Modelo conceptual de la fertilización de océanos con hierro

14 de mayo de 2008

Preparado por Tetra Tech, Inc.
3746 Mt. Diablo Blvd., Suite 300, Lafayette, CA 94549
(925)283-3771

La fertilización de regiones del océano que presentan déficit de hierro pero poseen altas concentraciones de macronutrientes ha sido objeto de investigación científica desde que, a fines de los años ochenta, se planteó la hipótesis del papel fundamental del hierro para regular la producción primaria en estas regiones. Los experimentos realizados en océanos a mesoescala han demostrado que la fertilización con hierro de estas vastas zonas con altas concentraciones de nutrientes puede generar un aumento importante de la producción primaria y reducciones del CO_2 en la capa superficial del mar, además de potenciar el papel fundamental que desempeña el océano en la atenuación del CO_2 atmosférico. Si bien los resultados de estos experimentos son interesantes, es limitado el alcance espacial y temporal de los experimentos de fertilización de océanos con hierro (OIF, por sus siglas en inglés) llevados a cabo hasta la fecha. Aún resta dilucidar interrogantes clave y existen numerosas razones teóricas y prácticas para explorar la respuesta a gran escala que tendría la fertilización natural y planificada en una región representativa con déficit de hierro.

Climos, que posee interés en facilitar alternativas que den respuesta al problema del calentamiento global y en generar mecanismos para canalizar los incentivos económicos relacionados con acciones voluntarias y reguladas del mercado, tiene planes destinados a aumentar la escala de los ensayos de la OIF y probar su capacidad para capturar mayores cantidades de CO_2 atmosférico. Paralelamente, Climos desea responder a las inquietudes suscitadas respecto de la eficacia de la OIF como técnica de captura de carbono y los posibles efectos ecológicos que tendría la estimulación de la producción primaria en aguas marinas. A este respecto se está llevando a cabo un detallado análisis ambiental de la OIF a gran escala, encargado por Climos. La piedra angular de este análisis es el desarrollo de un modelo conceptual de la OIF que se elaborará antes de comenzar el proyecto propuesto.

En el modelo conceptual se describirán y presentarán por medios gráficos los conocimientos actuales sobre los procesos biogeoquímicos que controlan las concentraciones en aumento de CO_2 atmosférico y que se ven afectados por éstas. Se hará hincapié en el uso de la información científica más reciente con el fin de describir el nivel de conocimiento de estos procesos en el medio marino. Esta información abarca los resultados de los doce experimentos de fertilización de océanos con hierro realizados a mesoescala que han abierto las puertas de un nuevo campo de investigación y han aportado nuevos datos importantes para comprender la biogeoquímica de la capa mixta del océano. Se han publicado más de 450 artículos científicos acerca de los resultados de estos experimentos y el alcance de estos resultados mediante modelos numéricos. El modelo conceptual de la OIF proporcionará una síntesis de esta información y se empleará para identificar y evaluar los problemas ambientales relacionados con las actividades propuestas de fertilización de océanos con hierro.

El modelo conceptual de la OIF se está elaborando en torno a la descripción de los ciclos subyacentes impulsados por los principales procesos biogeoquímicos y que repercuten en estos procesos. La descripción del ciclo del carbono global y el impacto de la actividad humana en el ciclo mediante el aumento de las emisiones de CO_2 constituye la base del modelo conceptual. Se describen los flujos de carbono que vinculan los océanos con las concentraciones de CO_2 atmosférico, tanto actuales como históricas, y se toman como base para analizar las propuestas de mitigación tendientes a reducir las concentraciones de CO_2 atmosférico. Asimismo, se describen los procesos fisicoquímicos y biológicos que interactúan en la captura del carbono orgánico —la bomba biológica oceánica— y se intenta dar respuesta a una serie de preguntas e inquietudes respecto del papel que desempeñan los ciclos de nutrientes y de materia orgánica en la capa mixta del océano.

La descripción del ciclo del hierro global que se ofrece a continuación es un ejemplo de cómo se presentarán estos ciclos subyacentes en el modelo conceptual de la OIF.

Componente del ecosistema: ciclo del hierro en el océano

Son dos los factores vinculados con este elemento traza que determinan en gran parte el funcionamiento del ciclo del hierro en el océano (figura 1), a saber: i) la solubilidad sumamente baja en el agua de mar de su estado de oxidación estable de Fe^{III} y ii) la necesidad biológica inevitable de hierro. En consecuencia, la biota debe adaptarse a procesos geoquímicos en gran parte abióticos, y en definitiva debe competir con ellos, por lo que el ciclo del hierro en el océano es de naturaleza totalmente "biogeoquímica".

El mayor flujo del ciclo del hierro en el océano está representado por el transporte fluvial, que transfiere hasta 960 Tg por año al océano (tabla 1). No obstante, casi todo el Fe descargado por los ríos se presenta en la forma de partículas que se depositan en las plataformas continentales y otros entornos costeros. Sólo un 0,2% de este flujo, o 1,5 Tg por $año^{-1}$, se presenta en forma disuelta y por ende, puede transportarse al

© 2008 Climos

océano abierto para sostener el crecimiento del fitoplancton. La redisolución del hierro en partículas en sedimentos de la plataforma continental libera un flujo similar de Fe disuelto en la columna de agua; sin embargo, se desconoce la fracción de este flujo que llega a la zona fótica y se estima que podría ser de tan sólo el 2,5% (Johnson *y col*., 2004). Los afloramientos costeros pueden aportar Fe al volver a suspender partículas finas de los sedimentos, que a su vez se disuelven y proporcionan gran parte del hierro necesario para sostener el crecimiento del fitoplancton en algunas aguas costeras (Johnson *y col*., 1999). Debido a la alta productividad del océano costero, la mayor parte de este Fe disuelto es atrapado en las plataformas continentales. Con todo, cabe destacar que el transporte del Fe disuelto al océano abierto queda demostrado por la disminución de las concentraciones superficiales de Fe disuelto a lo largo de las secciones oceanográficas distantes de las regiones costeras (Elrod *y col*., 2004). Por otra parte, dado que el Fe disuelto elevado sólo puede detectarse en varios cientos de kilómetros, la inmensa mayoría del océano no se ve afectado por el Fe de origen costero.

La principal fuente de Fe en las aguas superficiales del océano abierto es el transporte eólico de polvo desde los continentes (tabla 1). Este polvo se origina en las regiones áridas y semiáridas donde la erosión fluvial pasada o estacional genera material susceptible de ser erosionado

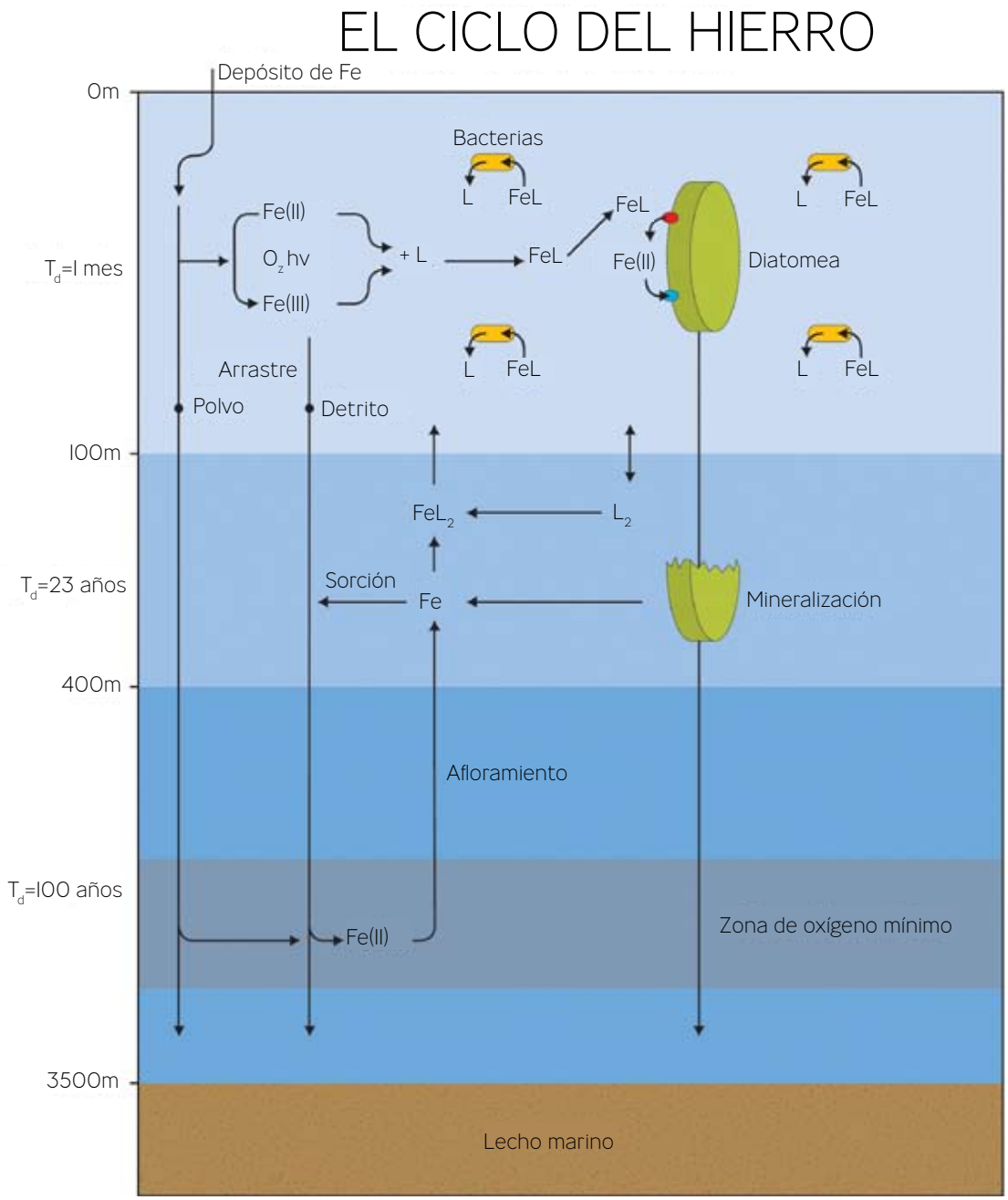

Figura 1
Principales procesos que intervienen en el ciclo del hierro en el océano. La mayor parte del hierro entra y sale del océano abierto en la forma de partículas. Los procesos biológicos agotan el hierro disuelto en el océano superficial, en tanto que el equilibrio entre la mineralización y el arrastre abiótico (sorción) controla sus concentraciones en las profundidades. Cuando la capa de oxígeno mínimo queda casi desprovista de oxígeno, se modifica el equilibrio entre el arrastre y la disolución ya que se incrementa la disolución reductiva de las partículas de hierro en esa capa.

© 2008 Climos

por el viento. Las partículas finas (~2 µm de diámetro) son transportadas con facilidad por movimientos atmosféricos verticales que elevan el material a altas altitudes (de 3 a 7 km), desde donde puede transportarse por miles de kilómetros hasta encontrar las condiciones atmosféricas (precipitaciones o baja velocidad del viento) que provocan su depósito en la superficie del océano (Jickells *y col*., 2005). Durante el transporte, factores tales como la acidez del agua de las nubes, el sulfato y la luz solar afectan a las reacciones químicas que transforman los óxidos de hierro menos solubles en formas amorfas más solubles (Fan *y col*., 2006).

Las partículas de polvo transportan al océano alrededor de 16 Tg de Fe por año. Una vez que se encuentran en la capa superficial, se disuelve un porcentaje reducido (entre el 1% y el 10%) del Fe de las partículas (tabla 1). Esta disolución es limitada porque el *p*H del agua de mar disminuye casi exactamente al mínimo de solubilidad de los óxidos férricos (Fe^{III}) (Waite, 2001). La reducción fotoquímica del Fe^{III} y la presencia de quelantes orgánicos fuertes de fijación al Fe en el agua de mar pueden incrementar de manera significativa el nivel de disolución del Fe presente en el polvo. Del hierro disuelto resultante en las aguas superficiales, la mayor parte se observa en el estado de oxidación del Fe^{III} fijado a fuertes quelantes; no obstante, una reducción fotoquímica induce variaciones diurnas en concentraciones de hierro no complejo o Fe´ (Fan, 2008).

La captación biótica es el proceso dominante que consume el hierro disuelto en el océano superficial. El Fe´ no complejo se encuentra disponible para la más amplia variedad de organismos (Hudson y Morel, 1990), aunque, en general, constituye una fracción muy pequeña del Fe disuelto. Muchos microbios tienen la capacidad de captar directamente el Fe quelado (FeL) y en realidad producen parte de las moléculas quelantes presentes a fin de solubilizar el Fe o superar a otros organismos que compiten por el Fe. Se sabe que el fitoplancton de mayor tamaño supera la oferta reducida de Fe´ mediante la reducción enzimática extracelular del Fe quelado para formar especies de Fe^{II} de mayor disponibilidad (Maldonado *y col*., 2001) (figura 1). La competencia entre la captación por parte de organismos vivos y el arrastre por parte de las partículas hace que el Fe tenga un tiempo de residencia breve de alrededor de un mes en la superficie del océano.

Asimismo, la captación biológica agota las concentraciones de Fe en la superficie del océano, al igual que lo hacen los principales nutrientes, como N y P, en la mayoría de los océanos del mundo. Por este motivo, los ciclos del hierro en el océano superficial pueden caracterizarse por medio de estequiometrías de tipo Redfield (en particular, las que difieren entre organismos). El requisito mínimo de Fe es exhibido por las diatomeas, que necesitan ~0,0000025 moles de Fe por mol de carbono. Estudios oceanográficos realizados (de Jong *y col*., 2007) indican que el picoplancton necesita Fe en niveles casi diez veces mayores, o 0,00002 moles de Fe por mol de C. Se considera que los organismos de fijación de N_2 poseen el mayor requisito de Fe, 0,000025 moles de Fe por mol de C, si bien los requisitos de Fe sólo se han caracterizado hasta la fecha respecto de pocas especies diazotróficas. La semejanza de la química marina del Fe con la de los principales nutrientes se extiende también a su vasto reciclaje mediante el pastoreo

Tabla 1
Aportes de hierro en aguas superficiales del océano costero y abierto.

Fuente de hierro	Flujo anual (Tg/año^{-1})[a]
Aportes en aguas superficiales del océano costero	
Partículas fluviales	De 625 a 962
Sedimentos glaciales	De 34 a 211
Resuspensión por afloramiento	?[c]
Erosión costera	8
Disolución fluvial	1,5
Difusión de sedimentos de plataformas	>0,1[b]
Disolución de partículas resuspendidas	?[c]
Aportes en aguas superficiales del océano abierto	
Depósito húmedo y seco de partículas de polvo	16
Disolución de partículas de polvo	De 0,2 a 0,3
Transporte disuelto desde la plataforma	Bajo
Afloramiento del interior del océano	Bajo

[a] Con la excepción de lo indicado por Jickells *y col*. (2005)
[b] Elrod *y col*. (2004)
[c] Johnson *y col*. (2001)

© 2008 Climos

sobre picoplancton dentro de la capa superficial y a su remineralización en paralelo con el C, N y P en las partículas biogénicas que se sumergen. En consecuencia, el Fe exhibe un perfil de concentración semejante al de los nutrientes en los 1000 *m* de la superficie del océano (Martin y Gordon, 1988).

Sin embargo, el hierro no se comporta como el N o el P a mayores profundidades (Johnson *y col*., 1999). En lugar de acumular Fe remineralizado cuando la circulación en el océano profundo transporta agua por las cuencas de los océanos Atlántico e Indo-Pacífico, el Fe se elimina constantemente en las profundidades mediante su *arrastre*. El término "*arrastre*" es genérico y se utiliza para describir los procesos (adsorción a partículas y precipitación en la forma de minerales insolubles) mediante los cuales los metales como el Al, Fe y Th son eliminados del interior del océano. Puesto que el Fe se hidroliza de manera pronunciada como el Al y Th, también puede ser arrastrado significativamente, aunque sus concentraciones no disminuyan con la profundidad como se observa con el Al y Th. Este comportamiento excepcional es causado por i) la presencia de moléculas quelantes de Fe o "ligandos" orgánicos en el agua de mar que mantienen niveles más elevados de Fe en solución y ii) la reversibilidad del proceso principal de arrastre, la precipitación del estado de oxidación (Fe^{III} o férrico) favorecido termodinámicamente como óxidos de hierro. En consecuencia, las concentraciones de hierro en las aguas profundas no aumentan tanto como las de N y P entre las cuencas del Atlántico y del Pacífico.

Un proceso adicional en el interior del océano ejerce una influencia posiblemente importante sobre sus concentraciones: la reducción microbiana de Fe^{III} en las zonas de oxígeno mínimo o hipóxicas (Moore *y col*., 2006). A concentraciones de oxígeno muy bajas, las bacterias respiran utilizando óxidos de nitrato y hierro. Puesto que la solubilidad del Fe^{II} reducido es prácticamente ilimitada en comparación con la del Fe^{III}, este proceso puede contribuir a solubilizar el Fe presente en las partículas detríticas y de polvo que se sumergen.

Como se sabe hoy en día, los registros de núcleos de sedimentos marinos demuestran que durante períodos glaciales el depósito de polvo en el océano aumentó de 2 a 20 veces respecto de los flujos interglaciales actuales (Lambert *y col*., 2008). Las correlaciones entre el Fe y el sílice biogénico en los sedimentos sugieren que el aumento del hierro contribuyó a incrementos de la productividad de diatomeas durante los periodos máximos glaciales pasados. Es posible que la liberación resultante de hierro en exceso en el océano a) haya permitido que el fitoplancton en regiones HNLC agote una mayor porción de los nutrientes superficiales (y bombee con mayor eficacia C hacia el interior del océano), b) haya estimulado el bombeo de carbono a mayores profundidades del océano mediante la estimulación de diatomeas en relación con otro plancton y c) haya estimulado el crecimiento de diazotrofos, liberando al océano de su deficiencia de nitrógeno en relación con el fosfato (Moore *y col*., 2006). Los estudios de modelos indican que estos factores juntos podrían haber contribuido de manera considerable con la reducción del CO_2 durante el máximo glacial. Estos efectos del Fe se habrían ampliado si también hubieran aumentado los niveles de fosfato en el océano, según se indica en estudios recientes de núcleos de sedimentos marinos (Filippelli *y col*., 2007).

La fertilización de océanos con hierro en regiones HNLC, según lo demostrado hasta la fecha, exhibe importantes semejanzas y diferencias respecto de los aportes naturales de hierro en el océano. La primera diferencia consiste en que durante la OIF, se añade el hierro al agua como Fe^{II} en lugar de óxidos Fe^{III}. No obstante, el Fe^{II} añadido se oxida a Fe^{III} en cuestión de minutos y las concentraciones superiores a los 0,5-1 nM fijadas por ligandos naturales se precipitarán como óxidos Fe^{III} amorfos. En consecuencia, si bien no es igual a un agregado de polvo, la diferencia está dada principalmente por las reacciones muy breves que tienen lugar y posiblemente por la fracción que queda disuelta. Una segunda diferencia está dada por los lugares geográficos. Se ha previsto utilizar la OIF en zonas en las que el aporte de polvo al océano es mínimo durante los períodos interglaciales. Por ende, el ciclo del hierro se aumentará significativamente en esas zonas si se compara con su funcionamiento actual, aunque tal vez no en comparación con el ciclo del hierro observado durante condiciones del máximo glacial, en las que se produjeron grandes aportes de hierro en regiones HNLC.

Uso del modelo conceptual en el informe ambiental maestro

El modelo conceptual se utilizará para elaborar un informe ambiental maestro (MER, por sus siglas en inglés) ya que proporcionará una descripción de los ciclos biogeoquímicos que se producen en el océano y permitirá comprender el mecanismo de funcionamiento de la OIF. En el informe se incluirá una descripción del diseño del proyecto planificado y los beneficios previstos. En la tabla 2 se indican los principales componentes del MER.

Tabla 2
Contenido del MER

Resumen del proyecto previsto
Descripción general de la OIF
- Descripción del diseño del proyecto
- Criterios de selección de sitios
- Posibles beneficios del proyecto
- Posibles efectos del proyecto
  - Biota marina local
  - Niveles tróficos más elevados
  - Química de océanos
  - Gases con efecto invernadero
  - Otros gases
- Resumen de problemas y respuestas
- Procedimientos de supervisión
- Medidas de mitigación
- Bibliografía

© 2008 Climos

Para abordar los posibles beneficios y efectos del proyecto, en el modelo conceptual se analizarán las principales inquietudes planteadas respecto de la eficacia de la OIF como técnica de captura de carbono y los posibles efectos ecológicos derivados de la estimulación de la producción primaria en aguas marinas. En la tabla 3 se ofrece una lista de las principales inquietudes.

Tabla 3
Principales inquietudes ambientales consideradas en el modelo conceptual de fertilización de océanos con hierro

Los océanos son la principal fuente de oxígeno del mundo y un sumidero del CO_2 atmosférico. Cualquier factor que repercuta en los procesos afines constituye una inquietud ambiental. El modelo conceptual de la OIF identificará estas inquietudes planteadas por distintos grupos y explicará cómo puede darse respuesta a ellas mediante la supervisión de campo y las contingencias incorporadas en el diseño del experimento.

Remineralización	Una fracción del carbono fijado como biomasa de algas, partículas fecales, etc., podría mineralizarse mucho antes de asentarse y pasar a formar parte del depósito profundo o la pérdida respecto de sedimentos. Por ende, es posible que no se capture una porción variable del carbono fijado.
Captura permanente	Se requiere hacer mediciones para demostrar que la OIF es eficaz y que el carbono es capturado en profundidades de unos 400 m; los experimentos de la OIF, en general, no midieron los flujos de carbono orgánico en partículas en aguas profundas durante >30 días.
Menor producción primaria	El autooscurecimiento y/o el enfriamiento debidos al aumento de la productividad podría afectar a la columna de agua en el océano más profundo.
Eficacia de la OIF	Aún no se ha dilucidado con certeza el aporte de la OIF a la reducción del CO_2 en la atmósfera; su eficacia podría ser importante a la luz de los posibles efectos ambientales adversos. Es preciso realizar mediciones del flujo aire-mar para demostrar la reducción del CO_2 en aire.
Pureza y destino del hierro	Es posible que la fuente de hierro utilizada para la OIF introduzca otros metales traza como impurezas, que podrían ejercer efectos tóxicos en la biota de la columna de agua. Asimismo, es preciso demostrar el destino del hierro añadido, en especial la cantidad que llega a la columna de agua inferior y los posibles efectos sobre los organismos bénticos.
Hipoxia/Anoxia	El material detrítico derivado del crecimiento del fitoplancton y su sedimentación podría demandar recursos de oxígeno en el océano a medida que se descompone.
Algas tóxicas	Podría haber crecimiento de algas tóxicas durante la fertilización, p. ej., dinoflagelatos y algunas especies de diatomeas.
Formación de subproductos	Podrían generarse otros gases con efecto invernadero (p. ej., N_2O, CH_4) y otros compuestos (p. ej., dimetil sulfuro) durante la OIF o después de ella.
Agotamiento de nutrientes aguas abajo	El N y P eliminados por la fertilización con hierro pueden agotarse para sustentar la cadena alimentaria aguas abajo (corriente abajo).
Efectos en la cadena alimentaria y alteraciones del ecosistema	La OIF podría estimular cambios en los tipos y las cantidades relativas de especies de plancton, lo que podría afectar a los niveles tróficos más elevados como peces, aves o mamíferos.
Ciclos biogeoquímicos	La captura de carbono adicional podría tener efectos perjudiciales en los ciclos de otros elementos y compuestos oceánicos, como por ejemplo el sílice.
Otros efectos fisicoquímicos	La OIF podría inducir el aumento de la acidificación del océano o cambios en la temperatura natural de la superficie marina y los flujos de calor superficial. Además, la OIF podría contribuir con la eutroficación.
Otros efectos biológicos	Es posible que la OIF interfiera en los patrones de reproducción o migración, en especial de las especies amenazadas.

© 2008 Climos

Elaboración del modelo conceptual y del informe ambiental maestro

El modelo conceptual de la OIF y el informe ambiental maestro serán elaborados por el grupo de Investigación y Desarrollo de Tetra Tech de Lafayette, California. Tetra Tech es una empresa consultora y de ingeniería multinacional líder con vasta experiencia en el análisis del impacto ambiental. El Grupo de Investigación y Desarrollo de Tetra Tech posee experiencia especializada en biogeoquímica, ciclos del carbono y modelos acoplados del clima global, así como en la elaboración de informes pormenorizados de impacto ambiental en una amplia gama de proyectos. El equipo ha sido reconocido por sus importantes contribuciones científicas y la capacidad para comunicar de manera eficaz los resultados de estudios a una amplia audiencia de partes interesadas y encargados de tomar decisiones. El informe de Tetra Tech sobre los ciclos biogeoquímicos del mercurio en lagos (Hudson *y col*., 1994) es un buen ejemplo del método técnico aplicado para elaborar este tipo de modelo conceptual. En http://www.sanjoseca.gov/esd/PDFs/CMR-Cvr-Sec-3.pdf puede encontrarse un ejemplo de un modelo conceptual elaborado para explorar y explicar el comportamiento de los metales en el entorno de estuarios.

Bibliografía

de Jong, J.T.M., M. Boyé, M.-B. Gelado-Caballero, K.R. Timmermans, M.J.W. Veldhuis, R.F. Nolting, C.M.G. van den Berg, abd H.J.W. de Baar (2007). *Marine Chemistry* **107**: 120–142.

Elrod, V.A., W.M. Berelson, K.H. Coale, and K.S. Johnson (2004). *Geophysical Research Letters* **31:** L12307.

Fan, S-M. (2008). *Marine Chemistry* **109**: 152-164

Fan, S-M., W.J. Moxim, and H. Levy II (2006). *Geophysical Research Letters* **33:** L07602

Filippelli, G.M., J.C. Latimer, R.W. Murray, and J.-A. Flores (2007). *Deep-Sea Research* Pt. II **54**: 2443-2452.

Hudson, R.J.M., S.A. Gherini, C.J. Watras, and D.B. Porcella, "Modeling the biogeochemical cycle of mercury in lakes: The Mercury Cycling Model (MCM) and its application to the MTL Study lakes." In Mercury as a Global Pollutant: Toward Integration and Synthesis, C.J. Watras and J.W. Huckabee [eds.] Lewis. Boca Raton, FL. pp. 473-523 (1994).

Hudson, R.J.M. and F.M.M. Morel (1990). *Limnology and Oceanography* **35**: 1002-1020.
Jickells, T.D. *y col*. (2005). *Science* **308**: 67.

Johnson, K.S., Gordon, R.M. Coale, K.H. (1997). *Marine Chemistry* **57**: 137.

Johnson, K.S., F.P. Chavez, and G.E. Friederich (1999). *Nature* **398**: 697.

Johnson, K.S., F.P. Chavez,V.A. Elrod, S.E. Fitzwater, J.T. Pennington, K.R. Buck and P.M . Walz (2001) *Geophysical Research Letters* **28**: 1247-1250.Lambert, F. B. Delmonte, J. R. Petit, M. Bigler, P. R. Kaufmann, M. A. Hutterli, T. F. Stocker, U. Ruth, J. P. Steffensen and V. Maggi (2008). *Nature* 452: 616-619

Maldonado, M.T. and N.M. Price (2001). *Journal of Phycology* 37: 298-309

Martin, J.H. and R.M. Gordon (1988). *Deep-Sea Research* **35**: 177-196,

Moore, K., S.C. Doney, K. Lindsay, N. Mahowald, and A.F. Michaels (2006). *Tellus* **58B**: 560-572.

Waite, T.D. (2001). Thermodynamics of the Iron System in Seawater *in* The Biogeochemistry of Iron in Seawater, *IUPAC Series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems*, D.R. Turner and K.A. Hunter, Eds. Wiley-Interscience, New York.

© 2008 Climos