

CONTROL CLIMÁTICO POR FITOPLANCTON ANTÁRTICO

Segundo lugar categoría Tecnología del concurso de ensayos
"Bicentenario de la Armada de Chile"

Hugo Hinrichsen Herrera*

Resumen

Este ensayo tiene como objetivo mostrar los procesos que pueden llegar a lograr un cambio climático a través de la geo-ingeniería utilizada sobre el fitoplancton antártico. Se explicará qué es el fitoplancton, por qué se le puede denominar antártico a una porción de éste, cómo su biomasa puede influir en el clima y cuál es el método que se podría utilizar para variarla, objeto mitigar las consecuencias de los gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos, muestran la significancia que puede llegar a tener este procedimiento y las posibles consecuencias de utilizarlo en el océano austral, en beneficio de la humanidad.

Palabras clave: Cambio climático, fitoplancton, océano austral, biomasa.

/// *Give me a half tanker of iron, and I will give you an ice age*"¹ (Denme medio estanque de hierro, y les daré una era del hielo) fue la frase que utilizó el oceanógrafo John Martin a finales de la década de 1980, para referirse a las consecuencias que tendría fertilizar con hierro el mar objeto reaccione el fitoplancton y aumente su biomasa. Ésto produjo gran controversia y desde ese momento se han realizado sendas investigaciones objeto verificar la efectividad de este procedimiento para capturar el excedente de CO₂ en la atmósfera.

¿Qué es el fitoplancton? ¿Por qué al reaccionar con el hierro aumentaría su biomasa? ¿Cuál es la relación entre el aumento de la biomasa del fitoplancton y la reducción del CO₂ en la atmósfera? ¿Por qué existe una subdivisión llamada fitoplancton antártico? ¿Dónde y cómo se podría fertilizar con hierro el océano para que sea más eficiente el crecimiento de la biomasa? ¿Cuáles son los riesgos asociados al efectuar

este procedimiento a gran escala? ¿Podrían existir beneficios adicionales e inmediatos para Chile, además de la captura de CO₂, aumentar la biomasa en el océano austral?

El objetivo del presente ensayo es responder estas interrogantes consultando principalmente la información obtenida libre y universalmente en la web; ya que se pretende también establecer si existe alguna manipulación de la información, objeto crear en las culturas de los diferentes países, aprehensiones asociadas a este procedimiento debido a intereses de diversa índole creados por distintas entidades tanto públicas como privadas.

La conformación del presente trabajo se estructura en un capítulo, el cual abarca cinco tópicos; el primero denominado fitoplancton, en el cual se describe brevemente lo que es y se explica por qué aumentaría su biomasa al ser fertilizado con hierro; el segundo es denominado

* Capitán de corbeta. (hhinrichsen@armada.cl).

1. John Martin, Julio 1988, frase utilizada durante un discurso en el instituto oceanográfico Woods Hole, Massachusetts, USA.

Bomba Biológica, donde se explica cómo el fitoplancton en un proceso natural elimina CO₂ de la atmósfera depositándolo en el fondo del mar; se hace hincapié en la oceanografía, donde se determina las características especiales que tiene el fitoplancton en el océano austral, y dónde y cómo sería más efectivo fertilizar con hierro el mar para aumentar su biomasa; el cuarto tema a tratar son los riesgos colaterales, en la cual se manifiestan las aprehensiones estudiadas que podrían suceder en caso de ejecutar este procedimiento a gran escala, y finalmente se expondrá el tópico beneficios colaterales, donde se expondrá brevemente que otros beneficios podría traer la fertilización del océano con hierro y si éstos podrían traer consecuencias positivas a corto plazo para nuestro país. De esta manera se realizará un marco donde se vinculen diversos aspectos que engloben al procedimiento en estudio, entregando con ello un escenario sintético que permita establecer la real importancia y significancia que podría tener para Chile y el mundo la teoría propuesta; constituyendo con ello los parámetros, lineamientos y proyecciones que permitan la comprensión de la relación del procedimiento expuesto, con la conservación de la Antártica, tal y cómo la conocemos actualmente.

Fitoplancton

Se le denomina fitoplancton al conjunto de organismos acuáticos autótrofos del plancton, que tienen capacidad fotosintética y que viven dispersos en los océanos, lagos y otros espacios de agua. Forman parte de este grupo muchos seres tradicionalmente considerados algas y estudiados como tal por la botánica y especialmente por la ficología. Estos organismos se encuentran actualmente clasificados como bacterias; las cianobacterias, algas verdeazuladas o como protistas. Uno de los grupos más importantes, por su abundancia y diversidad, es el de las diatomeas, organismos microscópicos con pigmentos amarillo-dorados. A pesar de que normalmente se considera al plancton como íntegramente constituido de organismos microscópicos, hay algunas algas, como ciertas especies de sargazos, que pueden vivir libremente en el océano; por

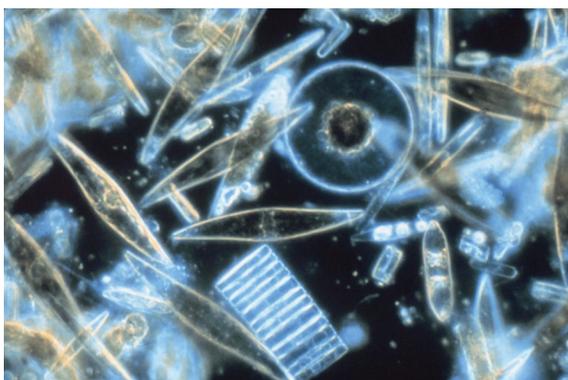
lo tanto, siendo igualmente clasificados como parte del fitoplancton.

Este tipo de organismo se encuentra en la base de la cadena alimentaria de los ecosistemas acuáticos, ya que sirve de alimento a organismos mayores; es decir realiza la parte principal de la producción primaria en los ambientes acuáticos, sobre todos los animales marinos. Pero algo muy notable, es que el fitoplancton es el responsable original de la presencia de oxígeno (O₂) en la atmósfera. La fotosíntesis oxigénica apareció evolutivamente con las cianobacterias, antepasadas además de los plastos de las algas eucarióticas. Durante casi 2.000 millones de años, hasta el desarrollo de las plantas terrestres, la fotosíntesis estuvo prácticamente restringida a los mares y la mayor parte de la producción primaria fotosintética de los mares, entonces como ahora, es atribuible al fitoplancton, con una parte menor debida a organismos bentónicos.

El hierro es un micronutriente esencial para el crecimiento del fitoplancton y la fotosíntesis; alrededor del 70% de la superficie terrestre está cubierta de océanos, y la parte superior de éstos, donde puede penetrar la luz, está habitado por fitoplancton o las algas. En algunos océanos, el crecimiento y la reproducción de estos organismos es limitado por la cantidad de hierro en el agua de mar; el que históricamente ha sido entregado al mar por las tormentas de polvo de las tierras áridas, por las cordilleras submarinas al ser erosionadas por las mismas corrientes submarinas y los volcanes tanto a nivel de la superficie como submarinos, entre otros.

Respondiendo más específicamente a la pregunta de por qué el fitoplancton aumenta su biomasa por el hierro; el *ratio* de Redfield describe las concentraciones atómicas relativas de nutrientes críticos en la biomasa de plancton y las investigaciones recientes se han ampliado a la constante: 106 C: 16 N: 1 P: 001 Fe;² donde C = Carbono, P = Fósforo y Fe = Hierro, que significa que en condiciones deficientes de hierro cada átomo de hierro puede capturar 106.000 átomos de carbono; o expresado en una base de masas, cada kilogramo de hierro puede arreglar 83.000 kg de dióxido de carbono. Posteriores experimentos de la relación dióxido de carbono

2. https://es.wikipedia.org/wiki/Fertilizaci%C3%B3n_con_hierro; Fertilización con hierro, 05 diciembre 2016.



■ Figura 1.

al hierro, han arrojado porcentajes de casi 3.000 a 1. La relación atómica sería aproximadamente: 3.000 C: N 58.000: 3.600 P: 1 Fe.³

En la figura 1⁴ se muestra las diatomeas a través de un microscopio electrónico, una de las especies de fitoplancton que más genera carbonato de sílice o calcio, y que por lo tanto la hace más pesada.

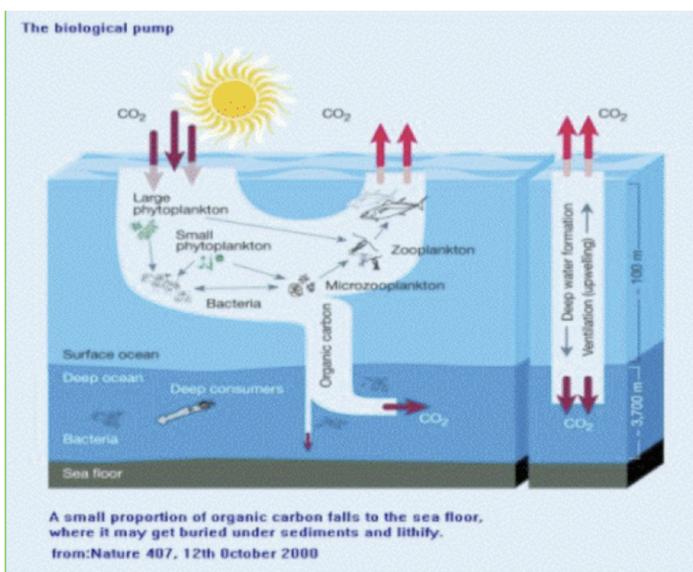
Por lo expuesto en el párrafo anterior es que pequeñas cantidades de hierro, medido por las partes en masa por trillón, pueden desencadenar grandes floraciones del fitoplancton. Recientes estudios sugieren que un kilogramo de partículas de hierro fino disperso en el mar a través de un buque especialmente acondicionado, puede generar más de 100.000 kilogramos de la biomasa de plancton. El tamaño de las partículas de hierro es fundamental y partículas de 0,5-1 micras o menos parecen ser ideales tanto en términos de tasa de caída, como de la biodisponibilidad. Partículas de ese tamaño no sólo son más fáciles para las cianobacterias y fitoplancton para incorporarlas; sino que también la agitación de las aguas superficiales, mantiene a estas partículas

en la zona soleada eufótica a profundidades biológicamente activas sin hundirse por largos períodos de tiempo, lo que facilita aún más su absorción por el fitoplancton.

Bomba biológica

Hemos analizado como el hierro es fundamental para el crecimiento del fitoplancton; ahora analizaremos el por qué se puede reducir la cantidad de CO₂ en la atmósfera a través de estos organismos.

Tomando como referencia sólo lo que sucede a nivel oceánico con el fitoplancton, tal como se muestra en la figura 2⁵, parte de estos organismos nace y muere de distintas formas, cerca de la superficie interactuando directamente con la atmósfera; sin embargo, una parte importante, los más pesados y que no fueron devorados, se hunden al fondo del océano; donde debido a las corrientes de profundidad afloran después de décadas a través de la bomba fisiológica, representada en forma esquemática a la derecha de la figura 2; pero otros fitoplancton o sus derivados simplemente se hunden lo suficiente para quedar fuera de la acción de las



■ Figura 2.

3. https://es.wikipedia.org/wiki/Fertilizaci%C3%B3n_con_hierro; Fertilización con hierro, 05 diciembre 2016.

4. <https://es.wikipedia.org/wiki/Fitoplancton>; Fitoplancton, 05 de diciembre 2016.

5. http://www.nature.com/nature/journal/v407/n6805/fig_tab/407685a0_F1.html; The 'biological pump' is a collective property of a complex phytoplankton-based food web; 05 diciembre 2016.

corrientes de profundidad y quedan depositados en el fondo marino; separándose del ciclo de la bomba biológica como se muestra al centro de la figura 2.

Han existido casos anteriores de secuestro de carbono en la historia del planeta que han provocado grandes cambios climáticos, en los cuales se ha observado una relación inversa entre la cantidad de hierro en el mar y la cantidad de CO₂ en la atmósfera, y en consecuencia existen autores que han ido aún más lejos y tal como ocurre con el ciclo del agua, han planteado un ciclo del carbono; en el cual el fitoplancton depositado en el fondo del mar, después de millones de años, se transforma en combustibles fósiles que podría ser utilizado por los humanos en forma racional, compensando este uso a través de la bomba biológica. El proceso es llamado ciclo del carbono, y se muestra en la figura 3.⁶

El fitoplancton que genera calcio o esqueletos de carbonato de sílice, como diatomeas, cocolitofóridos y foraminíferos; secuestran carbono en forma más directa, y cuando estos organismos mueren, sus esqueletos de carbonato caen con relativa rapidez y forman un componente importante de la precipitación de mar rica en carbono, conocida como la nieve marina. También incluye la nieve

marina *pellets* de pescado fecales y otros desechos orgánicos, y puede ser visto constantemente caer miles de metros por debajo de las floraciones de plancton activo. De la biomasa rica en carbono generada por las floraciones de plancton, la mitad o más, es generalmente consumida por los organismos de pastoreo como zooplancton, el krill y peces pequeños, entre otros; pero entre el 20% a 30% que supera los 200 m de profundidad, que representa gran parte de este carbono fijado en los estratos de temperatura del agua por debajo de la termoclina; continúa cayendo en el abismo marino en forma de nieve, pero un porcentaje importante se redissuelve y mineraliza. A esta profundidad; sin embargo, este carbono está en suspensión en las corrientes profundas y eficazmente aislado de la atmósfera durante siglos; ya que la duración de los ciclos bentónicos del océano es de aproximadamente 4.000 años. El que quedó depositado en el suelo, será transformado finalmente en potencial combustible fósil; pero el proceso durará millones de años.

Oceanografía

Habiendo definido la relación entre la cantidad de biomasa de fitoplancton, el hierro como

nutriente y la cantidad de CO₂ en la atmósfera, queda pendiente definir a dónde sería conveniente fertilizar con hierro el océano para aumentar la cantidad de biomasa de fitoplancton.

El fitoplancton necesita diversos nutrientes para reproducirse, y como se explicó anteriormente en forma breve, la fertilización también se produce por el hierro en forma natural a través del polvo en suspensión; cuando afloramientos ricos en nutrientes vienen de las aguas profundas a la superficie, como ocurre cuando corrientes oceánicas se encuentran con

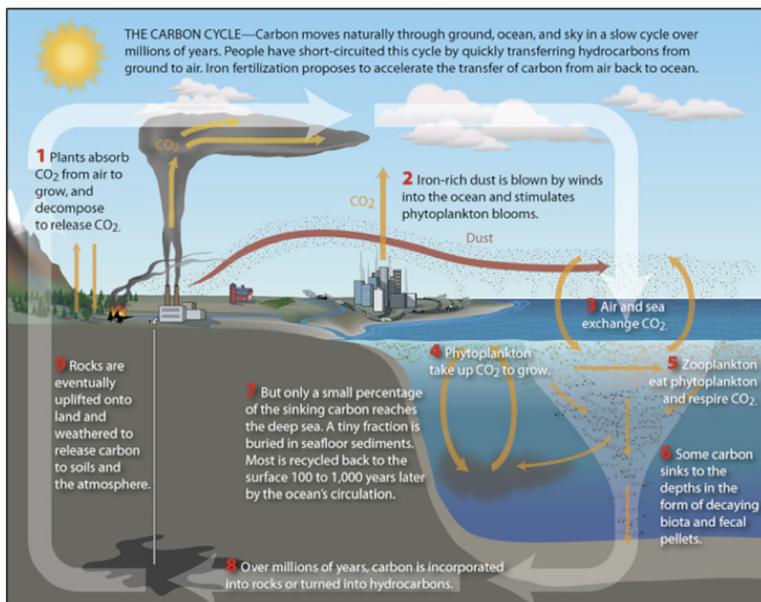
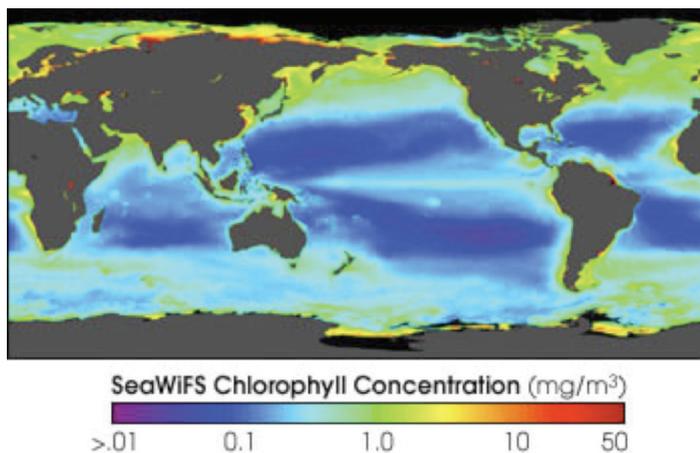


Figura 3.

6. <http://www.ocean.washington.edu/courses/oc400/Oceanus1.pdf>; The Carbon Cycle; 05 diciembre 2016.

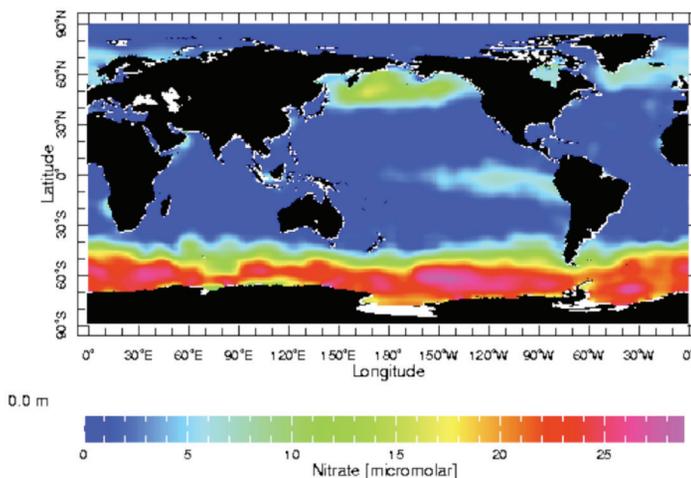


Martin discovered that the missing ingredient was iron—a trace element in the waters of the open ocean. The above image shows the concentration of chlorophyll from phytoplankton, compiled from 3 years of data from the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS). (Image courtesy the SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center)

■ Figura 4.

un dique de mar o un borde de mar; al enfrentarse a cordilleras submarinas, lo que produce los hábitats marinos más grandes del mundo; o también cuando minerales ricos en hierro son transportados al océano por los glaciares, los ríos y los icebergs. La distribución resultante del fitoplancton en los océanos del mundo es la expuesta en la figura 4.⁷

Como se puede apreciar en la figura 4, es bastante más presente el fitoplancton en el hemisferio norte que en el sur, debido principalmente a la influencia del hierro trasladado por el polvo en suspensión desde los continentes; fenómeno que no ocurre de similar forma en el hemisferio austral. Pero para que crezca fitoplancton, también es necesario fosfato, nitrato y en menor medida silicato; el fitoplancton se expandirá hasta consumir y agotar cualquiera de los dos primeros, por lo que para comprobar la teoría de los vientos anterior, se analizará la cantidad de nitrato existente en los océanos, de acuerdo a la figura 5.⁸



■ Figura 5.

Se puede identificar que especialmente el océano austral presenta grandes cantidades de nitrato y al compararlo con la figura 4, se puede determinar que el océano austral es un océano con altos índices de nitrato y bajos índices de clorofila; lo que en inglés se conoce como HNLC (*High Nitrate Low Chlorophyll*).

Las condiciones descritas anteriormente, de acuerdo a lo ya explicado, son las ideales para fertilizar con hierro y fueron identificadas por primera vez como zonas desoladas en la década de 1930 por el biólogo inglés Joseph Hart, especulando que estas grandes zonas desiertas del océano, pero aparentemente ricas en nutrientes, carecían de actividad de plancton o de otra vida marina, y que esto podría ser simplemente por deficiencia de hierro; lo que después y de acuerdo a lo expuesto al principio del trabajo estudiaría el oceanógrafo norteamericano John Martin. Al fitoplancton presente en esta área, con este potencial y con estas particularidades

7. <http://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/6b.html> ; The Oceans and the Carbon Cycle; 05 Diciembre 2016.

8. http://www.xplora.org/downloads/Knoppix/ESPERE/ESPEREdez05/ESPEREde/www.atmosphere.mpg.de/enid/0,55a304092d09/2__Oceanic_nutrients/-_Iron_in_the_oceans_og.html; Iron in the Oceans; 05 diciembre 2016.

es al que se le llama fitoplancton antártico.

El apoyo más dramático en la historia para la hipótesis de Martin fue vista en las consecuencias de la erupción de 1991 del monte Pinatubo en las Filipinas. El científico ambientalista, Andrew Watson analizó los datos globales de la erupción, y calculó que se depositó aproximadamente 40.000 ton de polvo de hierro en los océanos de todo el mundo. Este evento generó una fertilización que produjo un declive mundial, fácil de observar, en el CO_2 atmosférico y un aumento paralelo en los niveles de oxígeno.

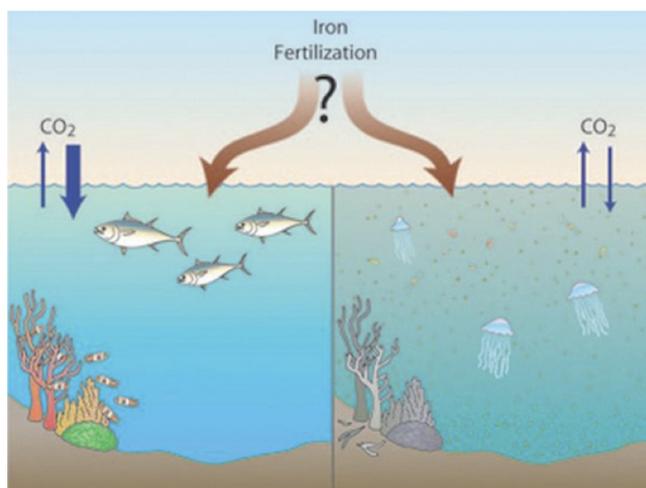


Figura 6.

Si bien Martin sostenía que quizás se podría hasta revertir el cambio climático, los últimos estudios indican que el potencial de la fertilización con hierro como una técnica de geoingeniería para combatir el calentamiento global se puede ilustrar por las cifras siguientes: Si convertimos todos los nitratos y fosfatos presentes en la superficie de la capa de mezcla para el fitoplancton, en toda la corriente circumpolar antártica actual, en carbono orgánico que se fuera al fondo del mar; el déficit de dióxido de carbono resultante, podría ser compensado por la absorción de la atmósfera en alrededor de 0,8 a 1,4 gigatoneladas de carbono al año. Esta cantidad es igual a 1/6 de la magnitud de los combustibles fósiles anuales antropogénicos de combustión, que se estiman en aproximadamente 6 gigatoneladas. Teniendo en cuenta que la región circumpolar antártica es sólo una de varias en las que la fertilización con hierro podría llevarse a cabo; el área de las islas Galápagos y el norte del océano Pacífico entre Alaska y la península de Kamchatka, son otros lugares convenientes por ejemplo, y que aún falta realizar mediciones a gran escala para saber la real magnitud del potencial de este procedimiento, es que no se descarta llegar a igualar la cantidad de CO_2 que se puede hundir utilizando la fertilización con hierro, con la que emitimos actualmente la raza humana a la atmósfera. Cantidad de gases que de todas maneras se debe seguir intentando disminuir,

aunque se decida aplicar el procedimiento de fertilización con hierro forma generalizada y masiva.

Riesgos colaterales

Existen diversas teorías sobre lo que pudiese suceder en los océanos o parte de ellos al ser fertilizados por hierro; sin embargo, las principales encontradas en la web se podrían resumir en las siguientes:

■ Acidificación del océano profundo

Al fertilizar con hierro y parte del plancton irse al fondo, podría consumir el oxígeno de las profundidades, alterando el ecosistema al bajar los niveles de oxígeno en estos profundos lugares, fomentando la proliferación de microorganismos a escalas antes nunca vistas y con resultados impredecibles. En figura 6⁹ se muestra un esquema de un océano donde parte del CO_2 se deposita en el fondo y otro donde sólo se mantiene en suspensión.

■ Proliferación de fitoplancton dañino

Si bien la intención es fertilizar para producir fitoplancton que llene las zonas desiertas del océano austral y otros en aguas abiertas. Nada asegura que por culpa de un accidente o un mal cálculo, ese florecimiento llegue a alguna costa y consuma el oxígeno disponible, produciendo por ejemplo marea roja o la proliferación de un

9. <http://www.ecofriend.com/good-bad-ugly-ocean-iron-fertilization.html>; The good, the bad and the ugly about ocean iron fertilization; 05 diciembre 2016.



■ Figura 7.

fitoplancton venenoso como el *Pseudonitzschia* que destruya el resto de los organismos vivos, tal como ha ocurrido en algunas estaciones y regiones de Chile en el pasado. (ver figura 7¹⁰).

Beneficios colaterales

Lo anterior son sólo teorías; ya que aún no se hacen experimentos a grandes escalas, pero el aumentar la biomasa de fitoplancton en lugares en los cuáles es escaso ahora, se podría comparar con plantar árboles en el desierto y debido a esta razón, existen otras teorías donde se exponen una multiplicidad de beneficios, y especialmente para Chile, considerando que nuestras costas son bañadas por el mismo océano austral desolado. Algunos de los beneficios son:

■ Aumento de la biomasa de las especies en forma general

Debido a que el fitoplancton es la base de la alimentación de todas las especies; las que comen fitoplancton como krill y otros zooplancton, al tener más alimento disponible, aumentarían su población y así sucesivamente subiendo por la cadena alimenticia; esto debería producir un ciclo virtuoso que llenaría el océano de oxígeno y vida especialmente donde no la hay ahora; pudiendo llegar incluso a aumentar en forma colateral la población de las depredadores tope como las ballenas, lo que se podría aprovechar para el turismo y el estudio de estas especies entre otros. También

como política de Estado se podría fomentar la fertilización con hierro; ya que aumentaría la disponibilidad para efectuar pesca de alta mar de las distintas especies beneficiadas por la alta disponibilidad de alimento y que son de alta demanda para el consumo humano, como el krill o la merluza austral; produciendo un incremento de la posibilidad de desarrollar intereses marítimos del país.

■ Aceleración de la tasa de cambio para frenar el aumento de temperatura global

Algunas especies de plancton producen sulfuro de dimetilo (DMS), una parte de la cual entra en la atmósfera donde es oxidado por los radicales hidroxilo (OH), el cloro atómico (Cl) y el monóxido de bromo (BrO) para formar partículas de sulfato, los que producen las nubes en última instancia. Lo anterior podría aumentar el albedo, la luz que se refleja del planeta y así causar un mayor enfriamiento. Este es el principio básico de la hipótesis Gaia, y fue presentado en el primer artículo de James Lovelock, que publicó sobre este tema. Durante los experimentos de enriquecimiento de hierro en el océano antártico (SOFeX), las concentraciones de DMS aumentaron en un factor de cuatro en el interior de la zona fertilizada. La fertilización a gran escala con hierro del océano austral podría dar lugar a una importante disminución de la temperatura producida por el azufre y por el aumento del albedo, además de un aumento en la absorción de CO₂; sin embargo, la cantidad de enfriamiento por este efecto en particular es muy incierta.

■ Recuperación de la inversión y generación de ingresos monetarios por bonos de carbono

Desde la puesta en marcha del Protocolo de Kyoto, varios países y la Unión Europea han establecido compensaciones de carbono a los mercados de comercio, por el concepto de créditos de Reducción Certificada de Emisiones (RCE) y otros tipos de instrumentos de crédito de carbono a nivel internacional. Por otra parte, recientes estudios de científicos han registrado un descenso mínimo de 6.12% en la producción de plancton mundial desde 1980, y esto sugiere que un programa a

10. <http://www.ecofriend.com/good-bad-ugly-ocean-iron-fertilization.html>; The good, the bad and the ugly about ocean iron fertilization; 05 diciembre 2016.

gran escala de restauración del plancton podría regenerar aproximadamente 3-5 mil millones de toneladas de la capacidad de secuestro de carbono. Obteniendo una ganancia de 75 millones de € o más en compensación de carbono; la fertilización con hierro, considerando que es una tecnología de captura de carbono relativamente barata, en comparación con el lavado, la inyección directa y otros enfoques de tipo industrial, y que en teoría pueden generar estos créditos de CO₂ por 5/ton a menos de €31; ha logrado interesar a muchos comerciantes de carbono, y dado este potencial de rendimiento de la inversión, están siguiendo los avances de esta tecnología con mucho interés, ya que se podría convertir en una fuente de ingresos inmediata e importante para el propio país.

Conclusiones

- Si bien algunos estudios han bajado las expectativas del rendimiento de hundimiento de CO₂ a través de la fertilización con hierro en los océanos, en comparación con las simulaciones de laboratorio, es importante considerar que los pocos experimentos para aumentar la biomasa del fitoplancton se han hecho a una escala muy menor, y que aún falta mucho por estudiar y probar para que se pueda mejorar

el proceso y llegar a los rendimientos óptimos que hagan que la aceleración de este proceso natural, llamado bomba biológica, sea más atractivo para la comunidad internacional.

- El océano austral, por sus particularidades peculiares, presenta una oportunidad única para transformarlo en un lugar con mucha más vida, a través de la fertilización con hierro, sin presentar grandes peligros, debido a la presencia de la corriente circumpolar antártica. Lo anterior, además podría compensar en gran medida los efectos del calentamiento global a mediano plazo y traer grandes beneficios para Chile en el corto plazo, considerando que es el mismo océano austral el que baña nuestras costas y somos el país que tiene mejor accesibilidad.
- Si bien existen riesgos al aplicar geo-ingeniería para fertilizar con hierro el fitoplancton del océano, si se hace bien y en forma regulada, el costo asociado y la posibilidad de generar beneficios es tan alta, que estimo se debiera masificar este procedimiento y transformar a Chile en líder en esta materia, objeto compensar los efectos del calentamiento global lo antes posible, mientras paulatinamente migramos a una sociedad con menor necesidad de combustibles fósiles.

* * *

BIBLIOGRAFÍA

1. Fertilizing the Ocean with Iron; <http://www.ocean.washington.edu/courses/oc400/Oceanus1.pdf> ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
2. Climate Engineering; <http://www.chooseclimate.org/cleng/cleng.html> ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
3. La alteración del fitoplancton antártico está ligada al cambio climático; http://www.soitu.es/soitu/2009/03/12/info/1236885249_493046.html ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
4. Fertilización con Hierro; https://es.wikipedia.org/wiki/Fertilizaci%C3%B3n_con_hierro ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
5. Fitoplancton; <https://es.wikipedia.org/wiki/Fitoplancton> ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
6. Iron in the Oceans; http://www.xplora.org/downloads/Knoppix/ESPERE/ESPEREdez05/ESPEREde/www.atmosphere.mpg.de/enid/0,55a304092d09/2__Oceanic_nutrients/_Iron_in_the_oceans_og.html ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
7. The 'biological pump' is a collective property of a complex phytoplankton-based food web; http://www.nature.com/nature/journal/v407/n6805/fig_tab/407685a0_F1.html ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
8. The Oceans and the Carbon Cycle; <http://serc.carleton.edu/eslabs/carbon/6b.html> ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.
9. The good, the bad and the ugly about ocean iron fertilization; <http://www.ecofriend.com/good-bad-ugly-ocean-iron-fertilization.html> ; Recuperado el 05 de Diciembre del 2016.