

Intercambio de gases en la superficie del mar y Surgencia en el Caribe Colombiano

Por

José Luis Hernández¹ y Serguei Lonin²

¹Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA

²CIOH, Cartagena, Colombia

Introducción:

Surgencia e Intercambio de Gases

- A nivel de márgenes continentales, la surgencia costera soporta sistemas marinos productivos a través del transporte de nutrientes a la zona eufótica, incrementando el plankton que funciona como una “bomba biológica”, la cual reduce el CO₂ atmosférico y controla el intercambio de gases con la atmósfera a través de variados procesos biogeoquímicos.
- Desde el punto de vista del clima, el intercambio de gases en la superficie del mar es un proceso importante que regula la abundancia de gases invernadero, los que a su vez controlan la transferencia de calor en la atmósfera y en consecuencia influyen en el calentamiento en la superficie del planeta.

Introducción (2)

- Es bien conocido que el caribe colombiano presenta surgencia costera más notable bajo la intensificación de vientos paralelos a la costa a comienzos del año. Dicho fenómeno afecta los ciclos anuales de temperatura del mar, concentración de nutrientes y productividad primaria.
- Nuestro propósito es discutir el intercambio de gases partiendo de diferentes modelos de turbulencia que emplean variables meteorológicas y presentar resultados comparativos de anomalías de flujo de óxido nitroso (N_2O , potente gas invernadero) con la surgencia costera. Igualmente explorar el efecto de la surgencia en la reducción de oxígeno en la superficie del mar.

Objetivos

- Discutir modelos de intercambio de gases empleando datos de NODC-WOA98 y UWM-NODC para el Mar Caribe.
- Presentar la climatología regional mensual de variables relevantes en el intercambio de gases y presupuesto de energía (1980-1997 COADS).
- Estimar la concentración superficial de N_2O y discusión de anomalía del flujo atmósfera-océano de N_2O en conexión con el ciclo anual de la concentración de oxígeno en la superficie del mar.

Contenido

1. Modelos de Intercambio de Gases:

- Teoría básica y variables de entrada
- Velocidad de transferencia:

(1) Waninkhof (1992); (2) Erickson (1993)

2. Climatología regional:

- 1981-1997 COADS ; - 1998 AVHRR MCSST
NOAA/NODC (datos de entrada a los modelos)
- ASMD94: proyecto conjunto UWM-NODC
- WOA98: World Ocean Atlas

3. Surgencia costera y oxido nitroso

- Resumen
- Bases del estimado
- Correlación lineal negativa

Continúa ...

Contenido

4. Mapas de anomalía de Flujo de N_2O

- Modelo de Waninkof
- Modelo de Erickson

5. Resultados y discusión

- Tabla estadística

6. Conclusión

7. Referencias

Modelos de Intercambio de Gases: Teoría

Los modelos de intercambio turbulento emplean ecuaciones básicas, parametrizaciones con variables medibles y estadística como base para calcular el flujo del gas (F_g). Ellos dependen del gradiente de concentración del gas en la interfase, del grado de turbulencia en la superficie generada por el viento (W) y de la estabilidad térmica que depende de temperatura y humedad.

$$F_g = k_w (C_w - \alpha_s C_a) \quad (1)$$

k_w = velocidad de transferencia {es la **principal diferencia entre los modelos**}
 C_w, C_a = concentraciones del gas en el aire y mar cerca a la superficie
 α_s = coeficiente de solubilidad del gas

Velocidad de transferencia (K_w)

- K_w describe la fisicoquímica de la transferencia a través de parametrizaciones y hace posible la extensión a otros gases en unidades equivalentes usando el número de Schmidt (Sc). Su aplicación se limita a velocidad del viento (W) < ~15 m/s
(Doneland et al (eds), 2002; Kraus & Businger, 1994.)

- Ciertos gases (O_2 , N_2 , N_2O , CO_2 , CH_4) de interés en ciclos biogeoquímicos son descritos por:

$$K_w = A Sc^n (da/dw)^{1/2} U_* \quad (2)$$

Donde: $n = -2/3$ ($W < 5\text{m/s}$); $-1/2$ ($5\text{m/s} < W < 10\text{m/s}$)
 da/dw = razón de densidades aire-agua de mar
 U_* = velocidad de fricción

La ec. (2) es el tipo usado por Wanninkhof con $n = -1/2$

Continúa ...

Velocidad de transferencia (K_w)

Otros modelos consideran cambios en el estado de la superficie del mar y estabilidad térmica afectando sustancialmente la transferencia del gas. Erickson (1993) considera la velocidad de transferencia:

$$K_{er} = K_m (1 - Wh) + K_t Wh \quad (3)$$

$$K_m = 5 \text{ cm/hr} ; \quad K_t = 1300 \text{ cm/hr} \quad Wh = 0.2 U_a^*$$

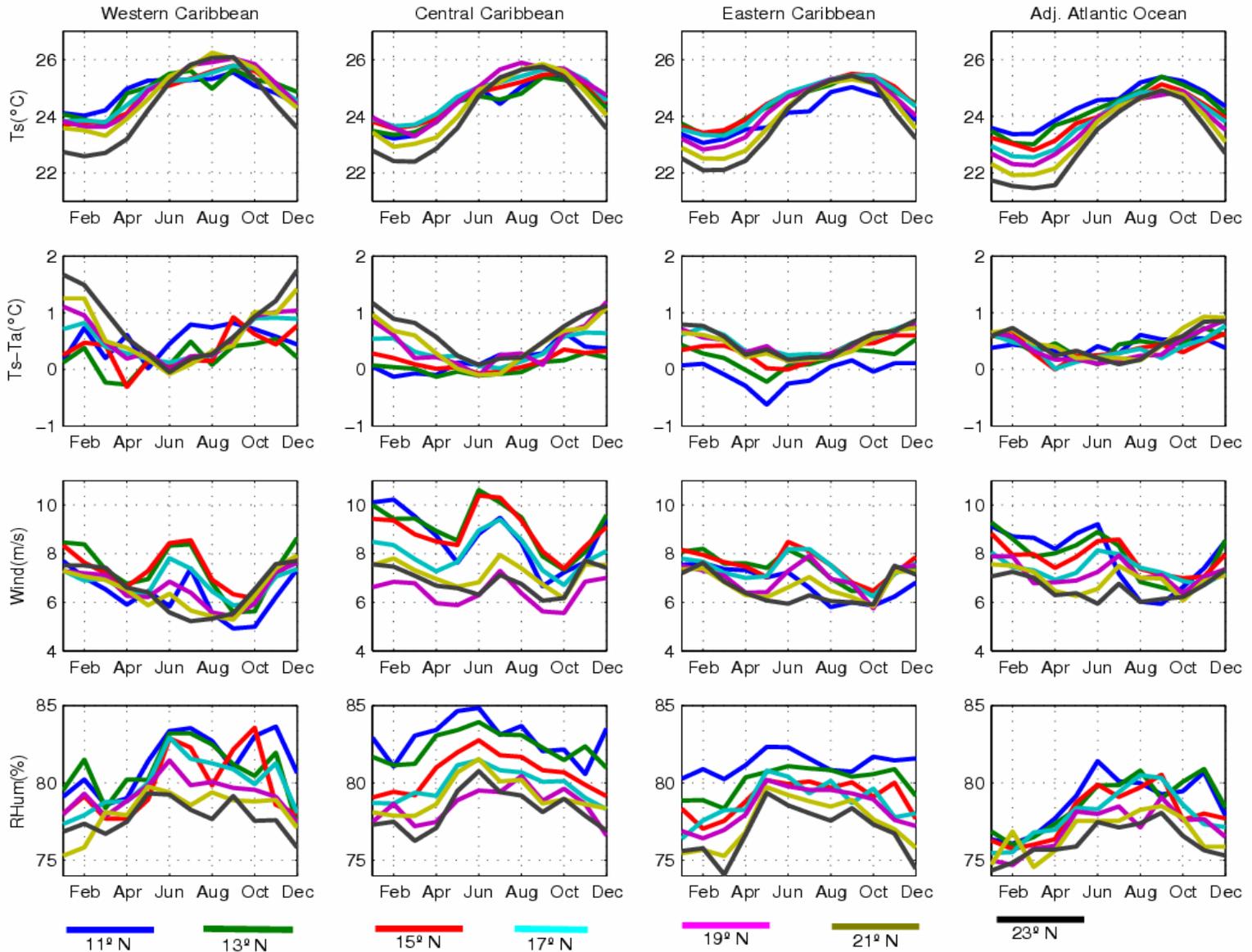
A través del modelo de Erickson el flujo se obtiene en dos intervalos de velocidad del viento:

$$F_{er} = K_{er} \left[\frac{Sc_{N_2O}}{Sc_{Rn}} \right]^n \quad (4) \quad \begin{array}{l} n = -1/2 \text{ si } W > 3.6 \text{ m/s} \\ n = -2/3 \text{ si } W < 3.6 \text{ m/s} \end{array}$$
$$Sc_{N_2O} = -0.0433 Ts^3 + 3.63 Ts^2 - 126 Ts + 2073$$
$$Sc_{Rn} = -0.0555 Ts^3 + 5.50 Ts^2 - 202 Ts + 3147$$

Climatología regional (1)

- En la climatología regional se han considerado variables relevantes a la evaluación de intercambio de gases y presupuesto de energía en la superficie del mar. Distinguiremos cuatro regiones que cubren el Mar Caribe y Océano Atlántico vecino (10°N a 24°N y 88°W a 48°W). En tales regiones las distribuciones de parámetros del clima se distinguen esencialmente por sus elongaciones anuales y variación espacial. Las regiones son: Oeste($88\text{W}-78\text{W}$), Central($78\text{W}-68\text{W}$), Este($68\text{W}-58\text{W}$), Atlántico adyacente ($58\text{W}-48\text{W}$).
- La temperatura presenta una variación anual bien definida principalmente en áreas oceánicas ($\text{lat} \geq \sim 17^{\circ}$), mientras que latitudes cercanas a la costa muestran mayormente variación semi-anual en conexión con el ciclo de intensidad del viento.

1981–1997 COADS Annual Mean Cycles

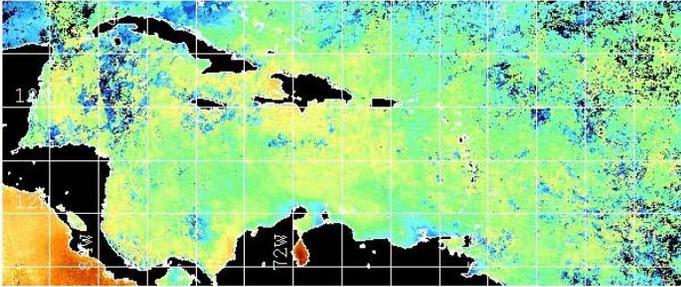


Climatología regional (2)

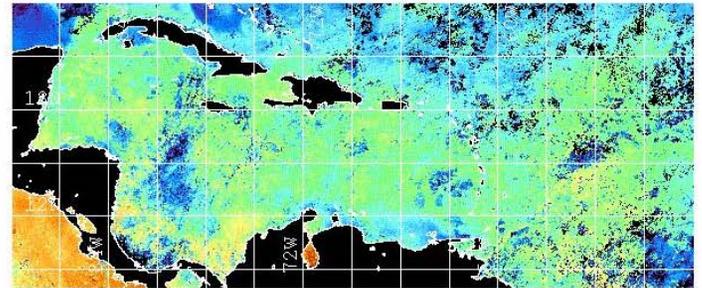
- La intensificación del viento, Diciembre-Marzo y mitad del año (Veranillo de San Juan) cerca a la costa (11° - 13°) conlleva a una disminución en la temperatura superficial del mar y promueve la surgencia costera. Bajo tal incremento en los vientos alisios, la humedad relativa levemente disminuye en el Caribe según 1980-1997 COADS. La intensificación de viento produce efectos contrarios en el gradiente térmico atmósfera-océano ($T_s - T_a$) que aumenta de Nov-Feb mientras tiende a ser uniforme hacia Junio-Julio.
- El Caribe occidental y Central son más inestable térmicamente presentando mayores oscilaciones en sus variables del clima.
- Las imágenes de satélite corroboran la climatología mensual obtenida por COADS 1981-1997. En ellas la temperatura superficial del mar en áreas costeras decae de Febrero y Marzo.

1998 Sea Surface Temperature: NOAA-12 AVHRR

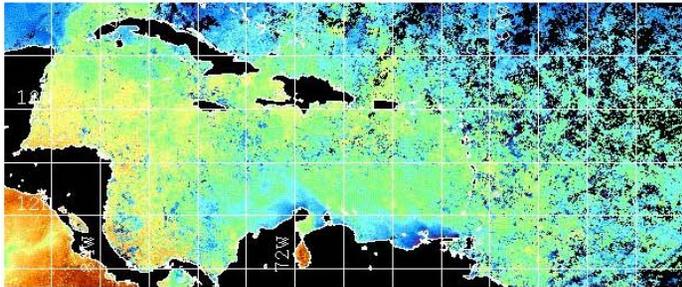
January



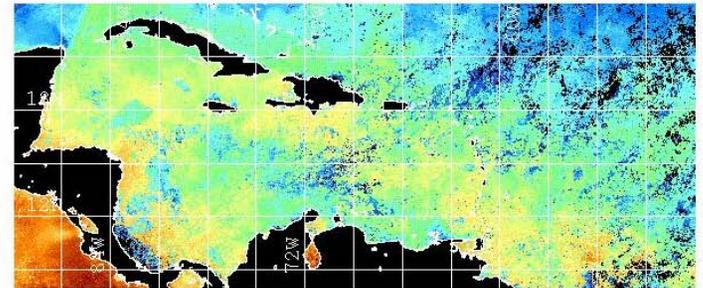
February



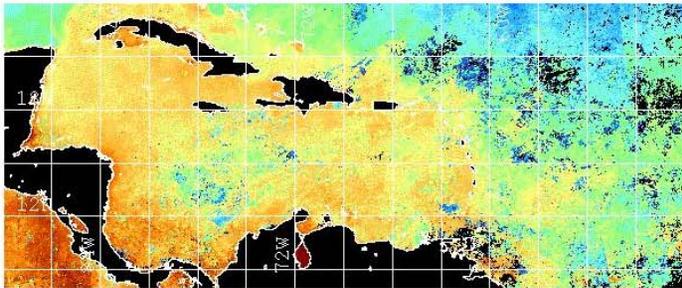
March



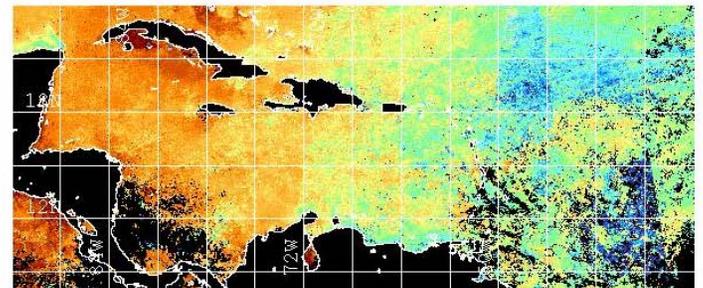
April



May



June

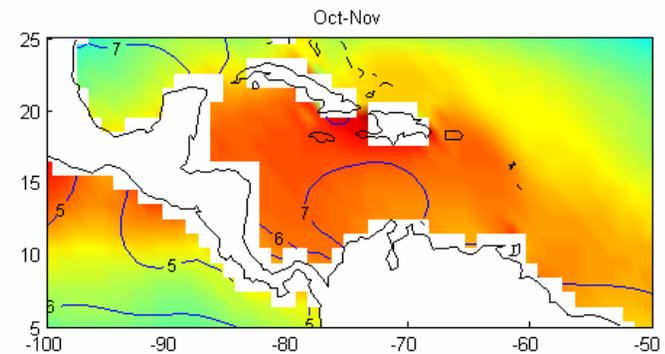
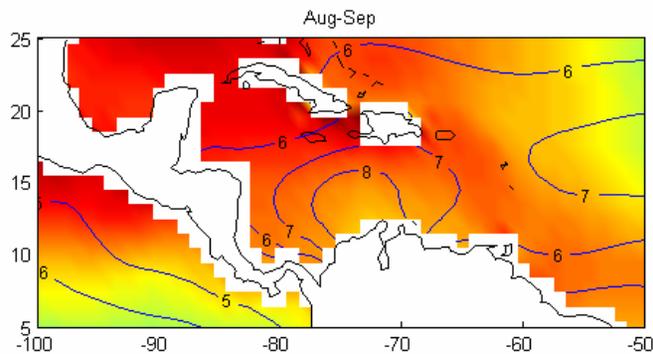
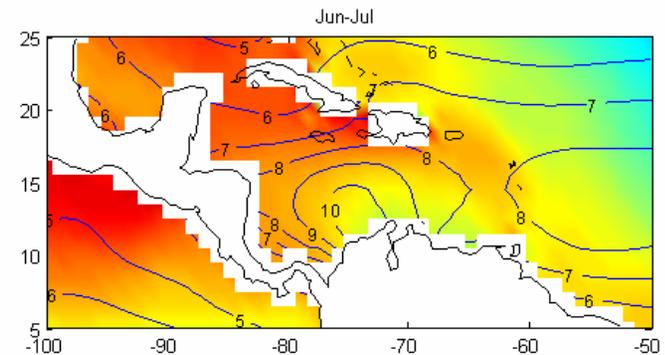
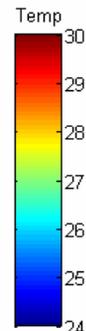
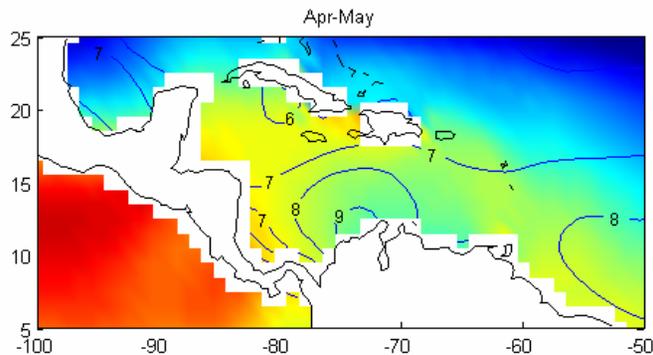
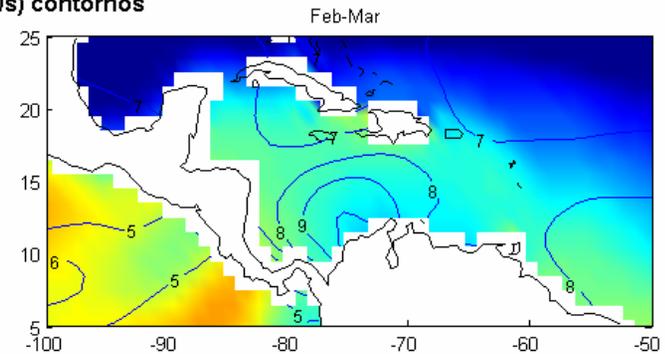
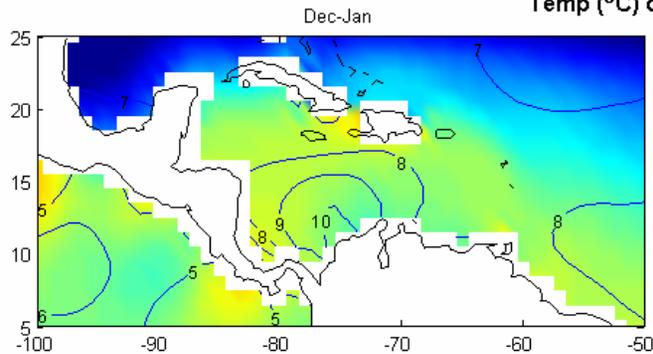


Climatología regional (3)

- La humedad relativa no manifiesta un ciclo anual o semianual definido, sin embargo, claramente las áreas costeras tienden a ser más húmedas que las oceánicas con un leve aumento ($< 5\%$) de Abril a Junio con respecto a la temporada seca de Diciembre a Marzo.
- Las cuatro variables: T_s , $T_s - T_a$, velocidad del viento y humedad relativa son relevantes al intercambio de gases. Entre ellas el viento juega un papel importante en la mezcla en los dos ambientes, en el intercambio de gases y el control de la energía mecánica del aire hacia el mar y en el gradiente térmico en la interfase.
- Bajo condiciones extremas de viento, la interfase se pierde y en muy corto tiempo la transferencia supera largos períodos de vientos moderados.

Datos de Entrada: ASMD94/UWM-NODC

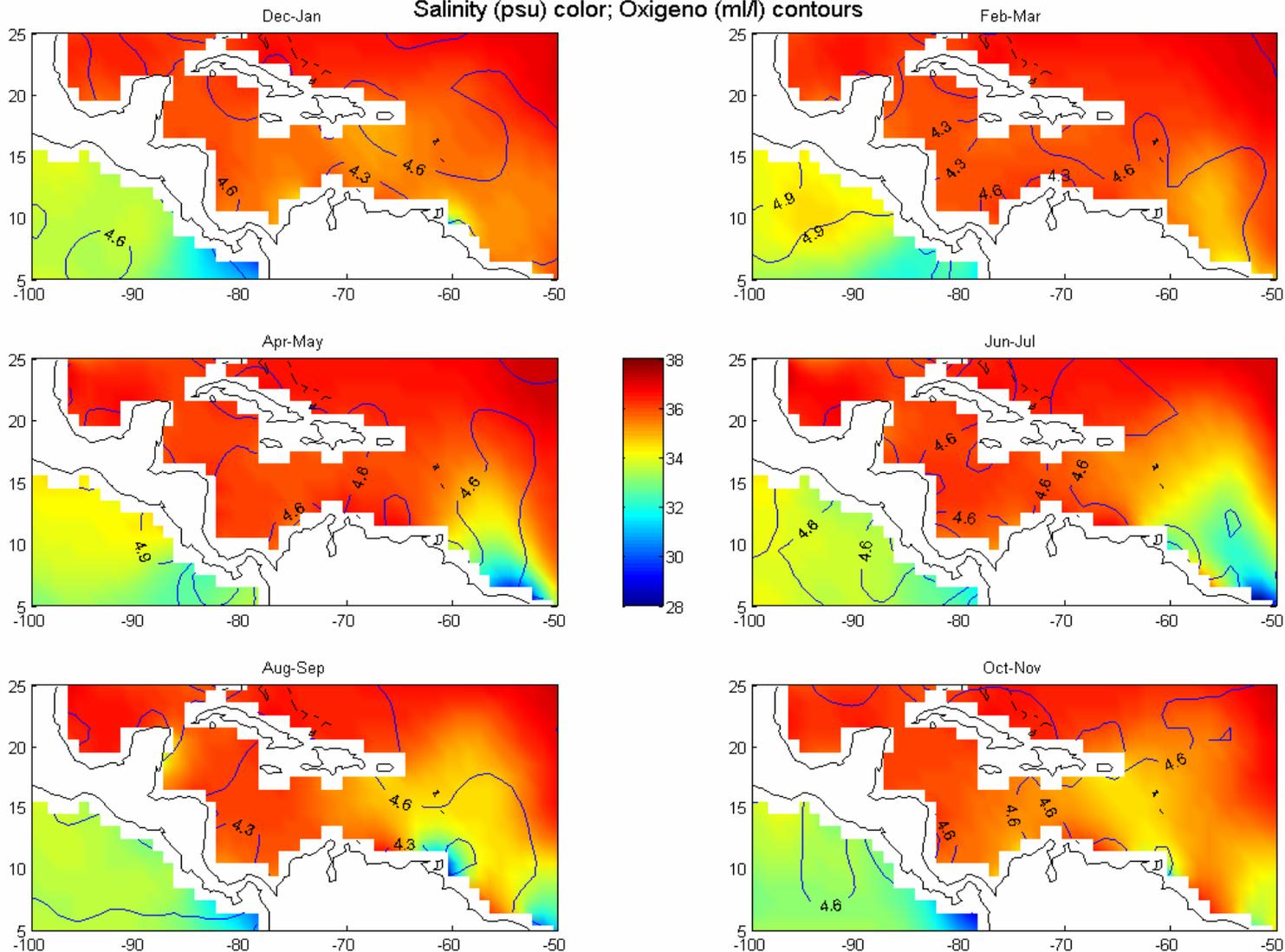
Temp (°C) color; Viento (m/s) contornos



La intensificación del viento de Feb-Mar y Jun-Jul coincide con la disminución de la temperatura superficial cerca a la costa en el Caribe Colombiano. Según las climatologías de ASMD94, 1981-1997 COADS y 1998-AVHRR el viento alcanza a disminuir la temperatura local en 1°C respecto a aguas vecinas.

Datos de Entrada: WOA 2001 / NODC

Salinity (psu) color; Oxígeno (ml/l) contours



De acuerdo con WOA-2001 la salinidad en el Caribe no sufre mayores cambios anuales; sin embargo el oxígeno disuelto muestra disminución cerca de la costa colombiana y venezolana de Diciembre-Marzo que coincide con períodos de surgencia. Los ríos Orinoco y Amazonas afectan mayormente la salinidad del Caribe oriental y el O₂ en áreas costeras al comienzo del segundo semestre.

Surgencia costera y Oxido Nitroso (1)

Aunque ya se había evidenciado que las zonas costeras y las áreas de surgencia presentan altas concentraciones de N_2O (Delwiche, 1981); solo recientes estudios han estimado que un 35% de emisiones marinas provienen de ambientes costeros (Seitzinger, 2000) y que las áreas de surgencia costera son una fuente importante de este gas (Nevison et al 2004; Suntharalingam y Sarmiento, 2000).

La surgencia provee ventilación al N_2O que de otra forma estaría atrapado en aguas subsuperficiales (aprox. 350m a 1000m) las cuales se encuentran supersaturadas de este gas respecto a la atmósfera.

Continúan siendo debatibles los estimados de producción de N_2O en el perfil vertical, y su flujo aire-mar, especialmente en costas y áreas de surgencia donde es sujeto a complejas transformaciones biogeoquímicas (reacciones bacterianas, nitrificación-rem mineralización y desnitrificación) bajo diferentes escalas de tiempo y espacio.

La surgencia tiene lugar en escalas de tiempo de horas a días. Su naturaleza episódica hace muy difícil determinar su efecto en el intercambio de gases a partir de métodos oceanográficos tradicionales.

Surgencia costera y Oxido Nitroso (2)

Actualmente los flujos estimados por todos los métodos ofrecen grandes incertidumbres y son difíciles de validar con observaciones directas. Nevison et al, 2004 reporta un 70% de incertidumbre para emisiones en zonas de surgencia.

Bases del estimado de N₂O en la superficie:

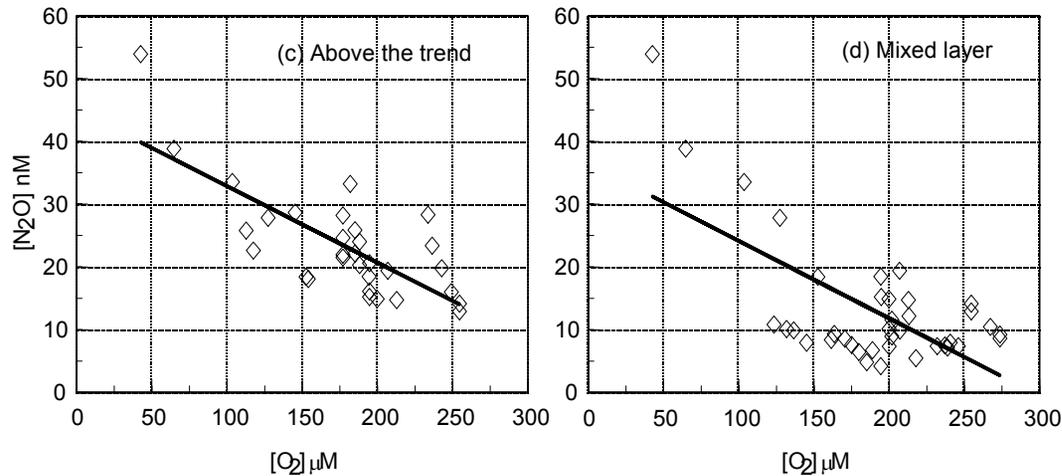
- Los perfiles verticales de N₂O y O₂ disuelto están correlacionados negativamente hasta cierto nivel limitante de oxígeno debajo del cual la correlación se pierde.
- Nosotros consideramos la correlación de observaciones (N₂O, O₂) en los primeros 100m que corresponde a un 15% del nivel de oxígeno mínimo (~700m).

$$[N_2O] = -0.12[O_2] + 36.48 \quad (\text{Mixed layer}) \quad (5)$$

coeficiente de correlación: - 0.66

incertidumbre: ± 59.55

Surgencia costera y Oxido Nitroso (3)



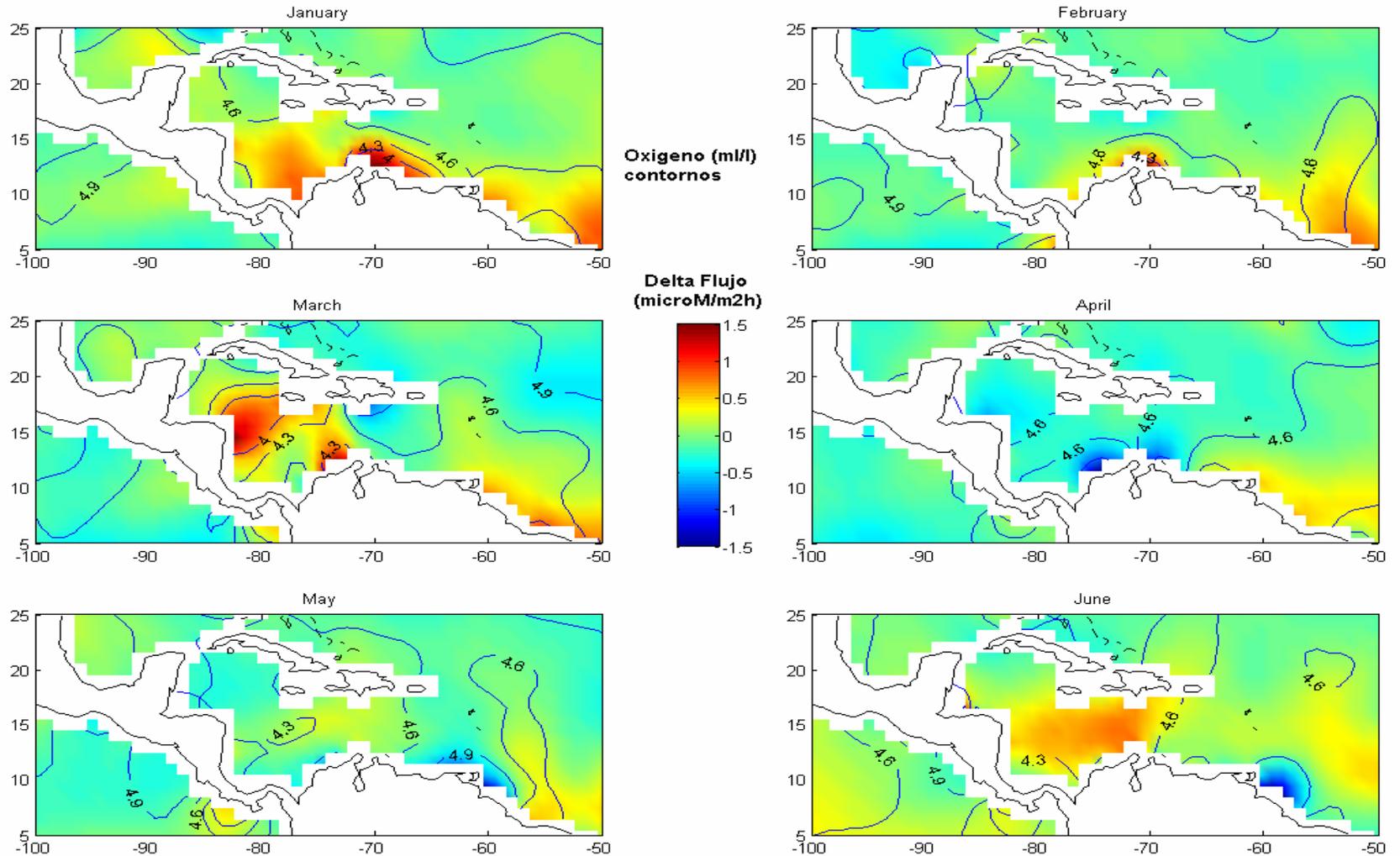
- Esta gráfica muestra perfiles de $[O_2]$ y $[N_2O]$ en el Caribe y Atlántico Tropical tomadas de anteriores investigaciones (Aguilera et al, 1992; Oudot et al, 1990; Hashimoto et al, 1983) los que fueron considerados para el calculo de $[N_2O]$ en la superficie del océano.

En lugar de calcular el flujo absoluto calcularemos la anomalía de flujo, $\Delta Flx(i,j)$, ya que estamos interesados en explorar el efecto de la surgencia en el aumento de emisión de N_2O .

$$\Delta Flx(i,j) = Flx(i,j) - \text{average}(Flx(i,j)) \quad (6)$$

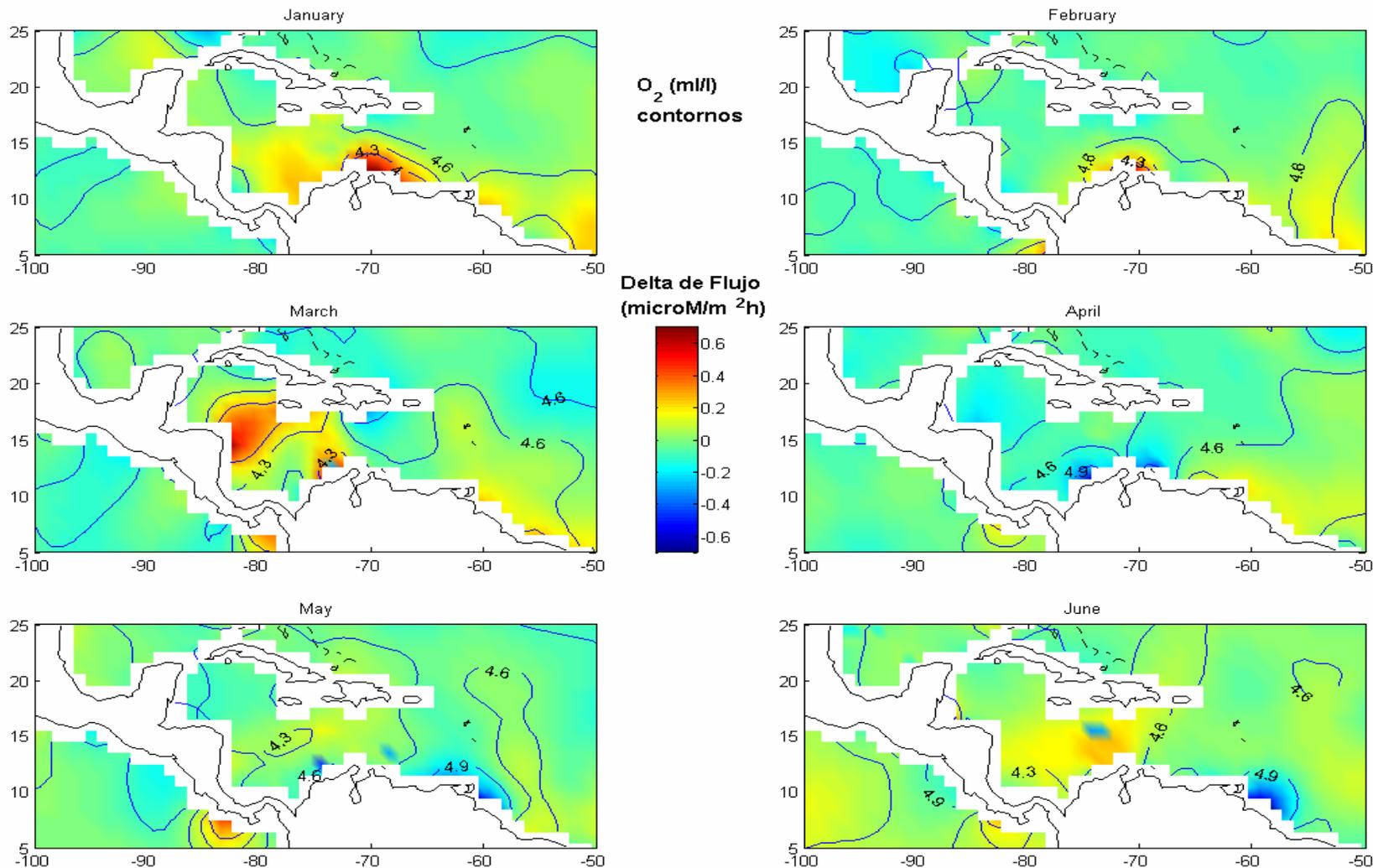
- La aproximación (5) puede sobre estimar el flujo del gas en $\pm 60\%$ según el calculo de error; sin embargo el valor absoluto del flujo no es de interés en nuestro objetivo.

Anomalia de Flujo de N₂O en la Superficie: Modelo de Waninkhof



Los meses de Enero a Marzo presentan un aumento del flujo que supera el 150% con respecto a su promedios mensuales de 0.93, 0.8 y 0.76 microM/m2h respectivamente.

Anomalia de Flujo de N_2O en la Superficie: Modelo de Erickson



Igual que el modelo anterior, el modelo de Erickson refleja un aumento (con menor intensidad) en la emisión de N_2O en aquellas áreas de surgencia donde simultáneamente la concentración de O_2 disminuye.

Resultados

Unidades: $\mu\text{Mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$

	Wanninkof(1992) long term winds				Erickson (1993) Whitecap model:			
	max	min	Aver	St.dev	max	min	Aver.	St.dev
Enero	4.8302	-2.1617	0.9257	0.6048	1.7257	-1.3574	0.3937	0.2260
Febrero	4.0453	-2.3286	0.7971	0.5657	1.4440	-1.5120	0.3496	0.2146
Marzo	3.77	-2.9379	0.7621	0.6711	1.2971	-1.8905	0.3388	0.2618
Abril	2.0728	-2.3221	0.7161	0.5388	0.7806	-1.4257	0.3366	0.2087
Mayo	2.5436	-1.1713	0.7865	0.5332	0.8987	-0.7105	0.3629	0.1998
Junio	3.2721	-0.7178	1.0085	0.4878	1.1243	-0.4014	0.4524	0.1478
Julio	3.0141	-0.6319	1.0189	0.4526	2.0235	-0.4064	0.4652	0.1571
Agosto	2.8503	-0.4109	1.0478	0.3521	1.3010	-0.2447	0.4910	0.1043
Sept	2.6588	0.2041	1.0725	0.2849	1.2148	0.1029	0.5004	0.0960
Octubre	1.7810	-0.4608	1.0431	0.2446	0.7735	-0.2272	0.4697	0.0869
Nov	2.3703	-1.0050	1.0669	0.2945	0.8451	-0.5219	0.4676	0.1060
Diciem	3.1606	-1.6218	1.0714	0.4876	1.0760	-0.9462	0.4582	0.1791

Los valores anteriores reflejan la estadística para toda el área de estudio.

Ambos modelos predicen flujos promedios más bajos en los primeros seis meses aunque con mayores desviaciones standard muy probablemente asociados con la intensificación del viento y ocurrencia de upwelling más cerca de la costa.

No es claro un ciclo anual en el intercambio del N_2O que refleje la dominancia de la velocidad del viento o el ciclo de concentración de oxígeno.

Conclusión

- Aunque la surgencia (upwelling) es un fenómeno episódico de media escala con lapsos de horas a días, es de esperar que bajo la intensificación de los vientos alisios de Diciembre a Marzo ella ocurra mayormente en el Caribe Colombiano cerca de la costa. Las climatologías de 1981-1997 COADS, UWM/NODC, y 1998-AVHRR muestran consistentes disminuciones de temperaturas en tales áreas.
- Simultáneamente aquellas áreas de surgencia muestran una disminución en el oxígeno disuelto superficial. Debido a la correlación negativa O_2 : N_2O es de esperar que el decrecimiento de $[O_2]$ conlleve a un incremento en $[N_2O]$.
- Los estimados para $[N_2O]$ y flujo en la superficie son efectuados con base en la correlación lineal negativa entre N_2O y O_2 en la parte superior del océano (<100m) a partir de observaciones en el Caribe y Atlántico tropical.
- Bajo esta aproximación, el flujo puede estar sobre estimado en un 60%; sin embargo el valor absoluto del flujo no es de interés en este trabajo. Se requieren medidas continuas de parámetros oceanográficos y meteorológicos con el fin de obtener una mejor descripción biogeoquímica de tal manera que se obtenga una mejor modelación del intercambio aire-mar de gases en la región.
- Bajo esta aproximación simple, es claro que la surgencia aumenta el intercambio de N_2O en áreas costeras. Como explicación a este hecho, la surgencia en tales áreas sobrepasaría el efecto de la fotosíntesis y al mismo intercambio de oxígeno superficial en la emisión de N_2O .

Referencias

- A. Aguilera, J. E. Corredor, and J. M. Morel, 1992, Oxido Nitroso en el Mar Caribe Nororiental, *Caribbean J. of Sc.* 28(1-2): 70-80.
- C.C. Delwiche (ed), 1981, Denitrification, nitrification, and Atmospheric Nitrous Oxide, John Wiley and Sons, NY, 286 pp
- M.A. Doneland, W.M. Drennan, E.S. Saltzman, R. Wanninkhof (eds), 2002, Gas Transfer at Water Surfaces, *Geophysical Monograph* 127, AGU, Washington, DC, 383pp.
- D.J. Erickson III, 1993, A Stability Dependent Theory for Air-Sea Gas Exchange, *J. Geophys. Res.* 98 (C5): 8471-8488.
- L.K. Hashimoto, W. A. Kaplan, S.C. Wofsy and M. B. Mc Elroy, Transformations of Fixed Nitrogen and N₂O in the Cariaco Trench, *Deep Sea Res.*, 30(6A): 575-590, 1983.
- E.B. Krauss, and J. A. Businger. 1994. *Atmosphere-Ocean Interactions*, 2nd. Ed. Oxford University Press, New York, 361 pp.
- R. Wanninkhof, 1992, Relationship between Wind Speed and Gas Exchange over the Ocean, *J. Geophys. Res.* 97(C5): 7373-7382.
- C. Oudot, C. Andrieu, and Y. Montiel, 1990, Nitrous Oxide Production in the Tropical Atlantic Ocean. *Deep Sea Res.* 37(2): 183-202.
- C. Nevison, T. Lueker and R.F. Weiss, 2004, Quantifying nitrous oxide source from coastal upwelling, *Global Biogeochemical Cycles*, v18, doi:10.1029/2003GB002110.
- S.P. Seitzinger, C. Kroeze, R.V. Styles, 2000, Global distribution of N₂O emissions from aquatic systems: natural emissions and anthropogenic effects, *Chemosphere- Global Change Science*, 2, 267-279.
- P. Suntharalingam y J.L. Sarmiento, 2000, Factors governing the oceanic nitrous oxide distribution: Simulation with an ocean general circulation model, *Global Biogeochemical Cycles*, v.14, N.4, 429-454.