

CAPTURA DE CO₂ EN EL OCÉANO PACÍFICO COLOMBIANO ENTRE LOS AÑOS 2000 Y 2011

Capture of CO₂ in the Colombian Pacific Ocean between 2000 and 2011.

Juan Guillermo Popayán-Hernández¹

Resumen

Se estimó el flux del CO₂ entre la atmósfera y el océano Pacífico colombiano usando datos derivados satelitalmente (Temperatura Superficial del Mar, Velocidad del viento) entre los años 2000 y 2011) y validados con datos in situ, disponibles en el Carbon Dioxide Information and Analysis Center. Así, se identificó que el Pacífico colombiano tiene una tendencia a la captura de CO₂. El promedio de flux para el periodo de tiempo estudiado osciló entre los -20 y -25 mmol/ /día, con excepción de los meses de junio de los años 2009 y 2010. La validación de los datos se realizó tomando como referencia el mes de noviembre de 2010, mostrando un mejor desempeño para los datos de noviembre (=0,58; RMSE=37%). Así, la tendencia de la estimación del flux de CO₂ a partir de datos satelitales presentó una tendencia a subestimar los datos de flux (BIAS=-14%). Finalmente, el análisis estadístico indicó que si bien la validación de los datos de flux satelitales Vs los in situ mostraron un buen comportamiento como herramienta preliminar para la estimación de los fluxes, se concluye que es necesario contar con mayores cantidades de datos in situ, esto con el propósito de ajustar y mejorar el modelo de estimación.

¹ Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Palabras clave: Flux de CO₂; sensores remotos; temperatura superficial del mar.

Abstract

The flux of CO₂ was estimated between the atmosphere and the Colombian Pacific Ocean derived using data by satellite (Sea Surface Temperature, wind speed) between 2000 and 2011 and validated with in situ data available at the Carbon Dioxide Information and Analysis Center. Thus, it was identified that the Colombian Pacific has a tendency to capture CO₂. The average flux for the time period studied ranged between -20 and -25 mmol/ / day, except for the months of June 2009 and 2010. The data validation was performed by reference November 2010, showing better performance for November data (=0,58 ; RMSE=37%). So the trend of CO₂ flux estimation from satellite data showed a tendency to underestimate the flux data (BIAS = -14 %). Finally , the statistical analysis indicated that while validating satellite data flux vs. the in situ showed a good performance as a preliminary tool for estimating the fluxes, it is concluded that it is necessary to have greater amounts of data on site, this for the purpose of adjusting and improving the estimation model .

Key words: CO₂ flux; Remote Sensing; Sea surface temperature.

Introducción

El proceso a través del cual se regula la concentración de CO₂ en la atmosfera para adecuar el efecto invernadero a las condiciones de radiación solar se conoce como el ciclo del carbonato-silicato. De esta manera, parte del CO₂ que se emite a la atmosfera producto de las actividades de la humanidad, tales como la industrial, el transporte y en menor medida el CO₂ producido por la respiración de las biocenosis, tiene como destino final los océanos, contribuyendo a incrementar la acidez de este ecosistema, y por lo tanto, en la disminución escalonada

de la fijación del carbonato de calcio, dado que dicho proceso genera un efecto de neutralización que impide el desarrollo óptimo de fijación de carbonato de calcio océanos (Millero, 2007).

Del total del CO₂ de origen antropogénico, entre un 28 y un 34% es absorbido por los océanos (Millero, 2007). Este enriquecimiento ha causado una reducción de alrededor 0,1 unidades de pH en la superficie de los océanos, comparado con el periodo previo a la revolución industrial (Caldeira y Wickett, 2005; Feely *et al.*, 2004; Orr *et al.*, 2005; Doney *et al.*, 2007).

Por ello, la acidificación de los océanos, debido al incremento en las concentraciones de CO_2 , constituye una amenaza para la diversidad de organismos marinos, especialmente para aquellos que son fijadores de calcio, tales como los moluscos, crustáceos, etc (Riebesell *et al.*, 2000).

Así, los océanos desempeñan un rol decisivo en la mitigación de los efectos del cambio climático, ya que sirven de sumideros para grandes cantidades de CO_2 liberadas a la atmósfera (Padin *et al.*, 2009). La capacidad de los océanos de absorber los excesos de CO_2 , es un parámetro clave para predecir los niveles futuros de este gas en la atmósfera (Padin *et al.*, 2009).

De esta forma, surge la necesidad de conocer cómo se está dando el proceso de flux de CO_2 en los océanos. Es por ello que el presente documento tiene como propósito mostrar un análisis temporal y espacial del flux de CO_2 en el Pacífico colombiano, haciendo uso de los sensores remotos, debido a que estos permiten obtener información útil para la deducción del rango de captura o emisión de CO_2

Materiales y métodos

Área de estudio

El Pacífico colombiano tiene un área aproximada de 80.000, la cual se encuentra fuertemente influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), con una precipitación ubicada en el rango de 3000 a 5000 mm al año y una humedad relativa de 87% (Figura 1). En cuanto a sus aspectos oceanográficos, la TSM se ubica en un rango promedio de 25°C y una

salinidad que oscila entre 20 y 33 UPS, según Cantera-Kintz (1993).

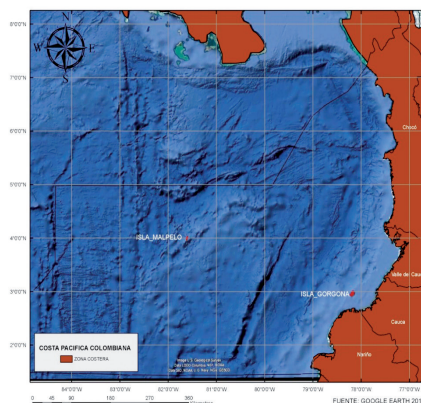


Figura 1. Área de estudio. Océano Pacífico colombiano.

Metodología

La estimación del flux de CO_2 se realizó mediante la aplicación de la siguiente expresión (ver Ecuación (1)):

$$F \text{ CO}_2 = kS(p\text{CO}_{2a} - p \text{ CO}_{2A}) \quad (1)$$

El flux de CO_2 se expresa en mmol/ /día. Donde $p\text{CO}_{2a}$ es la presión parcial del CO_2 en el mar, $p\text{CO}_{2A}$ la presión parcial del CO_2 en la atmósfera, S es la solubilidad del gas y k es la constante de transferencia del gas, según Else *et al.*, (2008).

El cálculo de k se realizó mediante la información derivada de QuikSCAT, del cual se extrajo la velocidad del viento, y del sensor MODIS, del cual se obtuvo la temperatura superficial del mar (TSM) la cual fue necesaria para satisfacer la expresión (ver Ecuación (2)):

$$k = cU_{10m}^b \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{2}$$

Donde U_{10} es la velocidad del viento en 10 m/s, Sc es el número de Schmidt, el cual es función de la TSM, y el coeficiente c y b , los cuales son valores obtenidos empíricamente.

Para el cálculo del número de Schmidt se implementó la metodología descrita por Wanninkhof (1992). Básicamnete el número

de Schmidt se obtiene de la aplicación de la ecuación 3, tomando la TSM derivada del sensor MODIS y los coeficientes A, B, C y D de la Tabla 1 descrita por Wanninkhof (1992).

$$Sc = A - Bt + Ct^2 - Dt^3 \tag{3}$$

Dónde:
 t es la temperatura superficial del mar medida en grados Celsius
 A, B, C y D son los coeficientes experimentales definidos para cada gas

TABLE A1. Coefficients for Least Squares Third-Order Polynomial Fits of Schmidt Number Versus Temperature for Seawater (35‰) and Fresh Water for Temperatures Ranging From Zero to 30°C

Gas	A	B	C	D
Agua de mar				
He*	410.14	20.503	0.53175	0.0060111
Ne*	855.1	46.299	1.254	0.01449
Ar	1909.1	125.09	3.9012	0.048953
O2	1953.4	128.00	3.9918	0.050091
CH4	2039.2	120.31	3.4209	0.040437
CO2	2073.1	125.62	3.6276	0.043219
N2	2206.1	144.86	4.5413	0.056988
Kr*	2205.0	135.71	3.9549	0.047339
N2O	2301.1	151.1	4.7364	0.059431
Rn*	3412.8	224.30	6.7954	0.08300
SF6	3531.6	231.40	7.2168	0.090558
CCl2F2 (F-12)	3713.2	243.30	7.5879	0.095215
CCl3F (F-11)	4039.8	264.70	8.2552	0.10359
Agua dulce				
He*	377.09	19.154	0.50137	0.005669
Ne*	764	42.234	1.1581	0.013405
Ar	1759.7	117.37	3.6959	0.046527
O2	1800.6	120.10	3.7818	0.047608

CH4	1897.8	114.28	3.2902	0.039061
CO2	1911.1	118.11	3.4527	0.041320
N2	1970.7	131.45	4.1390	0.052106
Kr*	2032.7	127.55	3.7621	0.045236
N2O	2055.6	137.11	4.3173	0.054350
Rn*	3146.1	210.48	6.4486	0.079135
SF6	3255.3	217.13	6.8370	0.086070
CCl2F2 (F-12)	3422.7	228.30	7.1886	0.090496
CCl3F (F-11)	3723.7	248.37	7.8208	0.098455

Tabla 1. Coeficientes ecuación tercer orden para el cálculo del Número de Schmidt.

La solubilidad se estimó a partir de la metodología propuesta por Teng *et al.*, (1996). Para ello, fue necesario asumir que la salinidad en el Pacífico colombiano fue de S‰= 35‰, y la presión de 1 atm, tal como se muestra en la Tabla 2, según Teng *et al.*, (1996).

7 [m]	T [°C]	
0	20.0	0.033
100	20.0	0.349
200	19.5	0.663
300	18.5	0.965
400	13.5	1.412
450	11.5	1.621
500	9.0	1.759
600	7.6	1.785
700	6.6	1.848
800	6.0	1.886
900	5.5	1.920

Tabla 2. Solubilidad del CO2 en agua de mar

La pCO_{2a} se calculó a partir de los datos de TSM. Así, se implementó la deducción realizada por Stephens *et al.*, (1995) (ver Ecuación (4)):

$$\ln[pCO_{2a}(10^{\circ}C)] = A + B(TSM) + C(TSM)^2 + D \tag{4}$$

Los coeficientes A, B, C y D se tomaron para el presente caso para la estación seca, los cuales se muestran en la Tabla 3, debido a las condiciones climáticas para la zona es estudio según Cantera-Kintz (1993), y estos fueron obtenidos experimentalmente por Stephens *et al.*, (1995).

	A	B	C	D
Invierno	6.511	-0,08309	0,001116	
Primavera	6.618	-0,1304	0,00328	
Verano	6.030	-0,06076	0,0007021	0,001655
Otoño	6.253	-0,08801	0,001484	0,001291

Tabla 3. Coeficientes estacionales para el cálculo de la presión parcial del CO₂ en agua de mar, a partir de la TSM

Finalmente, debido a la poca variabilidad de la presión parcial de CO₂ en la atmósfera, se propone asumir esta como constante a 350.0 μ atm como un promedio usualmente empleado en el Caribe y el Pacífico, según Rojas y Pabón (2002).

Los valores de flux de CO₂ calculados a partir de datos satelitales para el área de estudio entre los años 2000 y en 2011, para los meses de enero, junio y noviembre, fueron validados con datos *in situ* disponibles en la base de datos del Carbon Dioxide Information and Analysis Center, disponible en el sitio web cdiac.ornl.gov/oceans, tomando como referencia para la validación el mes de noviembre de 2010.

Finalmente, los datos de flux de CO₂, tanto

in situ como satelitales, fueron consignados y analizados mediante las herramientas gráficas y estadísticas de los software Microsoft Excel 2010 y SAS v8, esto con el propósito de validar la información obtenida y establecer si se presentaron diferencias significativas entre años y meses de estudio.

Resultados

La estimación del flux de CO₂ en el Pacífico colombiano presentó una tendencia a asumir un rol de sumidero, tal como lo muestra el promedio de captura de CO₂ para los meses de enero, junio y noviembre durante los años 2000 al 2011 (Tabla 3). Así mismo, la distribución del flux de CO₂ en este periodo, se representó mediante mapas, los cuales se muestran en las Figuras 2 a la 8.

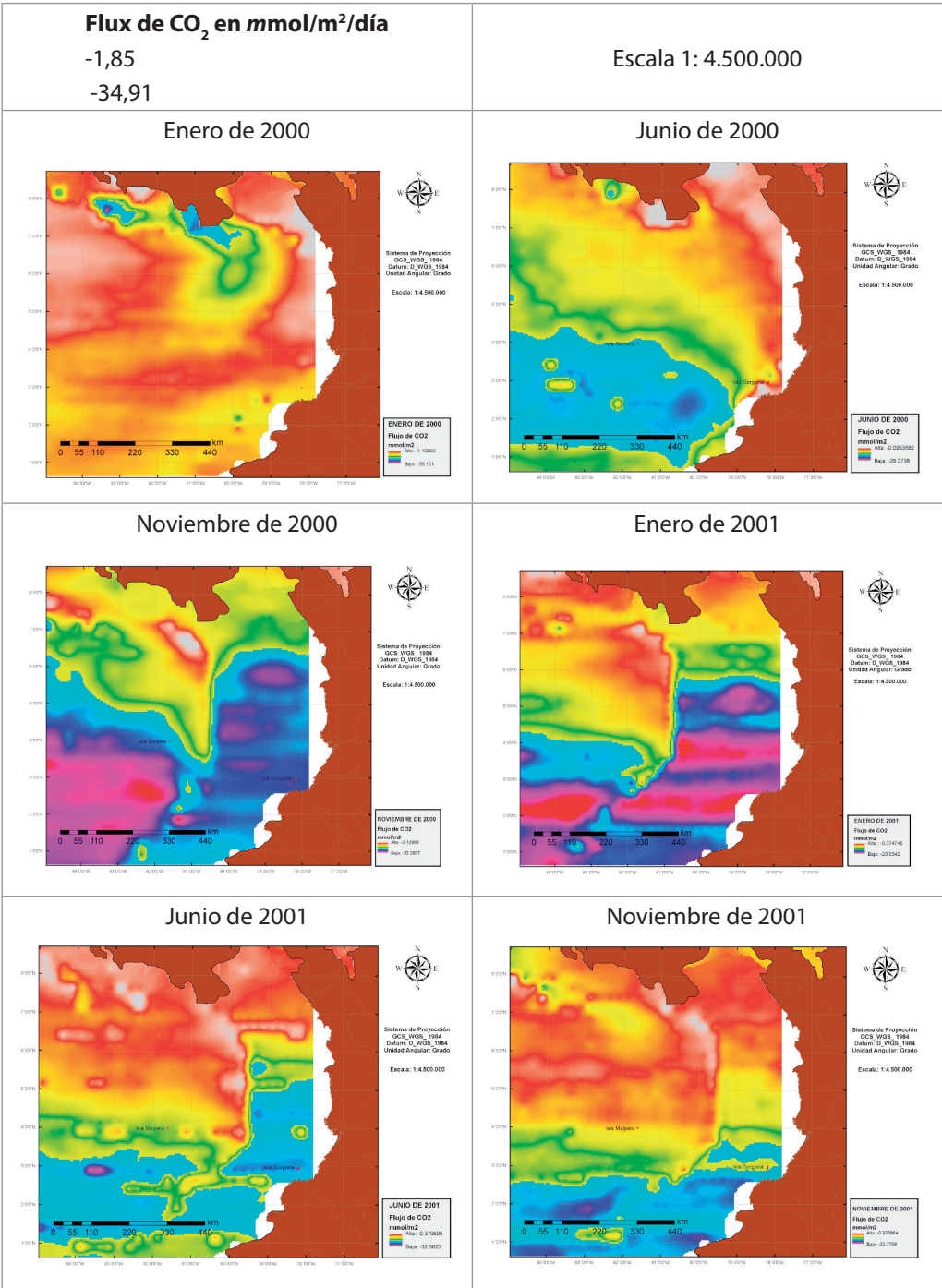


Figura 2. Flux de CO₂ para los meses de enero, junio y noviembre de los años 2000 y 2001.

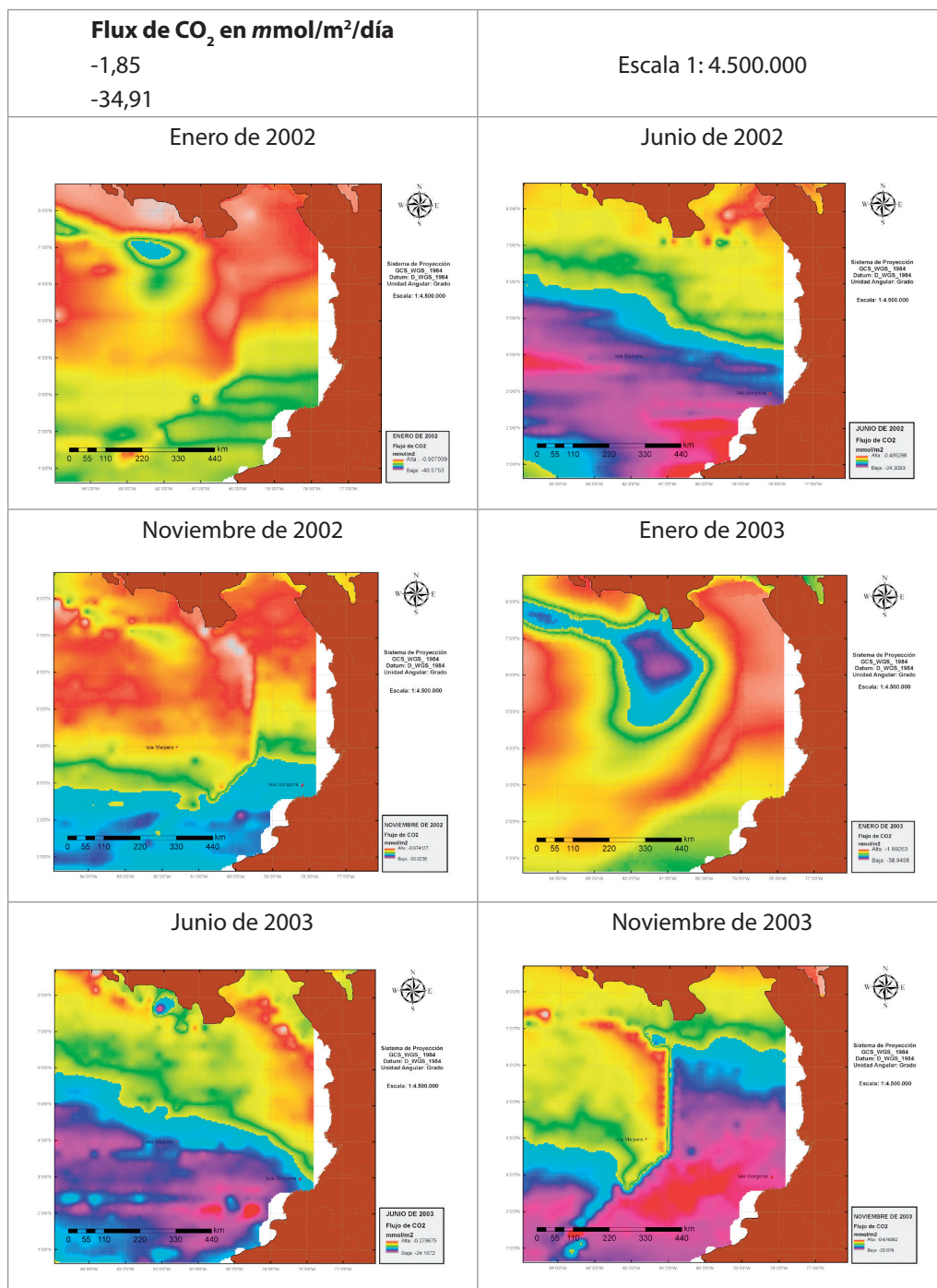


Figura 3. Flux de CO₂ para los meses de enero, junio y noviembre de los años 2002 y 2003.

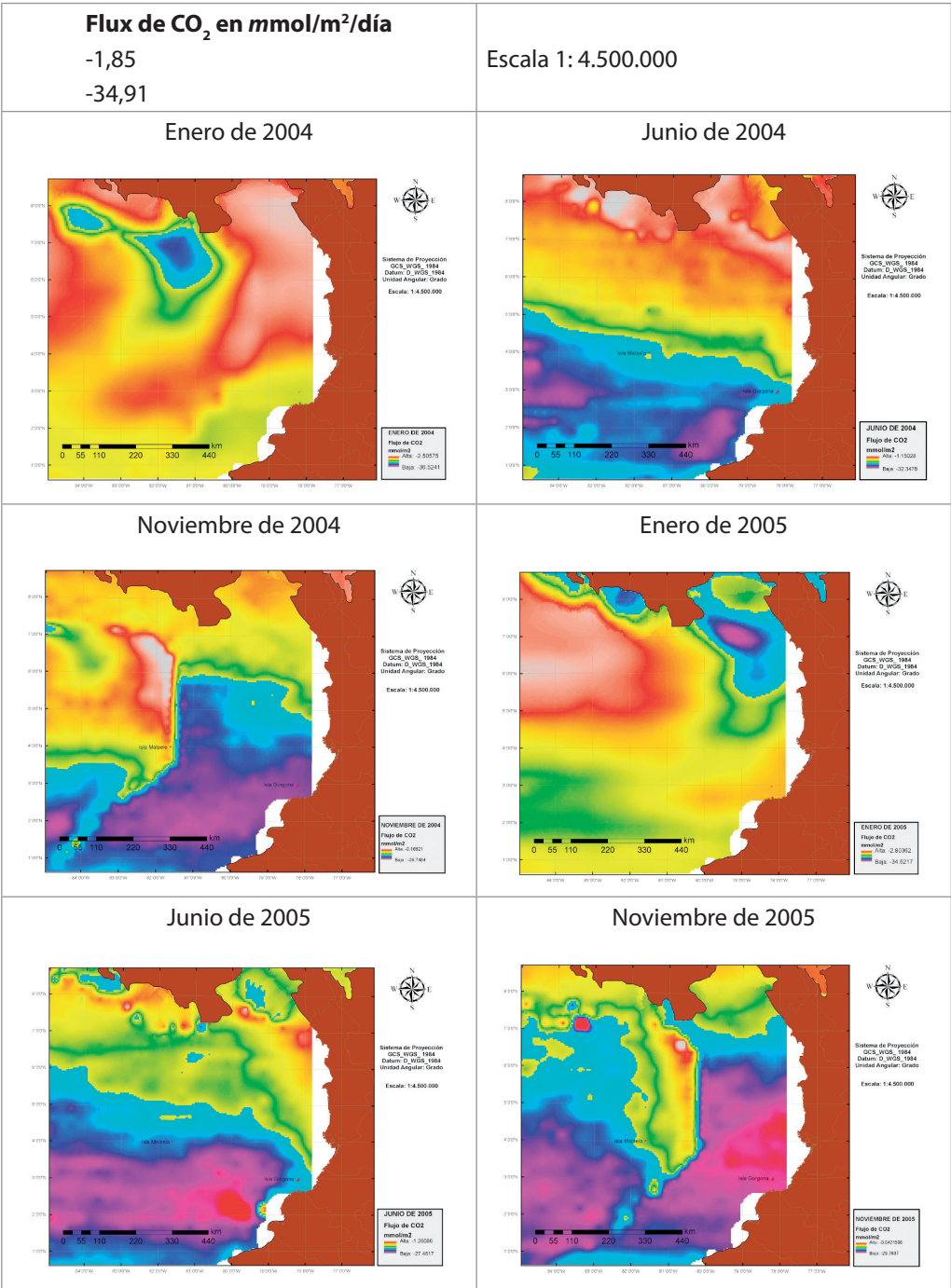
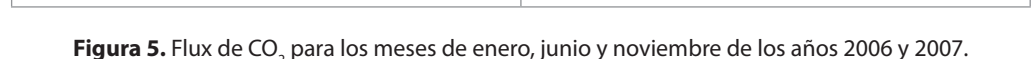


Figura 4. Flux de CO₂ para los meses de enero, junio y noviembre de los años 2004 y 2005.



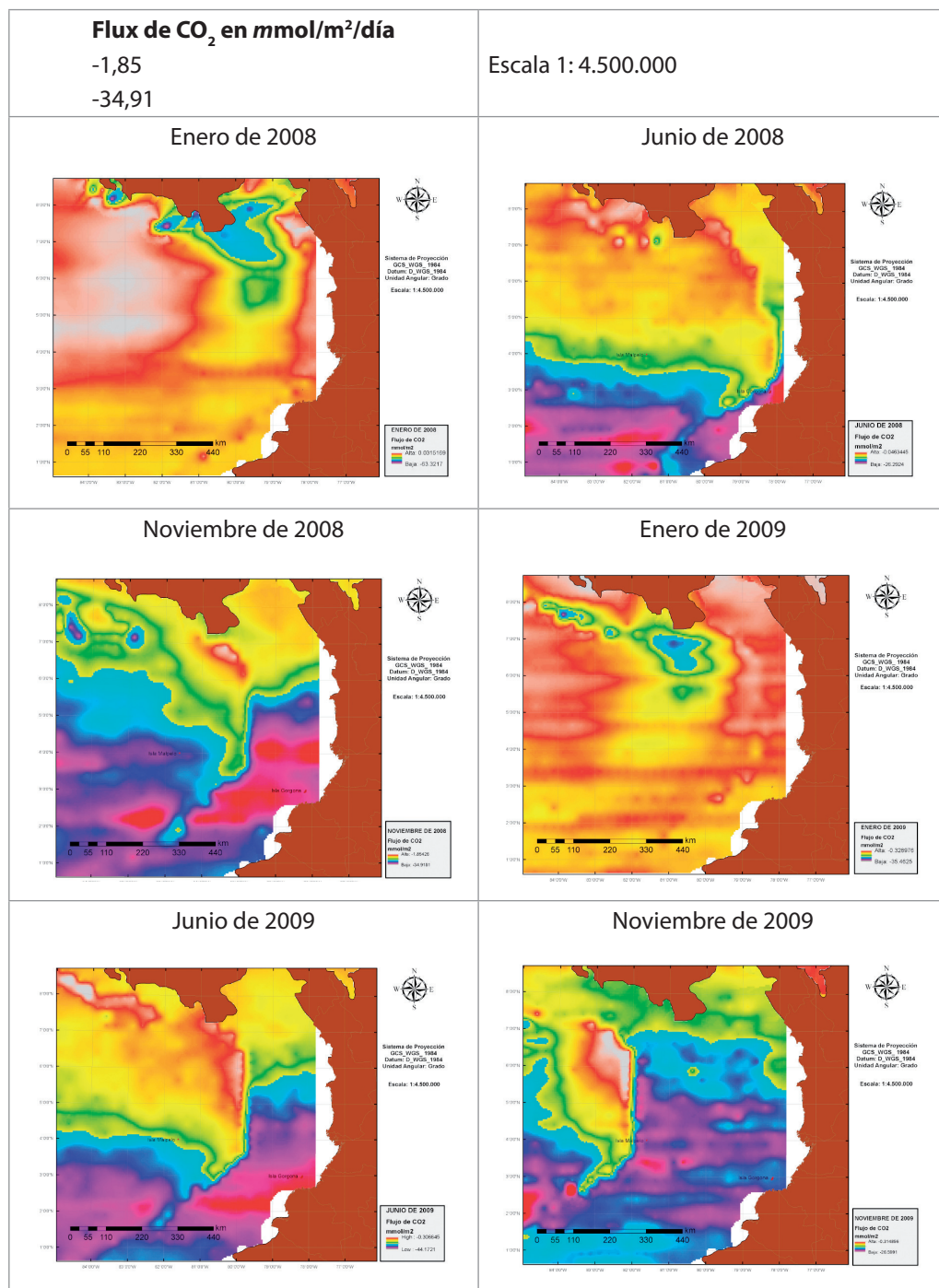


Figura 6. Flux de CO₂ para los meses de enero, junio y noviembre de los años 2008 y 2009.

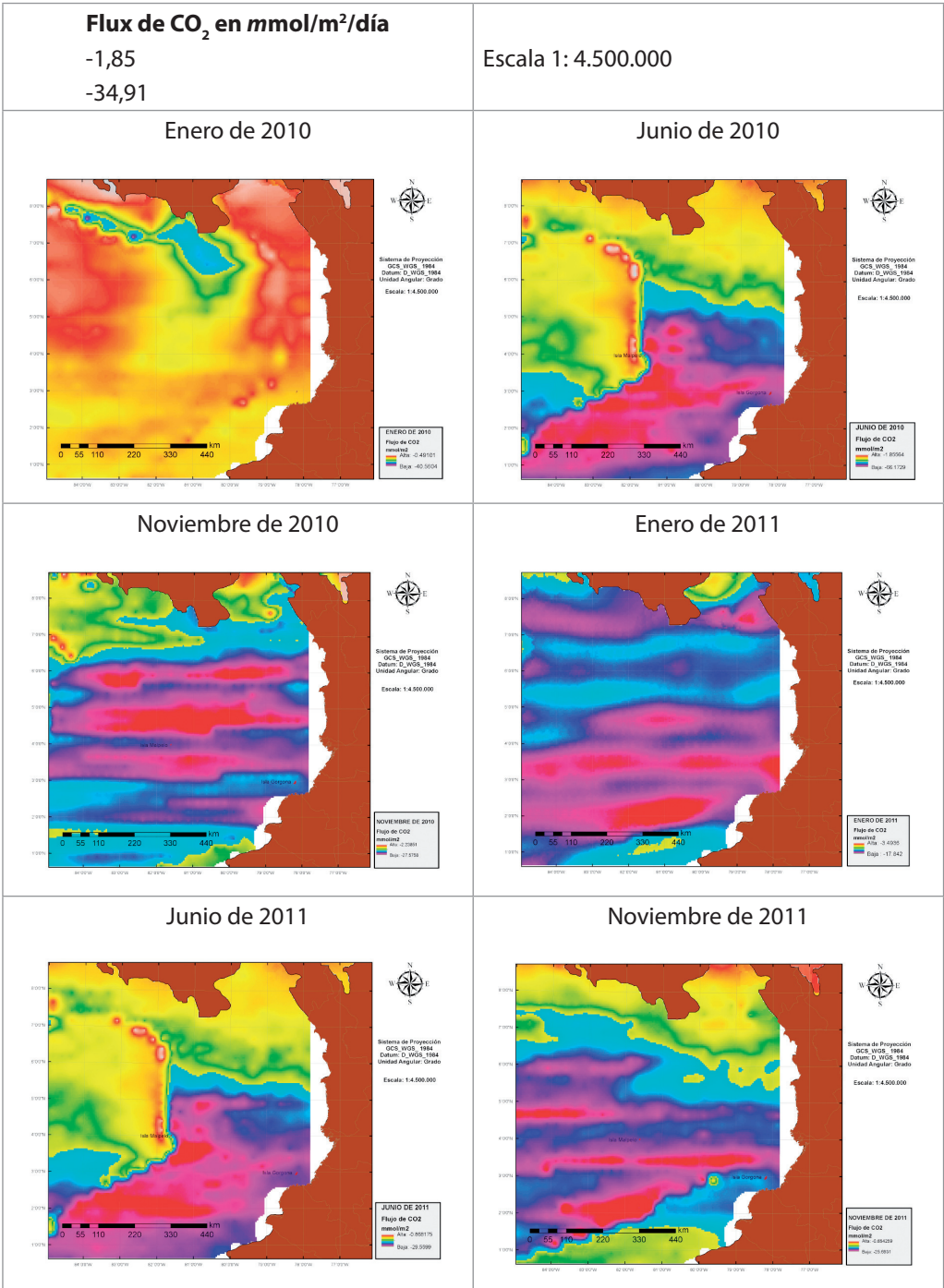


Figura 7. Flux de CO₂ para los meses de enero, junio y noviembre de los años 2010 y 2011.

La validación de los datos se realizó usando una población de datos satelitales e *in situ* de 1590, cuya dispersión se muestra en la Figura 8.

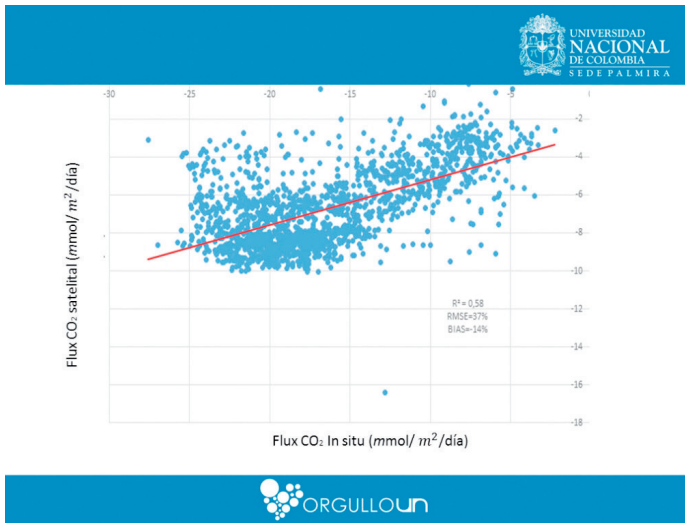


Figura 8. Diagrama de dispersión de los datos satelitales e in situ del flux de CO₂ para el mes de noviembre de 2010.

Dicho diagrama de dispersión presentado en la Figura 8 mostró un buen desempeño del algoritmo del flux de CO₂ para los datos satelitales e in situ, con RSM del 37% y coeficiente de correlación de 0,58 y una tendencia a subestimar datos.

Se procedió a realizar un ANOVA con los datos sin pre-tratamiento estadístico; esto mediante el software SAS v8, comparando fundamentalmente la relación estadística significativa entre los años analizados en función del flux promedio de CO₂ en dichos intervalos de tiempo, tal como se muestra en la Tabla 4.

Año	Promedio de CO ₂	
2000	-11.313	a*
2003	-12.287	A
2004	-12.297	A
2002	-12.609	A
2006	-12.729	Ab
2007	-13.050	Ab
2008	-13.120	Ab
2001	-14.651	Abc
2005	-14.770	Abc
2011	-16.978	Bcd
2009	-17.933	Cd
2010	-21.032	D

Tabla 4. Comparación de la captura de CO₂ entre años.

*Promedios con la misma letra son estadísticamente iguales al 5%

Luego de realizar el análisis de varianza para el Pacífico colombiano en función de los fluxes de CO₂ promedio, y de confirmarse diferencias significativas fue conveniente establecer en qué medida estas fueron distintas, lo cual se realizó mediante una prueba de comparaciones múltiples (DMS), la cual utiliza pruebas *t* para realizar comparaciones de medias en el grupo de datos estudiados, en donde no se corrige el error para realizar múltiples comparaciones, según lo descrito por García y Porras (1998).

La prueba *t* usada en este estudio, incorporada dentro del análisis DMS en SAS v8, mostró la comparación de la medida obtenida para el Pacífico colombiano durante los meses de enero, junio y noviembre en la escala de tiempo definida previamente, y contrastó si la media difería de cero (0), tal como se muestra en la Tabla 5.

Año	Promedio CO ₂ por mes		
	Enero	Junio	Noviembre
2000	-8.0 a	-9.4 a	-16.6 b
2001	-16.2 a	-15.0 a	-12.7 a
2002	-10.7 a	-14.4 a	-12.8 a
2003	-9.2 a	-13.7 ab	-14.3 b
2004	-8.6 a	-14.4 b	-13.9 b
2005	-12.6 a	-16.9 a	-14.8 a
2006	-9.4 a	-11.2 a	-17.6 b
2007	-8.2 a	-13.6 b	-17.3 c
2008	-8.6 a	-14.1 b	-16.7 b
2009	-5.6 a	-33.0 c	-14.9 b

2010	-7.2 a	-35.6 c	-20.3 b
2011	-14.2 a	-20.0 b	-16.7 a

Tabla 5. Comparación del promedio de CO₂ entre los meses evaluados por año.

Promedios con la misma letra son estadísticamente iguales al 5%

La prueba de comparación múltiple DMS al 5% muestra que el año donde se presentó la mayor captura de carbono fue 2010, que estadísticamente es igual a las capturas obtenidas en 2009 y 2011.

Mediante la comparación de la captura de CO₂ entre los meses de evaluación para cada año, presentados en la Figuras 2 a la 8, se puede apreciar que en el año 2000, en noviembre se obtuvo la mayor captura. En los años 2001, 2002 y 2005 no hubo diferencia estadística significativa entre los meses de captura. En los años 2009 y 2010 el mayor contenido se obtuvo en el mes de Junio, principalmente asociado a la ocurrencia del fenómeno de El Niño, ocurrido en ese año, tal como lo señalan los informes de IDEAM (2014).

Discusión y conclusiones

Este comportamiento del flux de CO₂ para el Pacífico colombiano durante los años comprendidos entre 2000 y 2011 se encuentran determinados por la estrecha relación termodinámica existente entre esta variable dependiente y la TSM, tal como lo describe Else *et al.*, (2008), Lefeuvre y Taylor (2002) en las zonas Norte Rojas y Pabón (2002) para el Caribe y el Pacífico colombiano.

Por tanto, el flux de CO_2 al estar asociado con la TSM, es determinante conocer la ocurrencia de fenómenos tales como El Niño y La Niña, y variables que afecten de forma directa la TSM en el área de estudio, tales como las corrientes marinas.

Así, el flux de CO_2 en esta área se encuentra influenciado por la presencia de corrientes marinas, tales como la Contracorriente Ecuatorial y la Corriente Nor-ecuatorial, las cuales, según Madrid-Vera (1998), generan variaciones estacionales sobre la TSM, y por tanto sobre el flux de CO_2 .

Por otro lado, según Fisher *et al.*, (2005), existen unas masas de agua que afectan la parte de la ZEE del Pacífico norte colombiano, tales como las aguas tropicales, asociadas a la zona norte oceánica, de acuerdo con Madrid-Vera (1998). Una relación del área y la presencia de corrientes que alteran el flux de CO_2 .

Recomendaciones

Al validar los datos del flux de CO_2 obtenidos a partir de datos *in situ* y datos satelitales, se encontró una buena relación ($\text{RSM} = 37\%$, coeficiente de correlación de 0,58) para el periodo de tiempo seleccionado (noviembre del 2010.)

Si bien la validación de los datos mostró que la aplicación del algoritmo del flux de CO_2 descrito en la Ecuación (1), usando datos satelitales tiene una tendencia para el Pacífico colombiano a subestimar dichos valores; esta alternativa de estimación se convierte

en una herramienta útil para tomar decisiones a la hora de establecer zonas de manejo, dado que mediante la obtención de dichos valores se disminuye el tiempo y los costos asociados a la toma de estos mismos datos de forma experimental, más aún si se tiene en cuenta que el Estado colombiano adolece de políticas ambientales enfocadas al monitoreo de dicho fenómeno, razón por la cual para nuestro contexto no existe una disponibilidad logística para realizar dichas campañas.

Agradecimientos

Al Dr. Taro Takahashi, por su asesoría en la consecución de los datos *in situ* necesarios para realizar la validación de los datos de flux calculados satelitales.

Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costera INVEMAR, por el acceso a los archivos y bases de datos.

Al programa de Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.

Referencias Bibliográficas

Caldeira, K., Wickett, M.E. (2005). Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. Vol 110, 1435-1455.

Cantera-Kintz, J.R. (1993) *Oceanografía*. En Leyva, P. (ed). *Colombia: Pacífico*,

- Tomo I. Fondo para la protección del medio ambiente FEN-Colombia. Santa Fe de Bogotá D.C. Colombia. 396 p.*
- Doney, S.C., Mahowald, N., Lima, I., Feely, R.A., Mackenzie, F.T., Lamarque, J.-F., Rasch, P.J. (2007) The impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition on ocean acidification and the inorganic carbon system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 104, 14580–14585.
- Else, B., Yackel, J., Papakryakou, Tim, N. (2008). Application of satellite remote sensing techniques for estimating air-sea CO₂ fluxes in Hudson Bay, Canada during the ice-free Season. *Remote Sensing of Environment*. 112, 3550-3562.
- Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J., Millero, F.J. (2004) Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*. 305, 362–366.
- Fisher K.S., Beitler C., Reuter C., Searcy K. (2005). Integrating MEA regeneration with CO₂ compression and peaking to reduce CO₂ capture cost. Final report DE-FG02-04ER84111 to U.S. DOE/NETL. Trimeric Corporation, Texas.
- García Leal, J., Porras, A.M. (1998). Diseño estadístico de experimentos. Análisis de la varianza. Grupo editorial universitario. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Ideam, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP. (2014). Evolución de precipitación y temperatura durante los fenómenos el Niño y la Niña en Bogotá - Cundinamarca. Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC).
- Lefèvre, N., Taylor, A. (2002). Estimating pCO₂ from sea surface temperatures in the Atlantic Gyres. *Deep Sea Research*. 49, 539– 554.
- Madrid-VerA J., A. Ruiz-Luna & I. Rosado-Bravo. (1998). Peces de la plataforma continental de Michoacán y sus relaciones regionales en el Pacífico mexicano. *Biología Tropical*. 42.267–276.
- Millero, F.J. (2007). The Marine Inorganic Carbon Cycle. *Chemical Reviews*. 107, 308–341.
- Orr, J.C., Fabry, V.J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S.C., Feely, R.A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R.M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R.G., Plattner, G.K., Rodgers, K.B., Sabine, C.L., Sarmiento, J.L., Schlitzer, R., Slater, R.D., Totterdell, I.J., Weirig, M.F., Yamanaka, Y., Yool, A.

- (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*. 437, 681–686.
- Padin, X.A., Navarro, G., Gilcoto, M., Rios, F.A., Pérez, F.F (2009). Estimation of air–sea CO₂ fluxes in the Bay of Biscay based on empirical relationships and remotely sensed observations. *Journal of Marine Systems*. 75, 280–289.
- Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, P. D. Tortell, R. E. Zeebe and F. M. M. Morel (2000): Reduced calcification in marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*. 407, 634–637.
- Rojas, P.J., Pabón, J.D. (2002) Fluxes de dióxido de carbono entre el océano y la atmósfera en las áreas marítimas colombianas durante el periodo 1998-2001. *Meteorología Colombiana*. 5, 139-145.
- Stephens, M. P., Samuels, G., Olson, D. B., Fine, R. A., Takahashi, T. (1995). Sea–air flux of CO₂ in the North Pacific using shipboard and satellite data. *Journal of Geophysical Research*. 100(C7), 13,571–13,583.
- Teng, H., Masutani, C.M., Kinoshita I., Nihous, G.C. (1996). Solubility of CO₂ in the ocean and its effect on CO₂ dissolution. *Energy Conversion and Management*. 37, 1029-1038.
- Wanninkhof, R. (1992). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of geophysical research*. 97, 7373-7382.