

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Doctorado en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Modelado de la influencia de los ríos en la dinámica
de la producción primaria en el Golfo de México**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Doctor en Ciencias

Presenta:

Javier González Ramírez

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por

Javier González Ramírez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Director de tesis

Dr. Julio Candela Pérez

Dr. Jushiro Carlos Adolfo Cepeda Morales

Dr. Julio Sheinbaum Pardo



Dr. José Gómez Valdés
Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Javier González Ramírez © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta Javier González Ramírez como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Oceanografía Física .

Modelado de la influencia de los ríos en la dinámica de la producción primaria en el Golfo de México

Resumen aprobado por:

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Director de tesis

El Golfo de México cuenta con una productividad primaria que va de moderada a alta, la cual combinada con la topografía y los procesos de mesoescala, propicia gran diversidad biológica. El proceso de producción primaria en el océano es fundamental en el ingreso de energía a todos los ecosistemas marinos, así como para determinar susceptibilidad de regiones costeras para la aparición de zonas hipóxicas. En México existen 16 ríos que descargan sus aguas directamente en el golfo. Los ríos mexicanos, junto a los aportes ubicados en EE.UU. propician grandes regiones donde la productividad primaria tiene una componente estacional fuertemente ligada a estas entradas de agua dulce ricas en nutrientes, en ambas regiones, norte y sur del golfo. En el presente estudio, se utilizó el modelo hidrológico SWAT para simular los caudales y concentraciones de nutrientes (nitrato y amonio) en las desembocaduras de los principales ríos mexicanos que fluyen hacia el Golfo de México. Posteriormente, los datos obtenidos a partir del modelo hidrológico se integraron como forzamiento a una configuración del modelo hidrodinámico CROCO v1.0 acoplado a un modelo biogeoquímico N2PZD2. Para poder representar de manera correcta los procesos biológicos en las regiones costeras, en el modelo biogeoquímico se implementó una condición de fondo biológica, con la cual fue posible representar el proceso de remineralización en la plataforma continental de la cuenca del Golfo de México. Se llevaron a cabo 21 años de simulación de 2 configuraciones, una con el forzamiento de los ríos y otra sin ellos, las cuales fueron validadas con imágenes satelitales de concentración superficial de clorofila y comparados con datos de estudios previos. El modelo acoplado fue capaz de representar de manera satisfactoria la dinámica estacional de producción primaria en el Golfo de México tomando como variable de comparación la concentración y distribución de clorofila tanto en superficie como en la columna de agua. Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se buscó definir los procesos físicos que influyen en la dinámica de la producción primaria en la zona profunda y la plataforma continental del golfo. De acuerdo con los mismos, en la región profunda la producción primaria esta dominada, principalmente, por la mezcla vertical inducida por el paso de frentes fríos durante el invierno y estructuras de mesoescala. En la plataforma esta dinámica esta dominada por surgencias costeras y el aporte de nutrientes provenientes de los ríos.

Palabras clave: Golfo de México, producción primaria, ríos, nutrientes

Abstract of the thesis presented by Javier González Ramírez as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Physical oceanography with orientation in

Modeling of the influence of rivers in the primary production dynamics in the Gulf of Mexico

Abstract approved by:

Dr. Alejandro Francisco Parés Sierra
Thesis Director

The Gulf of Mexico has a primary productivity that ranges from moderate to high, which combined with the topography and mesoscale processes, promotes a wide biological diversity. The primary production process in the ocean is essential in the entry of energy to all marine ecosystems, as well as to determine the susceptibility of coastal regions to the appearance of hypoxic areas. In Mexico there are 16 rivers that discharge directly into the gulf. The Mexican rivers, along with the contributions located in the US, favor large regions where primary productivity has a seasonal component strongly linked to these nutrient-rich freshwater inputs, in both regions, north and south of the gulf. In the present study, the SWAT hydrological model was used to simulate the flow rates and concentrations of nutrients (nitrate and ammonium) at the mouths of the main Mexican rivers that flow into the Gulf of Mexico. Subsequently, the data obtained from the hydrological model were integrated as forcing into a configuration of the CROCO v1.0 hydrodynamic model coupled to a N2PZD2 biogeochemical model. In order to correctly represent the biological processes in the coastal regions, in the biogeochemical model a bottom biological boundary condition was implemented, with this condition it was possible to represent the remineralization process in the continental shelves of the Gulf of Mexico basin. In total, 21 years of simulation of two configurations were carried out, one with the forcing of the rivers and the other without them, which were validated with satellite images of chlorophyll surface concentration and compared with data from previous studies. The coupled model was able to satisfactorily represent the seasonal dynamics of primary production in the Gulf of Mexico taking as a comparison variable the concentration and distribution of chlorophyll, in both, surface and in the water column. Finally, based on the obtained results, we sought to define the physical processes that influence the dynamics of primary production in the deep zone and the continental shelf of the gulf. According to them, in the deep region primary production is mainly dominated by the vertical mixing induced by the presence of atmospheric cold fronts during winter and the mesoscale structures in the ocean. On the shelves this dynamic is dominated by coastal upwellings and the contribution of nutrients from the rivers.

Keywords: Gulf of Mexico, primary production, rivers, nutrients

Dedicatoria

Al inolvidable recuerdo de mi madre...

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por darme la oportunidad de realizar mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

A mis tíos Pablo, Chelo y primos Pablo y Ricardo.

Al Dr. Alejandro Parés y todo mi comité de tesis.

A todos mis amigos y compañeros del departamento, especialmente a Arturo, Lenin y René.

Al personal académico y administrativo del departamento de Oceanografía Física.

Al Consorcio de Investigación del Golfo de México a través del proyecto 201441.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	II
Resumen en inglés	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	XI
 Capítulo 1. Introducción	
1.1. Justificación	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivo general	5
1.4.1. Objetivos específicos	5
 Capítulo 2. Simulación de caudales diarios	
2.1. Área de estudio	6
2.2. Modelo SWAT	8
2.3. Bases de datos	9
2.4. Configuración del modelo	9
2.5. Calibración y validación	11
2.6. Resultados	12
 Capítulo 3. Modelo acoplado del Golfo de México	
3.1. Modelo Físico	19
3.2. Modelo biológico	20
3.2.1. Frontera de fondo biológica	21
3.3. Resultados	24
3.3.1. Distribución superficial de clorofila	25
3.3.2. Distribución vertical de clorofila	27
3.3.3. Producción primaria	28
3.3.4. Promedios en TAVE y BOC	29
3.3.5. Coherencia entre clorofila y vientos	30
3.3.6. Funciones empíricas ortogonales en TAVE y BOC	32
3.3.7. Dinámica de producción primaria	36
3.3.7.1. En la región profunda del Golfo	36
3.3.7.2. En la región TAVE	38
3.3.7.3. En la región BOC	38
 Capítulo 4. Discusión y conclusiones	
4.1. Discusión	42

Tabla de contenido (continuación)

4.1.1. Simulación de caudales y nutrientes	42
4.1.2. Modelo acoplado del Golfo de México	43
4.2. Conclusiones	44
Literatura citada	46

Lista de figuras

Figura	Página
1. Circulación dominante en el Golfo de México	1
2. Ubicación de las desembocaduras y las cuencas de aporte de los ríos mas caudalosos que llegan al GdM	2
3. Raster de uso de suelo utilizada para las simulaciones hidrológicas en las cuencas estudiadas. Usumacinta (a), Grijalva (b), Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e).	7
4. Tipos de suelo empleados en el modelo SWAT para las cuencas Usumacinta (a), Grijalva (b), Coatzacoalcos (c), Papaloapán (d) y Pánuco (e). . . .	10
5. Descargas observada (línea roja) y simulada (línea azul) de los ríos Usumacinta (a), Grijalva (b) Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e). Para las cuencas c, d y e los resultados mostrados corresponden a las estaciones hidrométricas 29005, 28153 y 26424. Todos los periodos, tanto observados como simulados, están comprendidos entre el 1 de enero de 1989 al 31 de diciembre de 2013, excepto para el río Grijalva para el cual fue del 7 de julio de 1997 al 31 de diciembre de 2013.	14
6. Comparación entre los flujos mensuales observados y simulados en los ríos Usumacinta (a), Grijalva (b) Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e).	15
7. Flujo mensual observado (puntos verdes) y la incertidumbre al 95 % (barras grises) para los ríos Usumacinta (a), Grijalva (b) Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e).	16
8. Dominio y batimetría del Golfo de México, los puntos amarillos representan los ríos utilizados en modelo. La línea roja delimita la isobata de los 200 m, la cual divide el golfo en tres regiones principales usadas en el presente estudio: región profunda (i), región costera sur (II) y región costera norte (II). Delimitadas en línea gris están las áreas en las cuales se calcularon los promedios diarios de clorofila, viento y flujos de nitrato para las plataformas TAVE (b) y BOC (c), respectivamente.	20
9. Descargas observadas (línea gris) y simuladas (líneas de color) de los ríos mas caudalosos que se utilizaron en el modelo acoplado. Se muestran ocho de los 24 ríos usados como forzamiento.	22
10. Concentraciones de nitrato en el sistema Grijalva-Usumacinta producto del modelo hidrológico (línea azul) y de observaciones en la ciudad de Villahermosa (circulos verdes) así como observaciones río abajo cerca a la desembocadura (puntos rojos).	23
11. Modelo conceptual de la frontera de fondo biológica implementada en el modelo biogeoquímico. La frontera convierte la materia orgánica (fitoplancton y detritos) en amonio al momento de llegar al fondo. Posteriormente, la rutina de nitrificación del modelo oxida el amonio para dar paso directamente a nitrato, esto último haciendo de manera implícita el consumo de oxígeno y el paso por nitrito.	24

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
12. Climatología estacional (columnas 1-4, Invierno [1] - otoño [4]) de la concentración superficial de clorofila producto del modelo acoplado (fila superior, a-d) y de promedios mensuales de imágenes satelitales producto de MODIS (fila inferior, e-h). Escala en mg m^{-3}	26
13. Concentración mensual de clorofila superficial, observada (línea negra) y simulada (línea roja). Se muestran los promedios de las tres regiones delimitadas en la Figura 1.	26
14. Concentración diaria de clorofila en la columna de agua, muestreada en el punto P1 (fig. 8) en mg m^{-3} . La profundidad de la capa de mezcla, representada por la línea blanca, se calculó como la profundidad donde la diferencia de densidad desde la profundidad de referencia, en este caso 10 m, alcanza los 0.03 kg m^{-3} . Los círculos rojos muestran el paso de remolinos anticiclónicos por el punto P1 durante el periodo de simulación.	28
15. Producción primaria diaria calculada en toda la vertical para la región de la plataforma continental, delimitada desde la isobata de 200 m hacia la costa, y la región profunda, isobata de 200 m hacia el centro del golfo. . . .	29
16. El panel a(c) muestra la componente zonal(meridional) del viento diario promediado en la región TAVE(BOC) correspondiente al dominio b(c) de la Figura 1. La línea gris representa el promedio diario y la línea azul muestra la señal filtrada en el periodo de corte semanal. En el panel a(c) valores positivos(negativos) indican viento favorable a surgencias. En el panel b(c) se muestran promedios espaciales de concentración diaria de clorofila superficial de dos corridas del modelo.	29
17. Coherencia entre los promedios espaciales diarios de concentración clorofila y viento favorable para surgencias (a), y concentración de clorofila y flujo de nitrato de los ríos locales (b) en la región TAVE.	31
18. Coherencia entre los promedios espaciales diarios de concentración clorofila y viento favorable para surgencias (a), y concentración de clorofila y flujo de nitrato de los ríos locales (b) en la región BOC.	31
19. Panel superior - FEO 1 calculada en la región TAVE a partir de las salidas del modelo (derecha) y de productos mensuales de imágenes satelitales (izquierda). Panel inferior - Componente principal correspondientes al modo 1 para las salidas del modelo y datos observados. En el panel inferior de las CPs en azul se muestra la anomalía de caudal neto correspondiente a todos mexicanos que desembocan en TAVE, los puntos verdes representan la anomalía de caudal mensual de río Mississippi, todos en m^3s^{-1}	33

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
20. Panel superior - FEO 1 calculada en la región BOC a partir de las salidas del modelo (derecha) y de productos mensuales de imágenes satelitales (izquierda). Panel inferior - Componente principal correspondiente al modo 1 para las salidas del modelo y datos observados. En el panel inferior de las CPs en azul se muestra la anomalía del caudal mensual correspondiente al sistema Grijalva-Usumacinta en m^3s^{-1}	34
21. Panel superior - Componente principal de las dos configuraciones del modelo acoplado: con y sin ríos para la región TAVE, en línea azul y puntos verdes se muestra la anomalía de los caudales mensuales correspondiente a los ríos locales y Mississppi, respectivamente. Ambos en m^3s^{-1} . Panel inferior - Componente principal de las dos configuraciones del modelo acoplado: con y sin ríos para la región BOC, en azul se muestra la anomalía del caudal mensual correspondiente al sistema Grijalva-Usumacinta en m^3s^{-1}	35
22. Componente principal de la anomalía de los promedios mensuales de concentración de clorofila superficial en la región TAVE, a partir del modelo (línea negra) y producto satelital del sensor MODIS (línea roja). Lo símbolos en los picos de variabilidad, representan los procesos físicos asociados a cada uno de ellos.	37
23. Componente principal de la anomalía de los promedios mensuales de concentración de clorofila superficial en la región BOC, a partir del modelo (línea negra) y producto satelital del sensor MODIS (línea roja). Lo símbolos en los picos de variabilidad, representan los procesos físicos asociados a cada uno de ellos.	37
24. Climatología estacional (columnas 1-4, Invierno [1] - otoño [4]) de la concentración de nitrato en los primeros 300 m de profundidad en las secciones transversales a la plataforma BOC y TAVE, respectivamente . Sobrepuestas en línea negra se muestran las isotermas para las mismas escalas temporales y espaciales.	39
25. Dinámica de la producción primaria correspondiente a primavera y verano (derecha) y otoño e invierno (izquierda) en la plataforma TAVE. Los puntos verdes representan la concentración de clorofila, los círculos rojos representan la erosión del reservorio de nitrato debido a la profundización de la capa de mezcla representada por la línea negra delgada.	40
26. Dinámica de la producción primaria correspondiente a primavera y verano (arriba) y otoño e invierno (abajo) en la plataforma BOC. Los puntos verdes representan la concentración de clorofila, los círculos rojos representan la erosión del reservorio de nitrato debido a la profundización de la capa de mezcla representada por la línea negra delgada.	41

Lista de cuadros

Tabla		Página
1.	Configuración general de las cuencas estudiadas	11
2.	Parámetros utilizados en la calibración de caudal. ^a Parámetro ajustado dependiendo el tipo de suelo. ^b Parámetro utilizado solo en la cuenca Grijalva.	13
3.	Parámetros, definición y valores utilizados en las simulaciones bio-geoquímicas.	21

Capítulo 1. Introducción

El Golfo de México (Figura 1) es un mar semicerrado que cubre un área de $\sim 1,5 \times 10^6 \text{ km}^2$, está localizado entre las latitudes 18° y 30° N y las longitudes 82° y 98° O y está conectado con el océano Atlántico a través del canal de Yucatán y el estrecho de Florida (Rivas Camargo, 2006). El golfo cuenta con gran diversidad topográfica y una productividad primaria que va de moderada a alta, la cual propicia gran diversidad biológica. Así mismo, también provee de recursos energéticos, tales como petróleo y gas natural, fundamentales para la economía de la región.

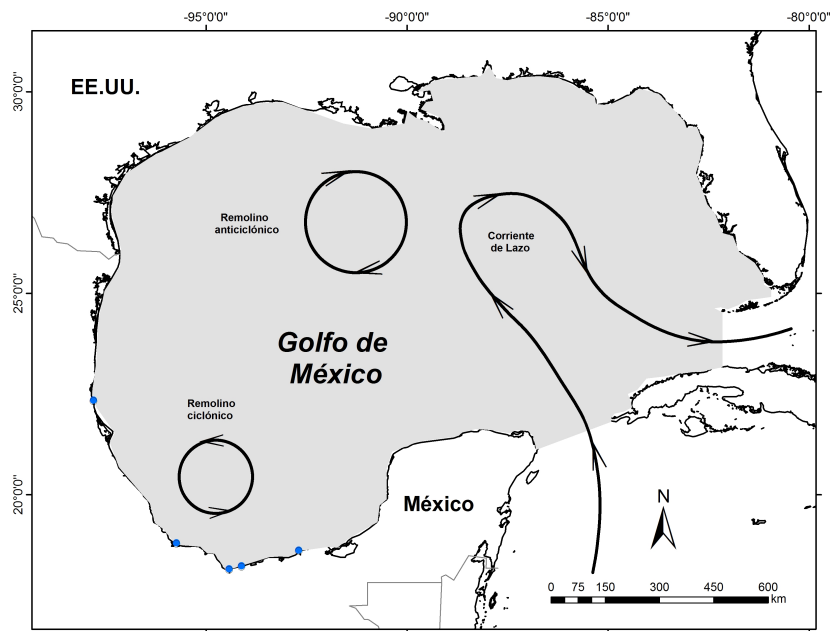


Figura 1. Circulación dominante en el Golfo de México

La circulación general del Golfo de México esta dominada por la corriente de Lazo la cual ingresa al golfo por el canal de Yucatán formando un giro semicerrado anticiclónico y abandona el mismo a través del estrecho de Florida. De esta corriente se desprenden remolinos de mesoescala anticiclónicos que se propagan hacia el oeste con velocidades de $\sim 2 \text{ km por día}$ (Elliott, 1982). La circulación del oeste del Golfo de México está dominada por estos remolinos transitorios que tienen una vida que va de varios meses hasta 1 año con un valor medio de ~ 10 meses (Vázquez De La Cerda *et al.*, 2005), así como por una circulación anticiclónica producto del esfuerzo del viento la cual genera una corriente con una significativa componente estacional (Sturges, 1993). En cuanto a la zona que comprende la Bahía de Campeche, diversos estudios han establecido que existe un flujo ciclónico semipermanente, el cual

presenta una variabilidad que no está ligada a la componente estacional, tanto espacial como temporalmente (Vázquez De La Cerda *et al.*, 2005). Dentro de los procesos ligados a la estacionalidad destacan la advección de agua de baja salinidad y surgencias costeras. El primero de ellos, durante el otoño e invierno, proveniente de los ríos Mississippi y Atchafalaya desde la plataforma de Lousiana-Texas a la plataforma de Tamaulipas-Veracruz, el mecanismo inverso se presenta en verano. Las surgencias costeras debidas al transporte de Ekman ocurren en verano en la región sur del golfo y en invierno en el norte (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003, 2006).

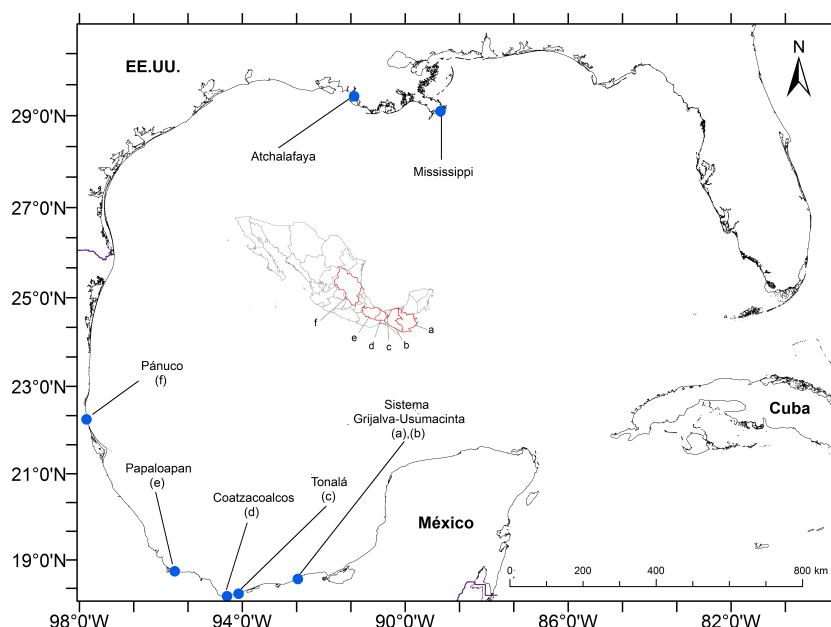


Figura 2. Ubicación de las desembocaduras y las cuencas de aporte de los ríos mas caudalosos que llegan al GdM

En México existen 16 ríos que descargan sus aguas directamente en el GdM, de los cuales cinco: Grijalva, Usumacinta, Coatzacoalcos, Papaloapan y Pánuco (Figura 2) son los que aportan la mayor parte de agua dulce con un caudal conjunto de $\sim 2,2 \times 10^6 m^3$ por año, el cual representa $\sim 90\%$ de los escurrimientos totales hacia el golfo provenientes de territorio mexicano (CONAGUA, 2012). En ambas regiones, norte y sur del golfo, los escurrimientos antes mencionados, junto a los aportes ubicados en EE.UU. propician grandes regiones donde la productividad primaria tiene una componente estacional fuertemente ligada a estas entradas de agua dulce ricas en nitrógeno.

En cuanto a estos escurrimientos concierne, los datos disponibles correspondientes a los caudales y nutrientes de estos grandes aportes de aguas continentales, aunque

importantes, generalmente son escasos o intermitentes pero sobre todo, con mediciones en regiones de las cuencas en la porción continental y no en las desembocaduras donde el flujo total es necesario. Para remediar esto, en el presente estudio se utilizó un modelo hidrológico para calcular dichos caudales en estas zonas de relevancia. Posteriormente estos datos se integraron a un modelo hidrodinámico acoplado a un modelo biológico con el fin de simular la dinámica de producción primaria en toda la cuenca del Golfo de México. Finalmente, se llevó a cabo un análisis en las regiones en donde se calcularon estos nuevos datos hidrológicos, con el fin de describir el proceso de producción primaria e identificar eventos extraordinarios en la respuesta del fitoplancton producto de emplear estos nuevos datos de caudales diarios en la configuración del modelo acoplado.

1.1. Justificación

La producción primaria es el proceso por el cual los organismos sintetizan moléculas orgánicas a partir de carbono inorgánico [CO_2] en compuestos orgánicos simples, una gran parte de esta reducción la llevan a cabo organismos fotoautótrofos a través de la fotosíntesis (Thornton, 2012). En el océano, producción primaria, es una medida de la cantidad de biomasa que un sistema trófico puede sostener, dicha capacidad se puede estimar en términos de la tasa de producción de fitoplancton y por ende de clorofila, es por esto que los estudios biogeoquímicos son fundamentales para conocer más acerca de la distribución y densidad de poblaciones marinas y pesquerías, así como la susceptibilidad de las regiones costeras para la aparición de zonas hipóxicas. La producción primaria es modulada, principalmente, por la radiación solar y la disponibilidad de nutrientes inorgánicos (fósforo, nitrógeno y sílice). El nitrógeno forma compuestos tales como nitrato [NO_3] y amonio [NH_4]. A pesar de que el nitrógeno es abundante en la naturaleza, en los ecosistemas se introduce artificialmente a través de aguas residuales y fertilizantes que a su vez llegan al océano vía escurrimientos superficiales y subterráneos. Otras fuentes importantes de aporte de nutrientes es a través de las surgencias y del proceso de remineralización de detritos.

1.2. Antecedentes

Diversos estudios biogeoquímicos se han llevado a cabo en el Golfo de México: En 2006, Fennel *et al.* (2006) implementó una frontera de fondo biológica en un modelo biogeoquímico acoplado a uno dinámico, lo anterior para simular el ciclo del nitrógeno en el noroeste del Golfo de México y la costa este de Estados Unidos durante un periodo de 3 años. Martínez-López y Zavala-Hidalgo (2009) estudiaron la variabilidad estacional e interanual de transporte de clorofila costa afuera usando imágenes mensuales de color superficial del océano (SeaWiFS) y datos de viento de NCEP/NCAR para un periodo de 10 años, encontrando que estos transportes son dominados por la inversión de las corrientes en la zonas someras y la aparición de zonas de confluencia. Fennel *et al.* (2011) analizaron la variabilidad de clorofila en el norte del golfo, utilizando un modelo biogeoquímico acoplado a un modelo físico, demostrando que el modelo fue capaz de reproducir de manera realista muchas de las características de la dinámica de nutrientes y fitoplancton incluyendo distribución y tasas de crecimiento y mortalidad. Xue *et al.* (2013a), con el uso de un modelo físico acoplado a uno biogeoquímico, simularon la variabilidad espacial y temporal de la circulación y el ciclo biogeoquímico en todo el GdM, encontrando una fuerte componente estacional en la distribución de nitrógeno, fitoplancton y zooplancton. Recientemente ?) llevaron a cabo una simulación de todo el golfo utilizando un modelo acoplado que toma en cuenta varios grupos funcionales de fitoplancton. Finalmente, Damien *et al.* (2018) analizaron la región profunda del golfo, concluyendo en base a su modelo acoplado, que existen distintos patrones de variabilidad en esta zona por lo que, ellos señalan, no se debería considerar como una región homogénea.

1.3. Hipótesis

El aporte de agua dulce, rica en nutrientes y sedimentos, proveniente de los ríos es fundamental para la producción primaria en zonas costera. Es por ello que, una implementación correcta de estos caudales en un modelo acoplado es de crucial importancia para representar de manera realista dichos procesos en el Golfo de México. Es por todo lo anterior, que en el presente estudio, las siguientes hipótesis son propuestas:

- Para lograr simular de forma correcta la dinámica de producción primaria en la zona costera del Golfo de México, es necesario contar con caudales y nutrientes en la desembocadura de los ríos que vierten sus aguas en el golfo.
- Uno de los factores principales que dominan la variabilidad de los “blooms” extraordinarios de clorofila en las plataformas del Golfo de México es el aporte de aguas continentales.

1.4. Objetivo general

Generar e integrar datos diarios de ríos a un modelo regional de circulación del Golfo de México para posteriormente, implementar un modelo biogeoquímico (i.e., N2PZD2) con la finalidad de simular y describir la dinámica de producción primaria en el golfo.

1.4.1. Objetivos específicos

- Simular caudales y nutrientes de los ríos principales que desembocan en el GdM.
- Integrar al modelo de circulación existente los datos simulados para un periodo de 21 años.
- Implementar el modelo biogeoquímico N2PZD2.
- Integrar al modelo los aportes de nutrientes por ríos en la región sur y oeste del GdM.
- Simular la dinámica de producción primaria.
- Validar resultados obtenidos con imágenes satelitales de concentración de clorofila superficial.

Capítulo 2. Simulación de caudales diarios

Es debido a la ausencia de caudales diarios en las desembocaduras de los ríos que en diversos estudios biogeoquímicos y oceanográficos en el Golfo de México (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Xue *et al.*, 2013a) se han utilizado datos mensuales (Milliman y Farnsworth, 2013; Dai, 2016) o incompletos para los flujos que desembocan dentro del golfo. Por otra parte, estos escurrimientos son necesarios para simular cargas de nitrógeno (nitrato y amonio), producto de actividades antropogénicas, que se depositan directamente en el océano. Esto último, fundamental para los procesos biogeoquímicos.

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a una porción continental específica que delimita el suroeste del Golfo de México, esta región esta formada por las cuencas Grijalva, Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá en el sur de México y por la cuenca Pánuco en el noreste del país (Figura 3). El criterio de selección para escoger las cuencas estudiadas fue la magnitud de la descarga del río que fluye hacia el golfo. Algunas de ellas son cuencas transfronterizas, como es el caso de las cuencas Grijalva y Usumacinta, de las cuales algunas regiones que las conforman se encuentran en Guatemala (García García y Kauffer Michel, 2011).

Las cuencas Grijalva y Usumacinta, ubicadas en la frontera con Guatemala, y que tienen una desembocadura en común en el estado de Tabasco, cubren una superficie de 56895 km² y 73176 km² respectivamente. En las partes altas de estas cuencas es donde se encuentra la mayor precipitación anual en todo el país con un promedio de ~4000 mm (Hinojosa-Corona *et al.*, 2011). El uso de suelo dominante para la cuenca Grijalva es agricultura mientras que para la cuenca Usumacinta es selva perenne. Finalmente, es relevante mencionar que dentro de la cuenca Grijalva se encuentra 4 centrales hidroeléctricas de relevancia: La Angostura, Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Nezahualcóyotl (Malpaso) y Peñitas (González-Villareal, 2009).

Las zonas de captación de los ríos Coatzacoalcos y Papaloapan cubre parte de los estados de Veracruz, Oaxaca y Puebla en el sur de México y tiene una extensión de

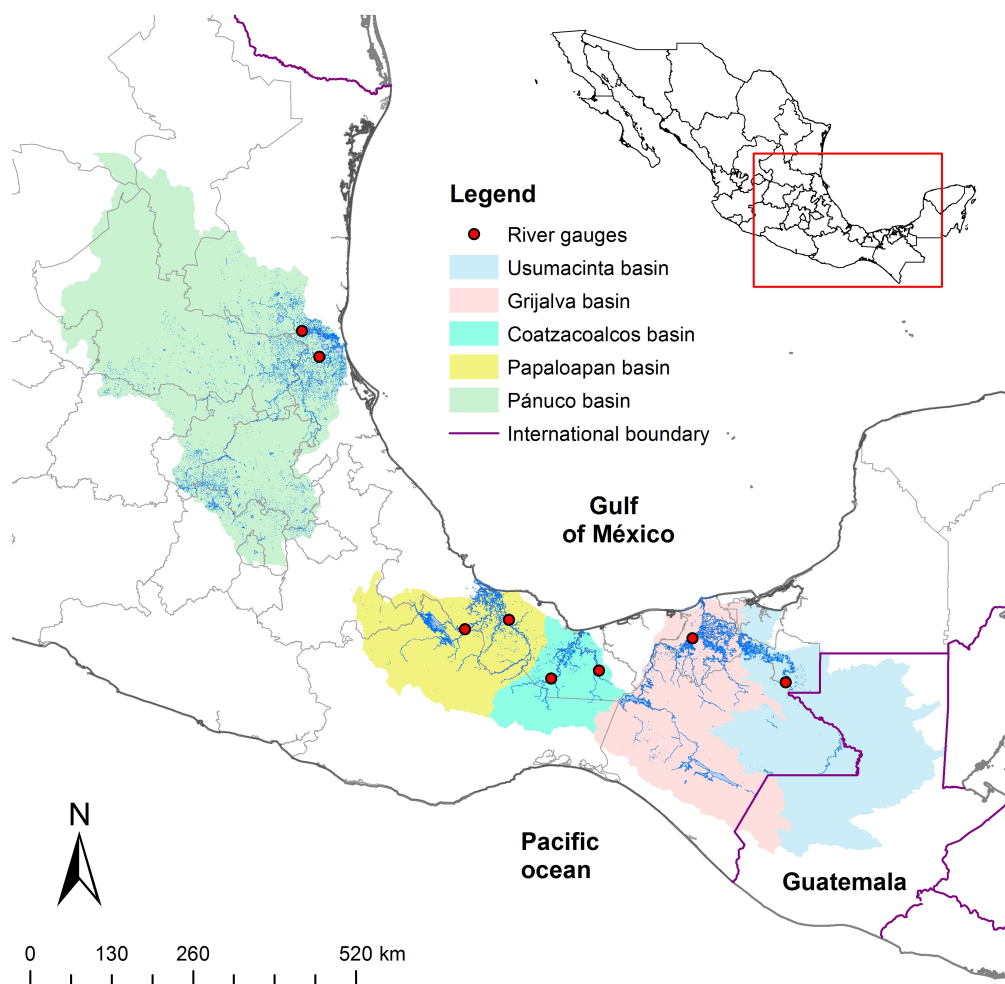


Figura 3. Raster de uso de suelo utilizada para las simulaciones hidrológicas en las cuencas estudiadas. Usumacinta (a), Grijalva (b), Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e).

21380 km² y 42143 km². La precipitación promedio anual en esta parte de México varía en el rango de 1000 mm y 2200 mm (Ponette-González *et al.*, 2010; Ostos, 2004) y el uso de suelo es agricultura. La cuenca del río Pánuco, la cual está separada geográficamente de las antes descritas, está localizada en el noreste de México y cubre un área de 147367 km². Es debido a la gran extensión que cubre esta cuenca, que en ella se presenta la mayor diferencia en precipitación promedio anual con un rango de valores que va de 600 mm en la porción norte hasta 1200 mm en el sur (Comrie y Glenn, 1998). En esta última cuenca el uso de suelo dominante es tierras de pastoreo seguido por bosques caducifolios.

2.2. Modelo SWAT

Con el propósito de modelar los datos de descargas diarias en las desembocaduras se empleó el *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Arnold *et al.*, 1998). Se eligió este modelo por la capacidad de simular procesos hidrológicos y biogeoquímicos así como por la facilidad para manejar y procesar todos los datos de entrada haciendo uso de sistemas de información geográficos. SWAT desarrollado en el *US-Agricultural Research Service* es un modelo hidrológico que funciona en intervalos temporales diarios y mensuales (Arnold *et al.*, 1998; Gassman *et al.*, 2007; Saha *et al.*, 2014a). Como ya antes se mencionó, el modelo se eligió para llevar a cabo esta parte del estudio debido a su capacidad para simular flujos, nutrientes y sedimentos en una cuenca cerrada. El modelo resuelve el ciclo hidrológico basado en la siguiente ecuación de balance:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})_i \quad (1)$$

donde SW_0 y SW_t es el contenido inicial y final de agua alojada en el suelo, R_{day} es la cantidad de precipitación, Q_{surf} es el volumen total de escurrimiento superficial, E_a es la evaporación, w_{seep} es la cantidad de agua entrando a la zona vadosa y Q_{gw} es el volumen de agua alojado en los acuíferos, todas las variables en valores diarios (i) y medidas en milímetros.

2.3. Bases de datos

El modelo requiere para su operación datos específicos de variables meteorológicas, topografía, así como tipo y uso de suelo en las cuencas analizadas. Todos los datos de entrada se integraron al modelo por medio de rasters y archivos con la información de estaciones meteorológicas de las cuencas correspondientes. La topografía se obtuvo a partir del modelo de elevación digital *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de NASA (Jarvis *et al.*, 2008) con una resolución horizontal de 90 m. Para los datos meteorológicos se utilizó la base de datos de Livneh *et al.* (2015) la cual cuenta con registros diarios de precipitación, temperaturas mínima y máxima, así como magnitud del viento para el periodo 1950-2013 con una resolución espacial de $1/16^\circ$. Las variables de humedad relativa y radiación solar se obtuvieron del *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) (Saha *et al.*, 2014b) usando el módulo correspondiente integrado en el modelo. Para definir el uso de suelo (Figura 4) se usaron los productos de *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de 500 m de resolución (Broxton *et al.*, 2014). Datos referentes al tipo de suelo se obtuvieron del mapa digital de suelos de la *Food and Agriculture Organization* (FAO) (FAO, 2003). Todos los datos observados de descargas utilizados en el proceso de calibración y validación se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2017), el cual consiste de 2070 estaciones hidrométricas con datos de caudales diarios.

2.4. Configuración del modelo

Para facilitar la entrada de datos, configuración y parametrización del modelo, se utilizó el ArcSWAT (version 2012.10.19). Todas las cuencas se delinearon mediante un proceso automático, el cual consiste en calcular la dirección y acumulación del flujo utilizando el modelo de elevación digital. Los puntos de descarga, o salidas de las cuencas fueron ubicados justamente en las desembocaduras. Así mismo, se agregaron puntos de descarga en los lugares en donde se contaban con datos observados de flujo. Con el propósito de representar las presas existentes en la cuenca Grijalva, se agregaron reservorios dentro de esta, la información detallada de la operación de las mismas se obtuvo de la información reportada por González-Villareal (2009). Se llevaron a cabo 25 años de simulación para las cuencas Usumacinta, Coatzacoalcos, Papaloapan y Pánuco. Para la cuenca Grijalva el periodo de simulación fue de 17 años,

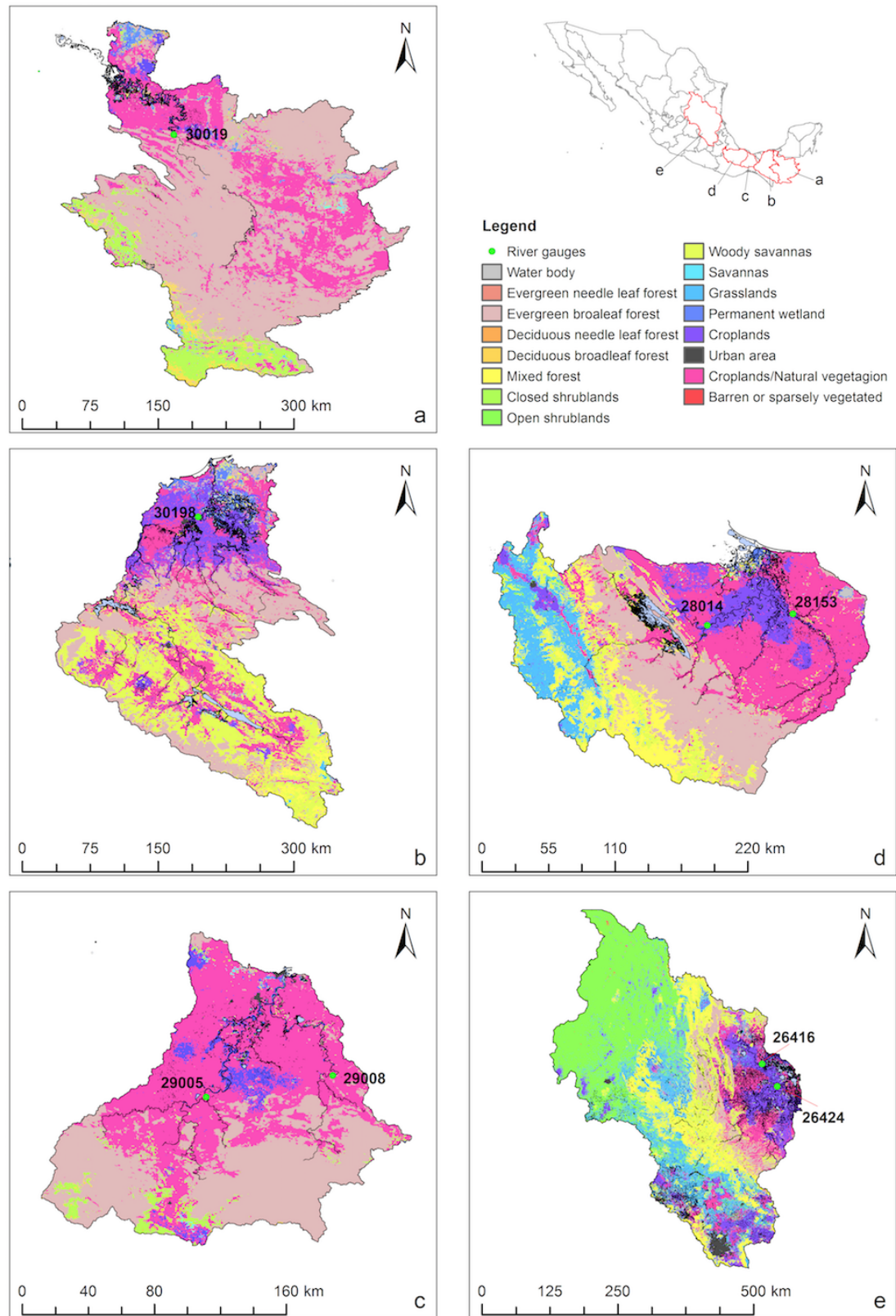


Figura 4. Tipos de suelo empleados en el modelo SWAT para las cuencas Usumacinta (a), Grijalva (b), Coatzacoalcos (c), Papaloapán (d) y Pánuco (e).

esto debido a los huecos existentes en la información disponible para el proceso de calibración. Los periodos de simulación fueron del 1 de enero de 1989 al 12 de diciembre de 2013 para las cuencas Usumacinta, Coatzacoalcos, Papaloapan y del 7 de julio de 1997 al 31 de diciembre de 2013 para la cuenca Grijalva. Estos periodos, como ya se mencionó, se definieron de acuerdo a la disponibilidad de datos. Finalmente, Se tomó un periodo de *spin up* de 3 años para todas las simulaciones.

Cuadro 1. Configuración general de las cuencas estudiadas

Cuenca	HRUs	Sub-cuencas	Extensión (km ²)
Grijalva	511	23	59755
Usumacinta	561	27	73075
Coatzacoalcos	219	15	21381
Papaloapan	347	20	42143
Pánuco	848	33	147367

2.5. Calibración y validación

La calibración del modelo, para todas las cuencas, se realizó con una técnica automatizada utilizando el método *SUFI-2* (Abbaspour *et al.*, 2004, 2007) implementado en el software *Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty* (SWAT-CUP 2012 version 5.1.6) (Abbaspour, 2011). El modelo se calibró y validó en intervalos temporales mensuales, se corrieron un total de 300 simulaciones en cada una de las cinco iteraciones que se utilizaron en el proceso de calibración. Finalmente, el proceso de calibración abarco los periodos 1989 - 2009 para las cuencas Usumacinta, Coatzacoalcos, Papaloapan and Pánuco y de 1997 a 2013 para la cuenca Grijalva. Para la seleccion de parametros para el proceso de calibración se siguió la metodología de Abbaspour *et al.* (2015), los parámetros utilizados en el proceso de calibración se muestran en la Tabla 2.

El desempeño de la la calibración se evaluó utilizando el coeficiente Nash-Sutcliffe (NS), el porcentaje del sesgo (PBIAS) y el radio de la raíz del error cuadrático medio-desviación estándar (RSR)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (2)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}} \quad (3)$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \quad (4)$$

donde Q_i^{obs} es el caudal observado, Q_i^{sim} es el caudal simulado y $\bar{Q}^{obs}$ es el promedio de los datos observados. Valores de $NS > 0,50$ (Santhi *et al.*, 2001), $RSR < 0,70$ y $-25 \% \leq PBIAS \leq 25 \%$ son necesarios en los evaluadores estadísticos para considerar la calibración exitosa, tal cual establece el criterio reportado por Moriasi *et al.* (2007). Así mismo, se calculó el coeficiente de correlación (r) para observar la relación lineal entre las señales observada y simulada.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x S_y}} \quad (5)$$

donde x es el flujo observado Q^{obs} , y es el flujo simulado Q^{sim} , S_{xy} es la covarianza y S_x y S_y son las desviaciones estándar de x y y respectivamente. Para validar el modelo los mismos parámetros estadísticos fueron calculados para el periodo 2010-2013 en todas las cuencas.

2.6. Resultados

El caudal promedio observado para el río Usumacinta durante los años analizados es de $2085.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, el cual es ligeramente más bajo que el promedio simulado de $2457.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. El rango del flujo simulado está entre $640 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $6105 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, el cual es consistente con los límites observados de $156 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $7147 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el periodo analizado y con los valores de 288 y $7442 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ reportados por Fuentes-Yaco *et al.*

Cuadro 2. Parámetros utilizados en la calibración de caudal. ^a Parámetro ajustado dependiendo el tipo de suelo. ^b Parámetro utilizado solo en la cuenca Grijalva.

Parámetro	Unidad	Método	Rango
CN2	—	<i>r</i>	-0.25 a 0.25
ALPHA_BF	días	<i>a</i>	0 a 1
GW_DELAY	días	<i>v</i>	0 a 500
GWQMN	mm H ₂ O	<i>v</i>	0 a 5000
CANMAX	mm H ₂ O	<i>v</i>	0 a 100
CH_K2	mm H ₂ O/h	<i>v</i>	0 a 500
EPCO	—	<i>v</i>	0 a 1
ESCO	—	<i>v</i>	0 a 1
GW_REVAP	mm H ₂ O/h	<i>v</i>	0.02 a 2
RCHRG_DP	—	<i>v</i>	0 a 1
REVAPMN	mm H ₂ O	<i>v</i>	0 a 500
SOL_AWC ^a	mm H ₂ O/mm	<i>r</i>	-0.25 a 0.25
SOL_Z ^a	mm	<i>r</i>	-0.25 a 0.25
SURLAG	días	<i>a</i>	0.05 a 24
RES_K ^b	mm/hr	<i>r</i>	0 a 1
RES_ESA ^b	ha	<i>r</i>	1 a 3000
RES_PVOL ^b	10 ⁴ m ³	<i>r</i>	10 a 100
RES_VOL ^b	10 ⁴ m ³	<i>r</i>	10 a 100
OFLOWMX ^b	m ³ s ⁻¹	<i>r</i>	0 a 2000
OFLOWMN ^b	m ³ s ⁻¹	<i>r</i>	0 a 1000
RES_RR ^b	m ³ s ⁻¹	<i>r</i>	0 a 1000
EVRSV ^b	—	<i>r</i>	0 a 1

(2001) para datos históricos.

La cuenca del río Grijalva es probablemente la más relevante de todas las cuencas estudiadas, esto debido a que fue posible simular una señal de caudal ininterrumpida para un periodo largo en toda la cuenca, incluidos el punto de calibración y la desembocadura. La mejor simulación de la cuenca arrojó valores promedio de 604.8 m³s⁻¹ en la estación hidrométrica 30198 para los datos observados y 628.88 m³s⁻¹ para la descarga simulada en el mismo punto. Por otra parte, el modelo calculó una descarga media de 1526.3 m³s⁻¹ en la desembocadura. Esto último, contrasta con el valor promedio de ~600 m³s⁻¹, que como ya se mencionó con anterioridad, es ampliamente utilizado en estudios oceanográficos como la cantidad de flujo escurriendo hacia el Golfo de México desde esta cuenca.

En la cuenca Coatzacoalcos se obtuvo un caudal promedio de 397.44 m³s⁻¹ comparado con la descarga observada de 454.49 m³s⁻¹ en la estación hidrométrica 29005. Para el caso de la cuenca Papaloapan un caudal medio simulado de 663.62 m³s⁻¹ y

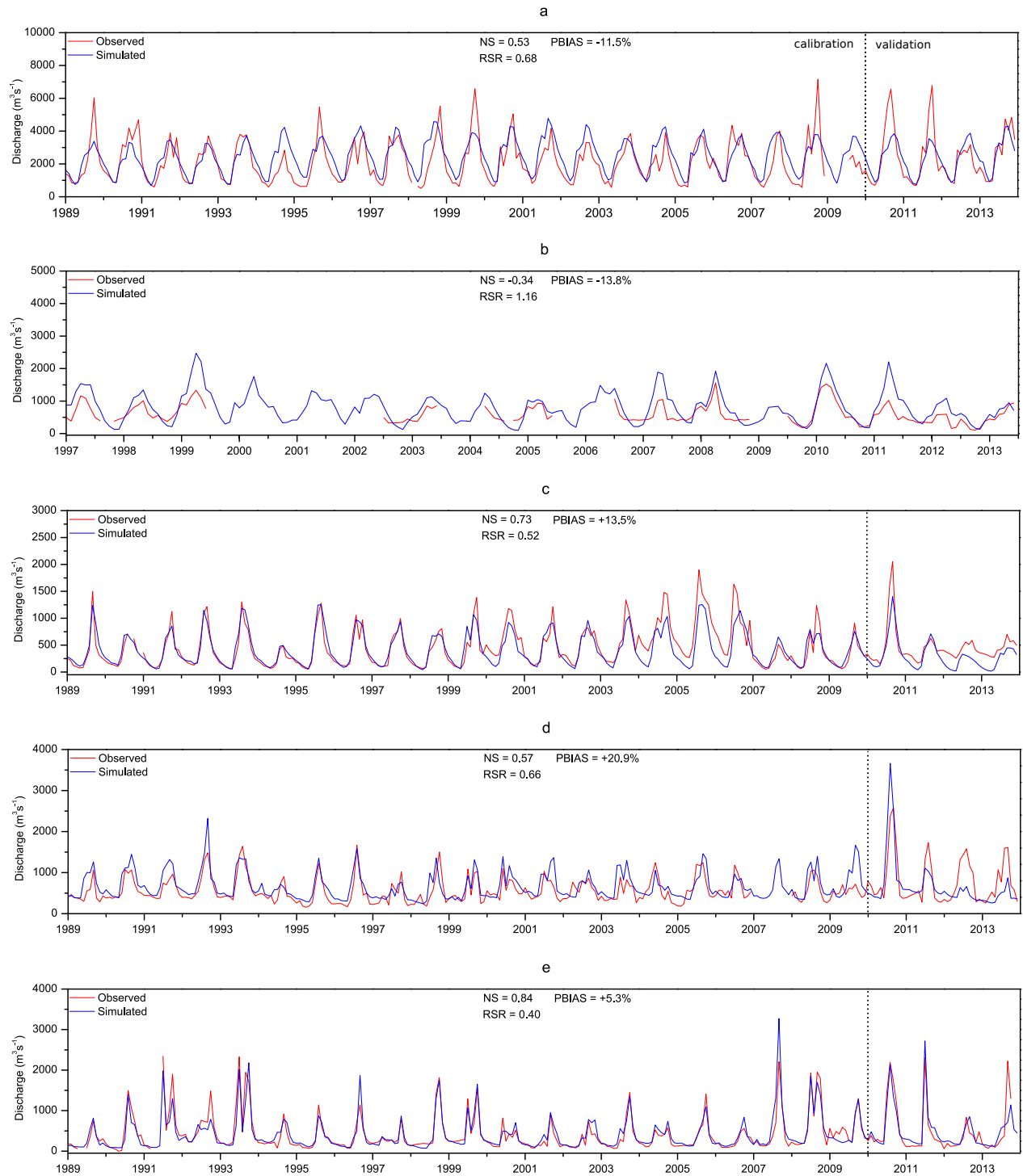


Figura 5. Descargas observada (línea roja) y simulada (línea azul) de los ríos Usumacinta (a), Grijalva (b) Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e). Para las cuencas c, d y e los resultados mostrados corresponden a las estaciones hidrométricas 29005, 28153 y 26424. Todos los periodos, tanto observados como simulados, están comprendidos entre el 1 de enero de 1989 al 31 de diciembre de 2013, excepto para el río Grijalva para el cual fue del 7 de julio de 1997 al 31 de diciembre de 2013.

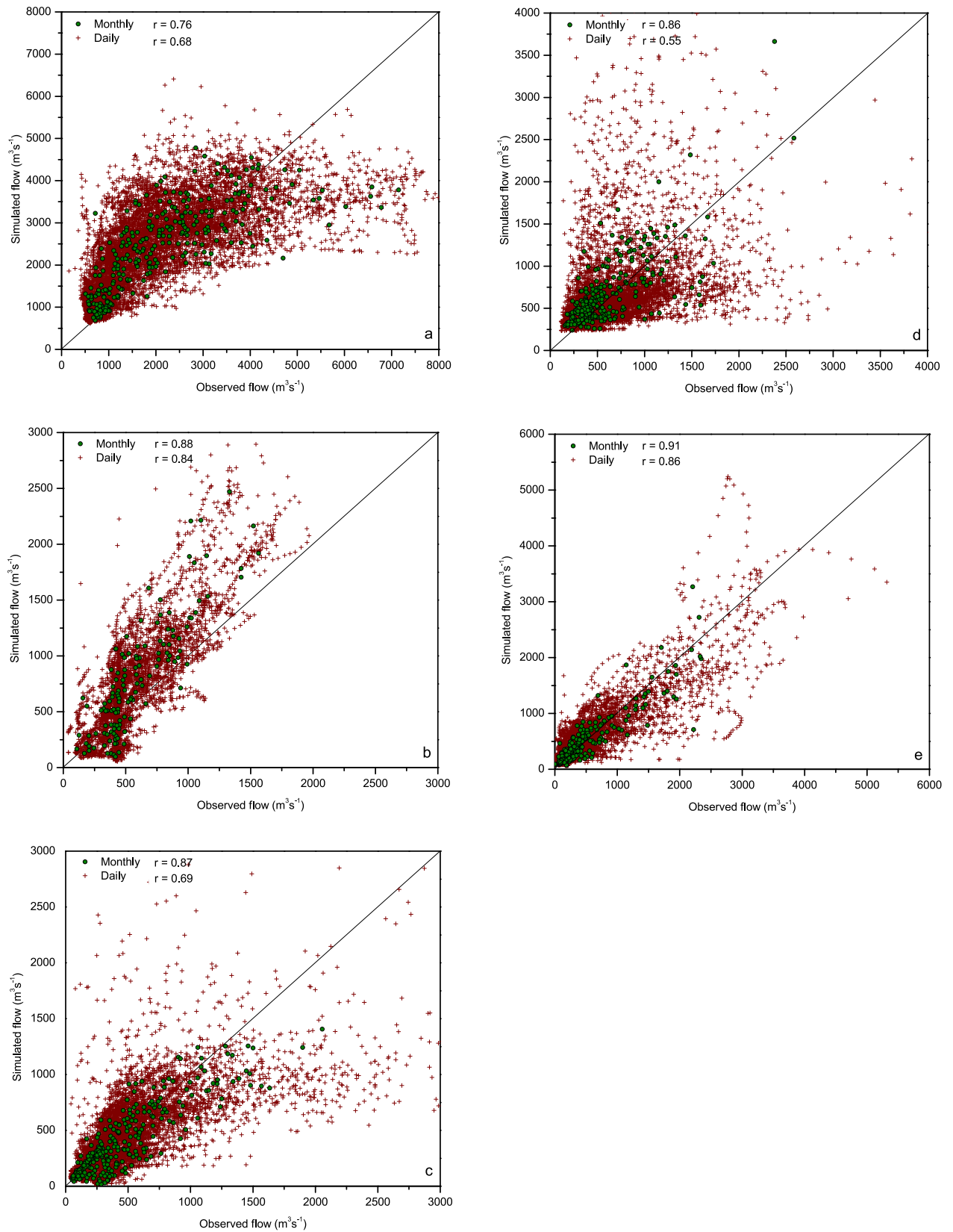


Figura 6. Comparación entre los flujos mensuales observados y simulados en los ríos Usumacinta (a), Grijalva (b) Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e).

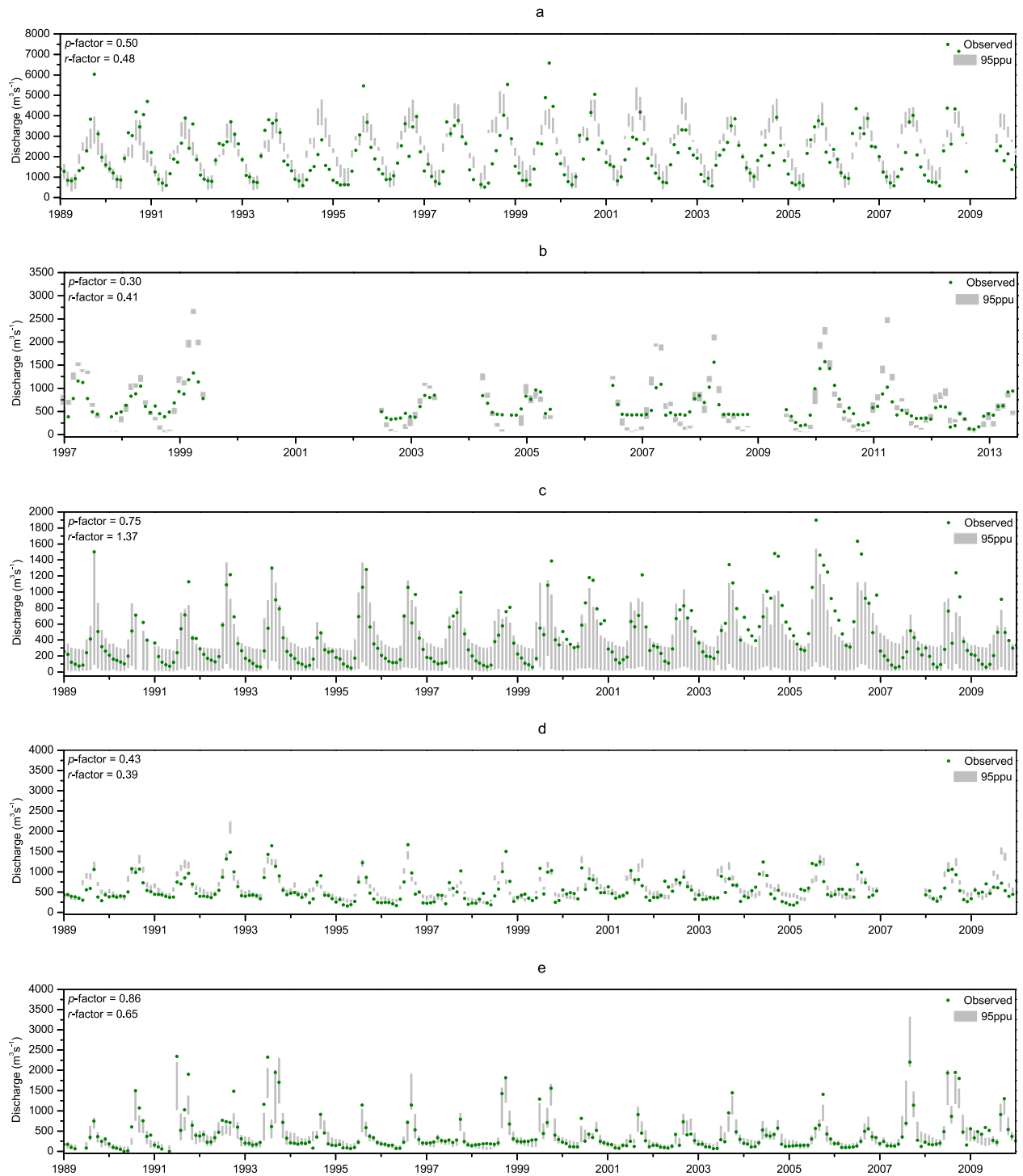


Figura 7. Flujo mensual observado (puntos verdes) y la incertidumbre al 95 % (barras grises) para los ríos Usumacinta (a), Grijalva (b) Coatzacoalcos (c), Papaloapan (d) y Pánuco (e).

observado de $591.62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la estación 28014. Finalmente, en la cuenca del río Pánuco con el modelo se obtuvo un caudal medio de $429.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y en la estación 26424 un caudal medio observado de $426.31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Todas las señales observadas y simuladas están en fase, demostrando así la capacidad del modelo de reproducir la respuesta de escurrimiento superficial de las cuencas, esto a pesar de las diferencias en tipo y uso de suelo entre las cuencas ubicadas en el sur comparadas con la cuenca del río Pánuco. En amplitud, las señales difieren entre si dependiendo primero de la tasa de precipitación, debido a la ubicación de la cuenca, y en segundo lugar a la extensión de la misma. Para entender de mejor manera esta afirmación hay que analizar la cuenca del río Pánuco (Figura 5, e), esta cuenca es la que cubre una área mayor de todas las analizadas. Es en esta cuenca, donde se puede observar un caudal medio de $\sim 430 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y picos en el flujo de $\sim 2000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, los cuales son similares a los valores de $\sim 400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $\sim 1500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ correspondientes a la cuenca Coatzacoalcos (Figure 5, c).

La similitud entre estas dos señales de caudal (Pánuco y Coatzacoalcos) esta relacionada con la diferencia de precipitación entre las dos regiones en donde las cuencas se ubican, y no con la extensión de la cuenca como es el caso de las cuatro cuencas ubicadas en el sur. Finalmente, en todas las cuencas en general se observó una fuerte correlación entre los escurrimientos superficiales y la cantidad de precipitación en la época de lluvias (junio a octubre) con el pico de estos escurrimientos ocurriendo en septiembre.

De acuerdo a Moriasi *et al.* (2007), el proceso de análisis de sensibilidad son los cambios en las salidas del modelo de acuerdo a variaciones en los diferentes parámetros de entrada. Para obtener la estadística de la sensibilidad de estos parámetros, el software de calibración usa un análisis de regresión múltiple. Esto es, la significancia de cada parámetro es identificada con el uso de una prueba *t* lo cual da lugar a determinar el coeficiente *P* (Abbaspour, 2011). En SUFI-2, la incertidumbre (95 % de la incertidumbre de la predicción, 95PPU) se propaga mediante el esquema del Hipercubo Latino y se calcula al 2.5 % y 97.5 % para todas las variables empleadas (Schuol y Abbaspour, 2006). El factor *P* es la cantidad de datos observados dentro de la banda 95PPU y el factor *R* indica el ancho de la banda y es una medida de la calidad de la calibración (Rouholahnejad *et al.*, 2012). El mejor ajuste para estos parámetros se ob-

tuvo en la cuenca Pánuco tal como se muestra en la Figura 7, con un factor P de 0.86 y un factor R de 0.65.

Capítulo 3. Modelo acoplado del Golfo de México

El objetivo de este estudio, es simular la dinámica de producción primaria en toda la extensión del Golfo de México utilizando nuevos datos de descargas y nutrientes de los ríos mexicanos. Estos datos anteriormente no existían, por ende una correcta representación del proceso de productividad primaria, sobre todo en las zonas costeras, no era posible.

Como se muestra en las secciones que a continuación se presentan, a nivel cuenca, el modelo reproduce de manera satisfactoria los procesos generales de producción primaria en toda la extensión del golfo, esto en contraste con trabajos previos que incluyen modelos acoplados y observaciones. Al analizar las plataformas continentales, encontramos correlaciones de relevancia entre los datos observados, producto de imágenes satelitales de concentración superficial de clorofila, y los datos de simulados que se analizan a continuación.

3.1. Modelo Físico

Para llevar a cabo este estudio se utilizó el modelo hidrodinámico Coastal and Regional Ocean COmmunity model (CROCO) version 1.0 (Debreu *et al.*, 2012) para simular los procesos físicos del Golfo de México. El dominio del modelo incluye todo el golfo desde los 79.30° hasta los 98.00° oeste y desde los 18.10° hasta los 30.70° norte. El modelo está configurado con una resolución horizontal de 5 km, 40 niveles sigma en la vertical e intervalos temporales de 3 minutos y utiliza el esquema de cerradura General length Scale para resolver la mezcla vertical. Los perfiles iniciales de salinidad y temperatura utilizados por el modelo fueron obtenidos del reanálisis GLORYS (Lellouche *et al.*, 2013) de Copernicus Marine Environment Monitoring Service. El modelo utiliza como forzamientos de momentum y flujos de calor y sal, promedios mensuales de GLORYS y de Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set, COADS (da Silva *et al.*, 1994), respectivamente. Para el forzamiento por el esfuerzo del viento se utilizaron promedios de 6 horas del NCEP Climate Forecast System Reanalysis, CFSR (Saha *et al.*, 2010) para los años 1998 al 2010 y NCEP Climate Forecast System Version 2, CFSv2 (Saha *et al.*, 2011) para el periodo de 2011 a 2013.

En total se llevaron a cabo 21 años de simulación (1993-2013) durante los cuales el

modelo logró reproducir de manera satisfactoria las principales características hidrodinámicas del Golfo de México, e.g. latitud de penetración de la corriente de Lazo a los 27 °N, desprendimiento coherente de remolinos anticiclónicos de la corriente de Lazo, circulación ciclónica en la región de la Bahía de Campeche, inversión de la corriente costera en el oeste de la plataforma del GoM, zonas de confluencia en la frontera entre Mexico-EE.UU. y Veracruz y Tabasco y un transporte promedio de ~ 24 Sv en el canal de Yucatán lo cual es consistente con lo reportado por Sheinbaum *et al.* (2002).

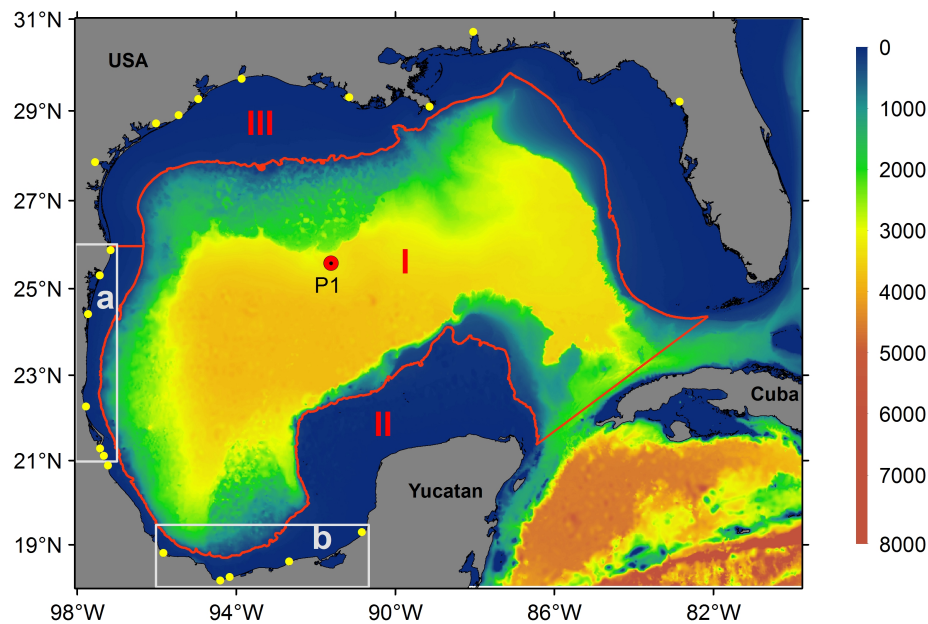


Figura 8. Dominio y batimetría del Golfo de México, los puntos amarillos representan los ríos utilizados en modelo. La línea roja delimita la isobata de los 200 m, la cual divide el golfo en tres regiones principales usadas en el presente estudio: región profunda (I), región costera sur (II) y región costera norte (III). Delimitadas en línea gris están las áreas en las cuales se calcularon los promedios diarios de clorofila, viento y flujos de nitrato para las plataformas TAVE (b) y BOC (c), respectivamente.

3.2. Modelo biológico

El modelo físico está acoplado con un modelo biogeoquímico N2PZD2 (Powell *et al.*, 2006), el cual resuelve el ciclo del nitrógeno mediante las variables: nitrato (NO_3), amonio (NH_4), fitoplancton, zooplancton y dos grupos de detritos. En el modelo se implementaron los datos (caudal, temperatura del agua, y concentraciones de nitrato y amonio) de 24 ríos (13 en México y 11 en los Estados Unidos) principales como entradas diarias de agua dulce utilizando la información reportada por González-Ramírez y Parés-Sierra (2019) para los ríos mexicanos (Usumacinta, Grijalva, Tonala, Papaloa-

pan, Coatzacoalcos, Pánuco) y de datos medidos por el US Army Corps of Engineers en las estaciones hidrométricas localizadas en Tarbert Landing para el río Mississippi y Simmesport para el río Atchafalaya, tal cual se llevó a cabo en estudios previos [Fennel *et al.* (2006), Fennel *et al.* (2011) y Xue *et al.* (2013a)]. Para los ríos Brazos y Río Grande, climatologías anuales fueron calculadas a partir de los periodos con datos diarios disponibles, tal información fue obtenida del United States Geological Survey (USGS). Para las condiciones iniciales y de frontera del modelo se utilizaron los datos de nitrato y amonio del World Ocean Atlas (Boyer *et al.*, 2013) y finalmente para las demás variables biológicas se utilizaron valores iniciales constantes predeterminados por el mismo modelo.

Cuadro 3. Parámetros, definición y valores utilizados en las simulaciones biogeoquímicas.

Parámetro	Definición	Valor
k_{water}	Atenuación de la luz debido al agua de mar	0.04
k_{chla}	Atenuación de la luz debido a la clorofila	0.024
α	Pendiente inicial de la curva P-I	0.7
CN_{Phy}	Radio C:N para fitoplancton	6.625
θ_{max}	Radio máximo de clorofila-fitoplancton	0.0535
$Chla_C$	Balance de masa para molécula de clorofila	1.3538
K_{NO3}	Saturación media para la toma de NO ₃	0.5
K_{NH4}	Saturación media para la toma de NH ₄	0.5
μ_{Nit}	Oxidación de NH ₄ a NO ₃	0.05
μ_{Phy-Sd}	Mortalidad de fitoplancton	0.25
g_{max}	Tasa máxima de pastoreo	0.6
β	Coefficiente de asimilación	0.75
K_{phy}	Constante de saturación media para la ingesta de fitoplancton	2
μ_{Z-Nit}	Tasa de excreción del Zooplancton	0.1
μ_{Z-Sd}	Tasa de mortalidad de Zooplancton	0.025
μ_{Sd-Nit}	Tasa de remineralización de detritos pequeños	0.003
μ_{Ld-Nit}	Tasa de remineralización de detritos grandes	0.005
μ_{Agg}	Tasa de agregación (SDet+Phyt $\Rightarrow$ LDet)	0.005
ω_{Phyt}	Velocidad de hundimiento de fitoplancton	0.1
ω_{SDet}	Velocidad de hundimiento de detritos pequeños	0.1
ω_{LDet}	Velocidad de hundimiento de detritos grandes	1.0

3.2.1. Frontera de fondo biológica

Con el propósito de resolver mejor el proceso de producción primaria en las regiones de las plataformas continentales, se integró una condición de frontera en el fondo al modelo biogeoquímico similar a la propuesta por Fennel *et al.* (2006). Esta condición es necesaria para resolver el ciclo biológico en regiones donde los nutrientes de fondo

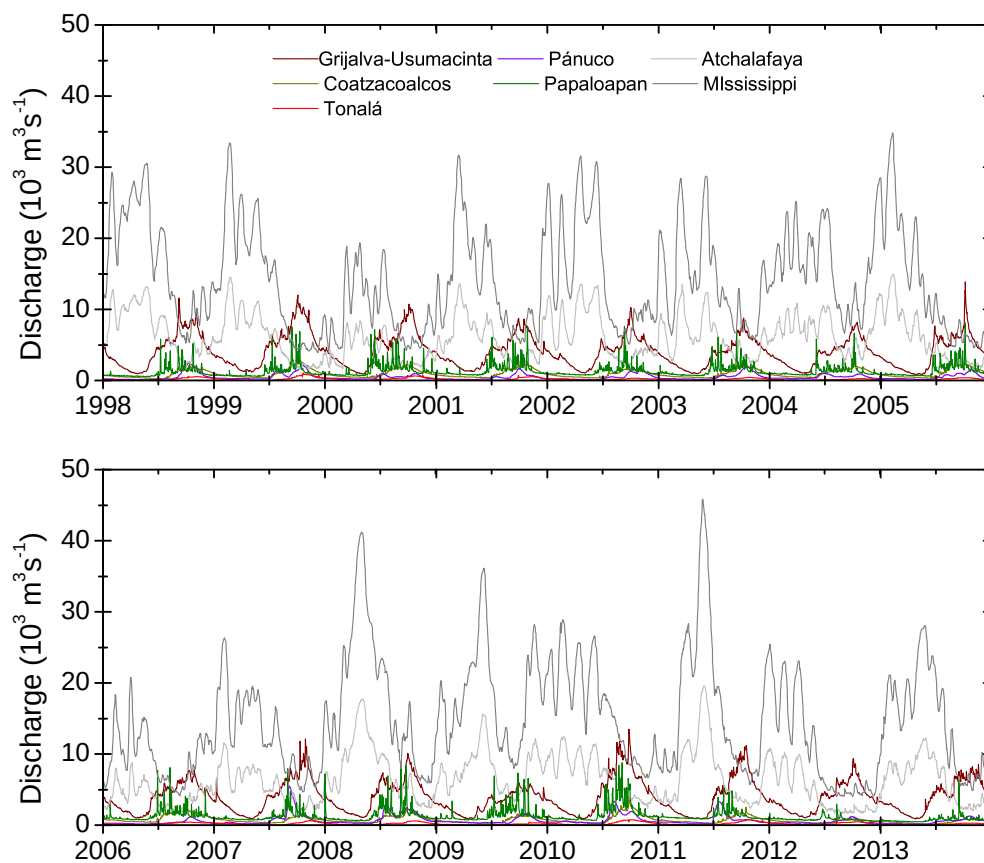
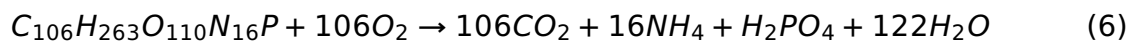


Figura 9. Descargas observadas (línea gris) y simuladas (líneas de color) de los ríos mas caudalosos que se utilizaron en el modelo acoplado. Se muestran ocho de los 24 ríos usados como forzamiento.

no alcanzan las zonas someras del golfo (isobata de 200 m hacia la costa), y por ende las altas concentraciones de nutrientes son producto, principalmente, de los aportes de aguas continentales. El proceso que se lleva a cabo es la remineralización de los desechos orgánicos y fitoplancton residual a amonio y posteriormente a nitrato entre otros compuestos, siguiendo la siguiente reacción:



de la cual, la parte que esta implementada en el modelo biogeoquímico es el proceso de transformación de la materia orgánica ($C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$) que alcanza el fondo, en este caso detritos y fitoplancton. Posteriormente, ésta es instantáneamente remineralizada en amonio ($16NH_4$), así pues la expresión matemática que define este proceso

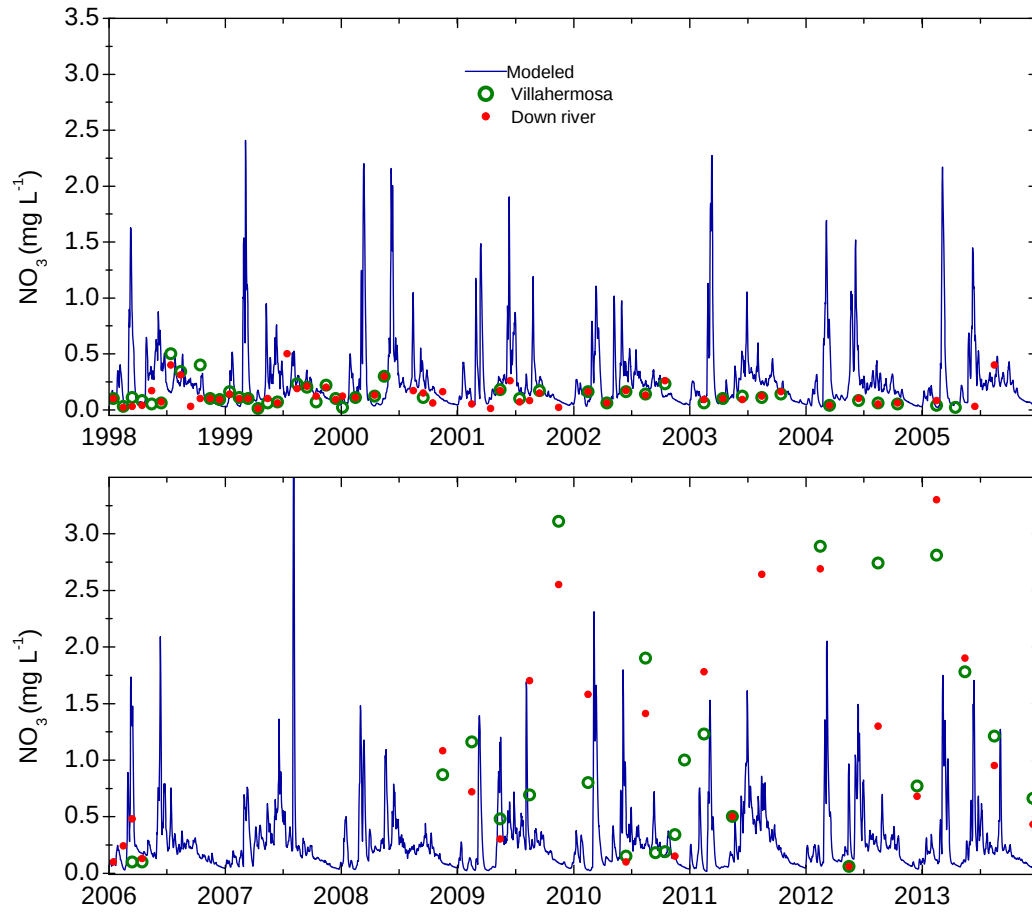


Figura 10. Concentraciones de nitrato en el sistema Grijalva-Usumacinta producto del modelo hidrológico (línea azul) y de observaciones en la ciudad de Villahermosa (círculos verdes) así como observaciones río abajo cerca a la desembocadura (puntos rojos).

es:

$$\left. \frac{\partial NH_4}{\partial t} \right|_{z=H} = (Phy|_{z=H} + SDet|_{z=H} + LDet|_{z=H}) \quad (7)$$

donde $Phy|_{z=H}$, $SDet|_{z=H}$ y $LDet|_{z=H}$ son las cantidades de fitoplancton, detritos pequeños y grandes en la capa de fondo, respectivamente. En diferencias finitas, tal cual fue implementada en el modelo numérico, es:

$$\frac{NH_4^t_{i,j,k=H} - NH_4^{t-1}_{i,j,k=H}}{\Delta t} = Phy^k_{i,j,k=H} + SDet^k_{i,j,k=H} + LDet^k_{i,j,k=H} \quad (8)$$

cada una de las cantidades es restada del reservorio correspondiente utilizando la

relación:

$$C_{i,j,k=H}^{*t} = \frac{C_{i,j,k=H}^{t-1}}{1 + \Delta t \omega^*} \quad (9)$$

Donde C^* y ω^* son los reservorios (Phy, SDet y LDet) y velocidades de hundimientos de los mismos.

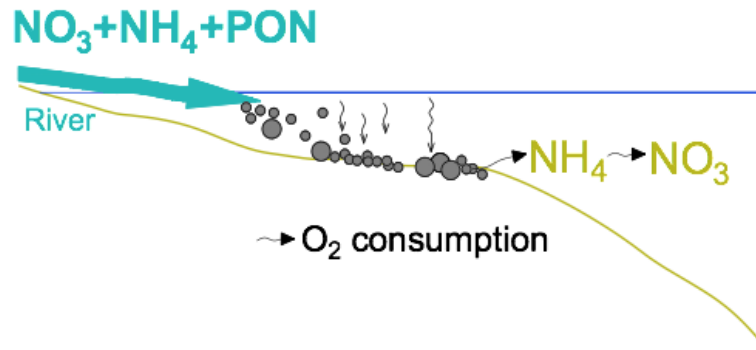


Figura 11. Modelo conceptual de la frontera de fondo biológica implementada en el modelo biogeoquímico. La frontera convierte la materia orgánica (fitoplancton y detritos) en amonio al momento de llegar al fondo. Posteriormente, la rutina de nitrificación del modelo oxida el amonio para dar paso directamente a nitrato, esto último haciendo de manera implícita el consumo de oxígeno y el paso por nitrito.

3.3. Resultados

Se lograron reproducir de manera aceptable los procesos generales de la dinámica de producción primaria en el Golfo de México: un ciclo anual dominado por el viento, altas concentraciones en las regiones costeras, una menor concentración en la corriente de Lazo y remolinos anticiclónicos desprendidos de la misma, así como mayores concentraciones en remolinos ciclónicos principalmente el remolino en la región de la Bahía de Campeche. En esta sección se presenta una comparación entre los resultados obtenidos en la presente investigación, imágenes de satélite y trabajos previos donde se incluyen observaciones de la distribución general, superficial y en la vertical de clorofila, así como un análisis de las regiones costeras en las cuales nuevos datos de caudales y nutrientes ríos mexicanos fueron implementados en el modelo.

3.3.1. Distribución superficial de clorofila

En términos generales se logró reproducir satisfactoriamente el ciclo anual de producción primaria en el Golfo de México. En la Figura 12 es posible observar las climatologías estacionales (invierno a otoño) de concentración superficial de clorofila α calculadas a partir de las salidas del modelo (fila superior, usando 21 años de simulación) y a partir de las observaciones satelitales del sensor MODIS (fila inferior, usando 13 años de observaciones).

En invierno el modelo acoplado fue capaz de simular la respuesta del fitoplancton al proceso de erosión de la parte superior de la capa de nutrientes producto de la intensa mezcla vertical que se da al ingresar al golfo los frentes fríos provenientes del polo. En primavera una disminución del máximo en superficie, asociado a la reducción de la intensidad del viento, como un aumento en la concentración en las distintas regiones de la plataforma continental (Louisiana-Texas [LATEX], Tamaulipas-Veracruz [TAVE] y Bahía de Campeche [BOC]). El aumento en las plataformas esta asociado, principalmente, a dos factores: al cambio de dirección en vientos predominantes, que dan lugar a surgencias costeras y a la acumulación de nutrientes provenientes de tierra, principalmente en la plataforma LATEX en donde estos aportes se dan durante finales de invierno - principio de primavera y en donde los ríos Mississippi y Atchafalaya proveen la mayoría de estos nutrientes (Walsh *et al.* (1989); Turner y Rabalais (1999)). Este patrón continua en el verano en donde la estratificación permite observar el mínimo de concentración de clorofila en superficie, hasta que una vez finalizado este, dicha concentración aumenta gradualmente durante el otoño hasta llegar a las condiciones de invierno antes descritas.

Para propósitos de comparación entre valores observados y simulados de concentración superficial de clorofila α , el golfo se dividió en tres grandes regiones: la región profunda (I), region costera sur (II) y region costera norte (III) (Figura 18), estas últimas (regiones II y III) divididas en la desembocadura del río Bravo. En las regiones I y II se observan buenas correlaciones entre los promedios mensuales del modelo acoplado e imágenes satelitales y una correlación baja en la región III. Las concentraciones simuladas son similares a las reportadas por Xue *et al.* (2013b), Gomez *et al.* (2018) y Damien *et al.* (2018).

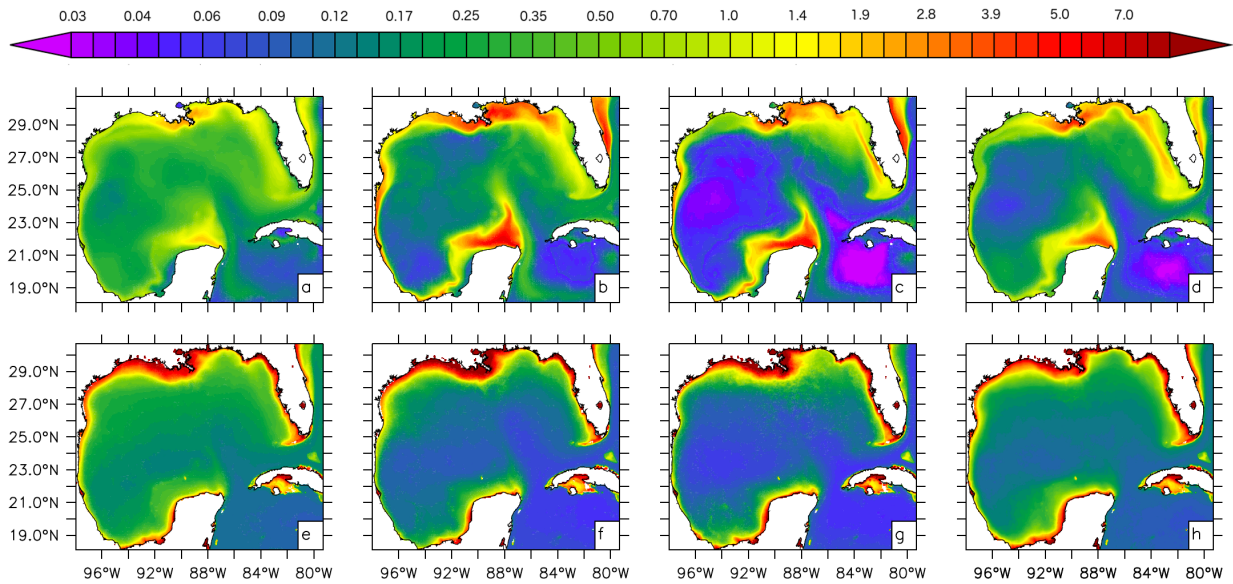


Figura 12. Climatología estacional (columnas 1-4, Invierno [1] - otoño [4]) de la concentración superficial de clorofila producto del modelo acoplado (fila superior, a-d) y de promedios mensuales de imágenes satelitales producto de MODIS (fila inferior, e-h). Escala en mg m^{-3} .

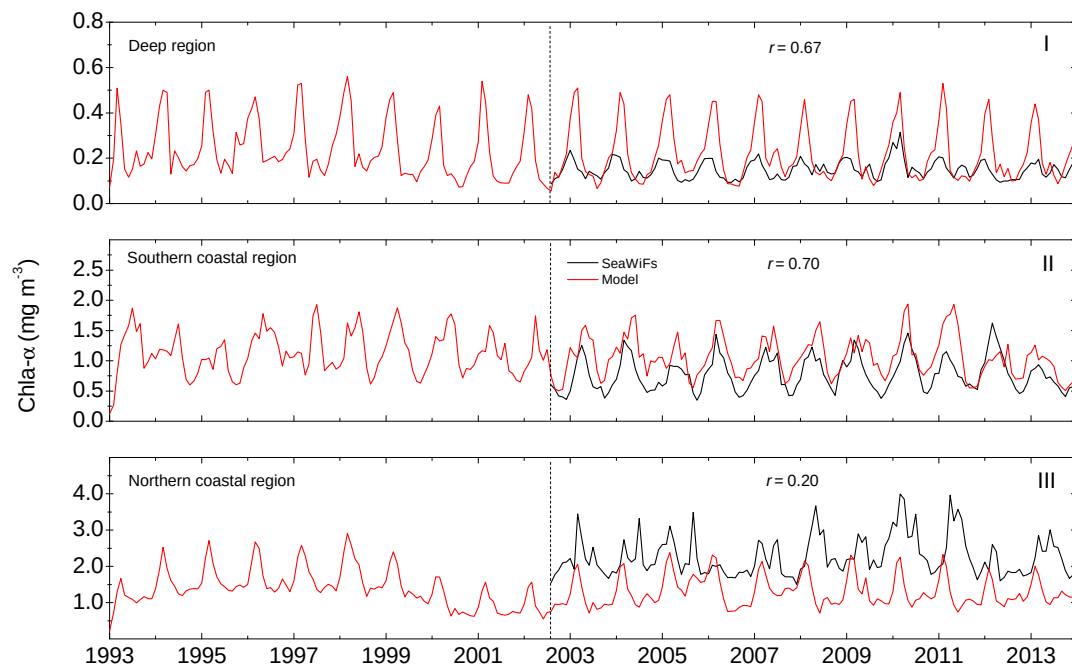


Figura 13. Concentración mensual de clorofila superficial, observada (línea negra) y simulada (línea roja). Se muestran los promedios de las tres regiones delimitadas en la Figura 1.

Los valores obtenidos a partir de las simulaciones son consistentes con trabajos previos de modelos acoplados [Fennel *et al.* (2011), Xue *et al.* (2013b), Gomez *et al.* (2018), Damien *et al.* (2018)], así como con datos observados [Hidalgo-González y

Alvarez-Borrego (2008), Pasqueron de Fommervault *et al.* (2017)]. Con valores promedio de 0.02 a 0.6 mg m⁻³ en la región profunda y una alta concentración de clorofila en el delta del Mississippi con valores de hasta 10 mg m⁻³, lo cual el modelo reprodujo sobre todo para los meses de primavera (Figura 12).

3.3.2. Distribución vertical de clorofila

Con el propósito de evaluar el desempeño del modelo para reproducir de forma correcta la distribución vertical de clorofila- α , se llevó a cabo un muestreo diario en el punto P1 (Figura 8) de los 0 a los 250 m de profundidad durante los 21 años de simulación.

En invierno se observó una distribución vertical uniforme de concentración de clorofila- α desde la superficie hasta la profundidad de la capa de mezcla, la cual se definió como la profundidad donde la diferencia de densidad desde la profundidad de referencia, en este caso 10 m, alcanza los 0.03 kg m⁻³. Mientras que en verano el máximo subsuperficial se ubicó entre los 40 y 90 m de profundidad promedio con concentraciones máximas de ~0.6 mg m⁻³ (Figura 14), ambos resultados coherentes con los datos observados por Pasqueron de Fommervault *et al.* (2017) a partir de perfiladores APEX y simulados por Damien *et al.* (2018) utilizando un modelo acoplado distinto al usado en el presente estudio.

En el perfil vertical de concentración de clorofila fue posible ubicar el paso de remolinos anticiclónicos desprendidos de la corriente de Lazo, los más evidentes fueron los ocurridos en los años 1995 a 1999, 2000 a 2002, 2004 a 2008, 2010 y 2013. En las simulaciones dos tipos de remolinos fueron localizados, el primero de ellos carente de nutrientes por la profundización de las isopícnas y la poca erosión en la capa superficial de la nutriclina lo que resulta en poca respuesta del fitoplancton que se encuentra en la capa eufótica. En el otro caso como se observa en los años 1998 y 1999, existe respuesta del fitoplancton dentro del remolino y no solo en los bordes donde las isopícnas son más someras, y en consecuencia, ocurre fertilización del fitoplancton al alcanzar la capa eufótica.

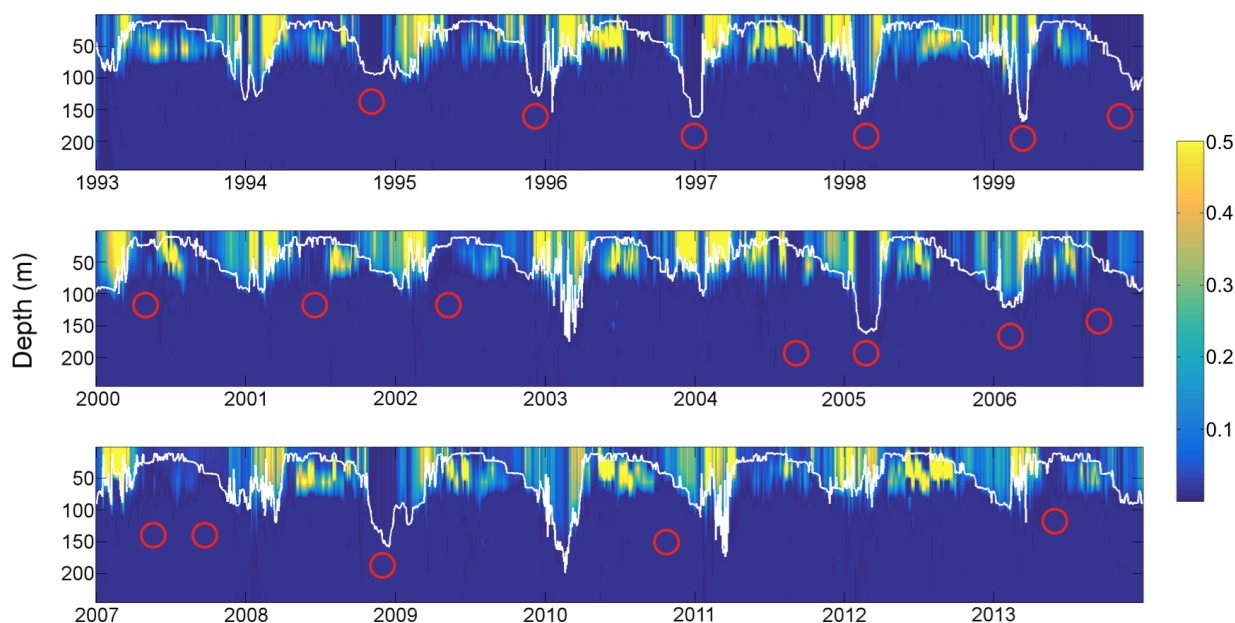


Figura 14. Concentración diaria de clorofila en la columna de agua, muestreada en el punto P1 (fig. 8) en mg m^{-3} . La profundidad de la capa de mezcla, representada por la línea blanca, se calculó como la profundidad donde la diferencia de densidad desde la profundidad de referencia, en este caso 10 m, alcanza los 0.03 kg m^{-3} . Los círculos rojos muestran el paso de remolinos anticiclónicos por el punto P1 durante el periodo de simulación.

3.3.3. Producción primaria

Se calculó la producción primaria diaria para todo el golfo integrando la biomasa de fitoplancton entre los 0 y 350 m de profundidad, posteriormente se delimitó la región costera de la región profunda utilizando la isobata de 200 m (Figura 8). Para ambas regiones se hicieron promedios espaciales diarios en las cuales se observaron: medias de $0.80 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ($292 \text{ g C m}^{-2}\text{año}^{-1}$) y $0.39 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ($142 \text{ g C m}^{-2}\text{año}^{-1}$), máximos de 1.46 (1.01) $\text{g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y mínimos de 0.43 (0.16) $\text{g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para las región costera y profunda, respectivamente. Esto es consistente con Heileman y Rabalais (2009) quien reporta valores dentro del rango de $150\text{-}300 \text{ g C m}^{-2}\text{año}^{-1}$ tomando en cuenta la producción en la costa y con el rango de $0.2 - 0.8 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$. para la zona profunda reportado por Muller-Karger *et al.* (2015),. Comparando los resultados con el trabajo de modelado de Gomez *et al.* (2018) el cual obtuvo un rango intercuantil de producción del modelo de $0.13\text{-}0.23 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$, mientras que los datos observados reportados por Biggs (1992) y para la misma zona están en el orden de $\sim 0.23\text{-}0.45 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ lo cual es consistente con los valores arrojados que para el presente estudio en el que el rango calculado es de $0.25\text{-}0.43 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$.

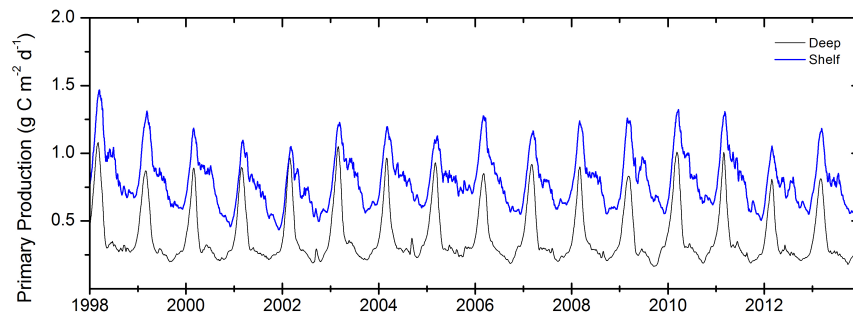


Figura 15. Producción primaria diaria calculada en toda la vertical para la región de la plataforma continental, delimitada desde la isobata de 200 m hacia la costa, y la región profunda, isobata de 200 m hacia el centro del golfo.

3.3.4. Promedios en TAVE y BOC

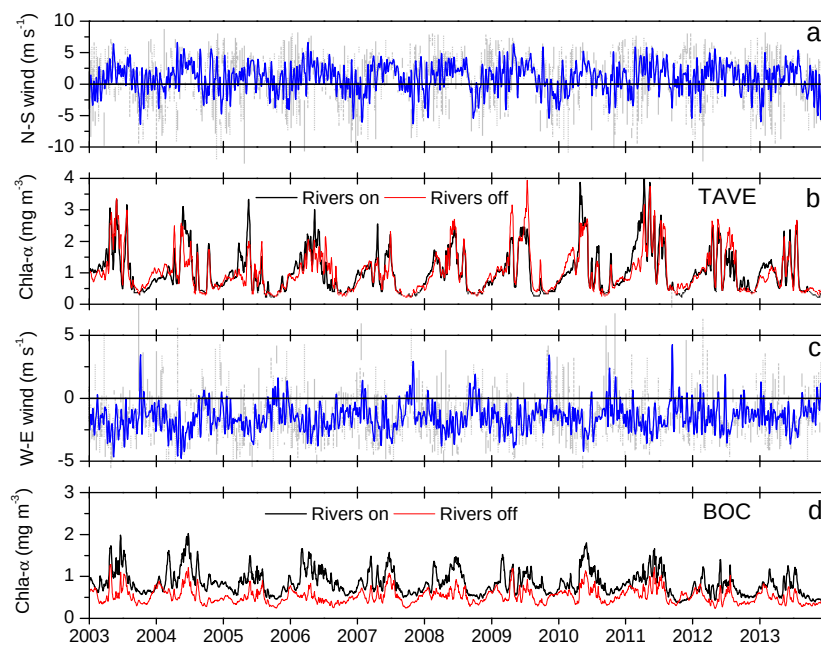


Figura 16. El panel a(c) muestra la componente zonal(meridional) del viento diario promediado en la región TAVE(BOC) correspondiente al dominio b(c) de la Figura 1. La línea gris representa el promedio diario y la línea azul muestra la señal filtrada en el periodo de corte semanal. En el panel a(c) valores positivos(negativos) indican viento favorable a surgencias. En el panel b(c) se muestran promedios espaciales de concentración diaria de clorofila superficial de dos corridas del modelo.

Con el propósito de llevar a cabo un análisis mas a detalle en las zonas donde se integraron los nuevos datos de ríos mexicanos, se realizaron promedios diarios de clorofila superficial, vientos y flujos de nutrientes diarios en las áreas correspondientes a las plataformas continentales de Tamaulipas-Veracruz (TAVE, Figura 8, a) y de la Bahía de Campeche (BOC, Figura 8, b).

Se calcularon los promedios diarios de clorofila superficial en ambas regiones con dos configuraciones del modelo acoplado: una con los ríos implementados y otra sin ellos (Figura 16, b y d), en las cuales fue posible observar una mayor diferencia entre ambas configuraciones en la región BOC, esta diferencia esta asociada al volumen que entra a través de los ríos Grijalva y Usumacinta los cuales presentan los mayores caudales en el sur del golfo, con flujos de medios del sistema Grijalva-Usumacinta de $\sim 3600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y picos máximos de hasta $10000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Por otra parte, se calcularon los promedios espaciales de vientos diarios tomando en cuenta la componente que es favorable a surgencias para cada región, componente meridional (N-S) para TAVE (Figura 16, a) y la componente zonal (W-E) para BOC (Figura 16, b). Finalmente se calculó la señal de nitrato que llega a las áreas correspondientes a través de todos los ríos locales en el caso de TAVE y del sistema Grijalva-Usumacinta en BOC.

3.3.5. Coherencia entre clorofila y vientos

Con el objetivo de entender de mejor manera las escalas temporales en las que ocurren los distintos procesos en TAVE y BOC así como los mecanismos asociados a estos, se calculó la coherencia entre clorofila superficial-viento y clorofila-flujo de nitrato proveniente de tierra (ríos). Para llevarlo a cabo se utilizó la relación:

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f)G_y(f)} \quad (10)$$

Donde $G_x(f)$ y $G_y(f)$ son las funciones de densidad espectral de potencia de $x(t)$ y $y(t)$, respectivamente; $G_{xy}(f)$ es la función de densidad espectral cruzada entre $x(t)$ y $y(t)$. Los valores de coherencia siempre deberán satisfacer $0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1$. Debido a que la salida del sistema, en este caso concentración superficial de clorofila- α , es el resultado de una combinación de entradas al mismo, se obtuvieron valores menores que uno pero cercanos a la unidad cuando estos se encontraban mayormente correlacionados en frecuencia.

Las señales dominantes en ambas regiones TAVE y BOC son las anuales tanto en la coherencia entre clorofila-viento ($\gamma_{TAVE}^2 = 0.95$, $\gamma_{BOC}^2 = 0.9$) y clorofila-flujo de nitrato

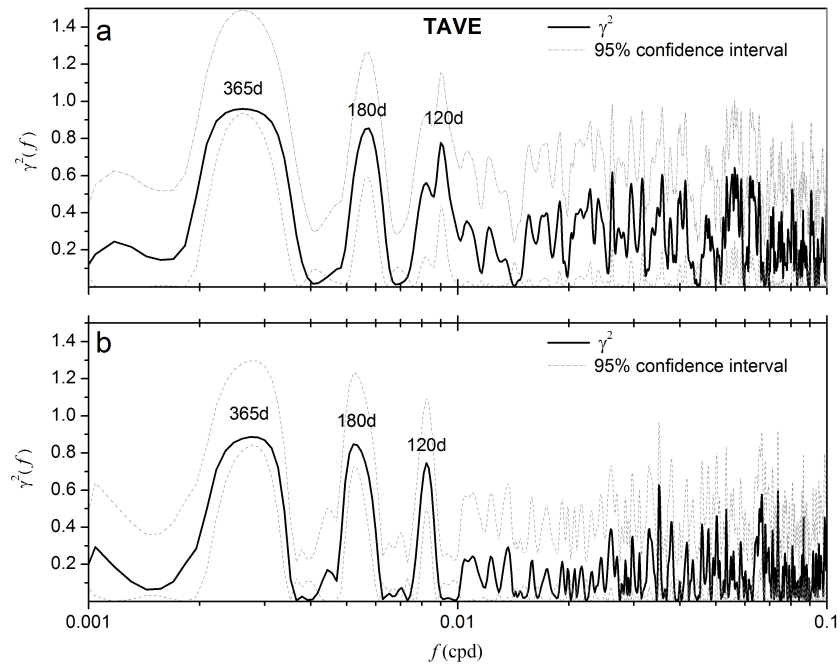


Figura 17. Coherencia entre los promedios espaciales diarios de concentración clorofila y viento favorable para surgencias (a), y concentración de clorofila y flujo de nitrato de los ríos locales (b) en la región TAVE.

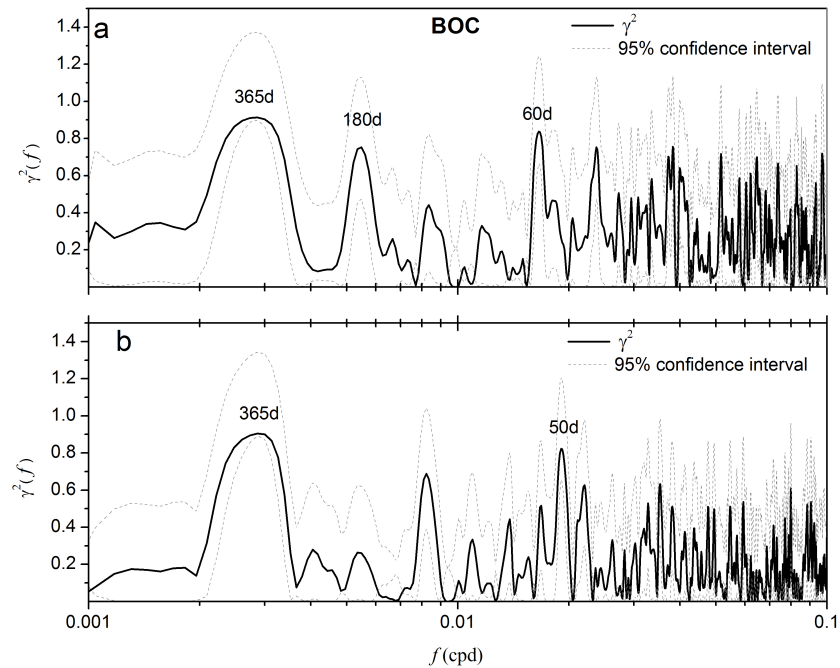


Figura 18. Coherencia entre los promedios espaciales diarios de concentración clorofila y viento favorable para surgencias (a), y concentración de clorofila y flujo de nitrato de los ríos locales (b) en la región BOC.

($\gamma_{TAVE}^2 = 0.9$, $\gamma_{BOC}^2 = 0.92$). En TAVE se observó un segundo pico importante ($\gamma_{TAVE}^2 > 0.8$) en el periodo correspondiente a los 180 días, para ambos, clorofila-viento y clorofila-flujo de nitrato. En BOC este segundo pico de relevancia ($\gamma_{BOC}^2 > 0.8$) solo se observó en el periodo correspondiente a los 180 días para clorofila-viento. A partir del cálculo de coherencia se puede identificar el dominio del ciclo anual del viento en la dinámica de las regiones analizadas, asociado al flujo anual de vientos provenientes del sur (suradas y que son propensos a surgencias), esto contrasta con lo observado en la región profunda en donde el ciclo anual de la respuesta de clorofila superficial esta asociada a la intensa mezcla vertical producto de los frentes fríos en los meses de invierno principalmente. Un segundo pico de correlación se observa a los 180 días de periodo, el cual puede estar asociado a la presencia de suradas extraordinarias durante los meses fríos (octubre-marzo) y que propician una respuesta en la concentración de clorofila superficial debido al favorecimiento de surgencias por consecuencia del transporte de Ekman.

3.3.6. Funciones empíricas ortogonales en TAVE y BOC

A partir de los datos de concentración superficial diaria de clorofila- α obtenidos del modelo en las zonas TAVE (Fig. 8, a) y BOC (Fig. 8, b) se calcularon los tres primeros modos de las funciones empíricas ortogonales para el periodo 1998-2013. Con el propósito de comparar los resultados del modelo con las observaciones disponibles lo mismo se realizó con imágenes satelitales mensuales producto del sensor MODIS para el periodo 2003 a 2013. Para facilitar la comparación entre datos observados y simulados, con la salidas diarias del modelo se calcularon promedios mensuales, a partir de los cuales se calcularon las anomalías mensuales de concentración de clorofila utilizadas para el cálculo de las FEOs y sus correspondientes componentes principales. Con el propósito de identificar y asociar los picos de variabilidad en las componentes principales de ambas regiones con procesos hidrológicos, se calcularon las anomalías del caudal mensual de los ríos mexicanos en las regiones TAVE y BOC, así como la anomalía del río Mississippi para la región TAVE. Todas ellas se calcularon restando el año climatológico a los datos mensuales de caudal. Ambas componentes principales se normalizaron dividiendo cada uno de los datos entre el valor absoluto del máximo de cada una de ellas. Con el propósito de identificar mas a detalle los picos

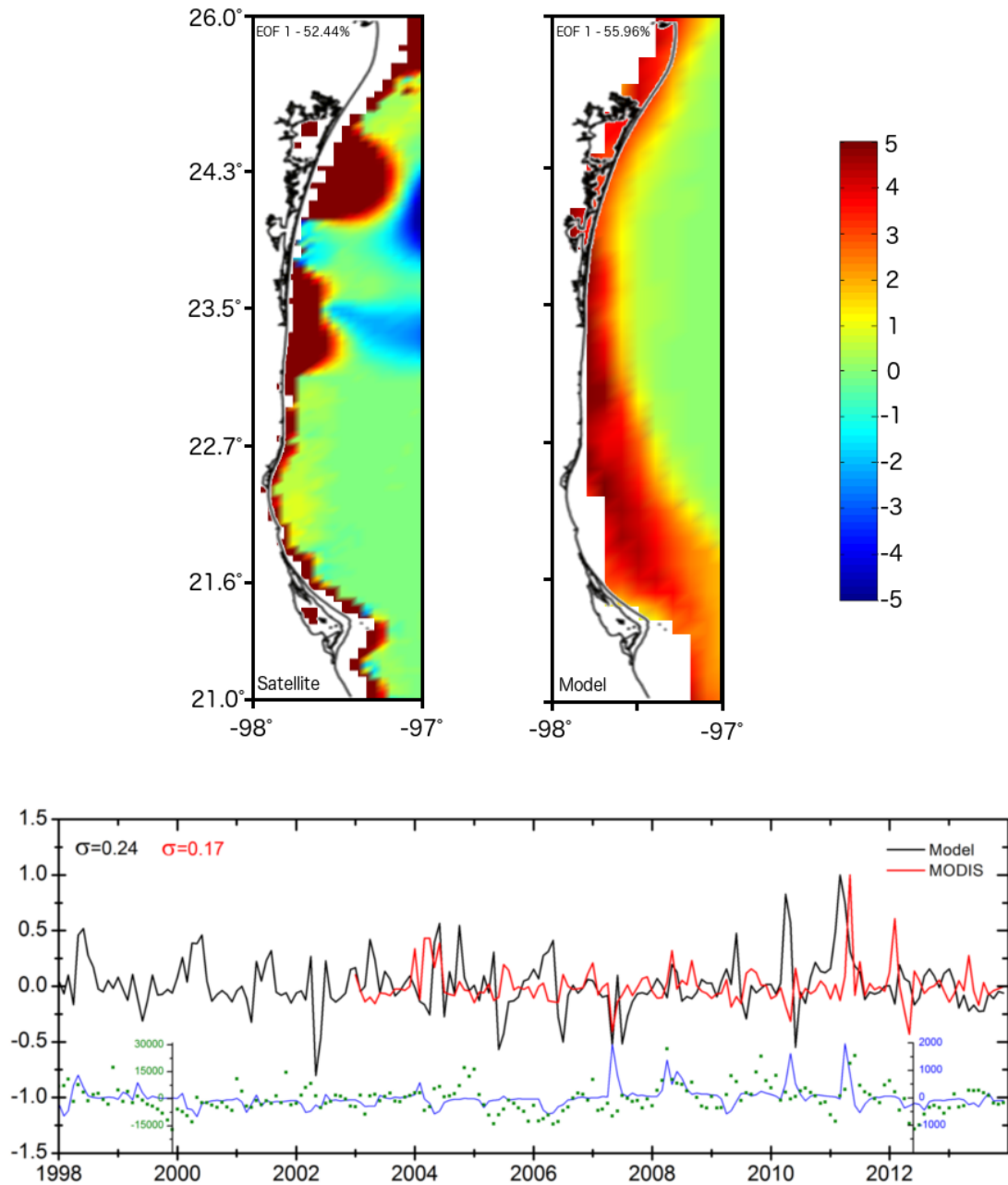


Figura 19. Panel superior - FEO 1 calculada en la región TAVE a partir de las salidas del modelo (derecha) y de productos mensuales de imágenes satelitales (izquierda). Panel inferior - Componente principal correspondientes al modo 1 para las salidas del modelo y datos observados. En el panel inferior de las CPs en azul se muestra la anomalía de caudal neto correspondiente a todos mexicanos que desembocan en TAVE, los puntos verdes representan la anomalía de caudal mensual de río Mississippi, todos en m^3s^{-1} .

asociados al caudal extraordinario tanto en ríos locales como en Mississippi, se calculó la componente principal de las regiones TAVE y BOC, a partir del modelo acoplado sin el forzamiento de ríos activo. Es decir, el único aporte disponible de nutrientes en esta configuración del modelo proviene del reservorio disponible en la cuenca del Golfo

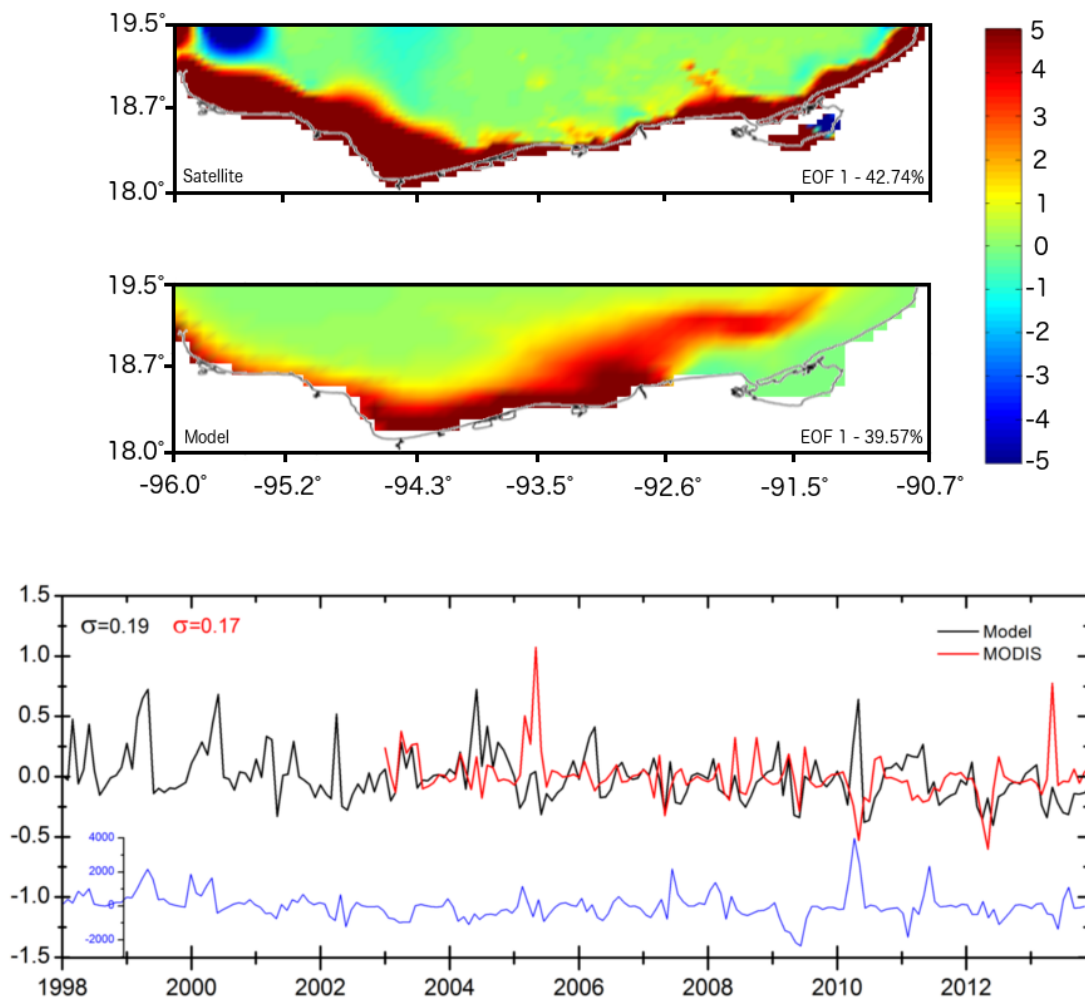


Figura 20. Panel superior - FEO 1 calculada en la región BOC a partir de las salidas del modelo (derecha) y de productos mensuales de imágenes satelitales (izquierda). Panel inferior - Componente principal correspondiente al modo 1 para las salidas del modelo y datos observados. En el panel inferior de las CPs en azul se muestra la anomalía del caudal mensual correspondiente al sistema Grijalva-Usumacinta en m^3s^{-1} .

de México. Comparando las componentes principales, resulta evidente que los picos de variabilidad que se mantienen en el modelo con los ríos activos son los que están directamente asociados con el aporte de caudales de los mismos (Figura 21).

En el caso de TAVE el primer modo arrojó el 56 y el 52 % de la varianza explicada para los datos simulados y observados. De acuerdo a lo observado en la primera componente, este primer modo esta asociado principalmente a dos factores: el efecto de los ríos y a lo que pudiesen ser variaciones importantes en la concentración superficial de clorofila asociadas a eventos atmosféricos, esto es: frentes fríos (nortes) y vientos

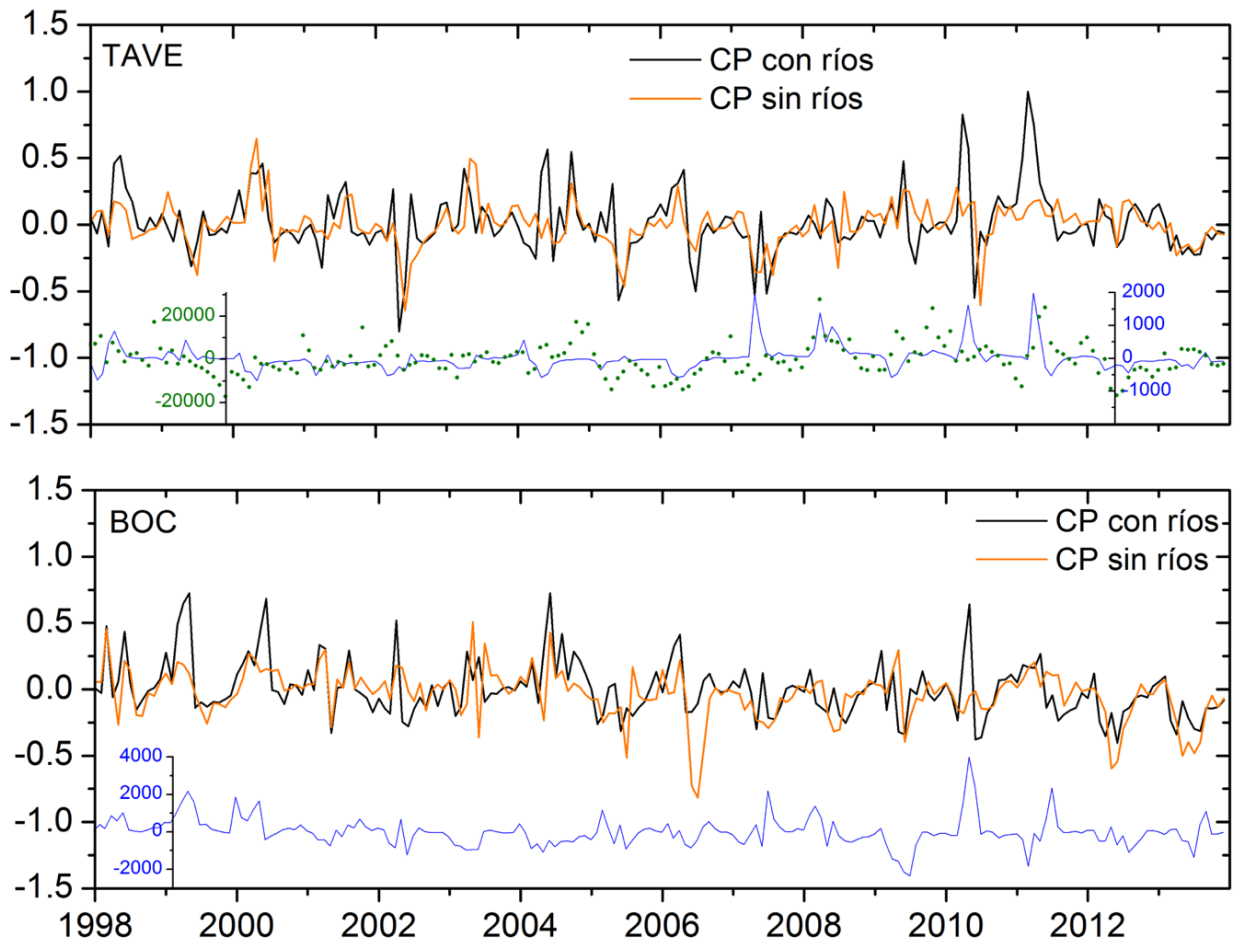


Figura 21. Panel superior - Componente principal de las dos configuraciones del modelo acoplado: con y sin ríos para la región TAVE, en línea azul y puntos verdes se muestra las anomalía de los caudales mensuales correspondiente a los ríos locales y Mississpppi, respectivamente. Ambos en m^3s^{-1} . Panel inferior - Componente principal de las dos configuraciones del modelo acoplado: con y sin ríos para la región BOC, en azul se muestra la anomalía del caudal mensual correspondiente al sistema Grijalva-Usumacinta en m^3s^{-1} .

extraordinarios de sur a norte (suradas, propensos a surgencias), ver Figura 22.

Los picos de variabilidad extraordinaria asociados a eventos extraordinarios de caudales de ríos locales y del río Mississippi se pudieron observar en los años 1998 (solo modelo), 2008 (modelo y observaciones) y 2011 (modelo y observaciones). En cuanto a picos de variabilidad asociados a caudales extraordinarios solo de los ríos locales se ubicaron en los años 2007 (modelo) y 2010 (modelo y observaciones).

Finalmente, picos asociados a flujos extraordinarios en el caudal solo del río Mississippi en los años 2004 (modelo), 2009 (modelo y observaciones), 2012 (modelo y observaciones) y 2013 (observaciones).

En cuanto a los picos de variabilidad extraordinaria asociados a las suradas, estos se observaron en los años 2000, 2001, 2003, 2004 y 2006 en el modelo y 2004 en la componente principal de los datos de satélite. En contraste, picos negativos de variabilidad extraordinaria en la componente principal del modelo se observaron en los años 2002, 2005, 2006 y 2007. Estos picos anómalos pudiesen ser producto de frentes fríos atípicos presentes en los meses de abril - mayo. Mientras que en las observaciones estos picos se observaron en los años 2007 y 2012.

Para BOC (Figura 23), al igual que en TAVE, se observa una respuesta al ciclo anual del caudal de los ríos relevantes de la región, en este caso el sistema Grijalva-Usumacinta, a variaciones en la intensidad y dirección del viento así como huracanes. El primer modo correspondiente a la respuesta de la clorofila en superficie al efecto de los ríos representa el 40 % y el 43 % de la varianza explicada para los datos modelados y observados, respectivamente. Dichos picos asociados a un evento de caudal extraordinario del sistema Grijalva-Usumacinta se pudo observar en los años 1998, 1999, 2000, 2002 y 2010 en el modelo . Mientras que 2005 y 2013 se pudieron observar en modelo y observaciones, ambos asociados al paso de los huracanes Bret (junio 2005) y Barry (junio 2013), respectivamente.

3.3.7. Dinámica de producción primaria

A continuación se lleva a cabo una descripción de los procesos físicos que están asociados y tienen repercusión en la dinámica de producción primaria en las regiones analizadas del Golfo de México: región profunda, y las plataformas Tamaulipas-Veracruz y Bahía de Campeche.

3.3.7.1. En la región profunda del Golfo

Dominada por el ciclo anual del viento, que pudiese considerarse como una región con concentraciones prácticamente homogéneas con valores que van de 0.02 a 0.6 mg m^{-3} en verano e invierno, respectivamente. En cuanto a la distribución vertical, es posible encontrar un máximo quasi homogéneo (desde la profundidad de la capa de mezcla hasta superficie) en invierno, un máximo subsuperficial en verano. Esta distribución vertical de concentración de clorofila es influenciada por la penetración de

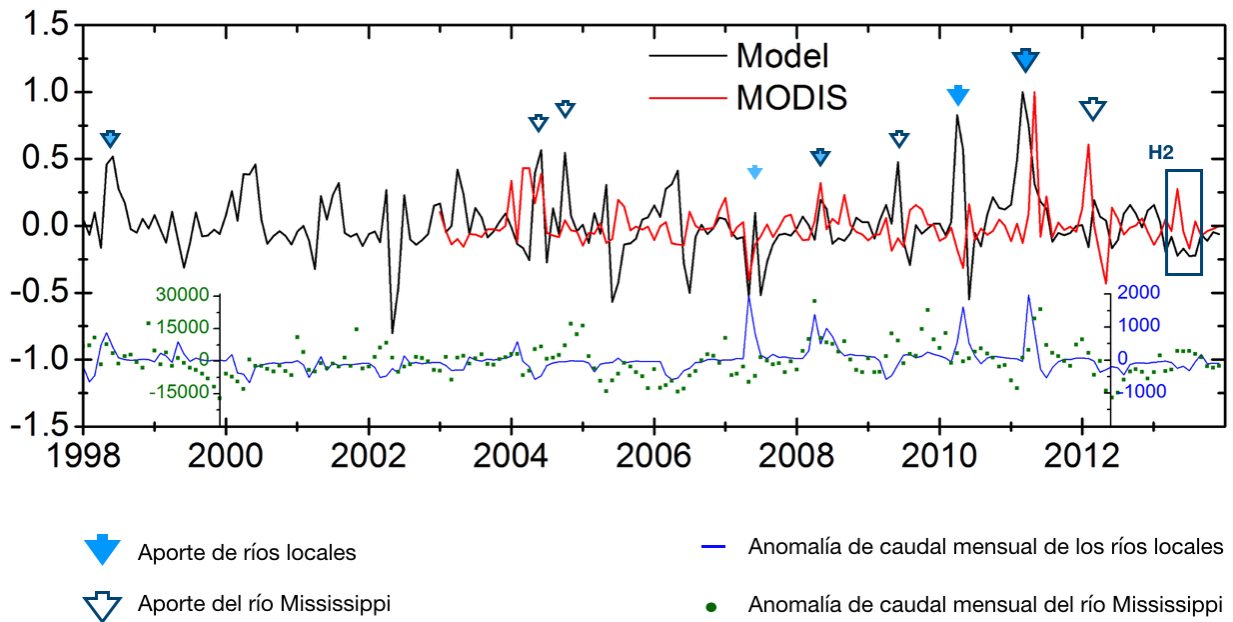


Figura 22. Componente principal de la anomalía de los promedios mensuales de concentración de clorofila superficial en la región TAVE, a partir del modelo (línea negra) y producto satelital del sensor MODIS (línea roja). Lo símbolos en los picos de variabilidad, representan los procesos físicos asociados a cada uno de ellos.

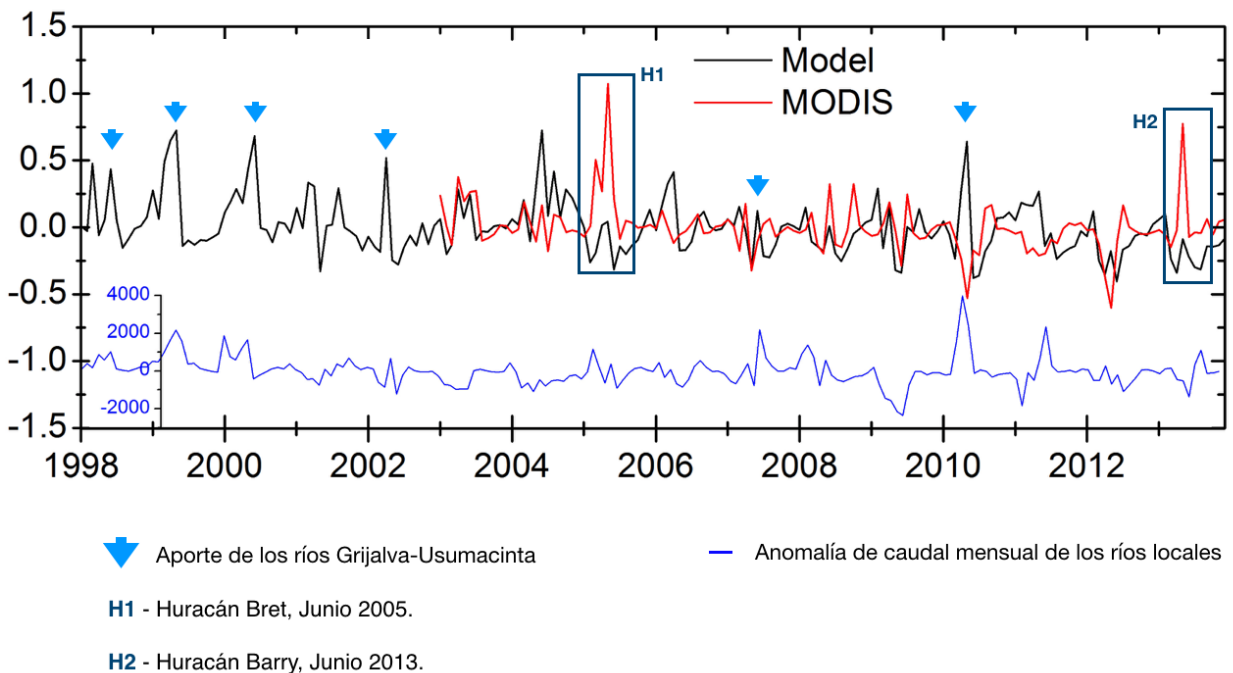


Figura 23. Componente principal de la anomalía de los promedios mensuales de concentración de clorofila superficial en la región BOC, a partir del modelo (línea negra) y producto satelital del sensor MODIS (línea roja). Lo símbolos en los picos de variabilidad, representan los procesos físicos asociados a cada uno de ellos.

la corriente de Lazo, los remolinos anticiclónicos que se desprenden de ella así como remolinos ciclónicos en la región de la Bahía de Campeche.

3.3.7.2. En la región TAVE

En primavera-verano, se observó una mayor concentración de clorofila en la costa debido a dos factores principales: viento de sur a norte lo que propicia surgencias debido al transporte de Ekman durante estos meses y aporte de nutrientes de los ríos locales cuando estos se encuentran en el régimen máximo de descarga. En otoño-invierno, hay una menor concentración en la región centro sur debido a la disminución en el caudal de los ríos locales y a la inversión de la dirección del viento (norte a sur) por lo que no hay mas surgencias. En la región norte de TAVE aún se presentan concentraciones que van de moderadas a altas debido a la llegada de agua del río Mississippi que es advectada desde la plataforma Lousiana-Texas durante los meses correspondientes a otoño e invierno. Finalmente, en la parte profunda (isobata > 200 m) es durante estos meses que el máximo de clorofila se puede observar en la superficie. En cuanto a la variabilidad extraordinaria de la concentración de clorofila en superficie en TAVE, está dada por tres factores principales: La variabilidad atmosférica, en este caso la inversión en el sentido del viento, caudales extraordinarios de los ríos locales y caudales extraordinarios de los ríos Mississippi y Atchafalaya.

3.3.7.3. En la región BOC

En primavera-verano, mayor concentración en la costa debido a que los vientos son favorables a producir surgencias producto del transporte de Ekman, y a los nutrientes que ingresan al sistema en verano por los ríos caudalosos principalmente el sistema Grijalva-Usumacinta. En otoño-invierno, surgencia que va de moderada a inexistente debido a la disminución en la intensidad de la magnitud del viento favorable a la misma e intensificación en la componente meridional del viento por consecuencia de los frentes fríos en esta época del año. Así mismo, en estos meses es cuando el caudal de los ríos de la región se encuentra en los niveles mínimos disminuyendo el aporte de nutrientes provenientes de tierra. En BOC la variabilidad extraordinaria de concentración superficial de clorofila es dominada por, al igual que en TAVE, diferencias en

dirección y magnitud del viento, caudal extraordinario en los ríos locales, principalmente el sistema Grijalva-Usumacinta y finalmente altas precipitaciones, y por ende caudales extraordinarios, asociados al paso de huracanes.

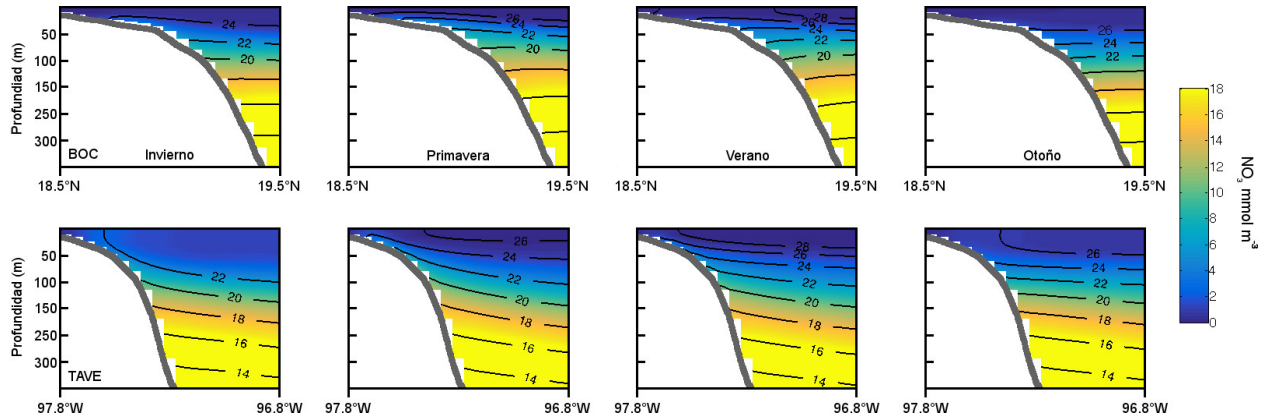


Figura 24. Climatología estacional (columnas 1-4, Invierno [1] - otoño [4]) de la concentración de nitrato en los primeros 300 m de profundidad en las secciones transversales a la plataforma BOC y TAVE, respectivamente. Sobrepuestas en línea negra se muestran las isotermas para las mismas escalas temporales y espaciales.

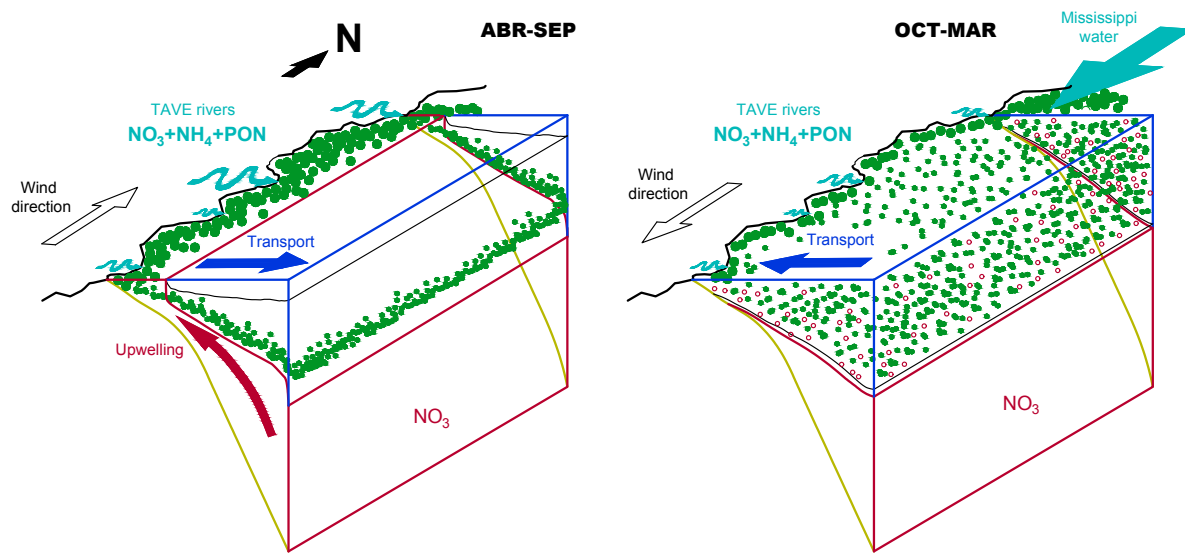


Figura 25. Dinámica de la producción primaria correspondiente a primavera y verano (derecha) y otoño e invierno (izquierda) en la plataforma TAVE. Los puntos verdes representan la concentración de clorofila, los círculos rojos representan la erosión del reservorio de nitrato debido a la profundización de la capa de mezcla representada por la línea negra delgada.

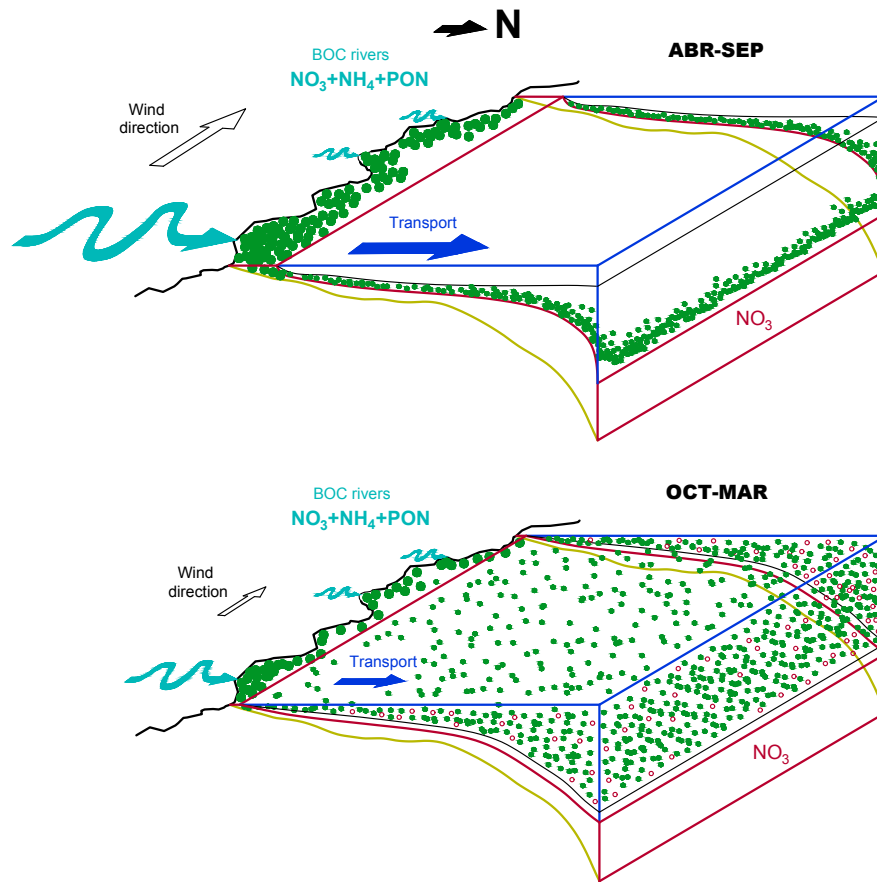


Figura 26. Dinámica de la producción primaria correspondiente a primavera y verano (arriba) y otoño e invierno (abajo) en la plataforma BOC. Los puntos verdes representan la concentración de clorofila, los círculos rojos representan la erosión del reservorio de nitrato debido a la profundización de la capa de mezcla representada por la línea negra delgada.

Capítulo 4. Discusión y conclusiones

4.1. Discusión

El presente trabajo arrojó resultados de relevancia que servirán a futuros estudios oceanográficos e hidrológicos en la región del Golfo de México. También sienta la base para llevar a cabo análisis biogeoquímicos en otras regiones de México donde no existan datos suficientes de caudales y nutrientes provenientes de tierra. Para expresar de mejor manera estas ideas, la discusión del mismo, se realiza dividiendo los dos partes que componen el presente estudio.

4.1.1. Simulación de caudales y nutrientes

El modelo hidrológico arrojó resultados satisfactorios en las cuencas analizadas, lo anterior, a pesar de la dispersión entre los caudales observados y simulados en intervalos diarios en las cuencas, Usumacinta, Coatzacoalcos y papaloapan. La mayor diferencia entre los datos simulados y observados se encontró en la cuenca Grijalva, dicha diferencia se atribuyó a la incapacidad del modelo para reproducir grandes presas a pesar de la disponibilidad de datos detallados de operación de las mismas. Esto último, también fue evidente para la cuenca Papaloapan, cuenca en la cual se encuentra la presa Miguel Alemán. La discrepancia entre los datos diarios, presente en los resultados de caudal del río Pánuco, podría ser asociada a la extensión de la cuenca y a las grandes diferencias entre los tipos y uso de suelo presente en la misma. El resultado de esta parte del estudio indicó que, en estudios previos y debido a la ausencia de información disponible, se habían subestimado los caudales totales que llegan al Golfo de México, esta situación fue mas evidente en la cuenca del río Grijalva. Anteriormente, los datos de descarga total de ríos habían sido obtenidos a partir de climatologías mensuales o de estaciones hidrométricas en las partes altas de las cuencas y no en las desembocaduras de los ríos, donde el flujo total debía ser determinado. Es también en la región de las desembocaduras de las cuencas donde tres importantes procesos de interacción océano-continente ocurre: dispersión de contaminantes y nutrientes, estos últimos cruciales para la producción primaria; transporte de sedimento que modifica la morfología costera y a formación de frentes e inestabilidades producto de los gradientes de salinidad y temperatura. Aunque el estudio de las cuencas analizadas en

el presente trabajo es preliminar, provee una base sólida para la mejora de estudios tanto hidrológicos como oceanográficos.

4.1.2. Modelo acoplado del Golfo de México

Región Profunda

El ciclo anual en la región profunda del Golfo de México analizado en el presente trabajo, tal como se menciona en la sección 3.3.1, es consistente con los datos reportados por Fennel *et al.* (2011), Xue *et al.* (2013b), y recientemente por ?) y Damien *et al.* (2018)] en simulaciones y por Hidalgo-González y Alvarez-Borrego (2008) en un recuento histórico de valores obtenidos a partir de cruceros y por Pasqueron de Fommervault *et al.* (2017) en observaciones en la superficie y en la columna de agua a partir de perfiladores. Este ciclo anual al parecer es estable y consistente en todos los años de simulación y responde en gran parte a la intensa mezcla vertical propiciada por los vientos asociados a frentes fríos que ocurren durante los meses fríos (octubre-marzo); a procesos de mesoescala, principalmente asociados a la corriente de Lazo y a los remolinos que se desprenden de la misma y advectan filamentos de aguas ricas en clorofila a las partes centrales de la cuenca del Golfo de México.

En cuanto a la distribución vertical de clorofila, el modelo fue capaz de reproducir de manera coherente las concentraciones, profundidad y periodos de migración del máximo subsuperficial en el punto analizado. Lo anterior, comparado con los resultados de Pasqueron de Fommervault *et al.* (2017) y Damien *et al.* (2018), es consistente y refleja el comportamiento estable del proceso de producción primaria en esta región del golfo.

La mayor discrepancia entre los datos observados y simulados se presentaron en la zona norte de la plataforma de Yucatán, tal discrepancia pudiese ser producto de la configuración del modelo físico y de las características propias de la región. Es decir, una región somera de gran extensión representada por pocas capas siguiendo la topografía, en las cuales en la última capa esta activa la frontera de fondo propiciando grandes aportes de amonio y por ende llegando este aporte hasta la capa superficial en el modelo.

Región TAVE

En esta región el modelo representó de manera consistente con lo observado en imágenes satelitales de concentración superficial de clorofila. En las simulaciones se pudo observar el ciclo anual de producción primaria, bajas concentraciones en la zona costera durante los meses fríos (octubre-marzo) y altas concentraciones en los meses cálidos (abril-septiembre). Así mismo fue posible observar eventos o años anómalos con una concentración extraordinaria de clorofila superficial, ésto tanto en el modelo como las observaciones y con picos de variabilidad consistentes entre ambos. Estos eventos fueron asociados a eventos extraordinarios de caudal tanto en los ríos locales como en el río Mississippi y Atchafalaya. En los años en los que se observan picos de variabilidad que no responden a caudales extraordinarios, estos pudiesen estar asociados a eventos anómalos (o fuera de temporada) en la dirección y magnitud del viento, es decir, *suradas* que propician surgencias durante los meses fríos (en el caso de los picos de variabilidad positiva) y *nortes* en la temporada cálida asociados a los picos de variabilidad negativos.

Región BOC

Al igual que en TAVE el mismo comportamiento del ciclo anual pudo ser observado en BOC: altas concentraciones en los meses cálidos (abril-septiembre) y bajas concentraciones en los meses fríos (octubre-marzo). Es importante mencionar que una menor diferencia en la concentración superficial de clorofila entre estas dos épocas pudo ser observada. Lo anterior se asocia a la diferencia entre caudales de los ríos locales de TAVE y BOC, en donde el sistema Grijalva-Usumacinta mantiene un flujo mínimo que contrasta con el de los ríos locales en TAVE, lo que propicia un aporte considerable de nutrientes provenientes de tierra hacia BOC también durante los meses de invierno.

4.2. Conclusiones

- El caudal de los ríos obtenido a partir de la base de datos BANDAS o climatológicas mensuales, subestima el caudal real en la desembocadura de los mismos, principalmente en el sistema Grijalva-Usumacinta.
- En la región profunda del golfo (iso >200 m) la concentración y distribución, tanto superficial como en la vertical de clorofila, esta dominada principalmente por el

ciclo anual del viento (asociado a frentes fríos).

- En TAVE y BOC, la concentración de clorofila esta dominada por el ciclo anual del viento (norte a sur), y nutrientes aportados por ríos locales, así como aportes provenientes del Mississippi en el caso de TAVE.
- En TAVE y BOC los picos de variabilidad están asociados a eventos de: caudales extraordinarios en los ríos locales (en TAVE y BOC) y Mississippi (en TAVE) y frentes fríos extraordinarios (abril y mayo), principalmente en TAVE.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, las diferencias en concentraciones de clorofila entre TAVE y BOC están asociadas a tres factores principales: las diferencias en la magnitud del viento, la topografía de cada región y las diferencias en la cantidad de nutrientes que aportan los ríos.

Literatura citada

- Abbaspour, K., Johnson, C., y Van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, **3**(4): 1340–1352.
- Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., y Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale swat model. *Journal of Hydrology*, **524**: 733–752.
- Abbaspour, K. C. (2011). Swat-cup4: Swat calibration and uncertainty programs—a user manual. *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag*.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., y Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine thur watershed using swat. *Journal of hydrology*, **333**(2): 413–430.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., y Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part i: Model development1.
- Biggs, D. C. (1992). Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the western gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **97**(C2): 2143–2154.
- Boyer, T. P., Antonov, J. I., Baranova, O. K., Coleman, C., Garcia, H. E., Grodsky, A., Johnson, D. R., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., O'Brien, T. D., et al. (2013). World ocean database 2013.
- Broxton, P. D., Zeng, X., Sulla-Menashe, D., y Troch, P. A. (2014). A global land cover climatology using modis data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **53**(6): 1593–1605.
- Comrie, A. C. y Glenn, E. C. (1998). Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest united states and northern mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*, **10**(3): 201–215.
- CONAGUA (2017). Banco nacional de datos de aguas superficiales. *Gerencia de Aguas superficiales e Ingeniería de Ríos*.
- da Silva, A. M., Young, C. C., y Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994, vol. 4: Anomalies of fresh water fluxes. *NOAA Atlas, NESDIS*, **9**.
- Dai, A. (2016). Historical and future changes in streamflow and continental runoff: A review. *AGU Monograph entitled "Terrestrial Water Cycle and Climate Change: Natural and Human-induced Impacts"*.
- Damien, P., Pasqueron de Fommervault, O., Sheinbaum, J., Jouanno, J., Camacho-Ibar, V. F., y Duteil, O. (2018). Partitioning of the open waters of the gulf of mexico based on the seasonal and interannual variability of chlorophyll concentration. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **123**(4): 2592–2614.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., y Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, **49**: 1–21.
- Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic rings in the gulf of mexico. *Journal of Physical Oceanography*, **12**(11): 1292–1309.
- FAO (2003). The digital soil map of the world. *Land and Water Development Division, Rome*.

- Fennel, K., Wilkin, J., Levin, J., Moisan, J., O'Reilly, J., y Haidvogel, D. (2006). Nitrogen cycling in the middle atlantic bight: Results from a three-dimensional model and implications for the north atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochemical Cycles*, **20**(3).
- Fennel, K., Hetland, R., Feng, Y., y Dimarco, S. (2011). A coupled physical-biological model of the Northern Gulf of Mexico shelf: Model description, validation and analysis of phytoplankton variability. *Biogeosciences*, **8**(7): 1881–1899.
- Fuentes-Yaco, C., de León, D. A. S., Monreal-Gómez, M. A., y Vera-Herrera, F. (2001). Environmental forcing in a tropical estuarine ecosystem: the palizada river in the southern gulf of mexico. *Marine and Freshwater Research*, **52**(5): 735–744.
- García García, A. y Kauffer Michel, E. F. (2011). Las cuencas compartidas entre méxico, guatemala y belice: un acercamiento a su delimitación y problemática general. *Frontera norte*, **23**(45): 131–161.
- Gassman, P., Reyes, M., Green, C., y Arnold, J. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions invited review series. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **50**(4): 1211–1250.
- Gomez, F. A., Lee, S.-K., Liu, Y., Hernandez Jr, F. J., Muller-Karger, F. E., y Lamkin, J. T. (2018). Seasonal patterns in phytoplankton biomass across the northern and deep gulf of mexico: a numerical model study. *Biogeosciences*, **15**: 3567.
- González-Ramírez, J. y Parés-Sierra, A. (2019). Streamflow modeling of five major rivers that flow into the gulf of mexico using swat. *Atmósfera*, **32**(4): 261–272.
- González-Villareal, F. (2009). Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de pr esas del río grijalva ante los impactos del cambio climático. *Instituto Nacional de Ecología, México. DF*.
- Heileman, S. y Rabalais, N. (2009). Xv-50 gulf of mexico: Lme# 5. *The UNEP Large Marine Ecosystem Report. A perspective on the changing condition in LMEs of the world's Regional Seas. UNEP Regional Seas Report and Studies*, (182).
- Hidalgo-González, R. y Alvarez-Borrego, S. (2008). Water column structure and phytoplankton biomass profiles in the gulf of mexico. *Ciencias Marinas*, **34**(2): 197–212.
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V. M., Munguía-Orozco, L., y Meillón-Menchaca, O. (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río grijalva, chiapas, méxico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **63**(1): 15–38.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., Guevara, E., et al. (2008). Hole-filled srtm for the globe version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- Lellouche, J.-M., Le Galloudec, O., Greiner, E., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., Bourdallé-Badie, R., Bricaud, C., Drillet, Y., y Le Traon, P.-Y. (2013). The copernicus marine environment monitoring service global ocean 1/12 physical reanalysis glorys12v1: description and quality assessment. **20**: 19806.
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D. R., y Brekke, L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for mexico, the us, and southern canada 1950–2013. *Scientific data*, **2**.
- Martínez-López, B. y Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *J. Mar. Syst.*, **77**(1-2): 1–20.

- Martínez-López, B. y Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the gulf of mexico. *Journal of Marine Systems*, **77**(1): 1–20.
- Milliman, J. D. y Farnsworth, K. L. (2013). *River discharge to the coastal ocean: a global synthesis*. Cambridge University Press.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. Asabe*, **50**(3): 885–900.
- Muller-Karger, F. E., Smith, J. P., Werner, S., Chen, R., Roffer, M., Liu, Y., Muhling, B., Lindo-Atichati, D., Lamkin, J., Cerdeira-Estrada, S., et al. (2015). Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore gulf of mexico. *Progress in Oceanography*, **134**: 54–76.
- Ostos, E. J. (2004). Contrastes bioclimaticos entre el mar y la montana en la zona central del estado de veracruz (mexico). *El clima, entre el mar y la montaña*, **4**: 41.
- Pasqueron de Fommervault, O., Perez-Brunius, P., Damien, P., Camacho-Ibar, V. F., y Sheinbaum, J. (2017). Temporal variability of chlorophyll distribution in the gulf of mexico: bio-optical data from profiling floats. *Biogeosciences*, **14**(24): 5647–5662.
- Ponette-González, A. G., Weathers, K. C., y Curran, L. M. (2010). Water inputs across a tropical montane landscape in veracruz, mexico: synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology*, **16**(3): 946–963.
- Powell, T. M., Lewis, C. V., Curchitser, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J., y Dobbins, E. L. (2006). Results from a three-dimensional, nested biological-physical model of the california current system and comparisons with statistics from satellite imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **111**(C7).
- Rivas Camargo, D. A. (2006). Renovación del agua profunda en el golfo de méxico - tesis de doctorado en ciencias. *CICESE*.
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K. C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R., y Lehmann, A. (2012). A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, **31**: 28–36.
- Saha, P. P., Zeleke, K., y Hafeez, M. (2014a). Streamflow modeling in a fluctuant climate using swat: Yass river catchment in south eastern australia. *Environmental earth sciences*, **71**(12): 5241–5254.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., et al. (2010). The ncep climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**(8): 1015–1058.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H.-y., Iredell, M., et al. (2011). Ncep climate forecast system version 2 (cfsv2) 6-hourly products. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-y., Iredell, M., et al. (2014b). The ncep climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, **27**(6): 2185–2208.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., y Hauck, L. M. (2001). Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **37**(5): 1169–1188.

- Schuol, J. y Abbaspour, K. (2006). Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (swat) applied to west africa. *Advances in geosciences*, **9**: 137–143.
- Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A., y Ochoa, J. (2002). Flow structure and transport in the yucatan channel. *Geophysical Research Letters*, **29**(3): 10–1.
- Sturges, W. (1993). The annual cycle of the western boundary current in the gulf of mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **98**(C10): 18053–18068.
- Thornton, D. C. O. (2012). Primary production in the ocean. *Advances in Photosynthesis—Fundamental Aspects*, pp. 563–588.
- Turner, R. y Rabalais, N. (1999). Suspended particulate and dissolved nutrient loadings to gulf of mexico estuaries. *Biogeochemistry of Gulf of Mexico Estuaries*, pp. 89–107.
- Vázquez De La Cerda, A. M., Reid, R. O., DiMarco, S. F., y Jochens, A. E. (2005). Bay of Campeche Circulation: An Update. *Circ. Gulf Mex. Obs. Model.*, pp. 279–293.
- Walsh, J. J., Dieterle, D. A., Meyers, M. B., y Müller-Karger, F. E. (1989). Nitrogen exchange at the continental margin: A numerical study of the gulf of mexico. *Progress in Oceanography*, **23**(4): 245–301.
- Xue, Z., He, R., Fennel, K., Cai, W. J., Lohrenz, S., y Hopkinson, C. (2013a). Modeling ocean circulation and biogeochemical variability in the Gulf of Mexico. *Biogeosciences*, **10**(11): 7219–7234.
- Xue, Z., He, R., Fennel, K., Cai, W.-J., Lohrenz, S., y Hopkinson, C. (2013b). Modeling ocean circulation and biogeochemical variability in the gulf of mexico. *Biogeosciences*, **10**(11): 7219–7234.
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L., y Brien, J. J. O. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. **108**: 1–19.
- Zavala-Hidalgo, J., Gallegos-García, A., Martínez-López, B., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2006). Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dyn.*, **56**(3-4): 333–338.