

NOTAS ACERCA DE LA FERTILIZACIÓN POR HIERRO

Willington Rentería ⁽¹⁾

Jamilton Ortega ⁽¹⁾

RESUMEN

La fertilización de los océanos con hierro ha sido presentada como solución a corto plazo para poder reducir el CO₂ de la atmósfera. Esta afirmación presentada hace 20 años ha liderado y ha despertado un controversial debate sobre las posibles consecuencias en el clima.

La bioquímica de hierro es un sistema complejo y su estudio en el océano es relativamente nuevo en comparación con los otros nutrientes, sin embargo, este sistema ha sido descrito en varios estudios que ayudan en la comprensión de la afirmación intrincada sobre los beneficios de la fertilización con hierro. El objetivo de este estudio es describir los aspectos relacionados con los fundamentos de la fertilización con hierro, discutiendo acerca de la afirmación de la limitación de hierro y la función del hierro como un nutriente.

ABSTRACT

The Fertilizing Ocean with iron has been presented as short-term solution to reduce CO₂ from the atmosphere. This statement made 20 years ago has led and has aroused controversial debate on the possible impact on climate. The biochemistry of iron is a complex system and study the ocean is relatively new compared to other nutrients, however, this system has been described in several studies that help in understanding this statement intricate about the benefits of iron fertilization. The aim of this study is to describe aspects of the fundamentals of iron fertilization, discussing the assertion of iron limitation and the role of iron as a nutrient.

⁽¹⁾ Estación de Investigaciones Marinas y de Ayudas a la Navegación de Galápagos-EIMAGA

INTRODUCCIÓN

La fertilización del océano con hierro, fue propuesta como un método para eliminar el CO₂ de la atmósfera por Martin JH et al, en 1990. Esta ha sido presentada como una solución a corto plazo para la reducción de CO₂ en la atmósfera y en consecuencia la reducción de los efectos del cambio climático. Esta afirmación se presentó hace 20 años, liderando un polémico debate desde sus inicios, con la base teórica de los efectos del hierro en el crecimiento del fitoplancton, pasando por la propuesta que el no-crecimiento de las poblaciones de fitoplancton en algunas zonas en el océano ricas en nutrientes, se debe a la limitación de hierro; finalmente, sobre su eficacia y las posibles consecuencias sobre el clima.

El ciclo de la bioquímica de hierro en el océano es un sistema complejo, y su estudio acerca de sus influencias sobre la vida del mar, es relativamente nuevo en comparación con el de los macronutrientes (N, P, Si), esta condición ha limitado la aceptación de esta propuesta. Actualmente se han realizado varios estudios para describir el ciclo de hierro, así como su comportamiento como nutriente, estos estudios han contribuido a la comprensión y aceptación de esta complicada afirmación. El objetivo de este estudio es describir los aspectos relacionados con los fundamentos de la fertilización con hierro, así como realizar una descripción bioquímica de los procesos inmersos.

Antes de la proposición de limitación de hierro, la restricción en el crecimiento del fitoplancton se creía solo dependiente de la mezcla vertical del nitrato y fosfato [Debaar, 1994]. Sin embargo, se encontró, que hay regiones donde la disponibilidad de los principales nutrientes no determina una mayor productividad del océano. Es en estas regiones donde inicio la

hipótesis de la fertilización con hierro, donde se cree que la falta de productividad se debe a la escasa disponibilidad de hierro, esta afirmación ha sido ampliamente demostrada. Por otra parte, algunas evidencias geológicas indican que en la última glaciación la cantidad de polvo (rica en hierro) en la región Antártica fue mayor que en la actualidad, en el mismo sentido que las concentraciones de CO₂ es menor, entonces la hipótesis se ha dirigido a que esta concentración de CO₂ fue menor debido a la mayor productividad en el océano, que se supone fue el resultado de las altas tasas de polvo de hierro en el océano [Raynaud et al., 1993].

Ley del mínimo

Se sabe que la productividad del plancton se ve afectada por la disponibilidad de los siguientes factores: los nutrientes, la luz y la temperatura del agua de mar. A continuación, se presenta una breve discusión de cada uno de ellos y su influencia en la productividad. Los nutrientes como nitrato, fósforo, silicio son necesarios para el crecimiento de los organismos, estos se suministran al océano principalmente a través de la escorrentía de los ríos, a causa de esto, los valores más altos de productividad se encuentran en los márgenes continentales. Los procesos físicos como los afloramientos de aguas profundas y corrientes, suministran estos nutrientes a la zona eufótica (donde se lleva a cabo la mayoría de la productividad), estos procesos físicos también extienden la productividad hacia áreas alejadas de la costa, por lo que la ruta de las masas de agua se relacionan con las zonas de productividad y con las zonas de fuentes de nutrientes.

La disponibilidad de la luz también es un factor importante, esta disponibilidad es influenciada por la intensidad de la luz y el espectro de la luz en el mar. La transmisión de la luz en el agua de mar depende de la longitud de onda

(luz visible), la altura del sol, la nubosidad la reflexión, absorción y dispersión de la luz solar. Además, es importante también el efecto que tiene la luz solar sobre la temperatura, ya que algunas especies de fitoplancton están adaptadas para vivir a cierta temperatura, y cuando esta cambia también cambia la población de fitoplancton. Además, la temperatura está asociada a la formación de la capa de mezcla y la formación de la termoclina, esta última se convierte en una barrera que limita la mezcla de las aguas, por lo tanto limita el suministro de nutrientes de las aguas más profundas hacia la superficie. Este mecanismo, influye en la limitación de la productividad en la capa superficial del océano.

Todos estos factores afectan la productividad del fitoplancton, algunas especies están adaptadas a vivir a ciertas condiciones particulares de luz y nutrientes [Moore et al., 2001], aunque existen también especies que se adaptan a diferentes condiciones. En conclusión, el crecimiento de la población de fitoplancton es ilimitado si la disponibilidad de los factores que influyen en su crecimiento también es ilimitado. Del mismo modo, el crecimiento del fitoplancton se limitará cuando la disponibilidad de estos factores es limitada. Este enunciado se puede explicar a través de la Ley del mínimo.

La afirmación básica de la Ley del mínimo, fue formulada en 1855 por J. von Liebig, el "padre de la química orgánica" [C. A. Twigg Twigg y MV, 1973], y establece que el mínimo de uno de los nutrientes esenciales limita el crecimiento de las plantas, incluso si los otros nutrientes esenciales son abundantes. En un principio esta ley sólo se aplicó para la agricultura, pero en los últimos años se ha demostrado que también se aplica para el crecimiento de las algas oceánicas [Debaar, 1994]. La aplicabilidad de esta ley se ha observado en diferentes zonas del océano. Por

ejemplo, el afloramiento de algas de la primavera en el Atlántico Norte es un efecto de la disponibilidad de Silicio, cuando esta se proporciona a las capas superficiales del océano, el afloramiento se produce. Además, como resultado del afloramiento de algas se agota la cantidad de N y P, y esto afecta al crecimiento de otras especies de plancton [Debaar, 1994].

Otro factor relacionado con el crecimiento del fitoplancton es el dióxido de carbono, el papel del CO₂ en la producción de plancton es indudable, aunque se considera al CO₂ como un factor limitante, esta enunciación requiere más indagación. Esta propiedad del CO₂ (de limitar la productividad) es considerada por el hecho de que algunas especies de algas requieren CO₂ disuelto, y el proceso de disociación de HCO₃⁻ a CO₂ podría verse afectado por otros factores, y demorar la disponibilidad del CO₂, por esta razón se lo podría considerar como un factor limitante en el crecimiento del plancton [Debaar, 1994].

Cuando la disponibilidad de luz disminuye, las células requieren más cantidades de hierro a fin de mantener su crecimiento [Raven, 1990], si el hierro no se suministra en la cantidad necesaria, el crecimiento del fitoplancton será limitado. El hierro y la luz son dos factores limitantes quienes están interrelacionados con el crecimiento de algas.

Teniendo en cuenta el esquema propuesto por Gorban et al, 2010 para la representación de la Ley de mínimo y la representación esquemática de la Baar De, 1994, la Figura 1 pretende resumir la consideración de los factores limitantes para el crecimiento de fitoplancton, considerando la ley de mínimo. En este punto es importante mencionar, que el hierro es considerado como un micronutriente así como otros metales como el Mn, Zn, Cu, Co y Cd, sin embargo, es el único de éstos que ha

demostrado esta capacidad de limitar el crecimiento de las poblaciones de fitoplancton

[Emerson y Hedges, 2008a].

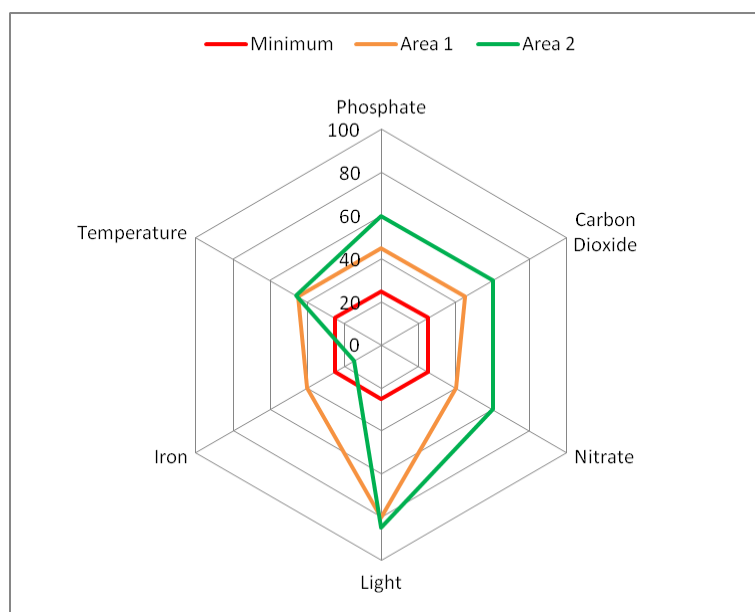


Figura 1 Esquema conceptual de la Ley de mínimo y el crecimiento del fitoplancton de una sola especie. La línea roja representan los valores mínimos de cada factor limitante. Para el caso del Área 1 la disponibilidad de factores está más allá de los valores mínimos, pero para el caso del Área 2, el valor de hierro está por debajo del mínimo requerido, por esta razón el crecimiento de esta especie será limitado.

La ley del mínimo de una sola especie de plancton, no es una afirmación estática, es necesario tener en cuenta la variación de los factores naturales, y considerar que están interactuando en un sistema dinámico; dicho de otra manera, la abundancia de un factor podría apuntar hacia el agotamiento de los otros factores, y el agotamiento de estos, podría llevar el área, a un estado mínimo de factores de crecimiento, para otras especies [Gorban et al., 2010].

Zonas de alto contenido de nutrientes y baja clorofila y el comportamiento de hierro como nutriente.

El supuesto de que el agua del océano es estéril [Martin, 1991] puede ser cierto, si se considera que la fertilización, es fuertemente dependiente de los factores físicos que son responsables del transporte de nutrientes a la capa superior del océano (zona eufótica) donde se produce principalmente la productividad. Los nutrientes que provienen de las deposiciones

atmosféricas, incluyendo el polvo volcánico y las escorrentías de los ríos, son considerados como las deposiciones más importantes que ocurren cerca de la costa, como se puede apreciar, las principales fuentes de nutrientes están relacionadas con la tierra. A través de procesos físicos como las corrientes oceánicas y los sistemas de viento, los nutrientes se esparcen en la zona eufótica en el océano. La descripción de estos procesos físicos, han ayudado a identificar las zonas de productividad en el océano, de hecho las zonas con altas concentraciones de nutrientes, normalmente son zonas con una alta productividad.

Sin embargo, existe una proporción importante del océano con cantidades abundantes de nutrientes, pero baja productividad, estas zonas son: el este del Pacífico ecuatorial, el océano del sur libre de hielo y el abierto subártico del Pacífico Norte [Morel et al, 1991]. Estas zonas se denominan de alta en nutrientes y baja clorofila (HNLC-High Nutrients Low

Chlorophyll). Esta situación especial es llamada a menudo la paradoja HNLC.

Hay algunas sugerencias que explican la falta de productividad en estas zonas, una de estas se basa en la alimentación y el diminuto tamaño de fitoplancton, el mismo que se cree ha evolucionado, reduciendo su tamaño a fin de coincidir con la disponibilidad de hierro [Miller et al, 1991.]. Otra explicación está relacionada con la penetración de la luz [Mitchell et al. 1991], esta establece que bajo ciertas circunstancias, la disponibilidad de luz se vuelve más baja y la productividad se reduce. Y finalmente la limitación de hierro [Martin, 1991], en este caso se considera que el hierro es necesario para las funciones vitales de la fotosíntesis. Las dos primeras dan una explicación que se puede considerar particular para ciertas zonas, mientras que la última otorga una explicación más general y aplicable a todas las zonas.

La relación Fe/C para el Pacífico Ecuatorial y del Océano Austral está en el orden de ~ 2 $\mu\text{mol/mol}$, que es tres veces menor que otras

zonas repletas de Fe como el Atlántico Norte [Moore et al., 2001]. La poca concentración de hierro en las áreas HNLC fue la base de la explicación de Martin, esto puede ser ejemplificado con el caso de Alaska. La muy baja productividad en el Golfo de Alaska (Subártico Pacífico) puede relacionarse con las pequeñas cantidades de hierro disponible, esta baja productividad sólo se produce hasta el agotamiento de las pequeñas cantidades de hierro. La productividad depende de la cantidad de hierro disponible, en esta y otras zonas, el hierro se suministra por el polvo atmosférico, que es llevado por el viento desde sectores terrestres. En este sentido, el esquema de la baja productividad coincide con el deficiente suministro de polvo atmosférico en estas zonas, especialmente en la Antártida y el Pacífico Ecuatorial. Esta afirmación se ve reforzada por la evidencia paleo-geológica, que muestra que en la Antártida la alta concentración de hierro se relaciona con una menor concentración de CO_2 en la atmósfera, lo cual cimienta la controversial hipótesis de fertilización con hierro.

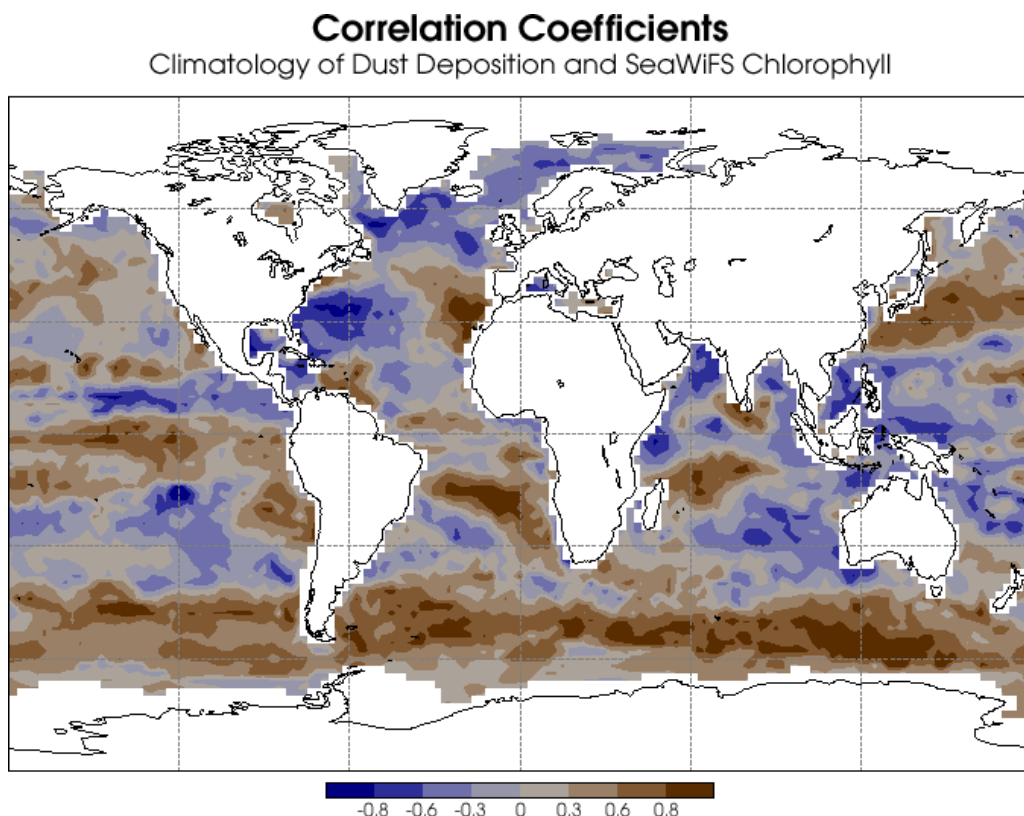


Figura 2 Climatología de la deposición de polvo y clorofila en el Mar WIFS. Las áreas con altos niveles de clorofila y altos niveles de deposición de polvo muestran una alta correlación y es indicada con color marrón oscuro. Climatología, deposición de polvo calculado para el período 1996-1998, las mediciones de clorofila son a partir de las observaciones 1998 de los SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), instrumento del satélite Orb View-2 [Map Source: David Erickson, Oak Ridge National Laboratory's Computer Science and Mathematics Division]

La relación entre el hierro y la productividad del fitoplancton, puede ligarse al ritmo de deposición de polvo atmosférico y aporte de fuentes terrestres de hierro. Esto puede observarse a través de los coeficientes de correlación entre la deposición de polvo y los niveles de clorofila en el océano, esto se muestra en la Figura 2. En este punto es importante destacar que aproximadamente ~ 10% de polvo de hierro que se deposita en el océano, llega a disolverse en condiciones disponibles para el fitoplancton (Moore et al., 2001).

En la Figura 2 se puede observar que los altos valores de correlación se producen cerca de las zonas áridas, que son regiones fuentes de hierro; éstas son las del norte de África, la Península Arábiga, el este de Asia, Australia, la Patagonia y sur de África [Moore et al., 2001]. En el sentido inverso, se produce una alta correlación en las zonas HNLC, con zonas que se caracterizan por tener un ritmo de deposición de polvo menor y consecuentemente una menor concentración de clorofila, por lo tanto, se infiere que la baja productividad del océano se debe al bajo suministro de hierro [Boyd y Ellwood, 2010a]. Los valores más bajos de correlación pueden estar asociados al proceso el cual transporta nutrientes a las zonas con valores bajos de deposición de polvo y altos valores de clorofila, son producidos por la adición de nutrientes desde las aguas más profundas, más que la disponibilidad de hierro por la deposición de polvo.

Esta correlación espacial entre 2 procesos diferentes (la producción de clorofila y la deposición de polvo) podría ser considerada como una fuerte evidencia, para argumentar la dependencia de la productividad oceánica con la disponibilidad del hierro, así como, reforzar el planteamiento de la importancia del hierro como nutriente, para el crecimiento del

fitoplancton. El papel del hierro como nutriente fue considerado en 1930, por HW Harvey [Debaar, 1994], este demostró que el hierro tiene un efecto estimulante sobre la tasa de crecimiento de especies de diatomeas.

Como se ha descrito en este documento, el hierro es suministrado por el polvo atmosférico, cuando estas partículas entran en la superficie del océano, el hierro ingresa en forma de Fe_2O_3 , después de la deposición, el hierro se encuentra inmerso en un proceso de disolución, luego de lo cual parte del hierro entra en la piscina coloidal (no biodisponible) donde interactúa y es foto reducido a $\text{Fe}(\text{II})$. Finalmente, el hierro ingresa a la piscina soluble en formas disponibles para la absorción por parte del fitoplancton.

El papel esencial del hierro tiene lugar en el proceso de fotosíntesis, debido a las propiedades del hierro de oxidación/reducción, que son importantes en el proceso de transporte de electrones [Morel et al., 1991], este último se produce en el proceso de conversión de energía. El Fe antes de ser absorbido debe ser reducido, este proceso es llevado a cabo por las enzimas hierro-reductoras [Boyd y Ellwood, 2010b], que son parte de las células responsables de la fotosíntesis.

El hierro está presente en el océano en dos formas, $\text{Fe}(\text{II})$ y $\text{Fe}(\text{III})$. El $\text{Fe}(\text{II})$ es soluble y fácilmente oxidado a $\text{Fe}(\text{III})$; esta forma del hierro es la más importante para el crecimiento de algas, esta es reducida antes de ser absorbidas por las enzimas presentes en las células de las algas. La otra forma es $\text{Fe}(\text{III})$, el cual que es insoluble en agua y se encuentran en formas sólidas (e.g. $\text{Fe}(\text{OH})$), cuando este recibe la radiación solar, reacciona a la forma de hierro más disponible para fitoplancton, esta reacción fotoquímica es seguida por una precipitación oxidativa de $\text{Fe}(\text{II})$ en una forma orgánica compleja.

CONCLUSIONES

A pesar de que la ley del mínimo, da una explicación sólida para la limitación de la productividad en las áreas HNLC debido a la limitación de hierro, la sola consideración de la ley del mínimo, podría ser errático en la comprensión de la productividad del océano. Existen otros factores que deben ser considerados en el proceso e incluidos en el régimen de la ley del mínimo. Por lo tanto el uso de esquemas como el propuesto en la Figura 1 debe tenerse en cuenta para cada especie con el fin de garantizar que el aumento de una población de sólo una especie marina no afectará a la sostenibilidad de las otras.

De la misma manera, los efectos de adaptación y la evolución de las especies son hechos que deben ser considerados en los estados concluyentes acerca de la ley del mínimo. Por ejemplo, algunas especies de algas se han encontrado en bajas condiciones de concentración de hierro; estas especies han reducido su tamaño a fin de reducir sus necesidades de hierro [Miller et al, 1991.], [Morel et al, 1991.], este es un caso específico del proceso de adaptación al que se han visto obligadas las especies.

La falta de productividad en las áreas HNLC y su relación con la limitación de hierro, ha sido ampliamente demostrado; entonces si se considera la importancia del hierro en el crecimiento del fitoplancton, es necesario considerar, que el cambio en los patrones de suministro de hierro puede alterar la distribución de la productividad en el océano [Boyd y Ellwood, 2010b], e incluso llevarse a niveles difíciles de controlar. Esta alteración puede incluir, la reducción de otros nutrientes que son importantes para la vida en el mar.

REFERENCIAS.

- *ironlimit_lrg.gif* (GIF Image, 674x539 pixels). [online] Available from: http://earthobservatory.nasa.gov/images/image-records/1000/1014/ironlimit_lrg.gif (Accessed 28 November 2010)
- Boyd, P. W., and M. J. Ellwood, 2010. The biogeochemical cycle of iron in the ocean, *Nature Geosci*, 3(10), 675-682, doi:10.1038/ngeo964.
- Boyd, P. W., and M. J. Ellwood, 2010. The biogeochemical cycle of iron in the ocean, *Nature Geosci*, 3(10), 675-682, doi:10.1038/ngeo964.
- Debaar, H. (1994), von Liebig's law of the minimum and plankton ecology (1899–1991), *Progress In Oceanography*, 33(4), 347-386, doi:10.1016/0079-6611(94) 90022 -1.
- Emerson, S. R., and J. Hedges (2008a), *Chemical oceanography and the marine carbon cycle*, Cambridge University Press.
- Emerson, S. R., and J. Hedges (2008b), *Chemical oceanography and the marine carbon cycle*, Cambridge University Press.
- Gorban, A. N., L. I. Pokidysheva, E. V. Smirnova, and T. A. Tyukina (2010), Law of the Minimum Paradoxes, *Bull. Math. Biol.*, doi:10.1007/s11538-010-9597-1. [online] Available from: <http://www.springerlink.com/content/8178p00767612xk7/> (Accessed 25 November 2010)
- Martin, J. (1991), Iron, Liebig's Law, and the greenhouse, *OCEANOGRAPHY*, 4, 52-55. [online] Available from: <http://www.tos.org/oceanography/issues/iss>

- ue_archive/issue_pdfs/4_2/4.2_martin.pdf
- Miller, C. B., B. Frost, B. Booth, P. Wheeler, M. Landry, and N. Welschmeyer (1991), Ecological processes in the Subarctic Pacific: Iron Limitation cannot be the whole story, *OCEANOGRAPHY*, 4(2), 71-78.
- Mitchell, B. G., E. A. Brody, O. Holm-Hansen, C. McClain, and J. Bishop (1991), Light Limitation of Phytoplankton Biomass and Macronutrient Utilization in the Southern Ocean, *Limnology and Oceanography*, 36(8), 1662-1677.
 - Moore, J. K., S. C. Doney, D. M. Glover, and I. Y. Fung (2001), Iron cycling and nutrient-limitation patterns in surface waters of the World Ocean, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(1-3), 463-507, doi:10.1016/S0967-0645(01)00109-6.
 - Morel, F. M. M., A. B. Kustka, and Y. Shaked (2008), The role of unchelated Fe in the iron nutrition of phytoplankton, *Limnol. Oceanogr.*, 53(1), 400-404, doi:10.4319/lo.2008.53.1.0400.
 - Morel, F. M. M., J. Rueter, and N. Price (1991), Iron nutrition of phytoplankton and its possible importance in the ecology of the ocean regions with high nutrient and low biomass, *OCEANOGRAPHY*, 4(2), 56-61.
 - Raven, J. A. (1990), Predictions of Mn and Fe use Efficiencies of Phototrophic Growth as a Function of Light Availability for Growth and of C Assimilation Pathway, *New Phytologist*, 116(1), 1-18.
 - Raynaud, D., J. Jouzel, J. M. Barnola, J. Chappellaz, R. J. Delmas, and C. Lorius (1993), The ice record of greenhouse gases, [online] Available from: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1993Sci...259..926R> (Accessed 4 December 2010)
 - Twigg, C. A., and M. V. Twigg (1973), Centenary of the death of Justus von Liebig, *Journal of Chemical Education*, 50 (4), 273, doi:10.1021/ed050p273.