geológica</b>	<b>Baja (TRL 3):</b> * Principios básicos entendidos y reportados. * Concepto de sistema formulado. * Prueba experimental de concepto demostrado con una unidad prototipo en un entorno de laboratorio. * Modelos de inyecciones de CO2 y el transporte desarrollado y utilizado para el análisis de riesgos y para la simulación de destino del CO2 inyectado. * No se han demostrado los componentes básicos tecnológicos trabajando juntos. * No hay planes o prototipos a gran escala para la implementación industrial. * Reducción geológica de CO2 es mas madura pero practicada en una escala para afectar potencialmente el clima.	<b>Sin clasificar:</b> * No "límite obvio" para la cantidad de reducción de emisiones de CO2 para el año 2100. * En teoría podría contrarrestar todas las emisiones globales de CO2 antropogénicas a las 33 gigatoneladas por año. * Quitándole gran uso de la energía: Aumento neto de las emisiones de CO2 si utiliza combustibles fósiles (la electricidad proveniente de combustibles fósiles libera mas CO2 que lo que elimina una unidad de captura de aire). * Incertidumbre en torno a la escalabilidad técnica.	* La viabilidad puede depender de la naturaleza y el alcance de un mercado de carbono. * Los requerimientos de procesos de energía para las ineficientes tecnologías de la actualidad para separar directamente el CO2 de aire en la concentración muy diluida. * Transporte y logística para la reducción de CO2 capturado. * Construcción y gestión de sitios geológicos de reducción de CO2 (ej. Inyección de CO2, medición, control y verificación). * Las estimaciones variaron en gran medida en la literatura científica: \$27 a \$630 o mas por tonelada de CO2 eliminada (excluyendo el transporte, la reducción y otros gastos).	* Aspectos asociados con el manejo de procesos materiales o químicos. * Puede tener riesgos tales como reducción de potencial para el CO2 para escapar del almacenamiento subterráneo en el caso de fractura o fisura del deposito de acumulación de presión.
<b>Bioenergía con captura y reducción de CO2</b>	<b>Baja (TRL 2):</b> * Principios básicos entendidos y reportados. * Concepto de sistema formulado. * Sin la demostración experimental de la prueba de concepto (No hay experimento de laboratorio que indican potencial de reducción de emisiones de CO2). * Tecnología emergente aprovecha lo que se conoce sobre la captura y reducción de CO2 geológico.	<b>Bajo a medio:</b> * Capacidad máxima para reducir el CO2 atmosférico: 50-150 ppm para 2100. * Negativo neto de carbono bajo condiciones ideales. * Depende de la productividad de la planta y el área de tierra cultivada.	* La viabilidad puede depender de la naturaleza y el alcance de un mercado de carbono. * Valor de la tierra en otros usos. * Zona de tierra potencialmente grande para el cultivo y la cosecha de la biomasa. * Tipo de materia prima de biomasa (ej. Switchgrass [Panicum virgatum]). * Requerimientos de procesos de energía para la producción de bioenergía (ej. pirólisis). * Construcción y gestión de sitios geológicos de reducción de CO2 (ej. Inyección de CO2, medición, control y verificación). * Transporte y logística para la reducción de CO2 capturado. * Las estimaciones variaron en gran medida en la literatura científica: \$150 a \$500 por tonelada de CO2 eliminada (excluyendo el transporte, la reducción y otros gastos).	* Ventajas y desventajas del uso potencial de la tierra; impactos relacionados en el precio de la comida, agua, recursos, fertilizantes. * Riesgos en reducción de CO2 mismos como la captura directa de aire.
<b>Métodos del carbón vegetal y biomasa.</b>	<b>Baja (TRL 2):</b> * Principios básicos entendidos y reportados. * Concepto de sistema formulado. * Prueba de concepto se muestra en los resultados del modelo y experimentales que demuestran capacidad de captura de CO2, pero incertidumbre en los aspectos de reducción de CO2. * No se practica en una escala que afecte el clima. No hay planes o prototipos para la	<b>Bajo:</b> * Capacidad máxima para reducir el CO2 atmosférico: 10-50 ppm para 2100. * Máximo anual de la reducción sustentable: 1-2 gigatoneladas de CO2-C equivalentes de CO2, CH4 y N2O. * Negativo neto de carbono bajo condiciones ideales (comparable a la bioenergía con captura y reducción de CO2).	* La viabilidad puede depender de la naturaleza y el alcance de un mercado de carbono. * Resultados de la fertilidad del suelo. * Tipo de materia prima de Pirólisis y factores relacionados. * Las estimaciones variaron en gran medida en la literatura científica: \$2 a \$62 por tonelada de CO2 eliminada.	* Ventajas y desventajas del uso potencial de la tierra. * Inciertos efectos a largo plazo sobre la tierra. * Salud y seguridad en el manejo de pirólisis y carbón vegetal. * Beneficios locales al mejorar el rendimiento de los cultivos del suelo.

Figura 11. Tablas Comparativas "Tecnologías CDR (Carbon Dioxide Removal) Seleccionadas" del sitio web del proyecto.

4. **Enlaces:** es la sección dedicada a los enlaces de interés enfocados en éste tema, (ver figura 12).

Conceptos Básicos | Bibliografía General | Tablas Comparativas | Enlaces | Contacto

IMTA® Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

ESTADO DEL ARTE DE LA INGENIERÍA CLIMÁTICA

SEMARNAT SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

### Enlaces de Interés

- Servicio Meteorológico Nacional
- National Hurricane Center
- The Weather Channel
- Centro de Ciencias de la Atmósfera
- Centro Nacional de Prevención de Desastres
- Protección Civil México
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Organización Mexicana de Meteorología, A.C.
- Red de Desastres Hidrometeorológicos y Climáticos
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
- Instituto Nacional de Ecología

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, CP 62550, Jiutepec, Mor. Tel.: +52 (777) 329 3600.

Figura 12. Enlaces de interés.

5. **Contacto:** incluye los datos de contacto tanto del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y los datos de los responsables del proyecto, (ver figura 13).



Conceptos Básicos | Bibliografía General | Tablas Comparativas | Enlaces | Contacto

**IMTA** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

**ESTADO DEL ARTE DE LA INGENIERÍA CLIMÁTICA**

**SEMARNAT** SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

**Subcoordinador de Hidrometeorología**  
Dr. Ricardo Prieto González  
rprieto@tlaloc.imta.mx  
Ext. 236 y 525

**Especialista en Hidráulica III**  
Mtra. Olivia Rodríguez López  
olvia\_rodriguez@tlaloc.imta.mx  
Ext. 821

 **Teléfono: +52 (777) 329 3600**

[Ver mapa más grande](#)

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, CP 62550, Jiutepec, Mor. Tel.: +52 (777) 329 3600.

Figura 13. Contacto y ubicación.

El sitio web fue diseñado para que funcione como un gestor de contenido en la sección correspondiente a la visualización de archivos (Bibliografía General). Esto se refiere a que se pueden realizar acciones administrativas como:

1. Agregar o modificar métodos y categorías.
2. Modificar contraseña de administrador y subida de archivos.

## Capítulo 8. Conclusiones.

Al finalizar la búsqueda y recopilación de la información referente a la modificación artificial del tiempo y clima, se puede concluir que es un tema de bastante complejidad ya que científicamente es difícil comprobar su funcionalidad bajo las condiciones existentes en el ambiente, regularmente se deben de alterar para comprobarlas.

En general en el mundo se han hecho una gran cantidad de intentos por tratar de modificar las condiciones atmosféricas mostrando sus resultados para uso del público en general. Sin embargo en México se han aplicado algunas de estas opciones sin mostrar resultados convincentes para los expertos en el tema.

Es necesario el diferenciar entre aquellas tecnologías dedicadas a la modificación meteorológica,

Un factor de importancia es el considerar que pueden existir consecuencias potenciales adversas al uso de las tecnologías de modificación atmosférica, por ello es preciso el tener un mayor conocimiento de los fenómenos que ocurren en la atmósfera desde la escala microscópica hasta la escala global y de cómo pueden verse afectados por la intervención humana.

Debido a la complejidad de los procesos atmosféricos de escala microscópica que se dan dentro de las nubes, las hipótesis que manejan diversas tecnologías de modificación artificial de la atmósfera son difíciles de ser comprobadas en su relación causa-efecto en la naturaleza. Con el grado tecnológico que se tiene en cuanto a instrumentación de medición atmosférica, algunas tecnologías no se pueden ni verificar, ni descartar con métodos experimentales *in situ*. Sólo se pueden tener estudios estadísticos basados en mediciones locales y dentro de periodos de tiempo limitados.

El tema de la modificación artificial de la atmósfera se encuentra muy activo a nivel mundial, pues existen una gran cantidad de investigadores, compañías, experimentos, talleres, reuniones y congresos que se llevan a cabo con el fin de compartir información sobre la aplicación de tecnologías, principalmente para mejorar la cantidad de agua disponible para uso y consumo humano, así como para reducir los riesgos ante fenómenos atmosféricos, al igual que para promover acciones que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático, entre otros. Esta línea de trabajo continuará su desarrollo en el futuro cercano, atrayendo inversiones tanto de entes públicos como privados. El único modo de poder dissociar entre técnicas que tengan sustento científico de aquellas tecnologías que no tienen hipótesis adecuadas, ni forma de ser probadas, es mediante una exhaustiva educación en ciencias atmosféricas, tanto de autoridades, como de miembros de la comunidad científica, tecnológica, académica y de usuarios, en temas tan diversos como Meteorología, Química, Física, Biología, Informática, Matemáticas, Ciencias Sociales, entre otros, así como de una forma seria y responsable de atacar el problema de la modificación artificial de la atmósfera. Mientras esto ocurre, se recomienda tomar con extrema cautela cualquier tecnología que clame tener efectos sobre el medio ambiente.

En cuanto a la visión del IPCC sobre el tema de modificación artificial del clima, tenemos lo siguiente (IPCC, 2011):

“Current discussions that suggest geoengineering as an option to support climate mitigation efforts remain rather abstract and lack comprehensive risk assessments that take into account possible adverse impacts over short and longer time frames. The understanding of the physical science basis of geoengineering is still limited and IPCC will, for the first time, assess this in several chapters of the WGI contribution to AR5. Improved scientific understanding of the impacts of geoengineering proposals on human and natural systems will be assessed by WGII. WGIII needs to take into account the possible impacts and side effects and their implications for mitigation cost in order to define the role of geoengineering within the portfolio of response options to anthropogenic climate change. Furthermore, this includes an evaluation by WGIII of options for appropriate governance mechanisms.”

## Bibliografía.

20minutos.es. (3 Junio 2005) Investigadores portugueses provocan lluvia con productos químicos. <http://www.20minutos.es/noticia/29027/0/lluvia/provocar/portugueses/> (Mayo, 2012)

Actual y Curioso. (13 Mayo 2010) Lluvia artificial con rayos láser <http://actualcurioso.blogspot.mx/2010/05/lluvia-artificial-con-rayos-laser.html> (Mayo, 2012)

Agua en Bolivia [http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_rojo/TC-159.htm](http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_rojo/TC-159.htm) (Mayo, 2012)

Ana Palacio Pire. (2009) Provocar lluvia artificial, solución contra el calentamiento global <http://www.mundo-geo.es/green-living/provocar-lluvia-artificial-solucion-contr-el-calentamiento-global> (Mayo, 2012)

Anna Salleh. (28 Noviembre 2007) Nuevos intentos en la tecnología de producción de lluvia <http://axxon.com.ar/not/179/c-1790039.htm> (Mayo, 2012)

Belén Tobalina. (21 Enero 2011) La lluvia artificial en entredicho <http://www.larazon.es/noticia/3514-la-lluvia-artificial-en-entredicho> (Mayo, 2012)

Blog de ecología. (22 Enero 2011) Crean lluvia artificial usando rayos láser <http://www.ecologiablog.com.ar/2011/01/crean-lluvia-artificial-usando-rayos.html> (Mayo, 2012)

Cortes de Aragón. [http://www.cortesaragon.es/bases%5Cdisca2.nsf/\(ID\)/84F82E7D4D5F2419C1256D72003D1F51?OpenDocument](http://www.cortesaragon.es/bases%5Cdisca2.nsf/(ID)/84F82E7D4D5F2419C1256D72003D1F51?OpenDocument) (Mayo, 2012)

Daily Mail Reporter 3 Enero 2011 Have scientists discovered how to create downpours in the desert? <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1343470/Have-scientists-discovered-create-downpours-desert.html#ixzz1A0oZQDtz> (2012)

El Comercio.pe. (7 Mayo 2010) Los rayos láser son capaces de formar nubes y producir lluvia <http://elcomercio.pe/tecnologia/473881/noticia-rayos-laser-son-capaces-formar-nubes-producir-lluvia> (Mayo, 2012)

El Universo. (21 Abril 2007) Científicos chinos le apuestan a provocar lluvia y nieve artificial <http://www.eluniverso.com/2007/04/21/0001/1064/A2F8F9D848DD4F4FBF0502D244281139.html> (Mayo, 2012)

Elena Sanz. (05 Mayo 2010) Crean lluvia artificial usando rayos láser <http://www.muyinteresante.es/consiguen-lluvia-artificial-usando-rayos-laser> (Mayo, 2012)

Enrique Atiénzar Rivero. (1999) Enigmas de la lluvia provocada. <http://www.sld.cu/print.php?idv=2894> (Mayo, 2012)



Ginés (2 Mayo 2012) Ya es posible crear lluvia artificial utilizando rayos láser <http://www.madreciencia.es/ya-es-posible-crear-lluvia-artificial-utilizando-rayos-laser/> (Mayo, 2012)

Imprescindibles de la ciencia. <http://www.imprescindiblesdelaciencia.es/?p=520> (Mayo, 2012)

Infoclima. <http://www.infoclima.com.ar/servicios/noticias.asp?id=178> (Mayo, 2012)

IPCC (2011). IPCC Expert Meeting on Geoengineering – Meeting Report.

IPCC Working Group III (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press.

Juan José Ibáñez. (29 Febrero 2012) La lluvia artificial y sus impactos ambientales <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/02/29/140272> (Mayo, 2012)

Max Miller. (28 Agosto 2010) Control the Weather <http://bigthink.com/ideas/22978> (Mayo, 2012)

Nature. <http://www.nature.com/nphoton/index.html> (Mayo, 2012)

Rafael Gonzalo Jimenez. (2011) XVI. - Dominio mágico de la lluvia, el sol y el viento <http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpyuVplpFlrVxIEZZR.php> (Mayo, 2012)

Ronald B. Standler (2002) History and Problems in Weather Modification (Revisión 2 Enero 2003) <http://www.rbs2.com/w2.htm> (Mayo, 2012)

Tiempo (3 Enero 2011) Los científicos han descubierto cómo crear lluvias en el desierto <http://foro.tiempo.com/los-cientificos-han-descubierto-como-crear-lluvias-en-el-desierto-read-mo-ht-t128218.0.html> (Mayo, 2012)

Universidad de Ginebra. (4 Mayo 2010) Un láser para modular el tiempo <http://www.unige.ch/communication/archives/2010/laser.html> (Mayo, 2012)

Web Mac. <http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html> (Mayo, 2012)

## Anexo 1. La lluvia artificial en entredicho.

<http://www.larazon.es/noticia/3514-la-lluvia-artificial-en-entredicho>

Un equipo de investigadores de la Universidad de Tel Aviv echa por tierra los logros de la siembra de nubes tras analizar los datos de volumen pluviométrico registrados en Israel en los últimos 50 años.

21 Enero 11 - Madrid - Belén Tobalina:  
Los científicos llevan décadas tratando de provocar lluvia artificial con el fin de poder utilizar esta tecnología para combatir períodos de sequía, incendios o incluso plagas. Desde su descubrimiento a finales de los años 40, no han sido pocos los aparentes éxitos alcanzados.

El último, el obtenido al parecer hace una semana en Abu Dhabi según se hacía eco «The Sunday Times». Sin embargo, una reciente investigación arroja un vaso de agua fría sobre los supuestos logros al poner en entredicho que la tecnología empleada hasta la fecha funcione realmente o se deba más al azar.

En concreto, un equipo de investigadores de la Universidad de Tel Aviv ha analizado exhaustivamente los datos de volumen pluviométrico registrados en Israel desde la puesta en práctica de la siembra de nubes. Y la conclusión del informe, publicado en «Atmospheric Research», echa por tierra los métodos utilizados hasta la fecha. Y no se trata precisamente de un estudio baladí. Han examinado los datos de lluvias de los últimos 50 años y la conclusión es que al menos hoy, la lluvia artificial no resulta eficaz para lograr que llueva más. Y eso

que los logros de Israel en materia de siembra de nubes han sido considerados hasta mediados de la década de 1990 los experimentos de mayor éxito.

«Tras esta investigación puedo decir que la siembra de nubes hasta el momento no ha tenido éxito, al menos en Israel. Y pienso que estos mismos resultados se pueden extrapolar a la mayoría de otros sitios del mundo», asegura a A Tu Salud Verde Zev Levin, uno de los investigadores del estudio, experto en Física Atmosférica del Departamento de Geofísicas y Ciencia Planetaria de la Universidad de Tel Aviv.

En concreto, «hemos demostrado que el éxito del segundo experimento de lluvia artificial en Israel (entre los años 1969 y 1975) fue gracias a la elección de los días para la siembra de nubes, ya que las condiciones sinópticas produjeron fuertes lluvias y los vientos fueron más fuertes. Cuando estas condiciones sinópticas se terminaron, los resultados de lluvia artificial cayeron hasta un incremento de lluvia cero. Además, cuando comparamos las cantidades de lluvia en la superficie sembrada con nubes con un área al sur de la misma, ésta última zona mostró que

había llovido más que en la superficie sembrada», precisa el experto. Es decir, que el incremento de lluvia que entonces se pensó que era gracias a la siembra de nubes, no fue tal, ya que el aumento de pluviosidad se debió a un modelo específico de ciclones que suele provocar un incremento de precipitaciones especialmente en zonas montañosas.

«Es posible que a veces la lluvia en caso de la siembra de nubes fuera mayor – prosigue–, pero en general los resultados son negativos, es decir, no aumentan. Nuestra conclusión es que la siembra de nubes podría tener un efecto en la microfísica de nubes, pero que otros factores de gran escala dominan el sistema y cualquier mejora potencial positivo de la lluvia por siembra es enmascarada por factores de mayor relevancia. Así, la lluvia de viento baja en áreas urbanas se ha incrementado en Israel en los últimos años cuando la ciudad creció de tamaño debido al efecto isla (los edificios altos provocan cambios en el viento)».

A pesar de estos resultados, lo cierto es que el Gobierno de Israel continúa, al menos hoy, con sus proyectos. Y es que no todo es blanco y negro.

### **Futuro**

«El Gobierno está listo para llevar a cabo un nuevo experimento en el que la siembra de yoduro de plata se llevará a cabo más al este, cerca del Mar de Galilea. El objetivo es utilizar las montañas de los Altos del Golán para ayudar a levantar las nubes y el material de siembra», añade. Este escenario podría acelerar la formación de lluvia al

hacerse sobre nubes con un tiempo de vida corto encima de las montañas.

Esperemos que tengan más éxito que en su último experimento (realizado entre 1975 y 1995 al sur de Tel Aviv), «que concluyó cuando se dieron cuenta de que no se obtenía mejora alguna», recuerda Levin.

Pero, ¿sería realmente la solución?, ¿a qué precio? Para Bruce Boe, director de Meteorología miembro de Weather Modification Incorporated, sí, ahora bien, con un matiz que en tiempos de sequía se nos olvida. «El costo por unidad de volumen de lluvia producido por la siembra es muy difícil de determinar con exactitud debido a que el efecto preciso de la siembra varía de nube en nube, de un lugar a otro y de una estación a otra. Se acepta que se puede conseguir un aumento de lluvia de un 10 por ciento. Los expertos en este tipo de operaciones están de acuerdo en que esta siembra es más eficaz si se realiza durante años con un volumen de precipitación normal o casi normal, y que resulta menos eficaz durante las sequías. Por lo tanto, la siembra de nubes debe ser utilizada como una herramienta de gestión del agua, no como un medio para “romper” las sequías». Boe, que considera la investigación de la Universidad de Tel Aviv como un buen estudio, matiza que «esto no significa que la siembra de nubes sea ineficaz en todas partes, o incluso en Israel». Depende de la zona, del tipo de proyecto, de que no se lleve a cabo en tiempo de sequía, etcétera.

### Más de 900.000 euros al año

En definitiva, diversas variables importantes cuando sólo «el presupuesto para las operaciones está en unos 900.000 euros al año. Esto cubre el costo del avión, el material de radar y los salarios», explica Levin.

«Son ganas de perder el tiempo y el dinero. No hay nada concluyente sobre la lluvia artificial. La mayoría de expertos opina como el informe de Tel Aviv. Algunos aseguran que conduce a más lluvia, aunque los datos digan lo contrario. De hecho, la probabilidad de que la lluvia artificial sea útil es mínima. Pero incluso aunque así fuera, “ordeñar” las nubes no

tiene mucha lógica cuando hay otras cosas que se pueden hacer para gestionar bien el agua. En España, por ejemplo, no falta agua, sino que hay una mala gestión. Y no tendría sentido invertir el escaso dinero dedicado a investigación e innovación en este tema. Hay asuntos menos costosos y más prácticos; entre ellos, la corrección del actual caos en la gestión de las aguas subterráneas», concluye el director del Observatorio del Agua de la Fundación Botín, Manuel Ramón Llamas, catedrático emérito de Hidrogeología de la Universidad Complutense de Madrid y doctor Honoris Causa por la Politécnica de Cataluña.



## Anexo 2. Los científicos han descubierto cómo crear lluvias en el desierto.

<http://foro.tiempo.com/los-cientificos-han-descubierto-como-crear-lluvias-en-el-desierto-read-mo-ht-t128218.0.html>

3-enero -2011

Me parece un artículo interesante sobre la lluvia artificial, en realidad no sé en qué espacio es el más idóneo para poner este artículo. Pero desearía que fuera leído y ver las opiniones. De pronto pone cosas muy interesantes como el hecho de con una humedad del 30 % puedan crearse lluvias artificiales. Otro hecho es que no se empleen productos químicos, sino solo unas antenas que ionizan el aire. Igual es una noticia esperanzadora o igual es un espejismo, la práctica lo dirá, también el artículo lo pinta muy bien.

Tecnología creado 50 tormentas en Abu Dhabi, Al Ain de la región el año pasado Por siglos, las personas que viven en el Oriente Medio han soñado con convertir el desierto de arena en la tierra apta para cultivos con agua fresca del grifo.

Ahora que el santo grial es un paso más cerca después de que científicos empleados por el gobernante de Abu Dhabi a la demanda han generado una serie de aguaceros.

Cincuenta lluvias fueron creados el año pasado en la tecnología del estado

oriental de Al Ain región utilizando diseñado para controlar el clima.

Seco como el polvo: Las dunas de arena de los Emiratos Árabes Unidos, que no ve la lluvia en todos los meses. Ahora, un proyecto secreto ha provocado tormentas a Abu Dhabi

**Plan:** Los científicos están tratando de hacer que las nubes en el desierto para dar el control del hombre sobre el clima La mayoría de las tormentas estaban en el apogeo del verano en julio y agosto, cuando no llueve en absoluto.

Las personas que viven en Abu Dhabi se desconciertan por la lluvia que a veces se convirtió en granizo y tormentas y rayos incluidos.

Cómo la tecnología está levantando una tormenta

Los científicos Metro Sistema utilizado ionizadores para producir partículas cargadas negativamente llamadas electrones.

Ellos tienen una tendencia natural para conectar a pequeñas motas de polvo que

están siempre presentes en la atmósfera en el desierto-regiones.

Estos son transportados desde los emisores por convección - corrientes ascendentes de aire generado por la emisión de calor de los rayos solares, ya que golpea el suelo.

Una vez que las partículas de polvo llegar a la altura adecuada para la formación de nubes, las cargas se atraen moléculas de agua que flotan en el aire que luego empiezan a condensarse alrededor de ellos.

Si hay suficiente humedad en el aire, que induce a miles de millones de gotas de forma que finalmente los medios de nubes y lluvia.

Los científicos han estado trabajando en secreto para los Emiratos Árabes Unidos el presidente Sheikh Khalifa bin Zayed Al Nahyan.

Ellos han estado utilizando ionizadores gigante, con forma de pantallas de lámparas se desnudaron en postes de acero, para generar campos de partículas con carga negativa.

Estos promueven la formación de nubes y los investigadores esperaban que podían producir lluvia.

En un vídeo de empresa confidencial, el fundador de la compañía suiza a cargo del proyecto, Metro Systems International, se jactó de éxito.

Helmut Fluhrer dijo: "Hemos logrado una serie de lluvias.

Se cree que es la primera vez que el sistema se ha producido la lluvia de los cielos despejados, según el Sunday Times.

En el pasado, China y otros países han utilizado productos químicos para la siembra de nubes para inducir y evitar que la lluvia caída.

En junio pasado los sistemas de metro construido cinco sitios ionizantes cada uno con 20 emisores que pueden enviar miles de millones de iones que forman las nubes en la atmósfera.

Más de cuatro meses de verano, los emisores se enciende cuando el nivel requerido de humedad atmosférica alcanza el 30 por ciento o más.

Si bien los expertos del país el clima prevista sin nubes o la lluvia en la región de Al Ain, la lluvia cayó sobre CINCUENTA Y DOS ocasiones.

El proyecto fue supervisado por el Instituto Max Planck de Meteorología, uno de los centros más importantes del mundo para la física atmosférica.

El profesor Hartmut Grassl, ex director de instituto, dijo: Hay muchas aplicaciones. Uno de ellos es conseguir agua en un lugar seco.

"Tal vez este es un punto muy importante para la humanidad".

**Visita de Estado:** Jeque Khalifa bin Zayed Al Nahyan, Presidente de los Emiratos Árabes Unidos, acompaña a la Reina en el Palacio Mushrif en Abu Dhabi el año pasado.

**Desierto:** Los científicos crearon 50 tormentas en Abu Dhabi, Al Ain de la región el año pasado.

El ahorro de uso de la tecnología WeatherTec son enormes con el sistema de costo de £ 6 millones al año, mientras que la desalinización es de £ 45 millones. La construcción de un sistema de ionización es de £ 7,000,000, mientras que una planta desalinizadora sería de £ 850 millones y cuesta mucho más para correr.

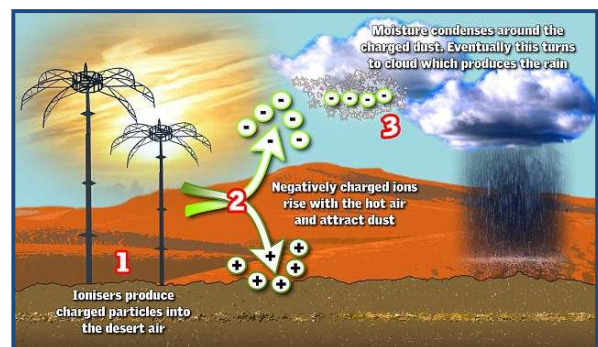
Algunos científicos están tratando a los resultados en Al Ain con precaución debido a Abu Dhabi es un estado costero y pueden experimentar lluvias de verano naturales provocados por el aire recogiendo la humedad del océano caliente antes de dejarlo caer en tierra.

Pero el número de veces que llovió en la región poco después de la ionizadores se ha encendido investigadores alentaron.

El profesor Peter Wilderer fue testigo de la mano de los primeros experimentos y apuesta por el avance.

El director de estudios avanzados sobre la sostenibilidad en la Universidad Técnica de Munich, dijo: "Nos llegó un gran paso más cerca del punto en que

podemos aumentar la disponibilidad de agua dulce a todos en tiempos de cambios radicales en el mundo."



## Anexo 3. Nuevos intentos en la tecnología de producción de lluvias.

<http://axxon.com.ar/not/179/c-1790039.htm>

27-Nov-2007

La tecnología de producción de lluvia que ha financiado el gobierno australiano fue recibida con los pulgares hacia abajo por científicos internacionales, dice un consejero de la World Meteorological Organization. Pero los defensores de la tecnología dicen que la crítica es injusta.

El Dr. Roelof Bruintjes, un investigador instalado en los EEUU que asesora a la World Meteorological Organization (WMO) en la mejora de las precipitaciones, está haciendo comentarios sobre esta tecnología, que pronto será probada en Queensland por la Australian Rain Corporation.



La compañía, con sede en Sydney, que recientemente recibió 10 millones de dólares australianos de la Australian Government Water Fund, espera que las próximas pruebas le sirvan para mostrar que su tecnología puede provocar la lluvia.

La tecnología está a prueba para determinar si puede formar nuevas nubes de lluvia en cielos despejados, mediante la generación de iones en la atmósfera.

Esto es muy diferente de la tecnología de producción de lluvia que existe hoy, que depende de sembrar en nubes que ya existen, y ha sido utilizada durante décadas en Tasmania y las Snowy Mountains.

Algunos expertos australianos ya han dicho públicamente que son escépticos acerca de la nueva tecnología de ionización, y Bruintjes está de acuerdo.

"No creo que sea dinero bien gastado, para serle sincero. Hasta donde conozco, es físicamente imposible", dice. "Nadie puede formar o ahuyentar una nube. Nadie puede hacer lluvia de la nada".

¿Formar nubes desde cero?



Los científicos involucrados en la prueba de esta tecnología de la Australian Rain Corporation, incluyendo al profesor Jürg Keller de la University of Queensland, dicen que el sistema de ionización utiliza un dispositivo con base en tierra para atraer moléculas de agua.

Éstas se condensan, generando calor que, a su vez provoca una corriente ascendente del tipo que se presenta cuando las nubes se forman naturalmente.

Pero Bruintjes, físico de nubes en el National Center for Atmospheric Research en Boulder, Colorado, dice que los expertos de la WMO ya han advertido contra el uso de tales técnicas de ionización porque no están basadas en principios científicos aceptados.

Bruintjes dice que, si bien es posible ionizar partículas atmosféricas, no es posible modificar la estructura termodinámica de la atmósfera, y por tanto en la actualidad no hay una teoría creíble que respalde la idea.

También dice que las pruebas de la tecnología en los Emiratos Árabes Unidos y en México han mostrado que no es útil para aumentar las precipitaciones Bruintjes no entiende por qué Australia ha aceptado la tecnología.

"Cualquier país que sufre una severa sequía se desespera por usar cualquier tipo de tecnología, y tal vez esto es lo que ha ocurrido en Australia", dice.

Si funciona, encuentre el mecanismo El consultor de sustentabilidad Andrew Campbell, instalado en Queanbeyan, está asesorando a la Australian Rain Corporation en las pruebas de Queensland.

Dice que es prudente investigar si la tecnología funciona en las condiciones australianas, aun cuando los científicos no comprendan cómo lo hace.

"Desde una perspectiva de política del agua, la cuestión más importante es si esta tecnología aumenta las precipitaciones o no", dice Campbell, ex-funcionario ejecutivo de la Land And Water Australia.

"Si lo hace, podemos analizar los mecanismos con tranquilidad. Si no, entonces éste es un ejercicio totalmente académico".

Campbell dice que no conoce de ninguna evaluación previa de la tecnología que estará probando la Australian Rain Corporation.

Pero Bruintjes insiste en que la tecnología es el mismo sistema desarrollado por los rusos y que ha sido promocionado durante muchos años por varias compañías alrededor del mundo, y contra el que la WMO ha advertido.

¿Competidores?

Bruintjes está actualmente en Australia, asesorando al gobierno de Queensland sobre la siembra de nubes.

Campbell dice que la crítica de la disputada tecnología de ionización no está justificada. "Es comprensible que las personas involucradas en la siembra de nubes estén preocupadas por una tecnología competitiva", dice. "Pero hasta que sea probada apropiada y científicamente, cualquier alegato a favor o en contra no es creíble".

Bruintjes coincide en que es urgente investigar tecnologías que incrementen las lluvias pero dice que hay mejores maneras de gastar el dinero. Dice que el problema es que es muy difícil determinar el éxito de cualquier tecnología de incremento de las lluvias debido a la variación natural de las precipitaciones.

Bruintjes dice que es importante desarrollar una mejor comprensión de cómo se forma la lluvia en las nubes, y cómo pueden manejar dicho conocimiento las tecnologías con conocidos mecanismos físicos.

"Necesitamos concentrarnos en comprender, más que sólo salir a probar a ciegas una tecnología que no comprendemos", dice.

Fuente: Anna Salleh, ABC. Aportado por Eduardo J. Carletti y Graciela Lorenzo Tillard

## Anexo 4. Científicos chinos apuestan a provocar lluvia y nieve artificial.

<http://www.eluniverso.com/2007/04/21/0001/1064/A2F8F9D848DD4F4FBF0502D244281139.html>

Lo hacen para mejorar las condiciones semiáridas de la meseta tibetana y piensan incrementar su uso en otras regiones del país.

La manipulación del clima parece cada vez más al alcance de los científicos chinos, que acaban de conseguir por primera vez nieve artificial en la meseta tibetana, la más alta del mundo y asolada por el calentamiento global, con el objetivo de reverdecer sus secas praderas.

"Es la primera vez que se consigue nieve artificial en una meseta con una altura superior a los 4.500 metros. Decidimos ponerla en práctica para resolver la grave sequía en las praderas y zonas de pasto", explicó a Efe Liu Xuesong, director de Meteorología de la comarca tibetana de Nagqu.

Tras elegir las condiciones meteorológicas idóneas, el pasado 10 de abril se lanzaron desde tierra bombas de yoduro de plata, un catalizador que, al contactar con las nubes, genera una reacción química que libera el hidrógeno el cual, en contacto con el oxígeno de la atmósfera, forma agua.

Se trata del mismo método que se utiliza para provocar la lluvia artificial y, según Liu, gracias a él la nieve caída fue del 10 al 15 por ciento más intensa de lo habitual, en una región semiárida donde las precipitaciones anuales son de sólo 381 milímetros.

Pese a que se trata de una primera prueba, algunos han lanzado ya campanas al vuelo y hablan de que este tipo de poco ortodoxas herramientas serán decisivas a la hora de combatir los efectos del calentamiento global, como el deshielo de los glaciares, la sequía de los lagos o la reducción de las praderas.

No obstante, las organizaciones ecologistas y otros muchos científicos consideran que este tipo de métodos no son más que "parches" dentro de fenómenos como el calentamiento global o la degradación del ecosistema tibetano, conducidos ambos por las nocivas prácticas humanas.

También Liu optó por la prudencia en este sentido.

"Teóricamente la técnica podría contribuir a evitar el deshielo de los glaciares, pero si se tienen en cuenta factores como la enorme inversión necesaria, la dificultad de la altura y los peculiares factores meteorológicos, parece algo muy difícil", manifestó Liu.

Afirmó, eso sí, que "si se distribuyese (el yoduro de plata) en aviones, es posible que el alcance fuese mayor, pero la inversión tendría que ser también mucho más grande".

Precisamente el pasado mes en Madrid, el secretario general de la Organización Meteorológica Mundial, Michael Jarroud, abogó en un foro sobre cambio climático por avanzar en las técnicas de creación de precipitaciones artificiales para abaratar sus costes, pues no son nocivas para el medio ambiente.

La lluvia artificial se ha utilizado en China para paliar sequías, como la que afecta a la cuenca del río Yangtsé, el más largo del país, apagar incendios, entre ellos el que amenazó hace unos meses un bosque virgen del Tíbet, o paliar las virulentas tormentas de arena primaverales.

Además del yoduro de plata, hay otros catalíticos como la sal, el hielo seco o el nitrógeno líquido, aunque el primero se ha revelado como el más efectivo y más barato, además de inocuo dado que no altera la composición química del agua.

La capital olímpica, Beijing, ha sido una de las más entusiastas en su uso y en

2006 aumentó las reservas de sus embalses en 29 millones de metros cúbicos gracias a la lluvia artificial, según datos de la llamada "Oficina de Manipulación del Tiempo" local.

Ese año, los aviones surcaron el aire para bombardear las nubes con yoduro de plata en 16 ocasiones, consiguiendo 11 días de lluvia artificial, mientras que otros 51 días de lluvia llegaron gracias al disparo de cohetes y artillería antiaérea.

En total, la lluvia artificial supuso el 11 por ciento del total de precipitaciones caídas en la capital china, y tanto confían los científicos en sus bondades que en 2007 se aumentarán desde 14 hasta 40 los puntos desde donde se lanza el yoduro de plata a las nubes.

## Anexo 5. ¿Cómo conseguir aliviar al medio ambiente?

<http://www.mundo-geo.es/green-living/provocar-lluvia-artificial-solucion-contra-el-calentamiento-global>

Para provocar lluvia artificial, que actualmente se utiliza en el mar de Galilea, situado en la región del Próximo Oriente, y perteneciente a Israel, la empresa pública israelí Mecorot, que se ocupa del abastecimiento y la gestión del agua en el país hebreo, realizó una serie de estudios matemáticos y análisis vía satélite mediante los que llevó a la conclusión de qué nubes son las más idóneas para el "bombardeo", y cómo se desplazarán en las horas siguientes según los vientos y corrientes que existan en ese momento. El proyecto para crear lluvia artificial se llamaba Geshem, lluvia en hebreo.

Consiste físicamente en que la fusión del yoduro con el agua provoca que este elemento ascienda a la parte superior de la nube, lo que hace que las gotas de agua se condensen, pesen más y, como consecuencia, de la gravedad, caigan en mayor cantidad.

## Anexo 6. Crear lluvia artificial desde el avión.

Este tipo de fenómeno meteorológico se ha conseguido lanzando desde tierra o por avión cartuchos con yoduro de plata a las nubes. El yoduro de plata es un catalizador que al contactar con las nubes genera una reacción química que libera el hidrógeno y éste, junto al oxígeno de la atmósfera, forma agua. Quienes lo han utilizado, como sucedió durante los Juegos Olímpicos de China este método es inocuo, ya que no altera la composición del agua.

En total, durante los JJ.OO la lluvia artificial supuso el 11% de las precipitaciones caídas gracias a 7.000 cañones y 5.000 lanzacohetes para lanzar el yoduro. Pekín aumentó en 2006 las reservas de sus embalses en 29 millones de metros cúbicos gracias a la lluvia artificial, según datos de la Oficina de Manipulación del Tiempo local.

Sin embargo, la organización ecologista Greenpeace, considera que aunque no es excesivamente dañina para el medio ambiente, "es una solución demasiado a corto plazo para solucionar los problemas ecológicos". Bien es cierto, que el yoduro de plata es una toxina y por tanto puede ser perjudicial para la salud, pero en cantidades pequeñas no supone una amenaza.

En este mismo sentido, la Comunidad de Madrid se planteó en 2006 la posibilidad

de bombardear las nubes en el embalse de El Atazar con yoduro de plata para incrementar las lluvias, siguiendo este método pionero en el mundo que se hace en Israel desde hace 30 años y que permite aumentar hasta en un 19% el volumen de agua de las precipitaciones.



## **Anexo 7. Resumen Extenso enviado al XXI Congreso Mexicano de Meteorología - VI Congreso Internacional de Meteorología, Mérida, Yucatán, Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C., 2012.**

### **Estado del arte de la ingeniería climática**

**Ricardo Prieto González<sup>1</sup>, Olivia Rodríguez López<sup>1</sup>, Luis Alberto Sánchez Hernández<sup>2</sup>, María del Rosario Ayala Enríquez<sup>2</sup>, Maricela Hernández Acevedo<sup>2</sup>**

rprieto@tlaloc.imta.mx, olivia\_rodriguez@tlaloc.imta.mx

<sup>1</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México, <sup>2</sup>Her-ros Consultores, S.C.

### **Resumen**

Debido a la variabilidad que tienen las condiciones meteorológicas y la gran dependencia de ellas de los recursos hídricos que son utilizados para consumo y uso humano, agricultura, ganadería e industria, los seres humanos han intentado realizar esfuerzos para modificar el tiempo y clima de forma tal que puedan obtener beneficios para la realización de sus actividades. Uno de los descubrimientos más importantes que dieron pie al desarrollo de tecnologías de modificación artificial del tiempo y del clima fue el realizado en los años 1940s (Brownlee, 1960), donde se encontró 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.

El presente trabajo tiene como objetivo el conocer y evaluar diversas tecnologías en materia de ingeniería climática para la modificación artificial de la atmósfera en el ámbito internacional.

La metodología para el cumplimiento del objetivo consiste en la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima, realizando la revisión de algunas de las técnicas como el sembrado de nubes, electrificación de la atmósfera, captura de carbono, entre otros y conocer el punto de vista de expertos e instituciones relacionadas en el tema como por ejemplo el Panel Intergubernamental de Cambio de Climático (IPCC) y Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Como resultado de este trabajo se desarrolló un sitio web para la recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima. Su administración es como un gestor de contenidos en el cual se va armando de manera dinámica, cuenta con el uso de contraseña para adjuntar archivos y, según sea, el caso también para restringir el acceso a un archivo. Los documentos y videos adjuntados son ordenados dependiendo el método, la categoría y la fecha, facilitando su acceso, incluso dentro del listado de archivos se pueden ordenar por fechas o nombre de los documentos de manera ascendente o descendente.

Este sitio web facilitará la difusión y la consulta de la de información relacionada a la ingeniería climática, recopilando diversas opiniones y evaluaciones de expertos sobre el tema. El usuario de la información contará con una diversidad de puntos de vista sobre las distintas tecnologías de la modificación artificial del clima, y conocerá los conceptos generales de las ciencias atmosféricas que están involucradas en diversas técnicas propuestas para la modificación artificial del tiempo atmosférico y el clima.

## Objetivo

Conocer y evaluar las diversas tecnologías en materia de ingeniería climática para la modificación artificial de la atmósfera en el ámbito internacional.

## Introducción

Desde hace miles de años, los seres humanos han realizado 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 a fines de 1940 con el descubrimiento de que las gotas sobre-enfriadas 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 una gran cantidad de proyectos de modificación artificial del tiempo en particular en regiones áridas y semiáridas, donde la falta de suficientes recursos hídricos limita su capacidad para satisfacer la demanda de alimentos, fibras y energía.

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. Se ha demostrado en laboratorio la posibilidad de influir en las micro-estructuras 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. La complejidad y variabilidad de las nubes hace sumamente difícil comprender y detectar los efectos de los intentos de modificarlas artificialmente.

El empleo de nuevas series de datos unido a modelos numéricos de nubes cada vez más refinados contribuye a poner a prueba diversas hipótesis en materia de modificación artificial del tiempo. 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.

Los programas operativos que se ejecuten, deben tener plena conciencia de los riesgos inherentes a una tecnología no totalmente desarrollada; intentando detectar y minimizar los efectos adversos con proyectos adecuadamente diseñados y ejecutados. Así, se alienta a los que tienen a su cargo la gestión de la modificación artificial del tiempo a que añadan metodologías de evaluación científicamente aceptadas que deben ser realizadas por expertos independientes de los ejecutores prácticos.

## **Metodología**

La metodología consiste en la búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima, realizando la revisión de algunas de las técnicas como el sembrado de nubes, electrificación de la atmósfera, captura de carbono, entre otros y conocer el punto de vista de expertos e instituciones relacionadas en el tema como por ejemplo el Panel Intergubernamental de Cambio de Climático (IPCC) y Organización Meteorológica Mundial (OMM).

### Revisión Bibliográfica

En la Edad Media, se llevaban a cabo diferentes ejercicios mágicos destinados a controlar los elementos naturales, como la lluvia, las tormentas o el viento. De igual modo las rogativas al panteón cristiano fueron numerosas. En España no han desaparecido las rogativas.

En el siglo XVI las prácticas mágicas no cesaban.

Posteriormente en el siglo XIX se llevaron actuaciones en las que mediante redobles de tambor, cañonazos y el lanzamiento de explosivos, se pensaba que podrían producir lluvia. No fue hasta la llegada tecnológica del siglo XX que los intentos serios para modificar el clima tuvieron lugar. Se enlistan algunos de ellos (ver Tabla 1):

**Tabla 1.** Intentos para modificar el clima en los siglos XX y XXI.

Emory Leon Chaffee de la Harvard University sembró con arena desde un aeroplano, un frente nuboso en 1924, intentando con ello modificar las precipitaciones (Standler, 2002).

Charles Hatfield, nacido en Kansas, que en los primeros años del siglo XX, ideó una secreta mezcla de 23 productos químicos a los que bautizó con el nombre de *Acelerador de humedad*. Según él, cuando se evaporaba esta mezcla en un lugar, a partir de grandes tanques que la contenían, las nubes experimentaban extrañas metamorfosis y llovía.

El profesor Henry G. Houghton del Massachusetts Institute of Technology, MIT, pulverizó una suspensión higroscópica con intención de hacer desaparecer la niebla. Corría el año 1938. (Standler, 2002)

En noviembre de 1946, los doctores Langmuir y Bernard Vonnegut descubrieron que los cristales de yoduro de plata (AGI) forman, en presencia de vapor de agua, cristales de hielo, en unos experimentos auspiciados por General Electric Research Laboratory. (Standler, 2002)

Los contratos entre General Electric y el Ejército norteamericano, iniciaron proyectos de utilización de yoduro de plata y hielo seco (CO<sub>2</sub>) en Albuquerque, en octubre de 1948 y julio de 1949, creando lluvias sobre Kansas y Nuevo México.

En la década de los 1950s se inició el programa de modificación de huracanes denominado Proyecto Stormfury. El proyecto Stormfury fue abandonado en los años 1980s. (Standler, 2002).

La siembra de nubes se puso de moda en los años 1950-1960s. La Oficina Meteorológica Federal americana puso en marcha el Proyecto Cirrus sobre modificaciones del tiempo y el posible control de los huracanes atlánticos.

En Chile, durante la década de los 1960s. El Ministerio de Agricultura realiza los primeros experimentos, con el Programa *META* (Modificación Experimental del Tiempo Atmosférico). Este Programa se basa en la aplicación de yoduro de plata, aplicado desde una aeronave.

La lucha antigranizo en Aragón se inició, en 1971, en la zona de Gallocanta. En 1973, se cambió el sistema implantado, el método Dessens, basado en las estufas de yoduro de plata disuelto en acetona, sistema que se ha mantenido hasta hoy.

Programa estimulación Artificial de Precipitaciones Cuenca del Cachapoal, temporada 2000.

El 22 noviembre 2006, un avión de la Fuerza Aérea Portuguesa soltó en la atmósfera cristales de cloruro de calcio y yoduro de plata sobre la región de Benavente y Coruche. (20 minutos, 2005)

El Gobierno chino comentó que consideraba ejecutar este tipo de bombardeos sobre Beijing los días previos al inicio de los Juegos Olímpicos (8 de agosto de 2008), como una forma de garantizar que no lloverá en la jornada inaugural.

## Lluvia Artificial con Rayos Láser

El calentamiento global y el agotamiento del ozono estratosférico tiene demostrado que las actividades humanas pueden alterar significativamente el clima de la Tierra.

Investigadores europeos han demostrado por primera vez que los láseres pueden utilizarse para formar nubes y provocar la caída de gotas de lluvia. Mediante el uso de un láser gigantesco han logrado crear gotas de agua en el aire. En esta investigación reciente, dirigida por el Dr. Jérôme Kasparian, de la Universidad de Ginebra, Suiza y Físico del laboratorio de espectrometría iónica y biología molecular, usó un instrumento denominado *Téramobile* que consiste en emitir impulsos de láseres extremadamente potentes y ultracortos para generar filamentos ionizados autoguiados.

Para comprobar si esta técnica puede inducir gotas de lluvia, los investigadores han disparado, en condiciones controladas en el laboratorio, un láser de alta potencia en una cámara de aire altamente saturada a 24 grados Celsius bajo cero. La cámara fue iluminada con un segundo láser de baja potencia, pronto se formaron nubes lineales. El láser generó nubes por extracción de electrones de los átomos en el aire, que favorecen la formación de radicales hidroxilo. Estos convierten los dióxidos de sulfuro y nitrógeno en el aire en partículas que actúan como semillas para cultivar las gotas de agua. Aun así, las gotas fueron demasiado pequeñas para provocar una verdadera precipitación. Después del experimento, las condiciones de humedad en una temperatura tan extremadamente baja aumentaron un 50% y dentro de las nubes el volumen de agua condensada se había incrementado cien veces.

Después, los científicos destinaron impulsos del láser *Téramobile* directamente hacia el cielo sobre la capital alemana, Berlín, en un momento en el que se registraba una humedad cercana al 90%. A continuación, se tomaron medidas mediante Lidar ('light detection and ranging') para observar la concentración de aerosoles en la atmósfera y detectar alteraciones en las condiciones meteorológicas. En consecuencia, la visibilidad empeoró, la humedad subió al 93% y la concentración de aerosoles de agua aumentó. No se observó ninguna nube a simple vista, pero los investigadores pudieron comprobar que las gotas se estaban formando. Estos investigadores han demostrado experimentalmente que se puede favorecer la condensación de agua por medio de filamentos autoguiados generados por impulsos de láser ultracortos.

Sin embargo, otros científicos han mostrado sus dudas acerca de la posibilidad de que esta técnica termine siendo útil para provocar la lluvia. John Latham, del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de Boulder, EEUU, quien califica a la nueva metodología de "inteligente", pero cree que "la producción de lluvia requiere muchas condiciones". Thomas Leisner, físico atmosférico del Instituto de Tecnología Karlsruhe (Alemania)

mantiene una actitud escéptica acerca de la viabilidad futura de esta técnica para este propósito. Pero también afirma que esta tecnología podrá tener otros usos. Explica que los investigadores podrían calibrar la relación entre la cantidad de condensación producida por el láser y las condiciones atmosféricas imperantes: “Podrían utilizar la cantidad de condensación producida por el láser como una medida de la saturación del agua y así mejorar las actuales técnicas de pronóstico de lluvia”.

### Cañones Antigranizo

Los fundamentos de los cañones antigranizo están basados en accionar disparos desde la superficie terrestre a la atmósfera en dirección vertical, produciendo una onda sonora que asciende en el aire. La hipótesis de su funcionamiento para reducir la producción de granizo es esencialmente desestabilizar la formación de los cristales de hielo a través de las ondas sonoras.

La Organización Meteorológica Mundial en su declaración sobre la situación de la modificación artificial del tiempo, publicada en 2001 manifiesta que en años recientes han re-emergido el uso de cañones antigranizo, y que no existe una base científica o una hipótesis creíble que soporte estas actividades. Debido a la complejidad de los procesos atmosféricos de escala microscópica que se dan dentro de las nubes, las hipótesis que maneja la tecnología antigranizo de los cañones son difíciles de ser comprobadas en su relación causa-efecto en la naturaleza. Con el grado tecnológico que se tiene en cuanto a instrumentación de medición atmosférica, esta tecnología no se puede ni verificar, ni descartar con métodos experimentales in situ. Sólo se pueden tener estudios estadísticos. En el caso de que exista una posible desestabilización de la formación de los cristales de hielo (la cual no ha sido verificada), sólo podría funcionar para sistemas nubosos que puedan ser susceptibles de desestabilización. Adicionalmente no existe la comprobación de que esa desestabilización no se extienda a la formación de gotas de lluvia.

### Tecnología de Electrificación Local de la Atmósfera para la Producción de Lluvias

Durante el año 2011 tuvieron lugar dos seminarios sobre la tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

En diversos estados de la República Mexicana se ha utilizado la tecnología de electrificación local de la atmósfera para producir condiciones favorables de precipitación; sin embargo, aún no hay una seguridad sobre la utilidad de las antenas ionizadoras para producir lluvia. La hipótesis de trabajo detrás de esta técnica es la siguiente: “los iones producidos artificialmente en la atmósfera, desarrollan aerosoles que servirán como núcleos de condensación para generar lluvia”.

En estos seminarios se discutió la técnica de electrificación local de la atmósfera y su posible relación causa-efecto con la producción de lluvias en regiones semiáridas del territorio nacional. Esta discusión ayudó a explorar si esta técnica tiene elementos científicos suficientes que sustenten su hipótesis de producir lluvias en nuestro país. A estos dos seminarios se convocó a personal con formación académica y experiencia profesional en las áreas de Meteorología, Clima, Física, Física de la Atmósfera, Física de Nubes y Electricidad, asistiendo personal adscrito a diversas instituciones tales como la Universidad Nacional Autónoma de México, la Comisión Federal de Electricidad, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Estos seminarios fueron impartidos por el Dr. Víctor Manuel Ramos González de la Compañía Soluciones Climáticas Avanzadas, S.A. de C.V., quien realizó las ponencias que explican su punto de vista sobre la teoría de la electrificación local de la atmósfera y los trabajos realizados con el fin de la producción de lluvias con esta tecnología, discutiendo distintas experiencias, entre otras, el caso de trabajos realizados por la compañía en la que trabaja en la isla de Cuba durante el periodo 2005-2008.

A partir de las discusiones realizadas en estos seminarios sobre la tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias, es necesario responder algunas de las principales dudas planteadas por los asistentes. Sin embargo, la mayor parte de las inquietudes requieren explorar áreas del conocimiento que se encuentran en desarrollo dentro de la Física de la atmósfera, la Física de nubes y el electromagnetismo, lo cual consideramos es un esfuerzo de largo plazo, que además no debe de estar orientado a esta tecnología en sí, sino a un avance general del conocimiento científico en estas áreas, involucrando no únicamente a una institución, si no a un grupo de instituciones nacionales y extranjeras.

## Resultados

Como resultado de este trabajo se desarrolló un sitio web para la recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima. Su administración es como un gestor de contenidos en el cual se va armando de manera dinámica, cuenta con el uso de contraseña para adjuntar archivos y, según sea, el caso también para restringir el acceso a un archivo. Los documentos y videos adjuntados son ordenados dependiendo el método, la categoría y la fecha, facilitando su acceso, incluso dentro del listado de archivos se pueden ordenar por fechas o nombre de los documentos de manera ascendente o descendente.

Este sitio web facilitará la difusión y la consulta de la de información relacionada a la ingeniería climática, recopilando diversas opiniones y evaluaciones de expertos sobre el tema. El usuario de la información contará con una diversidad de puntos de vista sobre las

distintas tecnologías de la modificación artificial del clima, y conocerá los conceptos generales de las ciencias atmosféricas que están involucradas en diversas técnicas propuestas para la modificación artificial del tiempo atmosférico y el clima.

La estructura del sitio web del proyecto se muestra en el mapa de navegación del sitio Figura 1.

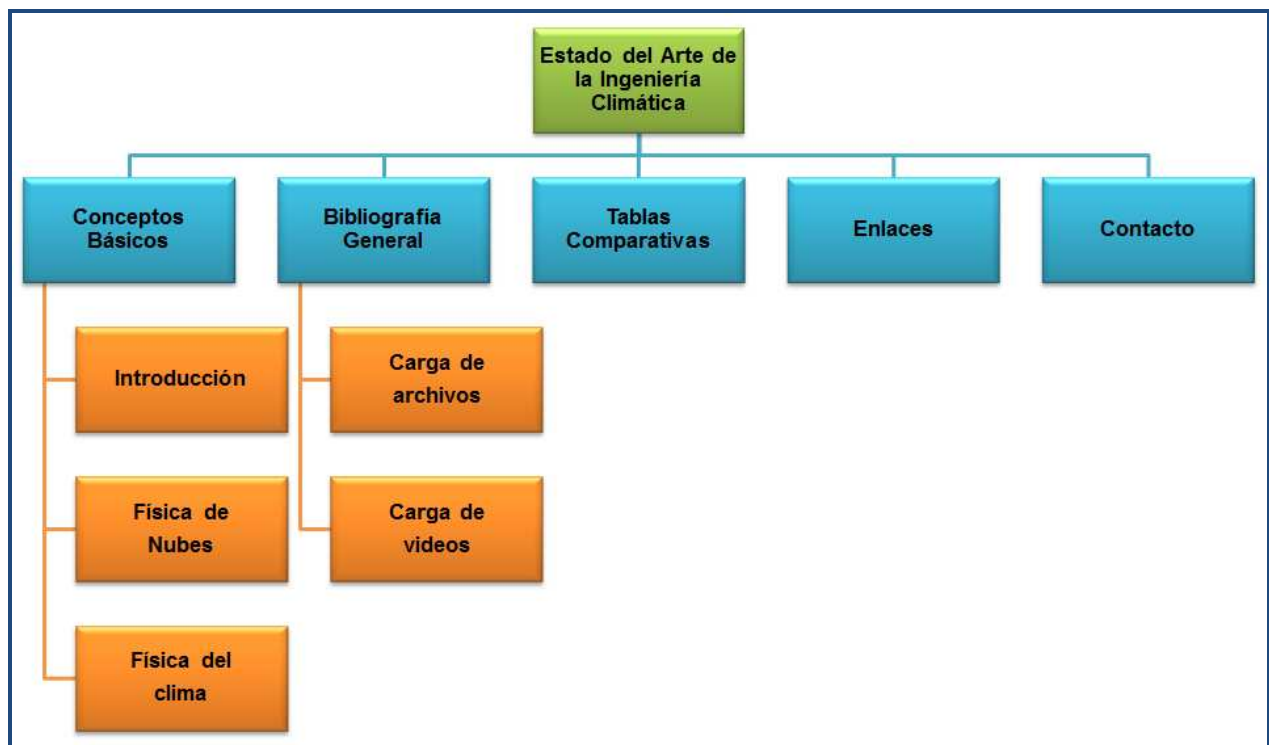


Figura 1. Mapa de navegación del sitio web del proyecto.

El sitio cuenta con los siguientes módulos:

1. **Conceptos Básicos:** consta de un submenú que contiene Introducción, Física de Nubes y Física del Clima.
2. **Bibliografía General:** se visualizan los documentos y vídeos contenidos en el sitio web en forma clasificada, así como las opciones de carga de estos archivos, carga de archivos y carga de vídeos.
3. **Tablas Comparativas:** muestra información sobre las diferentes tecnologías aplicadas en la Ingeniería Climática haciendo, como su nombre lo indica, comparación de dicha información en forma de tablas (Figura 2 y Figura 3)
- Enlaces:** es la sección dedicada a los enlaces de interés enfocados en éste tema.
4. **Contacto:** incluye los datos de contacto tanto del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y los datos de los responsables del proyecto.

El sitio web fue diseñado para que funcione como un gestor de contenido en la sección correspondiente a la visualización de archivos (Bibliografía General). Esto se refiere a que se pueden realizar acciones administrativas como:

1. Agregar o modificar métodos y categorías.
2. Modificar contraseña de administrador y subida de archivos.

Mitigación del cambio climático y la reducción atmosférica del CO <sub>2</sub>			
(Extraído de Adrew Glikson, 2010, <i>Geoengineering the Climate? A Southern Hemisphere perspective, A Symposium organised by the National Committee for Earth System Science .Climate Change Mitigation And Atmospheric CO2 Draw-Dwon</i> , pag. 42)			
Método	Supuestas Ventajas	Problemas	Referencias
Inyecciones de SO <sub>2</sub>	Aplicación rápida y económica.	Tiempo de residencia atmosférica de pocos años; acidificación de los océanos; retraso de precipitaciones y monzones.	<a href="http://www.essc.psu.edu/essc_web/seminars/fall12006/WilevSci06.pdf">http://www.essc.psu.edu/essc_web/seminars/fall12006/WilevSci06.pdf</a> <a href="http://www.atmos-chem-phys.net/8/3881/2008/acp-8-3881-2008.pdf">http://www.atmos-chem-phys.net/8/3881/2008/acp-8-3881-2008.pdf</a>
Sombrillas y espejos espaciales	Aplicación rápida. No hay un efecto directo sobre la química del océano.	Tiempo limitado de residencia en el espacio. Posicionamiento incierto en el espacio. No reduce la acidificación en curso de los océanos por las emisiones de carbono.	<a href="http://physicsworld.com/cvs/article/news/2009/sep/01/geoengineering-could-be-needed-to-halt-climate-change">http://physicsworld.com/cvs/article/news/2009/sep/01/geoengineering-could-be-needed-to-halt-climate-change</a> <a href="http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/4762720.stm">http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/4762720.stm</a> <a href="http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/un-cientifico-propone-construir-una-sombrilla-especial-contr-a-calentamiento-global">http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/un-cientifico-propone-construir-una-sombrilla-especial-contr-a-calentamiento-global</a>
Fertilización con limadura de hierro en el océano mejorando el fitoplancton	Reducción de CO <sub>2</sub>	No hay evidencias de que el fitoplancton muerto no libera CO <sub>2</sub> de vuelta a la superficie del océano	<a href="http://www.laonadigital.com/laonda/laonda/451/87.htm">http://www.laonadigital.com/laonda/laonda/451/87.htm</a> <a href="http://news.bbc.co.uk/1/spanish/science/newsid_7961000/7961165.stm">http://news.bbc.co.uk/1/spanish/science/newsid_7961000/7961165.stm</a> <a href="http://www.ocean-der-zukunft.de/fileadmin/user_upload/pdf/ocean-iron-fertilization.pdf">http://www.ocean-der-zukunft.de/fileadmin/user_upload/pdf/ocean-iron-fertilization.pdf</a>
Sistema de tubería para el océano, para la circulación vertical de agua fría mejorando la reducción de CO <sub>2</sub>	Reducción de CO <sub>2</sub>	No hay pruebas de que el agua fría que circula de nuevo a las profundidades del océano impida al CO <sub>2</sub> regresar a la superficie.	*target= blank <a href="http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7014503.stm">http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7014503.stm</a> <a href="http://www.json21.es/2007/10/09/enfriar-el-oceno/">http://www.json21.es/2007/10/09/enfriar-el-oceno/</a>
"Arboles de sodio" – NaOH líquido en un sistema de tuberías retirando CO <sub>2</sub> a Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , separación y entierro de CO <sub>2</sub>	Reducción de CO <sub>2</sub> estimado por Hansen en el 2008 en ~ \$ 300 por tonelada de CO <sub>2</sub>	Eficiencia no probada; necesaria para enterrar CO <sub>2</sub> ; costo de miles de millones (difícilmente no mas que los actuales gastos militares)	<a href="http://news.bbc.co.uk/1/spanish/science/newsid_6577000/6577267.stm">http://news.bbc.co.uk/1/spanish/science/newsid_6577000/6577267.stm</a> <a href="http://www.nature.com/news/2008/081217/full/081217a.html">http://www.nature.com/news/2008/081217/full/081217a.html</a>
Enterrar/Biochar Carbono en el suelo	Medio eficaz de controlar el ciclo del carbono (plantas + el intercambio del suelo con la atmosfera mas de 100 GtC por año)	Requiere un gran esfuerzo internacional por una fuerza de trabajo de millones de granjeros.	<a href="http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/03/120321_secuestro_carbono_mit_arn.shtml">http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/03/120321_secuestro_carbono_mit_arn.shtml</a> <a href="http://www.youtube.com/watch?v=BPG505kR7A">http://www.youtube.com/watch?v=BPG505kR7A</a> <a href="http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61770102.pdf">http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61770102.pdf</a> <a href="http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=67&amp;Itemid=7&amp;limit=1&amp;limitstart=1">http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=67&amp;Itemid=7&amp;limit=1&amp;limitstart=1</a>
Reducción de CO <sub>2</sub> Serpentina	Reducción de CO <sub>2</sub>	Posible escala desconocida	<a href="http://uocommons.uoc.edu/pdf/bitstream/2099.1/3137/1/42649-1.pdf">http://uocommons.uoc.edu/pdf/bitstream/2099.1/3137/1/42649-1.pdf</a> <a href="http://www.pwplentrcs.com/ccs/sto/nc/min/directsequestration.html">http://www.pwplentrcs.com/ccs/sto/nc/min/directsequestration.html</a> <a href="http://josearachaqa.limdo.com/captacion-y-almacenamiento-de-co2/carbonataci%C3%B3n/carbonataci%C3%B3n-mineral/">http://josearachaqa.limdo.com/captacion-y-almacenamiento-de-co2/carbonataci%C3%B3n/carbonataci%C3%B3n-mineral/</a>

Figura 2. Tablas Comparativas "Mitigación del cambio climático y la reducción atmosférica del CO<sub>2</sub>" del sitio web del proyecto.

Tecnologías CDR Seleccionadas				
(Extraído de United States Government Accountability Office, 2011. <i>Climate engineering. Technical status, future directions, and potential responses.</i> pp. 15-19)				
Tecnología	Madurez	Efectividad Potencial	Factores de Costo	Consecuencias Potenciales
<b>Captura aérea directa de CO2 con reducción geológica</b>	<b>Baja (TRL 3):</b> * Principios básicos entendidos y reportados. * Concepto de sistema formulado. * Prueba experimental de concepto demostrado con una unidad prototipo en un entorno de laboratorio. * Modelos de inyecciones de CO2 y el transporte desarrollado y utilizado para el análisis de riesgos y para la simulación de destino del CO2 inyectado. * No se han demostrado los componentes básicos tecnológicos trabajando juntos. * No hay planes o prototipos a gran escala para la implementación industrial. * Reducción geológica de CO2 es mas madura pero practicada en una escala para afectar potencialmente el clima.	<b>Sin clasificar:</b> * No "límite obvio" para la cantidad de reducción de emisiones de CO2 para el año 2100. * En teoría podría contrarrestar todas las emisiones globales de CO2 antropogénicas a las 33 gigatoneladas por año. * Quitándole gran uso de la energía: Aumento neto de las emisiones de CO2 si utiliza combustibles fósiles (la electricidad proveniente de combustibles fósiles libera mas CO2 que lo que elimina una unidad de captura de aire). * Incertidumbre en torno a la escalabilidad técnica.	* La viabilidad puede depender de la naturaleza y el alcance de un mercado de carbono. * Los requerimientos de procesos de energía para las ineficientes tecnologías de la actualidad para separar directamente el CO2 de aire en la concentración muy diluida. * Transporte y logística para la reducción de CO2 capturado. * Construcción y gestión de sitios geológicos de reducción de CO2 (ej. inyección de CO2, medición, control y verificación). * Las estimaciones variaron en gran medida en la literatura científica: \$27 a \$630 o mas por tonelada de CO2 eliminada (excluyendo el transporte, la reducción y otros gastos).	* Aspectos asociados con el manejo de procesos materiales o químicos. * Puede tener riesgos tales como reducción de potencial para el CO2 para escapar del almacenamiento subterráneo en el caso de fractura o fisura del deposito de acumulación de presión.
<b>Bioenergía con captura y reducción de CO2</b>	<b>Baja (TRL 2):</b> * Principios básicos entendidos y reportados. * Concepto de sistema formulado. * Sin la demostración experimental de la prueba de concepto (No hay experimento de laboratorio que indiquen potencial de reducción de emisiones de CO2). * Tecnología emergente aprovecha lo que se conoce sobre la captura y reducción de CO2 geológico.	<b>Bajo a medio:</b> * Capacidad máxima para reducir el CO2 atmosférico: 50-150 ppm para 2100. * Negativo neto de carbono bajo condiciones ideales. * Depende de la productividad de la planta y el área de tierra cultivada.	* La viabilidad puede depender de la naturaleza y el alcance de un mercado de carbono. * Valor de la tierra en otros usos. * Zona de tierra potencialmente grande para el cultivo y la cosecha de la biomasa. * Tipo de materia prima de biomasa(ej. Switchgrass [Panicum virgatum]). * Requerimientos de procesos de energía para la producción de bioenergía (ej. pirólisis). * Construcción y gestión de sitios geológicos de reducción de CO2 (ej. inyección de CO2, medición, control y verificación). * Transporte y logística para la reducción de CO2 capturado. * Las estimaciones variaron en gran medida en la literatura científica: \$150 a \$500 por tonelada de CO2 eliminada (excluyendo el transporte, la reducción y otros gastos).	* Ventajas y desventajas del uso potencial de la tierra; impactos relacionados en el precio de la comida, agua, recursos, fertilizantes. * Riesgos en reducción de CO2 mismos como la captura directa de aire.
<b>Métodos del carbón vegetal y biomasa.</b>	<b>Baja (TRL 2):</b> * Principios básicos entendidos y reportados. * Concepto de sistema formulado. * Prueba de concepto se muestra en los resultados del modelo y experimentales que demuestran capacidad de captura de CO2, pero incertidumbre en los aspectos de reducción de CO2. * No se practica en una escala que afecte el clima. No hay planes o prototipos para la	<b>Bajo:</b> * Capacidad máxima para reducir el CO2 atmosférico: 10-50 ppm para 2100. * Máximo anual de la reducción sustentable: 1-2 gigatoneladas de CO2-C equivalentes de CO2, CH4 y N2O. * Negativo neto de carbono bajo condiciones ideales (comparable a la bioenergía con captura y reducción de CO2).	* La viabilidad puede depender de la naturaleza y el alcance de un mercado de carbono. * Resultados de la fertilidad del suelo. * Tipo de materia prima de Pirólisis y factores relacionados. * Las estimaciones variaron en gran medida en la literatura científica: \$2 a \$62 por tonelada de CO2 eliminada.	* Ventajas y desventajas del uso potencial de la tierra. * Inciertos efectos a largo plazo sobre la tierra. * Salud y seguridad en el manejo de pirólisis y carbón vegetal. * Beneficios locales al mejorar el rendimiento de los cultivos del suelo.

Figura 3. Tablas Comparativas "Tecnologías CDR (Carbon Dioxide Removal) Seleccionadas" del sitio web del proyecto.

## Conclusiones

Al finalizar la búsqueda y recopilación de la información referente a la modificación artificial del tiempo y clima, se puede concluir que es un tema de bastante complejidad ya que científicamente es difícil comprobar su funcionalidad bajo las condiciones existentes en el ambiente, regularmente se deben de alterar para comprobarlas.

En general en el mundo se han hecho una gran cantidad de intentos por tratar de modificar las condiciones atmosféricas mostrando sus resultados para uso del público en



general. Sin embargo en México se han aplicado algunas de estas opciones sin mostrar resultados convincentes para los expertos en el tema.

Un factor de importancia es el considerar que pueden existir consecuencias potenciales adversas al uso de las tecnologías de modificación atmosférica, por ello es preciso el tener un mayor conocimiento de los fenómenos que ocurren en la atmósfera desde la escala microscópica hasta la escala global y de cómo pueden verse afectados por la intervención humana.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo recibido de Jorge Armando Ibarra Romero y Sinué Benjamín Bravo Ramírez para la realización de este trabajo.

### Bibliografía

- 20minutos.es. (3 Junio 2005) *Investigadores portugueses provocan lluvia con productos químicos.* <http://www.20minutos.es/noticia/29027/0/lluvia/provocar/portugueses/> (Mayo, 2012)
- A BRIDGED FINAL REPORT OF THE FIFTY-THIRD SESSION OF THE EXECUTIVE COUNCIL, *WMO STATEMENT ON THE STATUS OF WEATHER MODIFICATION*, pp. 99
- Actual y Curioso. (13 Mayo 2010) *Lluvia artificial con rayos láser.* <http://actualcurioso.blogspot.mx/2010/05/lluvia-artificial-con-rayos-laser.html> (Mayo, 2012)
- Agua en Bolivia. [http://www.aquabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_rojo/TC-159.htm](http://www.aquabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_rojo/TC-159.htm) (Mayo, 2012)
- ATIÉNZAR RIVERO, Enrique. (1999) *Enigmas de la lluvia provocada.* <http://www.sld.cu/print.php?idv=2894> (Mayo, 2012)
- Blog de ecología. (22 Enero 2011) *Crean lluvia artificial usando rayos láser.* <http://www.ecologiablog.com.ar/2011/01/crean-lluvia-artificial-usando-rayos.html> (Mayo, 2012)
- BROWNLEE, K. A. Statistical Evaluation of Cloud Seeding Operations, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 55, No. 291 (Sep., 1960), pp. 446-453
- Cortes de Aragón. [http://www.cortesaragon.es/bases%5Cdisca2.nsf/\(ID\)/84F82E7D4D5F2419C1256D72003D1F51?OpenDocument](http://www.cortesaragon.es/bases%5Cdisca2.nsf/(ID)/84F82E7D4D5F2419C1256D72003D1F51?OpenDocument) (Mayo, 2012)
- Daily Mail Reporter. (3 Enero 2011) *Have scientists discovered how to create downpours in the desert?* <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1343470/Have-scientists-discovered-create-downpours-desert.html#ixzz1A0oZQDtZ> (2012)

- El Comercio.pe. (7 Mayo 2010) *Los rayos láser son capaces de formar nubes y producir lluvia.* <http://elcomercio.pe/tecnologia/473881/noticia-rayos-laser-son-capaces-formar-nubes-producir-lluvia> (Mayo, 2012)
- El Universo. (21 Abril 2007) *Científicos chinos le apuestan a provocar lluvia y nieve artificial.* <http://www.eluniverso.com/2007/04/21/0001/1064/A2F8F9D848DD4F4FBF0502D244281139.html> (Mayo, 2012)
- GINÉS. (2 Mayo 2012) *Ya es posible crear lluvia artificial utilizando rayos láser.* <http://www.madreciencia.es/ya-es-posible-crear-lluvia-artificial-utilizando-rayos-laser/> (Mayo, 2012)
- GONZALO JIMÉNEZ, Rafael. (2011) *XVI. - Dominio mágico de la lluvia, el sol y el viento.* <http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpyuVplpFlrVxIEZZR.php> (Mayo, 2012)
- IBÁÑEZ, Juan José. (29 Febrero 2012) *La lluvia artificial y sus impactos ambientales.* <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/02/29/140272> (Mayo, 2012)
- Imprescindibles de la ciencia. <http://www.imprescindiblesdelaciencia.es/?p=520> (Mayo, 2012)
- Infoclima. <http://www.infoclima.com.ar/servicios/noticias.asp?id=178> (Mayo, 2012)
- MILLER, Max. (28 Agosto 2010) *Control the Weather.* <http://bigthink.com/ideas/22978> (Mayo, 2012)
- Nature. <http://www.nature.com/nphoton/index.html> (Mayo, 2012)
- PALACIO PIRE, Ana. (2009) *Provocar lluvia artificial, solución contra el calentamiento global.* <http://www.mundo-geo.es/green-living/provocar-lluvia-artificial-solucion-contra-el-calentamiento-global> (Mayo, 2012)
- SALLEH, Anna. (28 Noviembre 2007) *Nuevos intentos en la tecnología de producción de lluvia.* <http://axxon.com.ar/not/179/c-1790039.htm> (Mayo, 2012)
- SANZ, Elena. (05 Mayo 2010) *Crean lluvia artificial usando rayos láser.* <http://www.muyinteresante.es/consiguen-lluvia-artificial-usando-rayos-laser> (Mayo, 2012)
- STANDLER, Ronald B. (2002) *History and Problems in Weather Modification.* (Revisión 2 Enero 2003) <http://www.rbs2.com/w2.htm> (Mayo, 2012)
- Tiempo. (3 Enero 2011) *Los científicos han descubierto cómo crear lluvias en el desierto.* <http://foro.tiempo.com/los-cientificos-han-descubierto-como-crear-lluvias-en-el-desierto-read-mo-ht-t128218.0.html> (Mayo, 2012)
- TOBALINA, Belén. (21 Enero 2011) *La lluvia artificial en entredicho.* <http://www.larazon.es/noticia/3514-la-lluvia-artificial-en-entredicho> (Mayo, 2012)
- Universidad de Ginebra. (4 Mayo 2010) *Un láser para modular el tiempo.* <http://www.unige.ch/communication/archives/2010/laser.html> (Mayo, 2012)
- Web Mac. <http://web.mac.com/buhogris/iWeb/Yankoblog/B18FB135-B423-4717-A0F4-EE46376BCEC4/8CDBF2F7-C9E2-4E76-8E36-99EDAA9B927E.html> (Mayo, 2012)

## Anexo 8. Presentación realizada en el XXI Congreso Mexicano de Meteorología - VI Congreso Internacional de Meteorología, Mérida, Yucatán, Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C., 2012.

“Estado del Arte de la Ingeniería Climática”.



## Introducción

Desde hace miles de años, los seres humanos han realizado esfuerzos para modificar el tiempo y el clima.

La tecnología moderna de modificación artificial del tiempo se remonta a los años 1940s. A lo largo de más de sesenta 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.



2

## Objetivo

Conocer y evaluar las diversas tecnologías en materia de ingeniería climática para la modificación artificial de la atmósfera en el ámbito internacional.

Fomentar la discusión sobre las posibles ventajas y desventajas de financiar y/o implementar técnicas de geoingeniería para la modificación artificial de la atmósfera.

3

## Metodología

- Búsqueda y recopilación de información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima.
- Revisión de algunas técnicas.
- Conocer el punto de vista de expertos e instituciones.

4

## Algunos intentos para modificar la atmósfera en el siglo XX

Emory Leon Chaffee de la Harvard University sembró con arena desde un aeroplano, un frente nuboso en 1924, intentando con ello modificar las precipitaciones.

Charles Hatfield en los primeros años del siglo XX, ideó una secreta mezcla de 23 productos químicos a los que bautizó con el nombre de Acelerador de humedad. Según él, cuando se evaporaba esta mezcla en un lugar, a partir de grandes tanques que la contenían, las nubes experimentaban extrañas metamorfosis y llovía.

Prof. Henry G. Houghton del Massachusetts Institute of Technology, pulverizó una suspensión higroscópica con intención de hacer desaparecer la niebla. Corría el año 1938.

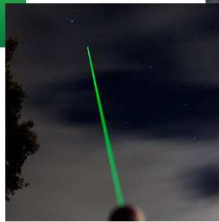
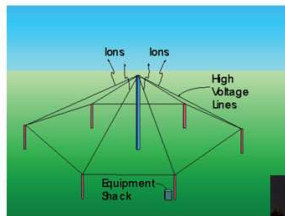
En noviembre de 1946, los doctores Langmuir y Bernard Vonnegut descubrieron que los cristales de yoduro de plata forman, en presencia de vapor de agua, cristales de hielo, en unos experimentos auspiciados por General Electric Research Laboratory.

STANDLER, Ronald B. (2002) *History and Problems in Weather Modification*. (Revisión 2 Enero 2003) <http://www.rbs2.com/w2.htm> (Mayo, 2012)

5

## Técnicas actuales de modificación artificial del tiempo

- Lluvia artificial con rayos láser.
- Cañones antigranizo.
- Tecnología de electrificación local de la atmósfera para la producción de lluvias.



6

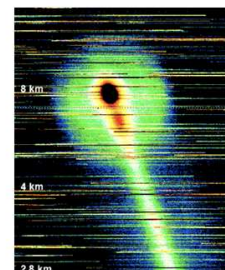
## Lluvia artificial con rayos láser

Investigadores europeos han demostrado que los láseres pueden utilizarse para formar nubes y provocar la caída de gotas de lluvia.

Después de un experimento en condiciones controladas, la humedad en una temperatura extremadamente baja aumentó un 50% y dentro de las nubes el volumen de agua condensada se incrementó 100 veces.

Los científicos destinaron impulsos del láser Téramobile directamente hacia el cielo. Con una humedad cercana al 90%, en consecuencia la humedad subió al 93% .

Otros científicos han mostrado sus dudas acerca de la posibilidad de que esta técnica termine siendo útil.



7

## Cañones antigranizo

Los cañones antigranizo están basados en accionar disparos desde la superficie terrestre a la atmósfera en dirección vertical, produciendo una onda sonora que asciende en el aire.

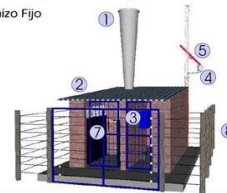
La hipótesis de su funcionamiento para reducir la producción de granizo es esencialmente desestabilizar la formación de los cristales de hielo a través de las ondas sonoras.

La Organización Meteorológica Mundial manifiesta que no existe una base científica o una hipótesis creíble que soporte estas actividades.

Debido a la complejidad de los procesos atmosféricos de escala microscópica, las hipótesis que maneja la tecnología antigranizo son difíciles de ser comprobadas.

Sistema Antigranizo Fijo

- 1 Cañon Antigranizo
- 2 Obra Civil
- 3 Tablero Principal
- 4 Estación Met.
- 5 Panel Solar
- 6 Torna
- 7 Cilindros de Acetileno
- 8 Casco Eléctrico



8

## Electrificación local de la atmósfera

Hipótesis: “los iones producidos artificialmente en la atmósfera, desarrollan aerosoles que servirán como núcleos de condensación para generar lluvia”.

En diversos estados de la República Mexicana se ha utilizado ésta tecnología; sin embargo, aún no hay una seguridad sobre la utilidad de las antenas ionizadoras para producir lluvia.

La mayor parte de las inquietudes que han manifestado expertos nacionales al revisar esta técnica, está relacionada a la necesidad de explorar áreas del conocimiento dentro de la Física de la atmósfera, la Física de nubes y el electromagnetismo.

9

### ARTIFICIAL ATMOSPHERIC IONIZATION: A Potential Window for Weather Modification

**Phillip Kauffman**  
Ionogenics  
8 Coachmen Lane  
Belford, MA 01730

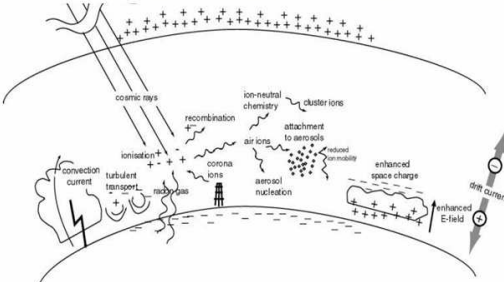
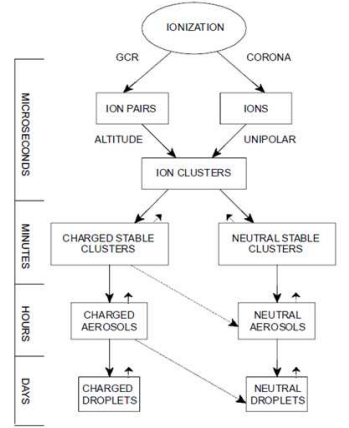
and

**Arquimedes Ruiz-Columbié**  
Active Influence & Scientific Mngt  
8696 Hanger Rd.  
San Angelo, TX 76904

**Abstract:**


Galactic cosmic rays have been positively correlated to the Earth's low cloud cover. It is now evident that cosmic ray ionization is linked to lowering nucleation barriers and promoting early charged particle growth into the Aitken range. There is a substantially high probability that some of the charged particles grow to the 100 nm range and beyond to become CCN. There is also evidence that electrically charged aerosol are more efficiently scavenged by cloud droplets, some of which evaporate producing evaporation aerosol, which are very effective ice formation nuclei.

The assumption is made that artificially generated, corona effect ionization should act in much the same way as cosmic ray ionization, with some differences that might make unipolar corona effect ionization a more powerful catalyzer of cloud microphysical processes and, consequently, climate. There is much further work required to understand the cause and effect relationship between artificial ionization and weather, including electrical, chemical and physical measurements at the nanoparticle level and beyond, as well as mathematical modeling to describe the observed, measured or hypothesized atmospheric phenomena at different levels of artificial ionization, and, hopefully equal levels of cosmic ray ionization.

## Resultados

La información recopilada se está compilando dentro de un sitio web:




11



## El sitio WEB:

Recopila información de las diferentes técnicas de modificación artificial del tiempo atmosférico y del clima.

Facilita la difusión y la consulta de la de información relacionada a la ingeniería climática.

Utiliza un gestor de contenidos y uso de contraseña para adjuntar o para restringir el acceso a un archivo.

12

## Tablas comparativas

### Mitigación del cambio climático y la reducción atmosférica del CO<sub>2</sub>

(Extraído de Adrew Glikson, 2010, *Geoengineering the Climate? A Southern Hemisphere perspective, A Symposium organised by the National Committee for Earth System Science, Climate Change Mitigation And Atmospheric CO<sub>2</sub> Draw-Dwon*, pag. 42)

Método	Supuestas Ventajas	Problemas	Referencias
Inyecciones de SO <sub>2</sub>	Aplicación rápida y económica.	Tiempo de residencia atmosférica de pocos años; acidificación de los océanos; retraso de precipitaciones y mozones.	<a href="http://www.essc.osu.edu/essc_web/seminars/faq/2008/W/icles/Sci06.pdf">http://www.essc.osu.edu/essc_web/seminars/faq/2008/W/icles/Sci06.pdf</a> <a href="http://www.atmos-chem-phys.net/8/3881/2008/acp-8-3881-2008.pdf">http://www.atmos-chem-phys.net/8/3881/2008/acp-8-3881-2008.pdf</a>
Sombrillas y espejos espaciales	Aplicación rápida. No hay un efecto directo sobre la química del océano.	Tiempo limitado de residencia en el espacio. Posicionamiento incierto en el espacio. No reduce la acidificación en curso de los océanos por las emisiones de carbono.	<a href="http://physicsworld.com/cvs/article/news/2009/sep/01/geoengineering-could-be-needed-to-halt-climate-change">http://physicsworld.com/cvs/article/news/2009/sep/01/geoengineering-could-be-needed-to-halt-climate-change</a> <a href="http://www.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/4767720.stm">http://www.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/4767720.stm</a> <a href="http://www.lafecha.net/canales/sciencia/noticias/un-cientifico-propone-construir-una-sombria-la-espacia-contra-el-calentamiento-globa/">http://www.lafecha.net/canales/sciencia/noticias/un-cientifico-propone-construir-una-sombria-la-espacia-contra-el-calentamiento-globa/</a>
Fertilización con limadura de hierro en el océano mejorando el fitoplancton	Reducción de CO <sub>2</sub>	No hay evidencias de que el fitoplancton muero no libera CO <sub>2</sub> de vuelta a la superficie del océano	<a href="http://www.laondigital.com/laonda/laonda/454_82.htm">http://www.laondigital.com/laonda/laonda/454_82.htm</a> <a href="http://news.bbc.co.uk/1/health/science/news/796000/796165.stm">http://news.bbc.co.uk/1/health/science/news/796000/796165.stm</a> <a href="http://www.ocean-dep-quick.de/fileadmin/user_upload/pdf/ocean-iron-fertilization.pdf">http://www.ocean-dep-quick.de/fileadmin/user_upload/pdf/ocean-iron-fertilization.pdf</a>
Sistema de tubería para el océano, para la circulación vertical de agua fría mejorando la reducción de CO <sub>2</sub>	Reducción de CO <sub>2</sub>	No hay pruebas de que el agua fría que circula de nuevo a las profundidades del océano impulse al CO <sub>2</sub> regresar a la superficie.	*target= blank <a href="http://news.bbc.co.uk/1/health/science/news/7704503.stm">http://news.bbc.co.uk/1/health/science/news/7704503.stm</a> <a href="http://www.ison71.es/2007/10/09/entran-el-oceno/">http://www.ison71.es/2007/10/09/entran-el-oceno/</a>
Árboles de sodio - NaOH líquido en un sistema de tuberías retirando CO <sub>2</sub> a Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , separación y entierro de CO <sub>2</sub>	Reducción de CO <sub>2</sub> estimado por Hansen en el 2008 en - \$ 300 por tonelada de CO <sub>2</sub>	Eficiencia no probada; necesaria para eliminar CO <sub>2</sub> ; costo de miles de millones (eficiencia no mas que los actuales gastos militares)	<a href="http://news.bbc.co.uk/1/health/science/news/637000/637787.stm">http://news.bbc.co.uk/1/health/science/news/637000/637787.stm</a> <a href="http://www.nature.com/news/2008/08/12/47/hull/news/2008/1219.html">http://www.nature.com/news/2008/08/12/47/hull/news/2008/1219.html</a>
Enterrar/Biochar Carbono en el suelo	Medio eficaz de controlar el ciclo del carbono (plantas + el intercambio del suelo con la atmosfera mas de 100 GtC por año)	Requiere un gran esfuerzo internacional por una fuerza de trabajo de millones de granjeros.	<a href="http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/05/120531_seguro_carbono_mit_amb_ukm.shtml">http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/05/120531_seguro_carbono_mit_amb_ukm.shtml</a> <a href="http://www.youtube.com/watch?v=9P509Sk87A">http://www.youtube.com/watch?v=9P509Sk87A</a> <a href="http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61770102.pdf">http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61770102.pdf</a> <a href="http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=87&amp;Itemid=78&amp;limit=1&amp;limitstart=1">http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&amp;task=view&amp;id=87&amp;Itemid=78&amp;limit=1&amp;limitstart=1</a>
Reducción de CO <sub>2</sub> Serpentina	Reducción de CO <sub>2</sub>	Posible escala desconocida	<a href="http://pubcommons.upc.edu/pdf/bitstream/20991/3137/1/43649-1.pdf">http://pubcommons.upc.edu/pdf/bitstream/20991/3137/1/43649-1.pdf</a> <a href="http://www.powerplant.com/ccs/info/nc/min/directcapture.html">http://www.powerplant.com/ccs/info/nc/min/directcapture.html</a> <a href="http://www.saracha.com/cepcion-y-almacenamiento-de-co2/carbonataci%C3%B3n/carbonataci%C3%B3n-minera/">http://www.saracha.com/cepcion-y-almacenamiento-de-co2/carbonataci%C3%B3n/carbonataci%C3%B3n-minera/</a>

13

## Conclusiones

Al realizar la búsqueda y recopilación de la información referente a la modificación artificial del tiempo y clima, se puede concluir que es un tema de bastante complejidad, ya que científicamente es difícil comprobar su funcionalidad bajo las condiciones existentes en el ambiente, regularmente se deben de alterar para comprobarlas.

En el mundo se han hecho una gran cantidad de intentos por tratar de modificar las condiciones atmosféricas, mostrando resultados parciales al público en general.

En México se han aplicado algunas de estas tecnologías sin mostrar resultados convincentes para los expertos en el tema.

14

## DUDAS, COMENTARIOS Y SUGERENCIAS

Contacto:  
rprieto@tlaloc.imta.mx  
olivia\_rodriguez@tlaloc.imta.mx

15