



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**Hipoxia en aguas superficiales de una zona
costera en la entrada del Golfo de California
(Mazatlán, Sinaloa) y su relación con
surgencias costeras**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
CARLOS ALBERTO HERRERA BECERRIL

TUTOR PRINCIPAL
DR. JOAN ALBERT SÁNCHEZ CABEZA
Instituto de Ciencias del Mar Y Limnología

COMITÉ TUTOR:

DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ
Instituto de Geografía

DR. JOSÉ GILBERTO CARDOSO MOHEDANO
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., agosto 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO:

Presidente:	Dr. Federico Páez Osuna
Vocal:	Dr. Raúl Aguirre Gómez
Secretario:	Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza
Suplente:	Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano
Suplente:	Dr. Juan Carlos Herguera García

Declaración de autoría

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor principal, el Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza, y los miembros del comité: Dr. Raúl Aguirre Gómez y Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano, por su acompañamiento, consejos y comentarios durante la elaboración de este proyecto, y a los miembros del jurado: Dr. Federico Páez Osuna y Dr. Juan Carlos Herguera García, por su valioso tiempo dedicado a evaluar este proyecto.

Este proyecto fue posible gracias al apoyo y colaboración de muchas personas. En particular quiero agradecer a quienes han colaborado en las diversas actividades del proyecto Observatorios costeros del cambio global: M. en C. León Felipe Álvarez Sánchez, Biol. Onésimo López Ramos, M. en C. Libia Hascibe Pérez Bernal, Ing. Roberto Clemente López Murillo, Mat. Germán Ramírez Reséndiz, Lic. Carlos Suárez Gutiérrez, M. en C. Sergio Rendón Rodríguez.

Agradezco al Dr. François Colas por su asesoría durante mi estancia en el laboratorio LOCEAN del IRD, durante noviembre del 2019, y por el apoyo en la obtención de datos de viento de escaterómetros. A la Dra. María Luisa Machain por los datos de CTD de las campañas MAZ I, MAZ II y MAZ III. A la Dra. Rosalba Alonso Rodríguez por los datos e información compartida. A Andrea Lara Cera por implementar y compartir el índice de surgencias costeras por gradiente de temperatura satelital.

Este proyecto fue realizado con el apoyo de los siguientes proyectos:

- Observatorio del Cambio Global en la zona costera de Mazatlán, Programa de Apoyos a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IB201612.
- Impactos del Cambio Climático y Global en zonas costeras de México, 2014-2016, CONACYT PDCPN-2013-01-214349.
- Observatorios costeros y registros ambientales de la acidificación de los mares mexicanos, CONACYT SEMARNAT-2016-01-278634.

- Hipoxia en los observatorios costeros del cambio global. Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional Autónoma de México (PAPIIT IN110518).

Agradecimientos personales

Agradezco a mi mamá, Lety, por apoyarme incondicionalmente y estar presente en cada proyecto que emprendo.

A los compañeros del Laboratorio de Cambio Global y Climático: Eduardo Gómez, Brenda Martínez, Ricardo Martínez, Serguei Rico.

A los compañeros y amigos que me han apoyado durante mi estancia en Mazatlán: Hascibe, Donají, Perla, Gerry, Lizzy, Martín y Giovanni.

Resumen

El oxígeno disuelto (DO, por sus siglas en inglés) es la concentración de oxígeno en su fase gas (O_2) presente en el agua y es un elemento indispensable para la supervivencia de la mayoría de los organismos acuáticos heterótrofos. Cuando la concentración de DO es baja (hipoxia, $DO < 2.0 \text{ mg L}^{-1}$), algunos organismos no pueden realizar sus procesos metabólicos adecuadamente, por lo que pueden experimentar estrés, e incluso morir. La hipoxia puede presentarse de manera natural, como en el caso de las zonas de mínimo oxígeno, pero también puede ser causada por actividades antropogénicas. La hipoxia es uno de los mayores impactos del cambio global sobre los ecosistemas costeros.

Mediante el uso de sensores autónomos se obtuvieron registros de DO de alta frecuencia temporal (30 min) en aguas superficiales (~5 m) de la zona costera de Mazatlán, en la zona de entrada del Golfo de California, entre 2014 y 2016. En este registro se observó la ocurrencia de eventos hipóxicos (e incluso anoxia, $DO < 0.06 \text{ mg L}^{-1}$) con duración entre días y semanas. La hipótesis principal de este trabajo es que estos eventos de hipoxia están relacionados con surgencias costeras, que ocurren de manera natural en la región y que aportan agua del fondo, empobrecida en oxígeno, a la capa superficial. De hecho, la zona de mínimo oxígeno en la región es somera, pues la oxiclina se observa aproximadamente a partir de 50 metros de profundidad cerca de la costa.

Para contrastar la hipótesis principal se realizaron análisis estadísticos y de frecuencias con variables físicas como la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), el nivel del mar y el índice de surgencias costeras por viento (CUI, por sus siglas en inglés). Los resultados permitieron confirmar la relación entre la ocurrencia de surgencias costeras y algunos de los eventos de hipoxia, principalmente entre los meses de diciembre y abril (56% de la duración de la hipoxia registrada). Sin embargo, esta relación no pudo ser confirmada para todos los eventos, especialmente para los aquellos registrados durante verano y otoño. Una nueva hipótesis contempla remolinos de mesoescala, eutrofización u ondas

internas como causantes de estos eventos, y será necesario implementar nuevos análisis para confirmarlo.

Abstract

Dissolved oxygen (DO) is the concentration of gaseous oxygen (O_2) in water and it is essential for most of heterotrophic aquatic organisms. When DO concentration is low (hypoxia, $DO < 2 \text{ mg L}^{-1}$), many organisms cannot carry out its metabolic processes adequately, suffer from stress and could even die. Hypoxia can occur naturally, as in the case of minimum oxygen zones, but it can also be caused by anthropogenic activities. The hypoxia is one of the largest impacts of global change on coastal ecosystems.

DO was recorded at high temporal frequency intervals (30 min) in surface waters (~5 m) of the Mazatlan coastal zone, at the entrance area of the Gulf of California, from 2014 to 2016 using autonomous sensors. This record shows hypoxic events (and even anoxia, $DO < 0.06 \text{ mg L}^{-1}$) lasting from days to weeks. The main hypothesis of this project is that the hypoxia events are related to coastal upwelling, which occurs naturally in the region and transport oxygen depleted water masses from depth to the coastal surface layer. In fact, the oxygen minimum zone in the region is shallow, records show the oxycline at 50 meters depth near the coast.

To test the main hypothesis, statistical and frequency analyses were performed with other physical variables such as sea surface temperature (SST), sea level and the coastal upwelling index (CUI). Results confirmed the relationship between the occurrence of coastal upwelling and some of the hypoxia events, mainly between December and April (56% of the time when hypoxia was observed). However, this relationship could not be confirmed for all events, especially those observed during summer and autumn. A new hypothesis considers mesoscale eddies, eutrophication or internal waves as the cause of these events, and it will be necessary to implement new analyzes to confirm this.

Índice

1.	Introducción.....	14
1.1	Oxígeno disuelto en el océano.....	14
1.1.1.	Intercambio gaseoso con la atmósfera.....	14
1.1.2.	Producción y consumo biológico.....	15
1.1.3.	Circulación oceánica y oxígeno disuelto.....	17
1.2	Zonas de mínimo oxígeno.....	19
1.3	Cambio global y oxígeno disuelto.....	20
1.3.1.	Impacto de la hipoxia.....	22
1.4	Observatorios costeros del cambio global.....	23
1.5	Hipótesis.....	24
1.6	Objetivos.....	24
1.7	Área de estudio.....	24
1.7.1.	Pacífico mexicano y entrada del Golfo de California.....	24
1.7.2.	Observatorio Costero de Mazatlán.....	26
2.	Métodos.....	28
2.1	Adquisición de Datos.....	28
2.2	Monitoreo de la surgencia costera.....	30
2.2.1.	Índice de Surgencia Costera.....	30
2.2.2.	Gradiente de temperatura superficial.....	31
2.3	Análisis estadístico.....	33
2.3.1.	Identificación de eventos de hipoxia.....	34
2.3.2.	Análisis bivariado.....	35
2.3.3.	Análisis multivariado.....	36
2.3.4.	Análisis de frecuencias.....	36
3.	Resultados.....	38
3.1	Oxígeno disuelto en la Bahía de Mazatlán.....	38
3.2	Caracterización de las surgencias.....	43
3.2.1.	Índice de surgencia costera.....	44
3.2.2.	Gradiente de temperatura superficial.....	46
3.3	Relación entre eventos de hipoxia y surgencia.....	47
3.3.1.	Eventos con relación surgencia–hipoxia confirmada.....	51

3.3.2.	Eventos de relación surgencia–hipoxia descartada.....	54
3.3.3.	Eventos de relación hipoxia-surgencia no confirmada.....	57
3.4	Análisis de frecuencias.....	64
4.	Discusión.....	69
4.1	DO en las aguas superficiales adyacentes a Mazatlán	69
4.2	Surgencias costeras en Mazatlán	70
4.3	Relación entre hipoxia y surgencia costera.....	71
4.3.1.	Eventos de hipoxia relacionados con las surgencias costeras	71
4.3.2.	Eventos de hipoxia no relacionados con las surgencias costeras	73
4.3.3.	Eventos de hipoxia parcialmente relacionados con las surgencias costeras.....	74
4.3.4.	Análisis de frecuencias	75
4.4	Impactos esperados de la hipoxia en Mazatlán	78
4.5	Perspectivas.....	80
5.	Conclusiones.....	82
6.	Referencias	84
	Anexo 1. Análisis estadísticos por evento	91
	Anexo 2. Análisis de frecuencias.....	102
	Anexo 3. Scripts	111

Índice de figuras

Figura 1.1.	Solubilidad de gases atmosféricos en agua de mar	15
Figura 1.2.	Perfiles de DO en el Pacífico, en tres diferentes latitudes.....	16
Figura 1.3.	Esquema de la espiral y transporte de Ekman.....	18
Figura 1.4.	Esquema de surgencias costeras	18
Figura 1.5.	Localización de EBUS y zonas de mínimo oxígeno	20
Figura 1.6.	Estimación de pérdida de contenido de oxígeno en el océano	21
Figura 1.7.	Esquema de la circulación oceánica en el Pacífico Mexicano	26
Figura 1.8.	Mapa del área de estudio.....	27
Figura 2.1.	Ejemplo de SST vs. distancia a la costa	32
Figura 2.2.	Regresión lineal de SST vs distancia 3	32

Figura 2.3. Ejemplo de etiquetado de un evento de hipoxia.....	35
Figura 3.1. Serie de oxígeno disuelto (DO) r en la bahía de Mazatlán.....	39
Figura 3.2. Distribución del DO en Mazatlán (2014-01-29 al 2016-09-23).	40
Figura 3.3. Distribución trimestral de DO en Mazatlán	40
Figura 3.4. Ejemplo de evento de hipoxia corto	40
Figura 3.5. Ejemplo de evento de hipoxia largo	41
Figura 3.6. Ejemplo de evento de hipoxia largo (11 días)	42
Figura 3.7. Ejemplo de periodo neutro.	42
Figura 3.8. Perfiles verticales de DO y temperatura.....	43
Figura 3.9. Frecuencia de dirección del viento e intensidad estacional.....	44
Figura 3.10. Serie de tiempo del índice de surgencia costera (CUI)	45
Figura 3.11. Distribución del CUI en Mazatlán	45
Figura 3.12. Distribución trimestral del CUI en Mazatlán	45
Figura 3.13. Serie de gradiente de SST (SSTGrad).....	46
Figura 3.14. Distribución del gradiente de SST en Mazatlán	47
Figura 3.15. Distribución trimestral del gradiente de SST en Mazatlán.....	47
Figura 3.16. Series DO, SST, CUI y SSTGrad del 04 al 15 de marzo de 2015.....	51
Figura 3.17. Dispersión y correlación de Spearman DO vs SST del 04 a 15 de marzo de 2015.	52
Figura 3.18. Correlación cruzada DO vs SST del evento del 04 al 15 de marzo de 2015	52
Figura 3.19. Correlación cruzada DO vs CUI del 04 al 15 de marzo de 2015.....	52
Figura 3.20. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y CUI durante el evento 04 al 15 de marzo de 2015.....	53
Figura 3.21. Correlación cruzada DO vs SSTGrad del 04 al 15 de marzo de 2015	53
Figura 3.22. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y SSTGrad durante el evento 04 al 15 de marzo de 2015	53
Figura 3.23. Análisis de factores de las series durante el evento de hipoxia del 04 al 15 de marzo.	54
Figura 3.24. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento de descenso del DO e hipoxia entre el 10 y 30 de julio de 2014	55

Figura 3.25. Correlación cruzada entre DO y SST durante el evento del 10 al 30 de julio de 2014	56
Figura 3.26. Correlación cruzada entre DO y CUI del 10 al 30 de julio de 2014 ...	56
Figura 3.27. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad durante el evento del 10 al 30 de julio de 2014	56
Figura 3.28. Análisis de factores de las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y SLH, durante el evento de hipoxia del 10 al 30 de julio de 2014.....	57
Figura 3.29. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento corto de hipoxia entre el 21 y 24 de marzo de 2014.....	58
Figura 3.30. Correlación entre DO y SST entre el 21 y 24 de marzo de 2014	58
Figura 3.31. Correlación cruzada entre DO y SST entre el 21 y 24 de marzo de 2014	59
Figura 3.32 Correlación cruzada entre DO y CUI durante el periodo del 21 al 24 de marzo de 2014.	59
Figura 3.33. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad durante el periodo del 21 al 24 de marzo de 2014	59
Figura 3.34. Análisis de factores de las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y SLH, durante el evento de hipoxia del 21 al 24 de marzo de 2014	60
Figura 3.35. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento corto de hipoxia entre el 29 de noviembre al 08 de diciembre de 2015.....	61
Figura 3.36. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y SST entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015	61
Figura 3.37. Correlación cruzada entre DO y SST entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015.....	62
Figura 3.38. Correlación cruzada entre DO y CUI entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015.....	62
Figura 3.39. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y CUI entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015	62
Figura 3.40. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y SSTGrad entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015	63
Figura 3.41. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015.....	63

Figura 3.42. Análisis de factores de las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y SLH, durante el evento de hipoxia del 29 de noviembre al 08 de diciembre de 2015....	63
Figura 3.43. Cross-wavelet de DO y SST del 30 de enero al 21 de agosto de 2014	66
Figura 3.44. Cross-wavelet de DO y CUI del 30 de enero al 21 de agosto de 2014	67
Figura 3.45. Cross-wavelet de DO y CUI del 30 de enero al 21 de agosto de 2014	68
Figura 4.1. Promedio mensual del campo de viento superficial	71
Figura 4.2. Serie de DO en Mazatlán con identificación de los eventos de hipoxia relacionados con surgencias costera.	79
Figura 4.3. Distribución anual de observaciones superficiales de oxígeno disuelto	80

Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de conjuntos de datos compilados.	33
Tabla 2. Resumen de criterios establecidos para confirmar relación hipoxia – surgencia.....	48
Tabla 3. Resumen de eventos de hipoxia	49
Tabla 4. Comparación de valores extremos y medios diarios de CUI	70

1. Introducción

1.1 Oxígeno disuelto en el océano

El oxígeno disuelto (DO, por sus siglas en inglés) es la concentración de oxígeno gaseoso (O_2) solvatado en el agua y es indispensable para la mayoría de los organismos heterótrofos acuáticos. Su concentración en el agua de mar depende de distintos procesos físicos, químicos y biológicos. La hipoxia ocurre cuando la concentración de DO es tan baja que algunos organismos no pueden llevar a cabo sus procesos metabólicos adecuadamente, por lo que pueden experimentar condiciones de estrés, e incluso morir. Los límites bajo los cuales los organismos experimentan estrés por hipoxia varían para cada especie, pero se puede definir la hipoxia para una región cuando la concentración de DO es $< 2.0 \text{ mg L}^{-1}$ (Breitburg *et al.*, 2018). Por otro lado, la anoxia se refiere a la ausencia total de DO y se define para concentraciones $< 0.2 \text{ mg L}^{-1}$ (Libes, 2011; Hofmann *et al.*, 2011).

En el océano, el DO es controlado principalmente por: el intercambio gaseoso con la atmósfera, la producción primaria por fotosíntesis y el consumo biológico. Los dos primeros procesos están limitados a la capa superficial del océano, por lo que la circulación oceánica juega un papel fundamental en la distribución del DO a lo largo de todo el océano, principalmente mediante movimientos verticales (hundimientos y surgencias) y por procesos de advección (Thomas *et al.*, 1990; Joos *et al.*, 2003; Libes, 2011).

1.1.1. Intercambio gaseoso con la atmósfera

El intercambio gaseoso entre el océano y la atmósfera es el proceso físico mediante el cual el oxígeno es transferido de un reservorio al otro debido a las diferencias de presión parcial del gas entre ambos. En el agua de mar, la solubilidad del oxígeno depende de la temperatura, salinidad y presión parcial del oxígeno en la atmósfera. En general, la solubilidad del oxígeno disminuye conforme aumenta la salinidad y la temperatura (fig. 1.1) (Thomas *et al.*, 1990; Libes, 2011).

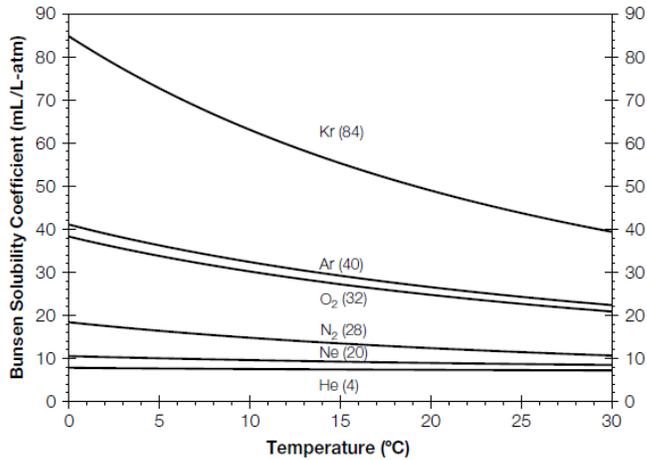
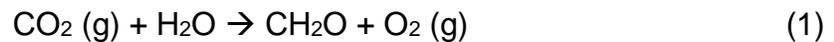


Figura 1.1. Solubilidad de gases atmosféricos en agua de mar (con salinidad de 35 ‰) en función de la temperatura (Libes, 2011).

1.1.2. Producción y consumo biológico

En el océano, la producción primaria por fotosíntesis es realizada principalmente por el fitoplancton, conformado por algas (diatomeas, dinoflagelados y cocolitofóridos) y bacterias fotosintéticas (Falkowsky, 1994; Armbrust, 2009). Las plantas marinas tienen una menor contribución (Libes, 2011). A través de su metabolismo, estos organismos utilizan la luz solar y carbono inorgánico y producen carbono orgánico y oxígeno (ec. 1) (Libes, 2011):



donde la materia orgánica se representa mediante la fórmula empírica CH₂O. Además de la luz solar, estos organismos dependen de la abundancia de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo (Falkowsky, 1994; Pedersen y Borum, 1996).

La mayoría de los organismos heterótrofos utilizan la respiración aerobia para obtener energía. En este proceso, los organismos consumen carbono orgánico y oxígeno y generan dióxido de carbono y agua (ec. 2) (Libes, 2011):



Mientras que la producción fotosintética de oxígeno está limitada a la zona fótica (primeras decenas de metros de la columna de agua), el consumo de oxígeno por respiración o degradación de la materia orgánica puede ocurrir a lo largo de toda la columna de agua (Koeve y Kähler, 2016). Por esta razón, la concentración de DO suele ser mayor en los primeros metros y disminuye conforme aumenta la profundidad (oxiclina) hasta llegar a un nivel mínimo. En algunas regiones, conforme la profundidad continúa aumentando los niveles de oxígeno pueden aumentar después, como se aprecia en un perfil oceanográfico (Fig. 1.2) (Libes, 2011).

El exceso de nutrientes propicia el crecimiento acelerado de los organismos fitoplanctónicos. Cuando estos organismos crecen descontroladamente, provocan un aumento de la turbidez del agua, impidiendo el paso de la luz solar a los niveles más profundos, inhibiendo la fotosíntesis en las capas más profundas. Cuando estos organismos mueren y se hunden, constituyen un exceso de materia orgánica que, al ser consumida y degradada, provoca el agotamiento del oxígeno disponible en profundidad, conduciendo al sistema hacia la hipoxia y en casos extremos a la anoxia. A este fenómeno se le conoce como eutrofización y es causada por el exceso de nutrientes y materia orgánica, derivados de la actividad humana (Howarth *et al.*, 2002; Smith *et al.*, 2006; Smith y Schindler, 2009).

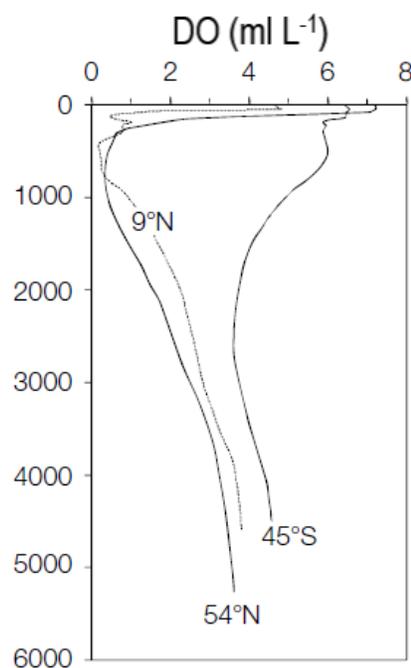


Figura 1.2. Perfil de DO en el Pacífico, en tres diferentes latitudes. En el Pacífico norte (9°N y 54°N) el DO es máximo en superficie y desciende rápidamente (oxiclina) en los primeros ~500 m de profundidad, hasta alcanzar valores de hipoxia. Esta zona corresponde con la zona de mínimo oxígeno. En el Pacífico sur (45°S), la oxiclina es más profunda y no alcanza valores hipóxicos. Esto se debe al hundimiento de las masas de agua fría antárticas, las cuales concentran mayor cantidad de oxígeno (modificado de Libes, 2011).

1.1.3. Circulación oceánica y oxígeno disuelto

La circulación oceánica juega un papel fundamental en la distribución y comportamiento espacial del DO, principalmente mediante movimientos verticales y horizontales de las masas de agua. Los hundimientos de masas de agua son los responsables de que el DO llegue a zonas más profundas (Libes, 2011), mientras que las surgencias llevan masas de agua del fondo empobrecidas en oxígeno hacia la superficie. Las surgencias pueden ser causadas por el esfuerzo del viento en zonas costeras y el ecuador (Kämpf y Chapman, 2016) y en los bordes de los giros oceánicos de mesoescala (giros ciclónicos en el hemisferio norte) (Bibby *et al.*, 2008). En este trabajo se consideran únicamente los efectos de este transporte por las surgencias costeras.

Las surgencias costeras ocurren como resultado de un conjunto de factores que incluyen el esfuerzo del viento, la fuerza de Coriolis y la orientación del borde costero. Cuando el viento sopla sostenidamente en una dirección, imprime su esfuerzo sobre la capa más superficial del océano y genera una corriente. La fuerza de Coriolis desvía la corriente 45° hacia la derecha de la dirección del viento en el hemisferio norte (hacia la izquierda en el hemisferio sur). A su vez, esta capa transfiere el esfuerzo, aunque con menor magnitud, sobre la capa inferior inmediata, cuya trayectoria se desvía 45° la derecha respecto la capa superior. Este proceso continúa sucesivamente hasta la profundidad de influencia del viento y se le conoce como espiral de Ekman (fig. 1.3). Como resultado final, ocurre un desplazamiento neto orientado 90° a la derecha de la dirección del viento, denominado transporte de Ekman (fig. 1.3) (Pond y Pickard, 1983; Kämpf y Chapman, 2016).

Cuando el viento fluye paralelo a la costa, con la costa a la izquierda de la dirección del viento en el hemisferio norte, el transporte de Ekman desplaza la masa de agua superficial 90° hacia la derecha del viento, es decir hacia el océano (*off-shore*), lo que obliga a que esta masa de agua sea remplazada por otra proveniente del fondo, dando lugar a la surgencia costera (fig. 1.4) (Cushman-Roisin y Beckers, 2008). Las surgencias costeras tienen una longitud de decenas a pocos cientos de kilómetros

y duración entre días a semanas (Broitman y Kinlan, 2006; Kämpf y Chapman, 2016).

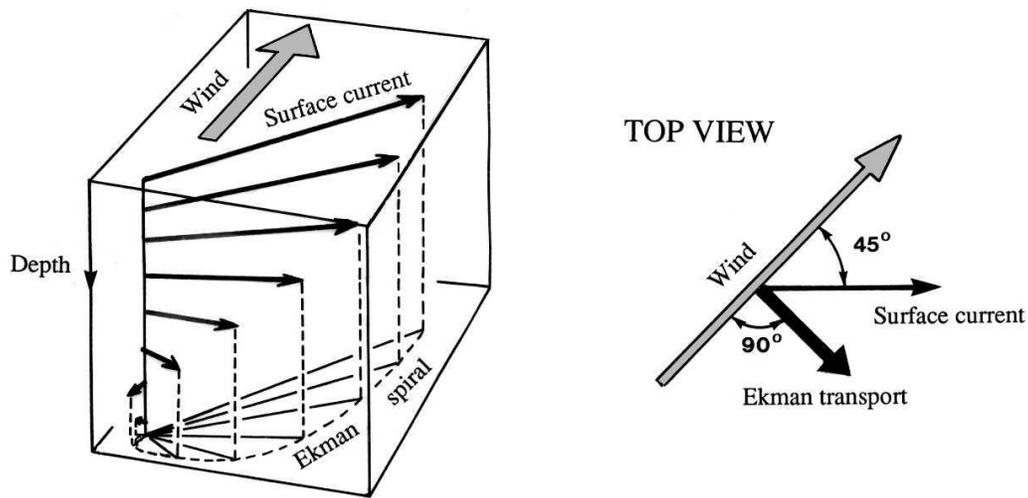


Figura 1.3. Esquema de la espiral y transporte de Ekman por arrastre del viento. La desviación de la masa de agua es hacia la derecha del viento en el hemisferio norte (Cushman-Roisin y Beckers, 2008)

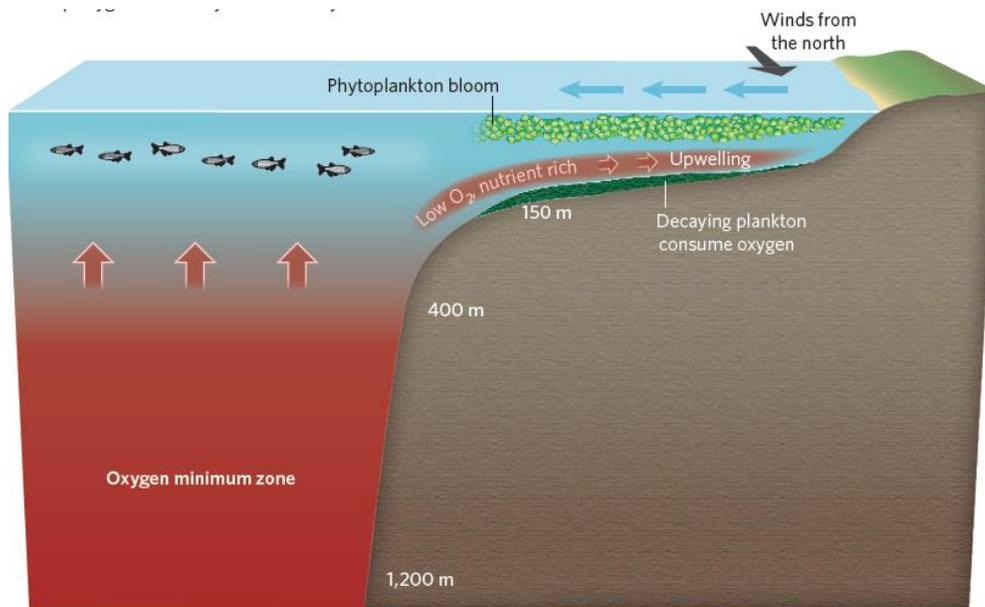


Figura 1.4. Esquema de surgencias costeras. El viento proveniente del norte genera el transporte de Ekman fuera de la costa (flechas azules) e inducen la surgencia e incursión de aguas profundas sobre la plataforma continental (Gewin, 2010)

1.2 Zonas de mínimo oxígeno

Las surgencias costeras ocurren preferentemente en regiones ubicadas frente a las fronteras orientales de los océanos (occidentales de los continentes). A estas regiones se les denomina Sistemas de Surgencias de Frontera Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés) (fig. 1.5). Debido a que las surgencias aportan aguas ricas en nutrientes y fomentan el aumento en la productividad primaria, estas regiones son de las más productivas del océano (Chavez y Messié, 2009) y soportan una parte importante de la cadena alimenticia del océano, por lo que son de alta importancia ecológica y económica (Rykaczewski y Checkley, 2008; Chan, 2019).

Derivado de la alta productividad en las zonas de surgencias costeras, se tiene un exceso de materia orgánica hacia las capas más profundas, que al ser consumida y degradada agota el oxígeno disponible en estas capas, acentuando las bajas concentraciones de DO que ya tienen estas aguas, especialmente en el Pacífico Nororiental. Estas zonas se denominan zonas de mínimo oxígeno (OMZ, por sus siglas en inglés) (Karstensen *et al.*, 2008). En el Pacífico nororiental tropical, frente a las costas de México, se localiza una de las OMZ más intensas y extensas del océano (fig. 1.5) (Stramma *et al.*, 2008). A su vez cuando ocurren las surgencias costeras, estas pueden llevar aguas desde la OMZ hasta las aguas someras, cubriendo la región de la plataforma con aguas hipóxicas (Paulmier *et al.*, 2008).

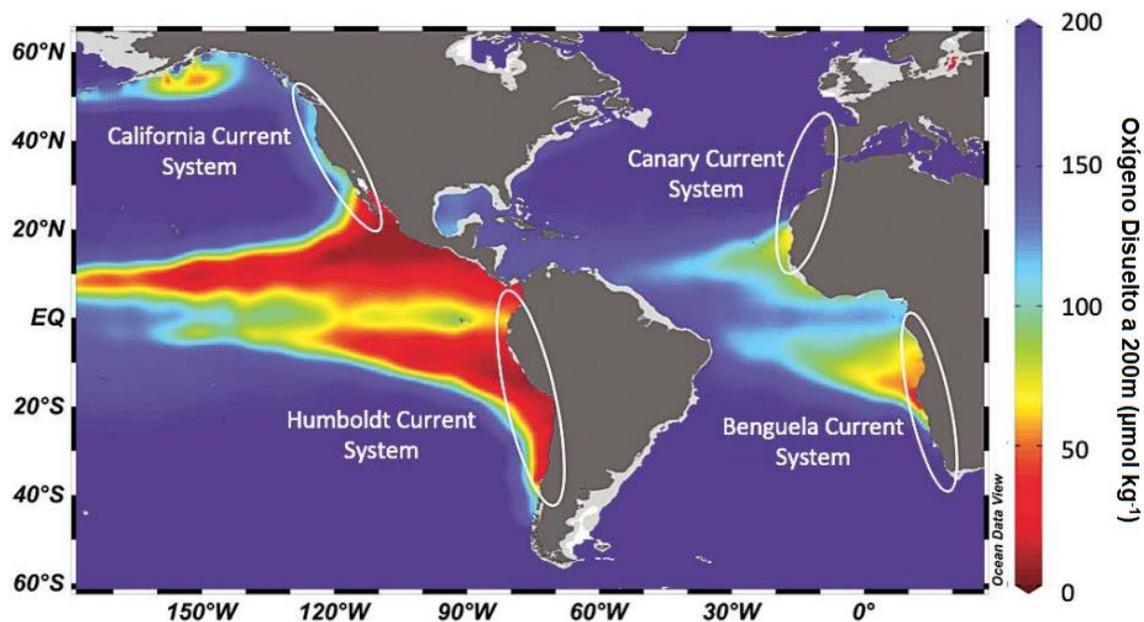


Figura 1.5. Localización de EBUS y zonas de mínimo oxígeno. La zona de mínimo oxígeno del Pacífico tropical nororiental alcanza sus valores mínimos frente a las costas de México (Chan *et al.*, 2019b).

1.3 Cambio global y oxígeno disuelto

Durante las últimas décadas se ha observado una disminución de la concentración de oxígeno en los océanos y un aumento en la cantidad, extensión e intensidad de zonas hipóxicas. Esta tendencia se debe a un conjunto de factores como el aumento en la temperatura del océano, la eutrofización y cambios en la circulación oceánica (Joss *et al.*, 2003; Diaz y Rosenberg, 2008; Breitburg *et al.*, 2018). Se estima que para el 2100 el océano podría perder entre 2 y 4% de DO respecto al presente, según los distintos escenarios del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (fig. 1.6) (Ciais *et al.*, 2013). Esta desoxigenación es uno de los mayores impactos del cambio global sobre el medio marino, que provocaría importantes alteraciones a los ecosistemas y recursos marinos (Helly & Levin, 2004; Rabalais *et al.*, 2009; Chan *et al.*, 2019a).

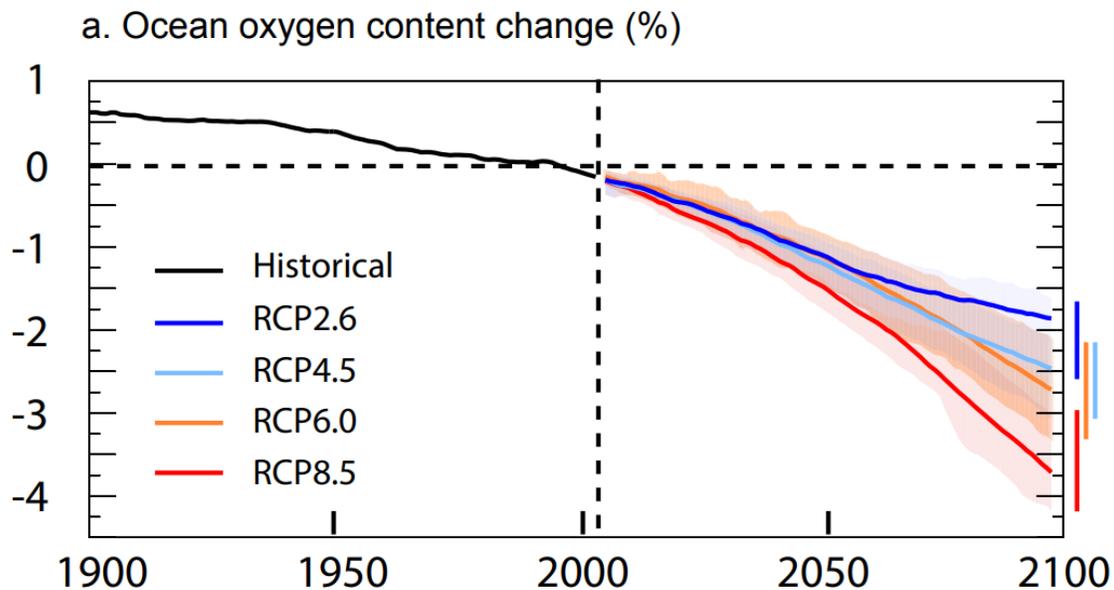


Figura 1.6. Estimación de pérdida de contenido de oxígeno en el océano desde 1900 hasta el presente y proyecciones hacia el 2100 según los escenarios del IPCC (Ciais et al., 2013). Eje X: Años. Eje Y: Cambio en concentración de oxígeno en el océano (%). RCP: Trayectorias de concentración representativas (por sus siglas en inglés).

El aumento de la temperatura (principalmente en la capa superficial) provoca la disminución de la solubilidad del DO, genera una mayor demanda de oxígeno por parte de algunos organismos debido incremento en sus requerimientos metabólicos y aumenta la degradación de materia orgánica por actividad microbiana (Matear y Hirst, 2003).

Adicionalmente a estos procesos las descargas de aguas residuales, provenientes de actividades industriales, municipales, agrícolas y acuícolas (acuicultura), además de la precipitación atmosférica, aportan un exceso de nutrientes y materia orgánica en las zonas costeras que generan el crecimiento acelerado de organismos fitoplanctónicos, que pueden conducir a las zonas costeras a la eutrofización e hipoxia locales o regionales (Díaz y Rosenberg, 2008; Breitburg et al., 2018). Se estima que la eutrofización e hipoxia costera es la mayor amenaza para los ecosistemas costeros y las actividades económicas dependientes de estos ecosistemas (Smith y Schindler, 2009; Díaz y Rosenberg, 2020; Limburg et al., 2020). La ocurrencia de episodios de hipoxia costera puede ser una de las primeras

señales de alerta de que un sistema costero está entrando en una etapa de eutrofización (Diaz y Rosenberg, 2008).

La disminución en el DO en algunas zonas costeras, así como el crecimiento vertical en profundidad de las zonas de mínimo oxígeno, pueden deberse también a fenómenos más complejos que implican cambios en la circulación atmosférica asociado al calentamiento diferencial entre océanos y continentes. La hipótesis de Bakun pronostica que, debido al calentamiento global, se incrementarán las diferencias de presión atmosférica entre el océano y los continentes, lo que intensificará los vientos generadores de surgencias costeras en los EBUS. Esta intensificación induciría un mayor transporte de aguas de fondo, empobrecidas en oxígeno, hacia la superficie y zonas costeras de estas regiones (García-Reyes y Largier, 2010; Bakun *et al.*, 2015). Sin embargo, esta hipótesis aún no ha sido confirmada en todos los EBUS (Sydeman *et al.*, 2014).

1.3.1. Impacto de la hipoxia

El nivel de impacto de la hipoxia sobre los ecosistemas depende principalmente de la intensidad y duración de la misma. En general, la mayoría de los peces requieren concentraciones de DO $> 5 \text{ mg L}^{-1}$ para vivir y prosperar. A concentraciones de DO $< 4 \text{ mg L}^{-1}$ (bajo oxígeno) la mayoría de los peces presentan cambios de comportamiento y respuestas fisiológicas (Sato *et al.*, 2016), mientras que concentraciones de DO $< 2 \text{ mg L}^{-1}$ son letales para la mayoría de los peces (Vaquer-Sunyer y Duarte, 2008).

Los animales bentónicos suelen ser tolerantes a valores más bajos de oxígeno. Sin embargo, debido a su movilidad reducida, estos organismos son más vulnerables a episodios de larga duración e intensidad, cuyas consecuencias van desde la disminución de la tasa de reproducción hasta el aumento en la mortalidad (Diaz y Rosenberg, 1995 y 2011; Vaquer-Sunyer y Duarte, 2008; Limburg *et al.*, 2020).

Además de los efectos negativos sobre los ecosistemas, la hipoxia representa una amenaza para algunas actividades económicas como la pesquería, la cual es una

de las principales actividades económicas en la región. Alteraciones como la migración, la reducción en la tasa de reproducción y el incremento en la mortalidad de las poblaciones, tanto de especies comerciales como de toda la red trófica, derivan en consecuencias como la reducción en el tamaño de capturas y el aumento en el esfuerzo de pesca (Díaz y Rosenberg, 2011, Limburg *et al.*, 2020).

Esta región del Pacífico mexicano concentra la mayor parte de la producción de camarón en el país, tanto de pesca como acuicultura, siendo la especie *Litopenaeus vannamei* la principal especie explotada (Páez-Osuna *et al.*, 2013). El rango óptimo de DO para *L. vannamei* se encuentra entre 5 y 9 mg L⁻¹, mientras que concentraciones persistentes entre 2 y 5 mg L⁻¹ pueden limitar el crecimiento y hacer más susceptibles a enfermedades a los individuos. Concentraciones de DO < 1.5 mg L⁻¹ pueden ser letales si esta condición se prolonga por varias horas (Van Wyk y Scarpa, 1999; Boyd *et al.*, 2001). Por lo tanto la hipoxia es una amenaza tanto ecológica como económica para esta región.

1.4 Observatorios costeros del cambio global

Con el objetivo de identificar los impactos del cambio global sobre las zonas costeras de México, se ha implementado un sistema de observatorios de bajo costo en tres zonas costeras, incluyendo Mazatlán, donde se monitorean variables fisicoquímicas, como temperatura del agua, nivel del mar, pH y DO, a alta frecuencia (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018). En el observatorio costero de Mazatlán se ha evidenciado la ocurrencia de eventos de hipoxia, e incluso anoxia, en aguas superficiales (~5 m de profundidad), con duraciones entre algunas horas y días.

La zona costera de Mazatlán es una de las regiones pesqueras más importantes del país (INEGI, 2015), por lo que los eventos de hipoxia representan una amenaza para la productividad pesquera. El grado de esta amenaza está en función de la intensidad y duración de estos eventos.

1.5 Hipótesis

La hipótesis principal de este proyecto es que los eventos de hipoxia registrados en la zona costera de Mazatlán están relacionados con la ocurrencia de eventos de surgencias costeras, que aportan masas aguas subsuperficiales enriquecidas en nutrientes y con bajas concentraciones de oxígeno, las cuales ocurren manera natural en la región.

1.6 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es: estudiar la ocurrencia de eventos de hipoxia en la zona costera de Mazatlán analizando su posible relación con eventos de surgencias costeras.

Los objetivos particulares son:

- Caracterizar la variabilidad temporal de los eventos de hipoxia (duración, frecuencia e intensidad).
- Estudiar la formación y variabilidad de las surgencias costeras.
- Estudiar la relación entre los eventos de hipoxia con las surgencias costeras.

1.7 Área de estudio

1.7.1. Pacífico mexicano y entrada del Golfo de California

La zona costera de Mazatlán se localiza en la zona de entrada del Golfo de California, en el Pacífico nororiental tropical (~23°N, 106°O). Se trata de una zona de transición donde confluyen tres sistemas oceánicos: el Sistema de la Corriente de California, el Sistema del Pacífico Tropical del Este y el Golfo de California (Pantoja *et al.*, 2012).

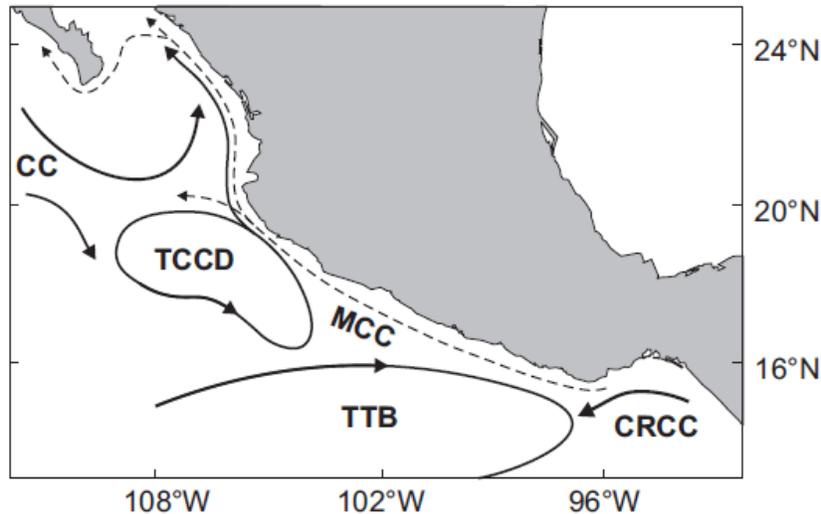
El área de estudio se localiza sobre la OMZ del Pacífico tropical oriental, una de las más extensas e importantes del mundo (Stramma et al., 2008; Paulmier y Ruiz-Pino, 2009), cuyo límite superior se encuentra aproximadamente a ~80 m de profundidad en el área de entrada del Golfo de California (Cepeda-Morales *et al.*, 2009 y 2013; Maske *et al.*, 2010)

Las condiciones oceanográficas en esta región presentan un comportamiento estacional. Durante el invierno, recibe aporte de masas de agua subárticas influenciada por ramificaciones de la Corriente de California, que es una corriente superficial fría que fluye del norte (~55° N) hacia el ecuador paralela a la costa de Norteamérica, llegando hasta ~15° N entre invierno y primavera (Lavín y Marinone, 2003; Checkley y Barth, 2009). Durante la primavera y verano, la zona recibe la influencia de la Corriente Costera Mexicana, que es una continuación de la corriente cálida de Costa Rica. Esta corriente fluye hacia el polo a lo largo de la costa de México, desde el Golfo de Tehuantepec hasta el Golfo de California (fig. 1.7) (Lavín y Marinone, 2003; Montaña-Ley et al., 2008; Gómez-Valdivia *et al.*, 2015).

Las condiciones atmosféricas también presentan un comportamiento estacional. Durante otoño, invierno y primavera los vientos dominantes fluyen del noroeste, paralelos a la costa, con velocidades promedio entre 8 y 12 ms⁻¹ (Lavín y Marinone, 2003). Estos vientos inducen un transporte de Ekman que mantiene a la termoclina somera y son causantes de surgencias costeras que se presentan en la región (Herrera-Cervantes et al., 2007; Pantoja *et al.*, 2012). Durante el verano los vientos dominantes fluyen del suroeste con velocidad promedio ≤ 5 ms⁻¹ (Lavín y Marinone, 2003).

Dinámicamente, esta región se ve influenciada tanto por la propagación de ondas de Kelvin atrapadas a la costa, que se propagan desde el ecuador hasta el Golfo de California a través del borde continental, como por la formación y propagación de remolinos de mesoescala. Ambos fenómenos modifican la profundidad de la

termoclina al propagarse (Lavín y Marinone, 2003; Pantoja *et al.*, 2012; Gómez-Valdivia *et al.*, 2015).



*Figura 1.7. Esquema de la circulación oceánica en el Pacífico Mexicano. MCC: Corriente Costera Mexicana, CC: Corriente de California, CRCC: Corriente Costera de Costa Rica. TCCD: Domo de Cabo Corrientes, TTB: Domo de Tehuantepec (Gómez-Valdivia *et al.*, 2015).*

La variabilidad oceánica y atmosférica interanual está dominada por el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Lluch-Cota *et al.*, 2001; Lavín y Marinone, 2003; Herrera-Cervantes *et al.*, 2007). Durante la fase positiva de ENSO, principalmente durante el invierno, los vientos generadores de surgencias costeras se debilitan, la SST presenta anomalías positivas y la termoclina aumenta su profundidad (Herrera-Cervantes *et al.*, 2007).

1.7.2. Observatorio Costero de Mazatlán

El observatorio costero de Mazatlán se encuentra en la zona costera adyacente a la ciudad de Mazatlán, Sinaloa. Esta ciudad cuenta con una población aproximada de medio millón de habitantes, cuyas actividades económicas principales son el turismo, la pesca y acuicultura (INEGI, 2015).

Esta zona costera incluye al Estero de Urías, una laguna costera al sur de la ciudad de 17 km de longitud y un área de 18 km², que se encuentra bajo una fuerte presión antropogénica. La zona media del estero alberga una central termoeléctrica y distintas granjas de acuacultura, cuyas descargas de aguas residuales van a parar al mismo estero. En la zona de entrada del estero se encuentra también un puerto comercial internacional, mientras que en la boca del estero se encuentra una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas que realiza descargas en la zona costera contigua (fig. 1.8) (Ochoa-Izaguirre y Soto-Jiménez, 2013; Cardoso-Mohedano *et al.*, 2016).

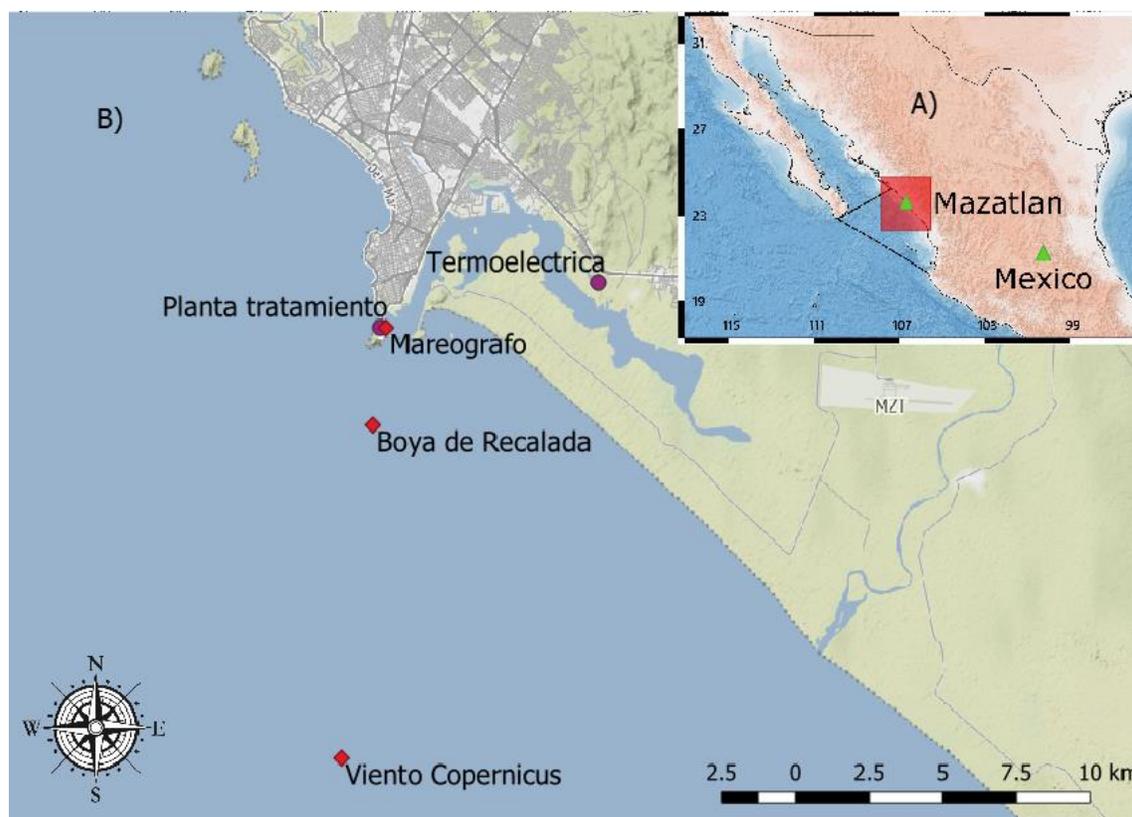


Figura 1.8. Mapa del área de estudio. A) Zona de entrada del Golfo de California, delimitado por líneas punteadas y ubicación de Mazatlán. B) Zona costera de Mazatlán y el Estero de Urías, sitios de estudio (rombos rojos), y ubicación la planta de tratamiento de aguas residuales y la central termoeléctrica.

2. Métodos

2.1 Adquisición de Datos

Se conjuntó una base de datos oceánicos y atmosféricos provenientes de distintas fuentes que incluyen al observatorio costero, incluyendo datos *in situ* (con sondas oceanográficas o estaciones meteorológicas), datos satelitales y modelos de reanálisis (tabla 1).

Los registros de oxígeno disuelto (DO) y SST *in situ* se obtuvieron mediante un sensor autónomo Hobo U26-001 (exactitud: $\pm 0.2 \text{ mg L}^{-1}$, precisión: 0.02 mg L^{-1} , límite de detección = 0.06 mg L^{-1}). Este sensor es calibrado primero al 100 % de saturación, colocándolo agua saturada de oxígeno en la atmósfera, y después al 0 % de saturación, colocándolo en una disolución sulfito de sodio con ausencia total de oxígeno. La calibración se llevó a cabo antes de instalar el sensor por primera vez y se repitió cada 6 meses, siguiendo las recomendaciones del fabricante (Onset Computer Corporation, 2012a). Este sensor utiliza un principio óptico para la medición del DO, en el cual la señal registrada es inversamente proporcional a la concentración del DO. Es decir, a menor DO, la señal óptica es más intensa. Esto permite que el sensor funcione muy bien en condiciones de hipoxia (Onset Computer Corporation, 2012b)

El sensor de oxígeno se instaló a una profundidad de $\sim 5 \text{ m}$, en la boya marítima denominada “Recalada” (fig. 1.8). Esta boya se encuentra aproximadamente a $\sim 2.7 \text{ km}$ de la línea de costa, frente a la entrada del estero de Urías. La profundidad media de la columna de agua bajo la boya es de $\sim 30 \text{ m}$.

Se obtuvo registro del nivel del mar (SLH, por sus siglas en inglés) mediante un sensor autónomo Hobo Water Logger U26-001. Este sensor se encuentra instalado en la boca del estero (fig. 1.8). Debido a su ubicación, esta serie se consideró como un indicador del flujo de agua entre el Estero de Urías y la bahía de Mazatlán: cuando la marea baja (SLH \downarrow) el agua sale del estero, pudiendo aportar aguas con

exceso de materia orgánica y poco oxígeno, cuando sube la marea (SLH ↑) el agua entra al estero. En el anexo 1 se muestra el gráfico de esta serie de tiempo.

Se obtuvieron datos de perfiles oceanográficos de CTD y DO cercanos a Mazatlán, de dos campañas realizadas por el buque oceanográfico El Puma el 2015-04-28 y 2016-03-31 (M.L. Machain, comunicación personal). Estos datos fungieron como indicadores de la profundidad de la termoclina y oxiclina.

Debido a las condiciones de nubosidad, no fue posible tener un registro completo de la SST mediante mediciones satelitales, por lo que la información espaciotemporal de este parámetro se obtuvo de datos del modelo análisis global y pronóstico “GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024”, proporcionado por el programa *Copernicus Marine Service*. Este producto incorpora datos observados sobre el estado del océano (*in situ* y satelitales) y genera información espaciotemporal regular mediante la resolución de modelos numéricos (Lellouche *et al.*, 2016). Este producto ofrece datos diarios en una malla regular de $1/12^\circ$ (~8 km), que se utilizaron posteriormente para la estimación de la surgencia costera mediante el gradiente de la temperatura superficial.

Para la estimación del índice de surgencia costera por viento (CUI, por sus siglas en inglés) se utilizaron datos del producto *WIND_GLO_WIND_L4_REP_OBSERVATIONS_012_006*, proporcionado por *Copernicus Marine Service*. Este producto incorpora datos de viento de observaciones remotas (radiómetros y escaterómetros satelitales) y del reanálisis ERA-Interim y los mezcla a partir de un reprocesamiento. Después utiliza la técnica geoestadística Kriging para obtener una malla regular en espacio y tiempo de 0.25° y 6 horas respectivamente. Finalmente otorga datos velocidad de viento a 10 metros de altura (U_{10}), esfuerzo, rotacional y divergente (fig. 1.8) (Bentamy, 2018)

2.2 Monitoreo de la surgencia costera

2.2.1. Índice de Surgencia Costera

Se utilizó el índice CUI (*Coastal Upwelling Index*) como indicador de la surgencia costera (Bakun, 1973). Este índice estima el transporte de Ekman por efecto del viento paralelo a la costa. Es positivo cuando el transporte se genera hacia afuera de la costa (surgencia) y negativo cuando el transporte es hacia la costa (hundimiento). Se calcula mediante la ecuación 3 y sus unidades son ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} / 100$ metros de costa):

$$CUI = \frac{\tau}{\rho f} 1000 \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

$\rho = 1025 \text{ kg m}^{-3}$: densidad media del agua de mar.

f : parámetro de Coriolis.

τ : componente del esfuerzo de viento paralelo a la costa (positivo con la costa a la izquierda del viento, en el hemisferio norte).

Para calcular la componente del esfuerzo de viento (τ) se utilizaron los parámetros propuestos por Bakun y Nelson (1977):

$$\tau = \rho_a C_d U_{10} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$\rho_a = 1.022 \text{ kg m}^{-3}$: densidad del aire,

$C_d = 0.0013$: coeficiente de arrastre empírico,

U_{10} : magnitud del componente de velocidad de viento paralelo a la línea de costa.

La línea de costa se definió a partir de los puntos con coordenadas (23.304445 N, 106.493609 O) y (23.093349 N, 106.295273 O), orientada a 319° respecto al norte.

Para el cálculo de la componente paralela a la costa de la velocidad del viento (U_{10})

se utilizaron los datos de viento de Copernicus (23.0625N, -106.4375°) (fig. 1.8). Se calculó el índice CUI y finalmente se utilizó una interpolación lineal para obtener una serie de tiempo con frecuencia de una hora (original de 6 horas) (tabla 1).

2.2.2. Gradiente de temperatura superficial

Una de las características que permite identificar la ocurrencia de una surgencia costera es la presencia de agua más fría, emergida del fondo, cercana a la costa. Este comportamiento puede ser monitoreado mediante observaciones remotas, pues durante la surgencia se pueden observar diferencias de temperaturas significativas (algunos grados Celsius) entre la costa y decenas de kilómetros mar adentro (Kämpf y Chapman, 2016). Para cuantificar este comportamiento, se creó una serie de tiempo del gradiente de SST (SSTGrad) entre la costa y mar adentro, a lo largo de un transecto perpendicular a la línea de costa (Lara-Cera, 2020).

Para definir la longitud del transecto donde estimar el gradiente de SST, se realizó una inspección visual de los gráficos diarios de SST vs distancia a la costa en el transecto perpendicular a la costa de 30 km x 120 km, sobre los cuales se agregó una línea de tendencia mediante LOESS, con un parámetro de suavizado del 75% (*span* = 75). A partir de estas imágenes, se identificó que la mayor pendiente se encuentra en los primeros 30 km desde la costa (fig. 2.1). Además, se pretende que a esta distancia (30 km) las diferencias de SST sean atribuidas principalmente a surgencias costeras y no a remolinos de mesoescala. Por lo tanto, se definió el transecto perpendicular a la costa de 30 km x 30 km, y se estimó el gradiente mediante la pendiente de la regresión lineal de SST vs distancia a la costa (fig. 2.2) (Lara-Cera, 2020).

La serie de tiempo SSTGrad tiene una frecuencia original de 1 día. Para que pueda ser comparada con las demás series de tiempo, se le aplicó una interpolación lineal para obtener datos cada 1 hora. Si bien los datos con los que fue construida la serie corresponden solamente a un instante de cada día, esta interpolación se consideró viable debido a que la escala temporal de las surgencias costeras es típicamente

mayor a un día. Sin embargo, es necesario advertir que los fenómenos que ocurren en una escala de tiempo menor a un día quedaron excluidos de esta serie.

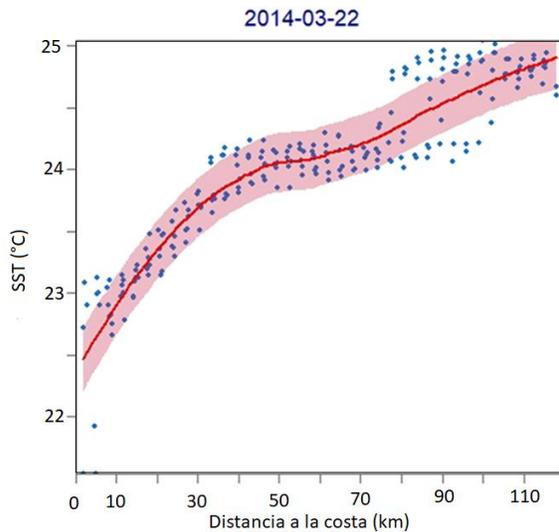
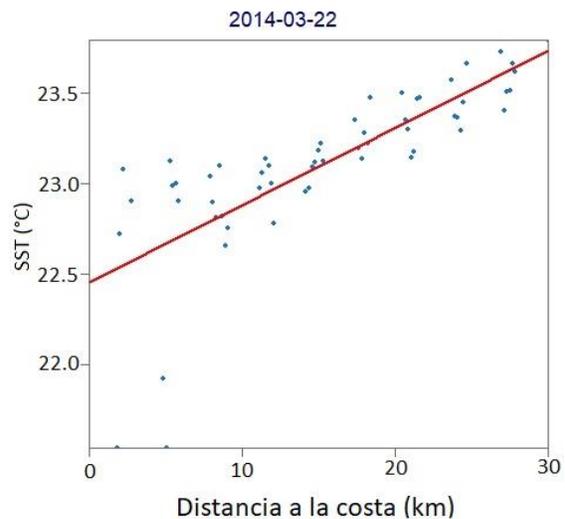


Figura 2.1. Ejemplo de SST vs. distancia a la costa en un transecto de 110 x 30 km. Tendencia observada mediante regresión local no-paramétrica (LOESS) (Lara Cera, 2020).

Figura 2.2. Ejemplo de regresión lineal de SST en función de distancia a la costa en los primeros 30 km (Lara Cera, 2020)



Además de la diferencia en las frecuencias de las series, es necesario considerar también las diferencias de escala espacial en la adquisición de datos. Por un lado, DO y SST fueron registrados en un solo sitio (boya de recalada), la serie CUI fue calculada con datos de viento medidos satelitalmente con un tamaño de píxel de ~25 km ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), cuyo píxel más cercano se encuentra a ~10 km de la boya de recalada (fig. 1.8), y finalmente, SSTGrad fue calculado con datos de SST obtenidos del reanálisis Copernicus cuyo tamaño de píxel es de ~8 km ($1/12^\circ$), en un transecto perpendicular a la costa de 30 km x 30 km que contiene tanto a la boya de recalada como el píxel de viento utilizado par CUI.

A pesar de las diferencias espaciales en la adquisición de datos, particularmente entre CUI y SSTGrad, se consideró válido utilizar ambas series debido a que las escalas de variabilidad espacial del viento y las surgencias costeras son mayores que el tamaño de píxel empleado.

Tabla 1. Resumen de conjuntos de datos compilados.

Nombre	Tipo	VARIABLES	Intervalo temporal	Frecuencia de medición
Boya de recalada	Serie de tiempo <i>in situ</i>	DO y SST	2014-01-29 – 2016-09-23	30 min
Campañas oceanográficas MAZ I y II	Perfil con CTD (cercano a costa de Mazatlán)	Temperatura y DO	2015-04-28 y 2016-03-31	-
CUI	Serie de tiempo con datos de reanálisis	Índice de surgencia costera por viento	2014-01-01 - 2016-12-31	Original: 6 horas. Interpolado: 1 hora.
Radiación	Serie de tiempo Medición <i>in situ</i>	Radiación solar	2014-05-23 – 2016-12-31	1 hora
Mareógrafo	Serie de tiempo <i>in situ</i>	Nivel del mar (SSH)	2014-01-01 – 2016-12-31	30 minutos
SSTGrad	Serie de tiempo con datos de reanálisis	Gradiente de SST en 30 km perpendicular a la costa	2014-01-01 – 2016-12-31	Original: 1 día. Interpolado 1 hora

2.3 Análisis estadístico

Se acotó el periodo de estudio a la disponibilidad de la serie de oxígeno en la boya de recalada, del 29 de enero de 2014 al 23 de septiembre de 2016. Además, esta serie cuenta con huecos entre 2014-08-21 y 2014-11-29, entre 2015-07-22 y 2015-10-09, y entre 2016-04-11 y 2016-06-09.

Para el análisis de las series de tiempo se utilizaron técnicas de estadística bivariada (correlaciones), estadística multivariada (análisis de factores) y análisis de frecuencias (cross-wavelets). Los análisis y gráficas se realizaron mediante el software estadístico R (R Core Team, 2019) y los scripts implementados se encuentran en el anexo 3 y en el repositorio: https://github.com/Carlos-HB/Tesis_Maestria.git. A continuación, se describe cada análisis implementado.

2.3.1. Identificación de eventos de hipoxia

Los eventos de hipoxia ($DO < 2 \text{ mg L}^{-1}$) fueron identificados por medio de un análisis visual las series de tiempo de DO. Los eventos se etiquetaron desde el momento en que comenzó la disminución de la concentración de oxígeno hasta su posterior recuperación de los niveles previos (fig. 2.3). También se identificaron y etiquetaron 3 periodos neutros, en los que no se presentaron periodos de hipoxia.

Para conocer la distribución de las variables durante cada evento, se graficaron sus histogramas y se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para muestras con $n < 5000$ y Lilliefors para $n > 5000$ (Razali *et al.*, 2011). A partir del resultado de estas pruebas se eligió el método para estimar las correlaciones, Pearson o Spearman, según la distribución de cada evento.

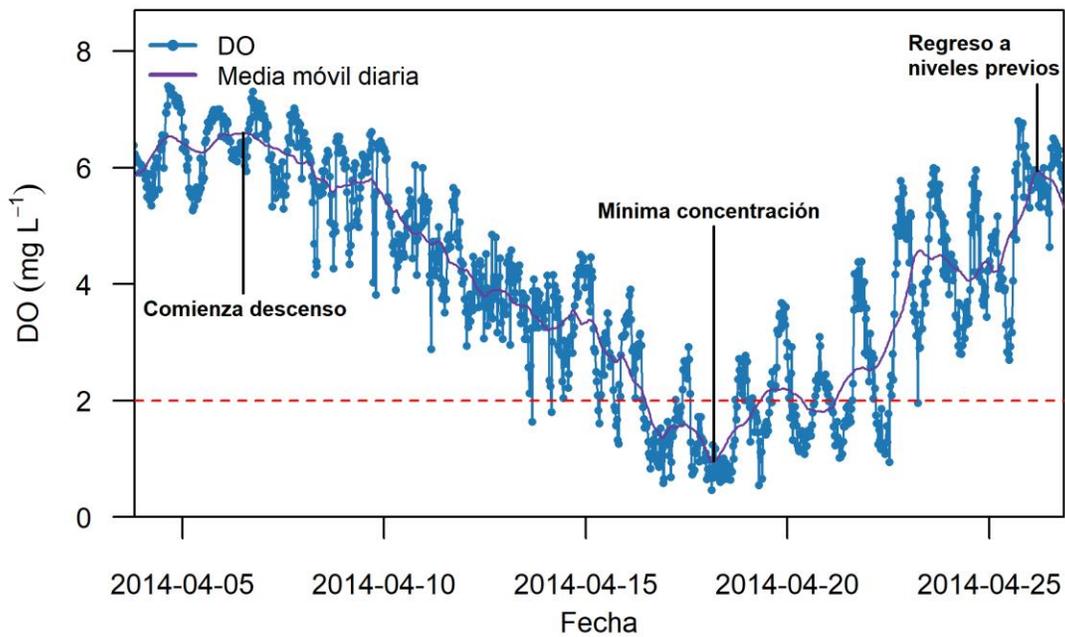


Figura 2.3. Ejemplo de etiquetado de un evento de hipoxia. El evento comienza desde la disminución de los niveles medios de DO, hasta llegar a los niveles por debajo de los niveles de hipoxia (línea punteada roja), y su posterior recuperación hasta los niveles previos de DO.

2.3.2. Análisis bivariado

Se utilizaron análisis estadísticos bivariados para analizar la relación del oxígeno con cada una de las demás variables. Para cada evento, se graficaron en paralelo las series de tiempo de DO, SST, CUI y SSTGrad y se estimaron los coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la serie de DO y las demás series.

Para identificar los eventos en los que la disminución del DO está relacionada con la ocurrencia de surgencias, se espera que el DO mantenga una correlación lineal positiva y significativa con la SST ($r_{DO-SST} > 0$), es decir que las disminuciones de DO correspondan con descensos de la SST. Por otro lado, se espera que el DO muestre una correlación negativa con los índices de surgencia ($r_{DO-CUI} < 0$, $r_{DO-SST} < 0$), es decir, que la disminución de DO corresponda con aumentos en dichos índices. El nivel de significancia aceptado es de $p\text{-value} < 0.05$.

Algunas de las correlaciones presentaron un desfase temporal. Esto debido a que el desarrollo y manifestación de una surgencia puede tomar tiempo después de que comienzan a soplar los viento generadores de esta. Para identificar estos posibles desfases se utilizó la correlación cruzada. Esta técnica permite estimar la correlación entre dos series mientras se desfasa una con respecto a la otra y así conocer cuál es el desfase en el que la correlación es mayor (Venables & Ripley 2013).

2.3.3. Análisis multivariado

Como parte del análisis multivariado se utilizó el análisis de factores (FA, por sus siglas en inglés). Este tipo de análisis puede ser utilizado de manera exploratoria para identificar o confirmar procesos (factores) subyacentes en una matriz de datos, a partir de la estructura de covarianza o correlación entre las variables (Schuenemeyer y Drew, 2011). En este caso se utilizó el FA como técnica exploratoria para identificar la presencia o ausencia de la surgencia costera durante los eventos de hipoxia previamente seleccionados. Se seleccionaron 2 factores para ejecutar el análisis y se crearon los gráficos de dispersión entre ambos factores.

2.3.4. Análisis de frecuencias

Las series de tiempo pueden ser expresadas en el dominio del tiempo o en el dominio de frecuencias. El dominio de frecuencias permite identificar las principales señales que forman la variabilidad observada en las series de tiempo. La transformada continua de wavelets (CWT) es un análisis que permite representar las frecuencias de una serie a lo largo del tiempo, lo que permite analizar las componentes en el dominio de tiempo y de frecuencia simultáneamente (Schuenemeyer y Drew, 2011). Este análisis es particularmente útil para analizar series de tiempo periódicas con cambios de frecuencia a lo largo del tiempo y para localizar periodicidades intermitentes (Rösch y Schmidbauer, 2016).

El análisis de wavelets también puede utilizarse para el análisis de dos series de tiempo mediante transformada continua de *cross-wavelet (XWT)*, la cual se construye a partir de las transformadas continuas de wavelets (CWT) de cada serie. Este análisis muestra la potencia de señales en común en ambas series y la fase entre estas señales, a lo largo del espacio de frecuencias y tiempo. Esto es útil para identificar periodos de tiempo en los que ambas series responden a forzamientos similares (señales con mismo periodo) y comprobar si esto ocurre al mismo tiempo o existe un desfase. (Grinsted *et al.*, 2004). En este estudio, se utilizó el análisis de cross-wavelet para estudiar la consistencia entre la serie de DO con cada una de las demás variables (SST, CUI y SSTGrad).

3. Resultados

3.1 Oxígeno disuelto en la Bahía de Mazatlán

Se obtuvo una serie *in situ* de DO con observaciones cada 30 minutos entre el 29 de enero del 2014 y el 23 de septiembre del 2016, con un total de 35 067 datos, que corresponden a 731 días de registro (fig. 3.1). La prueba de Shapiro-Wilk mostró que ni las series de tiempo completas, ni cada evento por separado siguieron una distribución normal ($p\text{-val} < 0.05$), por lo que se utilizaron métodos no paramétricos. La mediana de DO durante todo el registro fue 6.01 mg L^{-1} , el valor mínimo fue $< 0.06 \text{ mg L}^{-1}$ (anoxia), registrado el 20 de octubre del 2015, y el valor máximo fue 9.01 mg L^{-1} , registrado el 24 de marzo del 2014 (fig. 3.2). En el boxplot de la distribución total se puede apreciar que los registros de hipoxia son clasificados como outliers, es decir están más alejados que 1.5 veces el rango intercuartílico desde la mediana. En la figura 3.3 se muestra la distribución trimestral del DO durante el periodo de registro, mediante gráficos de Tukey.

En la figura 3.1 se puede observar la ocurrencia de caídas en la concentración de DO, que en algunos casos llegan hasta los niveles de hipoxia ($< 2 \text{ mg L}^{-1}$) (Libes, 2011; Hofmann *et al.*, 2011). En total, se registraron 1511 datos bajo el umbral de hipoxia, que equivalen al 4.3% del total de observaciones y a 759 horas de duración en conjunto. Se catalogaron 12 eventos de hipoxia de diferente duración, estacionalidad y comportamiento (tabla 2). En este trabajo se describen 4 casos característicos y en el Anexo 1 se muestran los gráficos de todos los eventos registrados.

En la figura 3.4 se muestra un evento de corta duración (menor a un día), que se caracteriza por una caída abrupta en la concentración de DO seguido de una recuperación casi inmediata. Durante todo el registro se identificaron 2 eventos de este tipo.

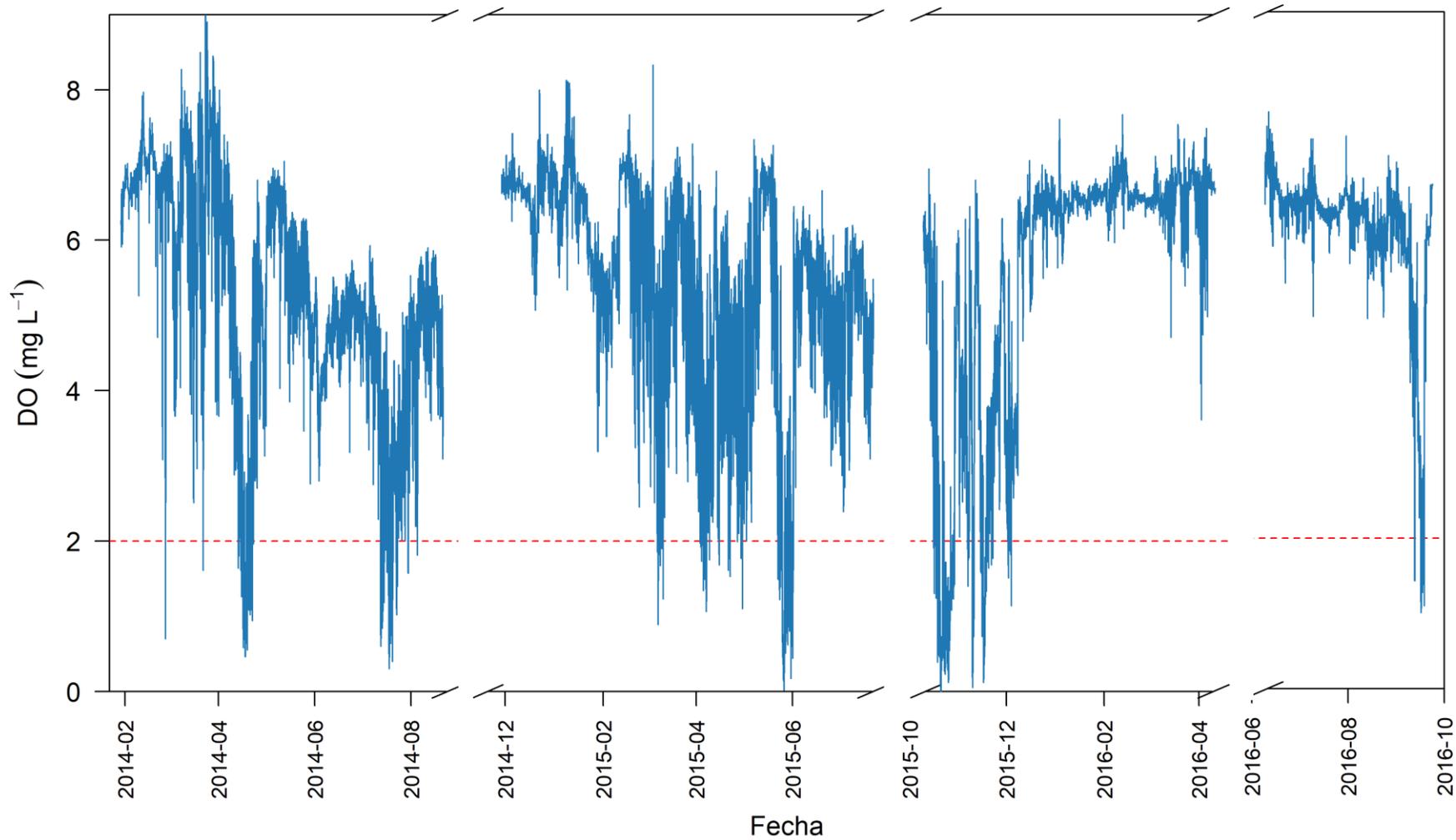


Figura 3.1. Serie de oxígeno disuelto (DO) registrada a ~5 m de profundidad en la bahía de Mazatlán, entre el 29 de enero de 2014 y 23 de septiembre de 2016.

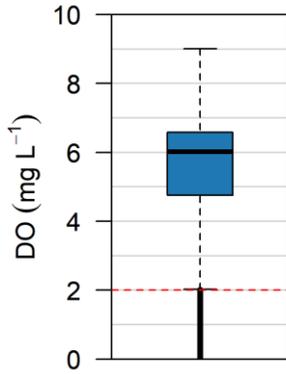


Figura 3.2. Distribución del DO en Mazatlán (2014-01-29 al 2016-09-23).

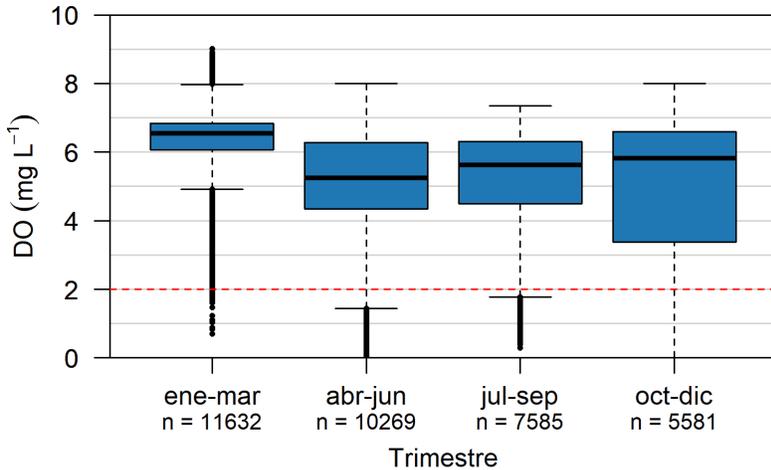


Figura 3.3. Distribución trimestral de DO en Mazatlán. Debido a la presencia de huecos en la serie original cada trimestre presenta diferente cantidad de datos (n).

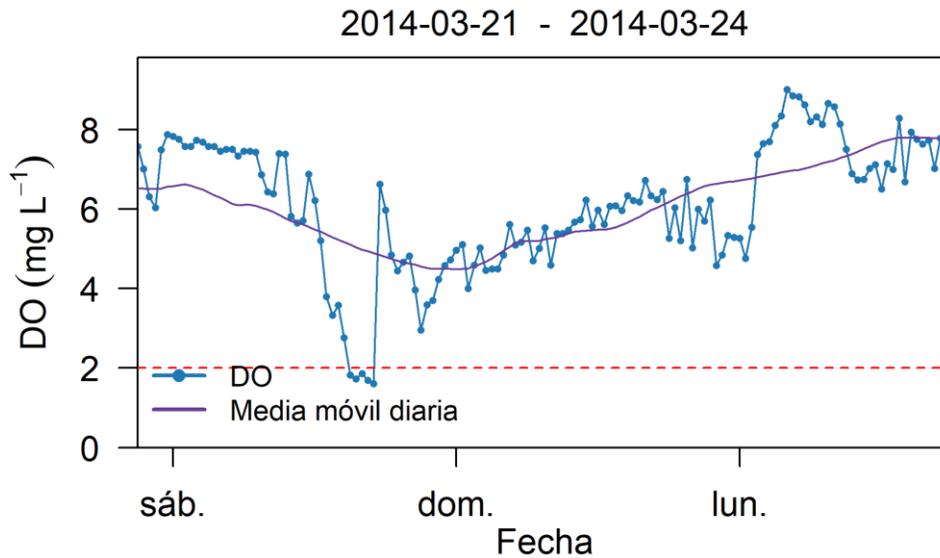


Figura 3.4. Ejemplo de evento de hipoxia corto, el 21 de marzo de 2014. Se trata de una caída rápida de la concentración de DO, que alcanza un valor mínimo de 1.61 mg L^{-1} , seguida de una recuperación gradual. En este caso la media móvil diaria no alcanza los niveles de hipoxia.

En la figura 3.5 se muestra un evento de larga duración (de más de un día), en el que se aprecia que el descenso de DO está superpuesto a oscilaciones de alta frecuencia y amplitud, se llega a valores mínimos de DO y permanece oscilando en el umbral de hipoxia durante algunos días hasta que finalmente regresa a los valores

medios después de un aumento gradual del DO. En total, el periodo seleccionado dura 10 días.

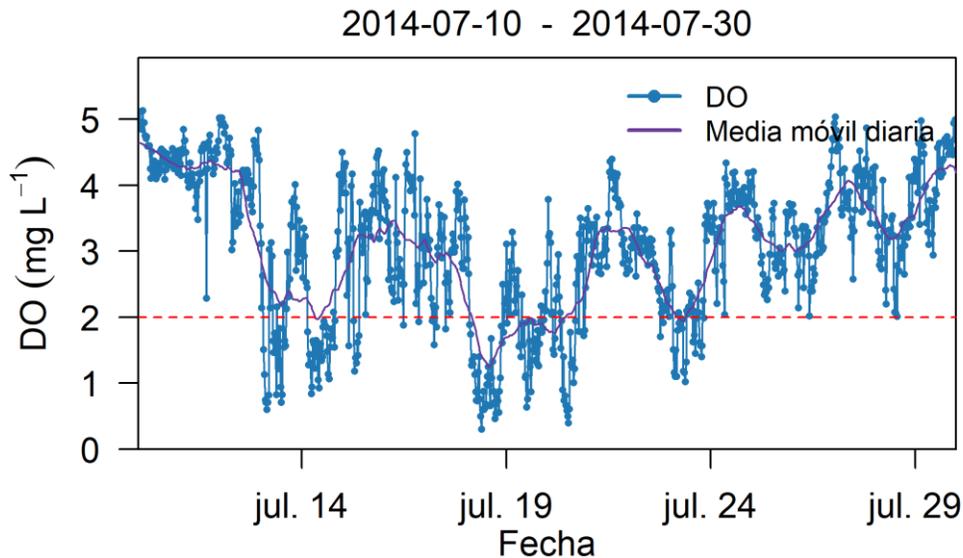


Figura 3.5. Ejemplo de evento de hipoxia largo, entre el 10 y 30 de junio de 2014. Se registran caídas abruptas en el DO, con duración de la hipoxia de hasta 24 horas. La concentración de DO durante este evento alcanza valores cercanos a la anoxia (0.3 mg L⁻¹.)

En la figura 3.6 se muestra un evento de larga duración, que se caracteriza por una disminución en los valores medios de DO durante varios días, superpuesta a oscilaciones diurnas de alta amplitud, de las cuales algunas de ellas alcanzan el umbral de hipoxia.

En la figura 3.7 se muestra un periodo neutro, de aproximadamente dos meses (2016-01-08 al 2016-03-18) donde no se presenta ningún evento de hipoxia y cuya variación de DO depende únicamente de la variabilidad diurna.

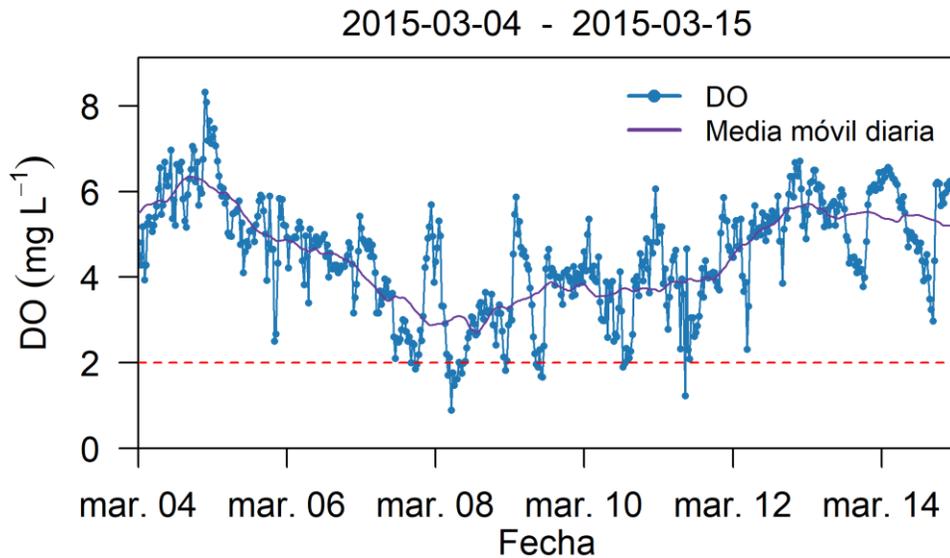


Figura 3.6. Ejemplo de evento de hipoxia largo (11 días) de disminución gradual del DO superpuesto a variaciones de alta amplitud que eventualmente llegan a la hipoxia, pero únicamente durante algunas horas. La concentración mínima es de 0.89 mg L^{-1} .

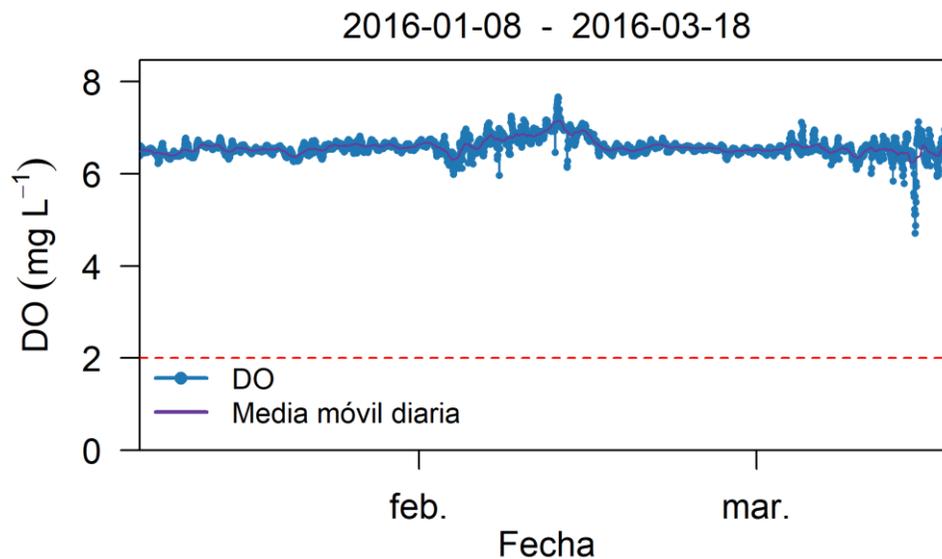


Figura 3.7. Ejemplo de periodo neutro, de más de 2 meses de duración sin eventos de hipoxia, en el que únicamente se aprecian pequeñas variaciones del DO, de entre 0.5 y 1.0 mg L^{-1} , que corresponde con la variabilidad diaria debida a la relación entre producción primaria y respiración.

En los perfiles oceanográficos de oxígeno y temperatura registrados en las campañas MAZ I (2015-04-28) y MAZ II (2016-03-31), se observa que la termoclina y la oxiclina se ubican a partir de ~ 30 m. La hipoxia se presenta a partir de 50 m de

profundidad, mientras que a partir de 100 m la concentración de DO es prácticamente nula (fig. 3.8).

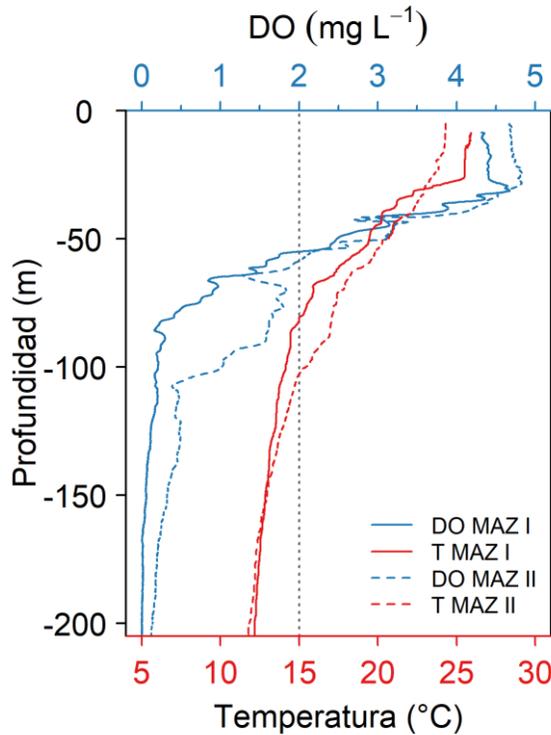


Figura 3.8. Perfiles verticales de DO y temperatura registrados en una estación cercana a la bahía de Mazatlán durante las campañas MAZ I (2015-04-28) y MAZ II (2016-03-31). La línea punteada vertical indica el umbral de hipoxia, que en ambas campañas se alcanza aproximadamente a 50 metros de profundidad.

3.2 Caracterización de las surgencias

Dada la disposición geográfica del área de estudio, los vientos generadores de surgencias costeras son aquellos que fluyen entre el noroeste y el norte. Los datos indican que este tipo de vientos se presentan con mayor frecuencia e intensidad durante otoño e invierno. Durante la primavera los vientos fluyen principalmente desde el oeste y noroeste, aunque con menor intensidad que en el invierno. Durante el verano los vientos dominantes son más débiles que el resto del año y fluyen principalmente del oeste o sureste, estos últimos En contraste, los vientos dominantes durante el verano fluyen desde el oeste y suroeste, posiblemente asociados a los canales de baja y alta presión relacionados con la temporada de ciclones tropicales del Pacífico (fig. 3.9).

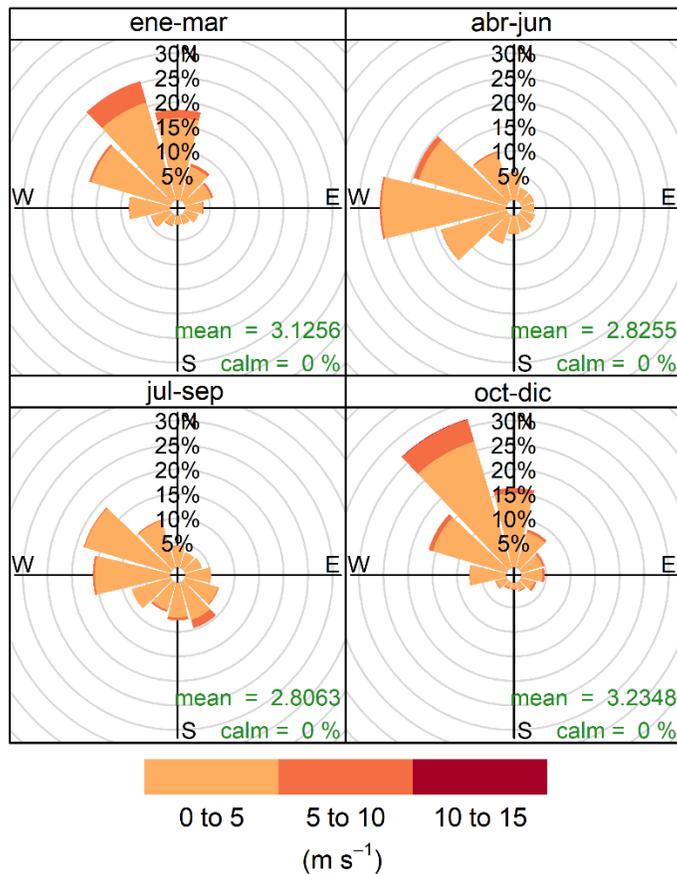


Figura 3.9. Frecuencia de dirección del viento e intensidad estacional. Los vientos con mayor intensidad se presentan entre otoño e invierno y fluyen del noroeste, mientras que los vientos más débiles se presentan durante el verano y fluyen del oeste. En primavera los vientos más persistentes fluyen del oeste. La mayor parte del tiempo los vientos son menores a 5 m s⁻¹ (18 km h⁻¹).

Frecuencia de dirección del viento (%)

3.2.1. Índice de surgencia costera

Con los datos de viento se calculó el CUI (fig. 3.10), que presenta un valor máximo de 239.7 m³ 100 m⁻¹ s⁻¹ el 27 de diciembre de 2015, un valor mínimo de -276.7 m³ 100 m⁻¹ s⁻¹ el 4 de octubre de 2015, y una mediana de 47.2 m³ 100 m⁻¹ s⁻¹ (fig. 3.11). La serie de CUI es en su mayoría positiva, con el rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés) positivo durante casi todo el año, con excepción de los meses entre julio y septiembre, cuando su distribución toma valores más negativos (fig. 3.12).

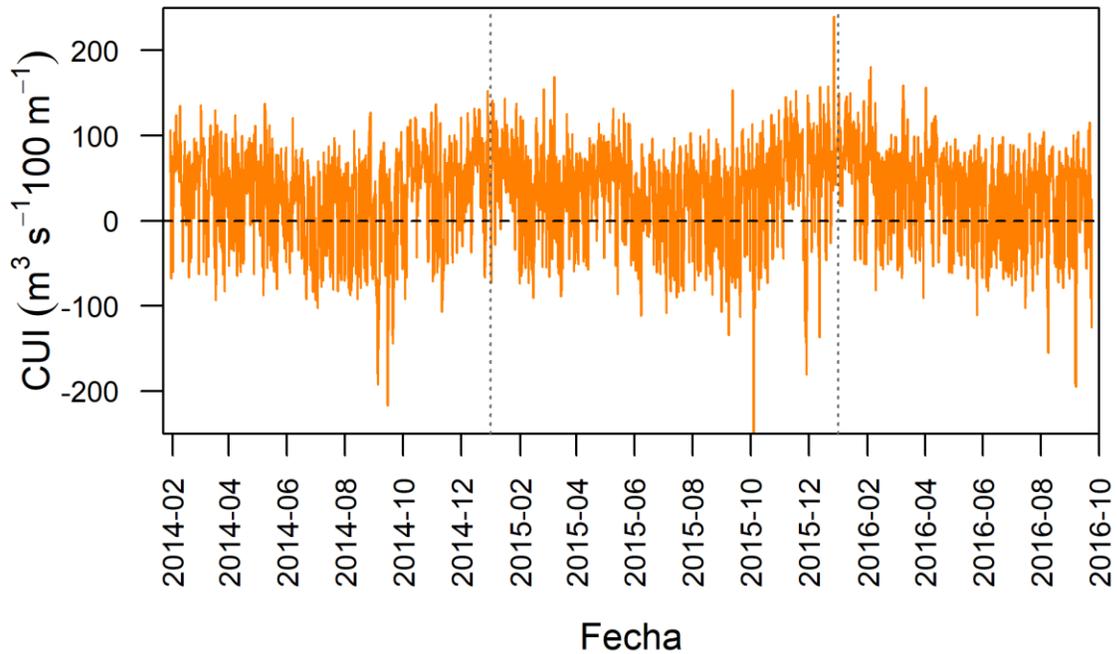


Figura 3.10. Serie de tiempo del índice de surgencia costera (CUI) de la bahía de Mazatlán, estimada con datos de viento de Copernicus, entre el 29 de enero del 2014 y el 23 de septiembre de 2016. Las líneas punteadas verticales señalan el inicio de cada año (2015 y 2016)

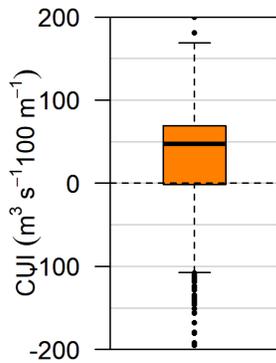


Figura 3.11. Distribución del CUI en Mazatlán. El IQR se encuentra entre -1.4 y $68.9 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

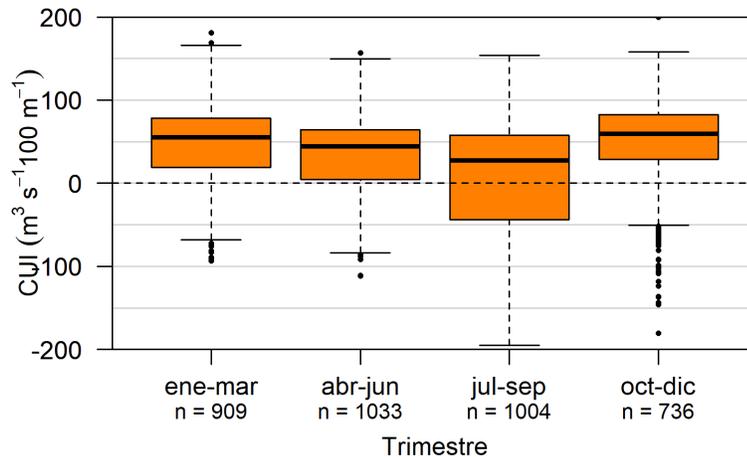


Figura 3.12. Distribución trimestral del CUI en Mazatlán. El IQR es positivo durante todos los trimestres, excepto entre julio y septiembre. La mediana es mayor entre octubre y marzo, y las máximas se distribuyen aproximadamente igual durante todo el año, alrededor de $150 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

3.2.2. Gradiente de temperatura superficial

Se incorporó un índice de surgencia por el gradiente de SST perpendicular a la costa (SSTGrad; fig. 3.13) (Lara Cera, 2020). Este índice se encuentra cercano a cero más de la mitad del tiempo (i.e. IQR entre -0.02 y 0.02), es decir no hay un gradiente evidente de SST durante la mayor parte del tiempo, aunque presenta un sesgo de asimetría positiva (fig. 3.14). El valor más alto fue $0.07 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$, registrado el 18 de enero de 2015. El SSTGrad presenta un comportamiento trimestral similar al CUI, con IQR mayor que cero durante todos los trimestres, con excepción del comprendido entre julio y septiembre, y los mayores valores se presentan entre enero y marzo (fig. 3.15).

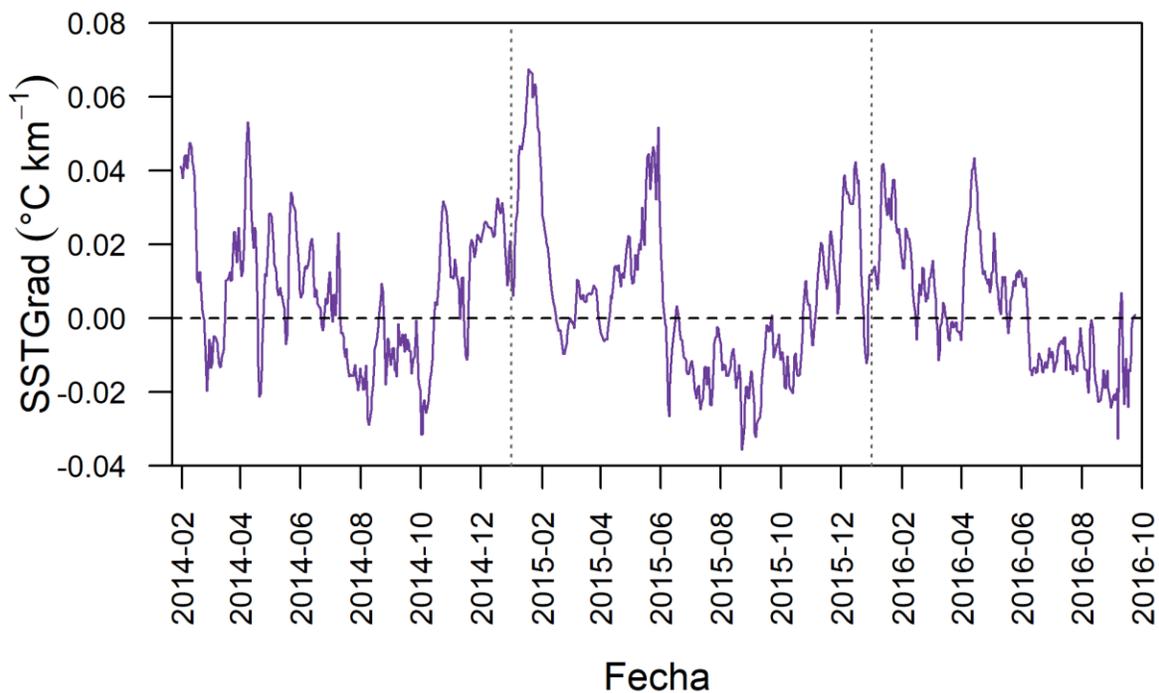


Figura 3.13. Serie de gradiente de SST (SSTGrad) perpendicular a la costa de Mazatlán (Lara Cera, 2020). Los periodos con los valores más altos podrían indicar la ocurrencia de surgencia. Las líneas punteadas verticales señalan el inicio de cada año (2015 y 2016).

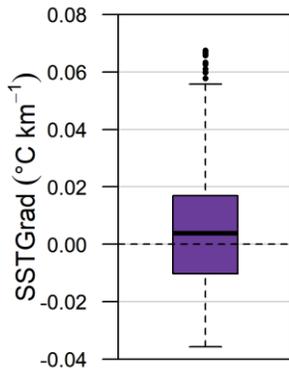


Figura 3.14. Distribución del gradiente de SST en Mazatlán. La mediana es próxima a cero ($0.004 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$).

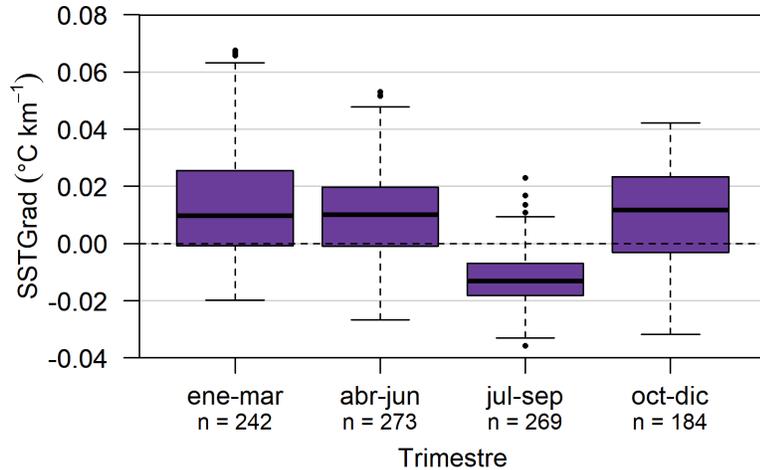


Figura 3.15. Distribución trimestral del gradiente de SST en Mazatlán. El gradiente es positivo la mayor parte del tiempo entre octubre y junio. Los valores más altos se encuentran entre enero y marzo.

3.3 Relación entre eventos de hipoxia y surgencia

La relación entre los eventos de hipoxia se exploró mediante tres procedimientos: i) análisis bivariados entre el DO y las series de SST, SSTGrad y CUI, ii) análisis de factores entre estas variables más el nivel del mar (SLH), y iii) análisis de frecuencias mediante cross-wavelet. En la tabla 2 se muestra un resumen de los criterios establecidos para confirmar la relación los eventos de hipoxia y surgencias costeras. Previo a cada análisis bivariado, se contrastó el supuesto de normalidad para elegir el método adecuado. En ninguno de los eventos analizados se confirmó una distribución normal para todas las series, por lo que se utilizó correlación no paramétrica de Spearman para todos los casos. En la tabla 3 se reportan las correlaciones entre las series durante los periodos de hipoxia.

Tabla 2. Resumen de criterios establecidos para confirmar relación hipoxia – surgencia. Las flechas hacia arriba (↑) representan un aumento de la serie, las flechas hacia abajo (↓) representan disminución.

	SST ↓	CUI ↑	SSTGrad ↑
i) Correlación con DO ↓	Positiva	Negativa (posible desfase negativo)	Negativa
ii) Análisis de Factores: Ubicación respecto a DO	Cercanos / agrupados sobre mismo factor	Opuestos / lejanos	Opuestos / lejanos
iii) Cross-wavelets con DO	Correlación significativa de las frecuencias (en fase)	Correlación significativa de las frecuencias (posible desfase angular)	Correlación significativa de las frecuencias (posible desfase angular)

Tabla 3. Resumen de eventos de hipoxia. Se muestran los resultados de la correlación de Spearman y el desfase de máxima correlación. Un desfase negativo indica que la serie 2 (SST, CUI o SSTGrad) antecede a la serie 1 (DO), y el desfase positivo indica que la serie 1 (DO) antecede a la serie 2 (SST, CUI o SSTGrad). Los códigos de significancia son: *: p-value < 0.05, **: p-value < 0.01, ***: p-value < 0.001.

Periodo	Mínimo DO (mg L ⁻¹)	Duración hipoxia	Correlación DO – SST (ρ , desfase en horas)	Correlación DO – CUI (ρ , desfase en horas)	Correlación DO – SSTGrad (ρ , desfase en horas)
2014-02-24 a 2014-02-28 (4 días)	0.70	~5 horas	0.33 **, 0	-0.60 ***, -13	0.21 *, 0
2014-03-21 a 2014-03-24 (3 días)	1.61	~3 horas	0.79 ***, 0	0.80 ***, -12	0.77 ***, 0
2014-04-05 a 2014-04-26 (21 días)	0.46	8 mínimos, de entre 1 y ~27 horas	0.14 **, 0	-0.11 ***, 0	0.66 ***, 0
2014-07-10 a 2014-07-30 (20 días)	0.30	6 mínimos de entre 4 y 18 horas.	-0.24 ***, 14	-0.40 ***, 15	0.09 *, 0
2015-03-04 a 2015-03-15 (11 días)	0.89	5 mínimos de entre 3 y 6 horas, separados por 1 día.	0.74 ***, 0	-0.33 ***, -14	-0.59 ***, 20
2015-04-01 a 2015-05-12 (41 días)	1.06	15 mínimos de entre 30 minutos y 6 horas	0.23 ***, 0	0.23 ***, -3	0.07 *, 0
2015-05-14 a 2015-06-07 (24 días)	0.02	~34 horas	-0.25 ***, 0	0.15 ***, 0	-0.28 ***, 0

2015-10-16 a 2015-10-31 (15 días)	0.00	2 mínimos de 5 días	0.36 ^{***} , 0	-0.25 ^{***} , -12	-0.26 ^{***} , 0
2015-11-05 a 2015-11-11 (7 días)	0.05	31 horas	0.33 ^{***} , 20	0.2 ^{**} , -3	-0.40 ^{***} , 20
2015-11-12 a 2015-11-23 (11 días)	0.12	24 horas	0.30 ^{***} , 24	-0.50 ^{***} , 24	0.59 ^{***} , -24
2015-11-29 a 2015-12-08 (9 días)	1.14	2 mínimos de 6 horas	0.31 ^{***} , 0	-0.18 ^{**} , -12	-0.46 ^{***} , 0
2016-09-09 a 2016-09-21 (12 días)	1.01	20 horas	0.62 ^{***} , -24	0.73 ^{***} , 24	0.70 ^{***} , 0

3.3.1. Eventos con relación surgencia–hipoxia confirmada

Los eventos de hipoxia que estuvieron relacionados con surgencias se pudieron identificar a partir de la alta correlación entre el DO y la SST, la cual debe presentarse sin desfase, lo que indica que la señal de agua de fondo (más fría y con menos oxígeno) se manifiesta en ambas series al mismo tiempo. Por ejemplo, durante el evento entre el 4 y 15 de marzo del 2015, DO y SST presentan un comportamiento similar, con oscilaciones que ocurren al mismo tiempo en ambas series, superpuestas a un descenso gradual (fig. 3.16). La similitud entre ambas series se comprueba mediante la correlación de Spearman ($\rho = 0.74$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.17), cuyo máximo valor se alcanza sin desfase (fig. 3.18).

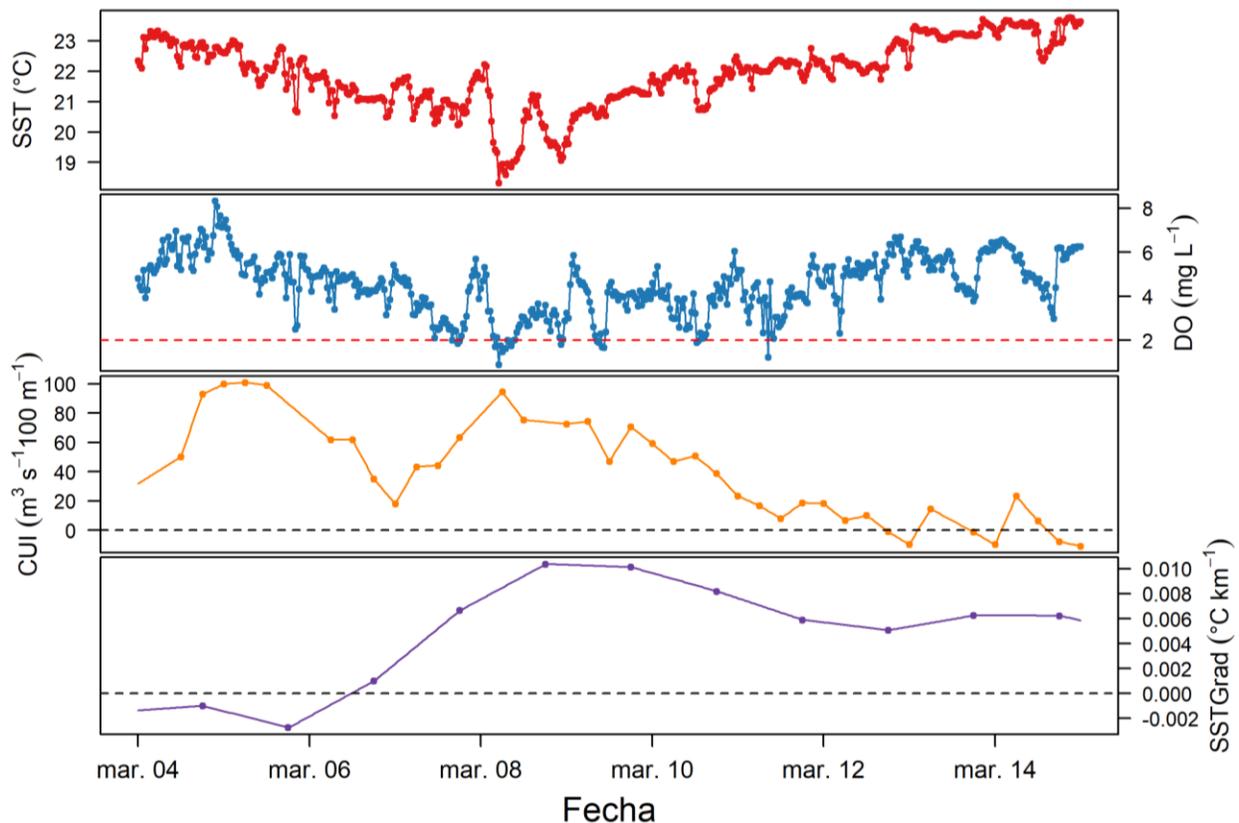


Figura 3.16. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento entre el 04 y 15 de marzo de 2015. Se aprecia que DO y SST presentan un descenso y oscilaciones similares, mientras que CUI es positivo, con dos máximos de $\sim 100 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. SSTGrad pasa de valores negativos a positivos, aunque con poca intensidad ($\sim 0.01 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$).

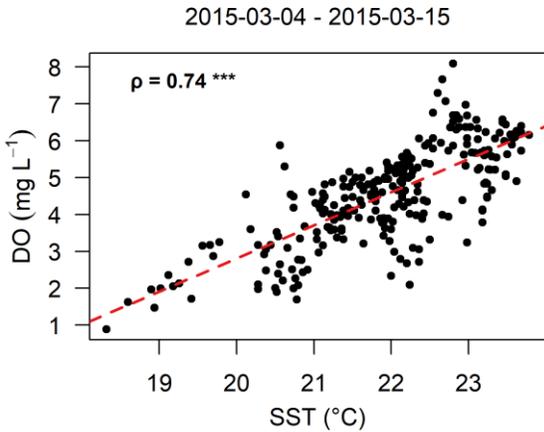


Figura 3.17. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y SST durante el evento del 04 a 15 de marzo de 2015. Durante este evento la variación de la SST tiene un rango de ~5.5 °C, de 18.3 a 23.8 °C.

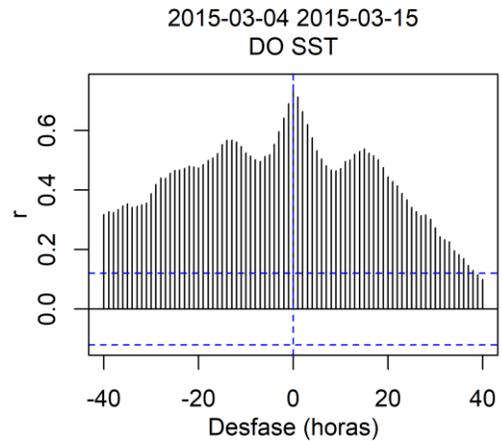


Figura 3.18. Correlación cruzada entre DO y SST durante el evento del 04 al 15 de marzo de 2015. Se aprecia que la mayor correlación entre las series ocurre sin desfase.

La relación entre los eventos de hipoxia y surgencia también se pudo comprobar mediante la anti-correlación entre la serie de DO y las series CUI. En la figura 3.16 se puede observar que mientras el DO y la SST disminuyen, CUI y SSTGrad aumentan. Durante el evento registrado entre el 04 y 15 de marzo de 2015 la correlación entre el DO y CUI es nula ($\rho = -0.04$, $p\text{-value} = 0.5$). Sin embargo, mediante correlación cruzada se observa los máximos valores de correlación se encuentran con desfases negativos (CUI antecede a DO) de -58, -31 y -12 horas (figs. 3.19 y 3.20).

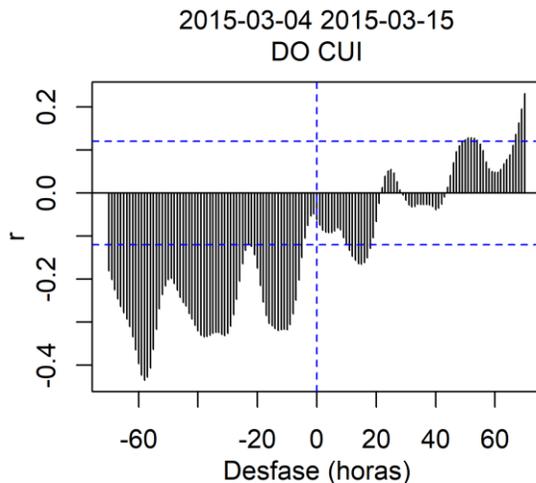
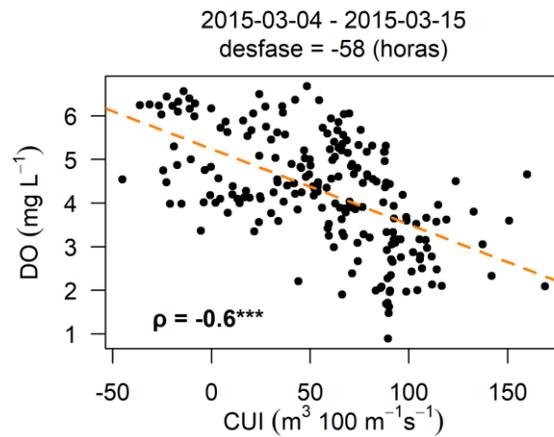


Figura 3.19. Correlación cruzada entre DO y CUI durante el evento del 04 al 15 de marzo de 2015. Se observa un comportamiento oscilatorio, con máximos en las correlaciones alcanzados con desfases de -58, -31 y -12 horas.

Figura 3.20. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y CUI durante el evento 04 al 15 de marzo de 2015, con desfase negativo de aproximadamente 2 días y medio. La correlación es negativa fuerte: $\rho = -0.60$, $p\text{-value} < 0.05$.



Respecto a la relación entre DO y el SSTGrad, durante el evento del 04 al 15 de marzo del 2015, se obtuvo una correlación negativa fuerte y significativa ($\rho = -0.51$, $p\text{-value} < 0.05$), que aumenta a $\rho = -0.59$ con un desfase positivo de 20 horas (DO antecede a SSTGrad) (figs. 3.21 y 3.22).

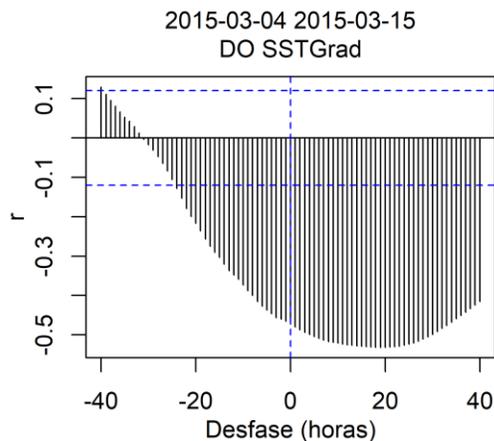


Figura 3.21. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad durante el evento del 04 al 15 de marzo de 2015. La máxima correlación se alcanza con un desfase de alrededor de 20 horas (DO antecede a SSTGrad).

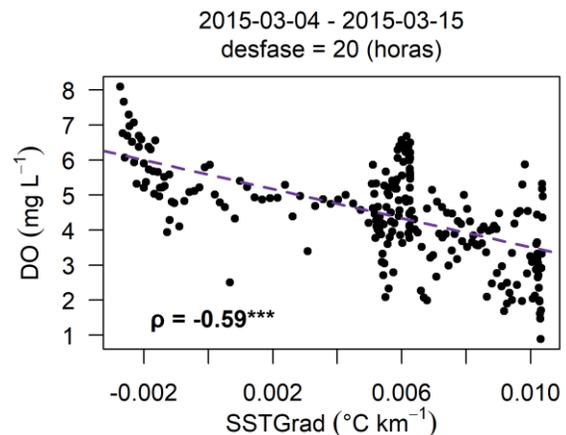


Figura 3.22. Gráfico de dispersión y correlación de Spearman entre DO y SSTGrad durante el evento 04 al 15 de marzo de 2015, con desfase de 6 horas entre las series. La correlación es negativa fuerte: $\rho = -0.59$, $p\text{-value} < 0.05$.

A partir del análisis de factores se puede analizar la relación entre todas las series. En la figura 3.23 se muestra el análisis de factores para las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y nivel del mar (SLH), durante el periodo del 04 al 15 de marzo de 2015. Previo a ejecutar este análisis, se corrigió el desfase de 3 días CUI y SSTGrad. Se calcularon 2 factores, que explican el 32 y

24% de la variabilidad, respectivamente. En este análisis, DO y SST se agrupan en el eje positivo del factor 1, mientras que el SSTGrad y CUI se encuentran opuestos sobre el eje negativo del mismo factor. El factor 2 agrupa a CUI y SSTGrad con pesos fuertes sobre el eje positivo, mientras que SST y DO se encuentran opuestos con pesos débiles sobre el eje negativo del factor 2. Los pesos de SLH son prácticamente nulos para ambos factores y se encuentra muy cercano al cero en ambos ejes, lo que sugiere poca relación con las demás variables.

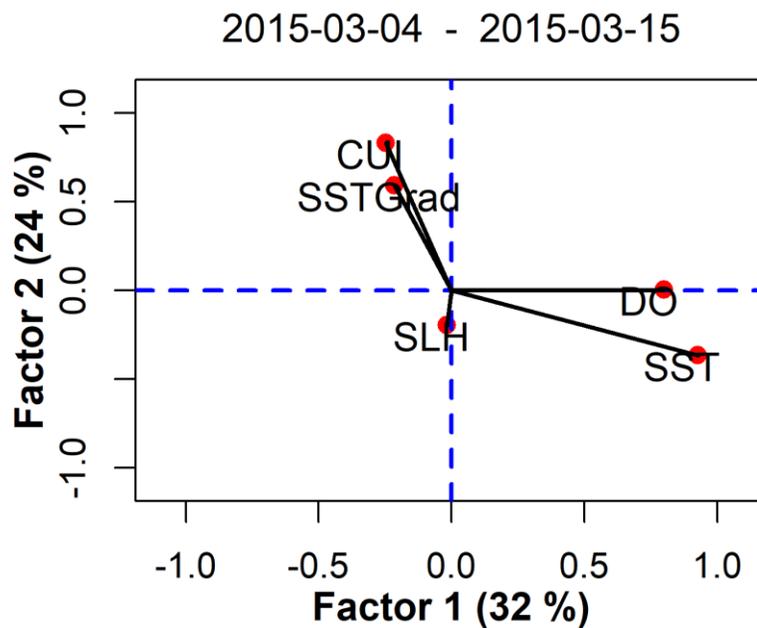


Figura 3.23. Análisis de factores de las series durante el evento de hipoxia del 04 al 15 de marzo.

3.3.2. Eventos de relación surgencia–hipoxia descartada

En 6 de los 12 eventos registrados se descartó su relación con surgencias mediante las correlaciones entre las series, que son opuestas a las esperadas: correlación nula o negativa entre DO y SST, y correlación baja o positiva entre DO y CUI o SSTGrad.

En la figura 3.24 se muestran las series durante el evento de hipoxia registrado entre el 10 y 30 de julio de 2014. Durante este evento se registran 8 caídas abruptas en los valores de DO, que permanecen en el umbral de hipoxia durante 24 horas, con un rango de variación de hasta 5 unidades (0.5 a 5.1 mg L⁻¹). Este comportamiento no se observa en la serie de SST, la cual

no presenta disminución y el rango de variación es pequeño (30 - 32 °C). La correlación entre ambas series es nula ($\rho = -0.06$, p-value = 0.19), incluso la correlación más grande es negativa y se encuentra desfasada 14 horas ($\rho = -0.24$, p-value < 0.05) (fig. 3.25).

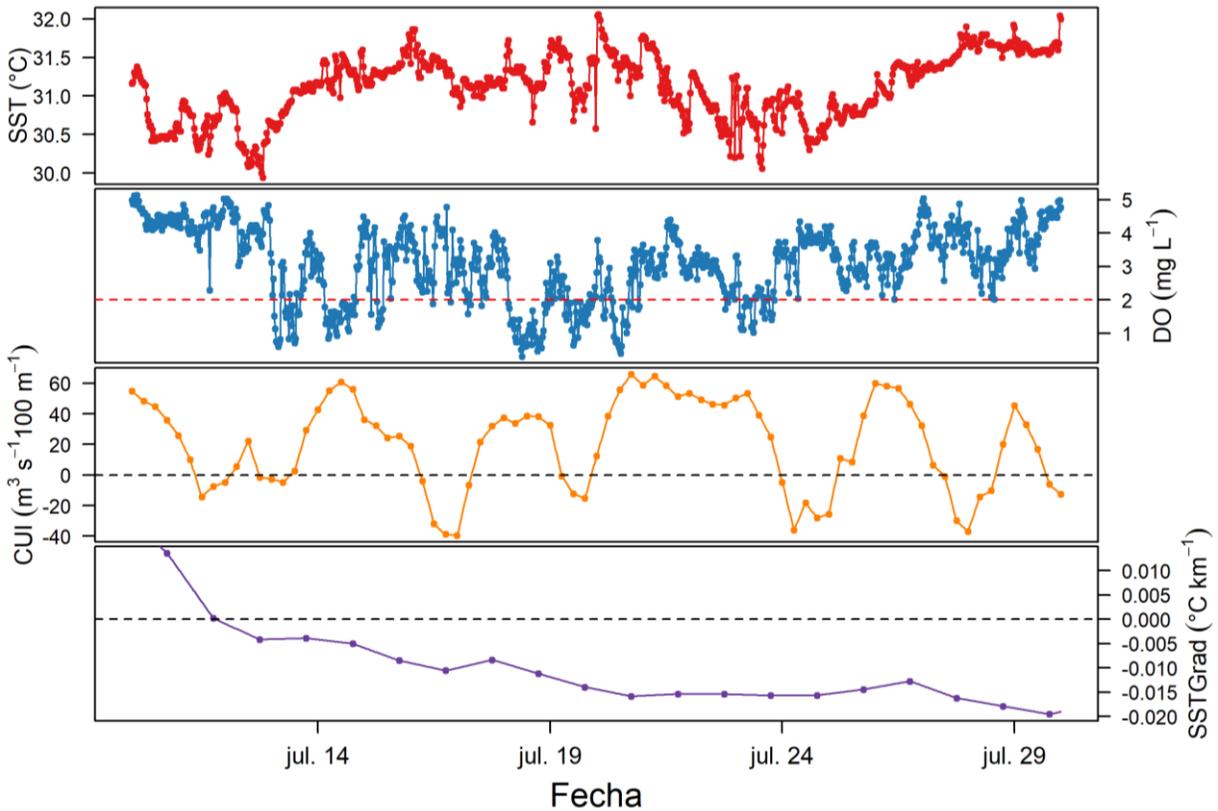


Figura 3.24. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento de descenso del DO e hipoxia entre el 10 y 30 de julio de 2014. La SST registra una variación entre 30 y 32 °C. DO presenta una serie de caídas abruptas de hasta 5 mg L⁻¹ (de 5.1 a 0.5 mg L⁻¹), que permanecen en hipoxia hasta durante 24 horas. La serie de CUI presenta una serie de máximos de hasta 60 m³ 100 m⁻¹ s⁻¹, sostenidos hasta por 3 días consecutivos. Respecto al SSTGrad, este permanece negativo la mayor parte del tiempo.

Durante el mismo evento (10 al 30 de julio de 2014), la serie CUI muestra una serie de máximos sostenidos, que sin embargo no coinciden con los mínimos registrados de DO. La correlación entre ambas series es nula ($\rho = -0.02$, p-value = 0.61), aunque se encuentra una correlación negativa y significativa ($\rho = -0.4$, p-value < 0.05) con un desfase positivo de 15 horas, es decir que los cambios en DO ocurren antes que los cambios de CUI (fig. 3.26).

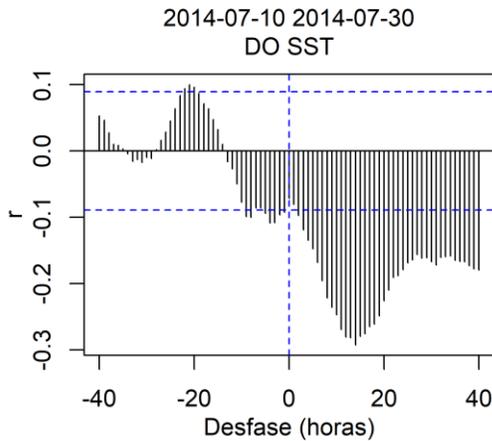


Figura 3.25. Correlación cruzada entre DO y SST durante el evento del 10 al 30 de julio de 2014. La mayor correlación es negativa y se encuentra con 14 horas de desfase ($\rho = -0.24$, $p\text{-value} < 0.05$).

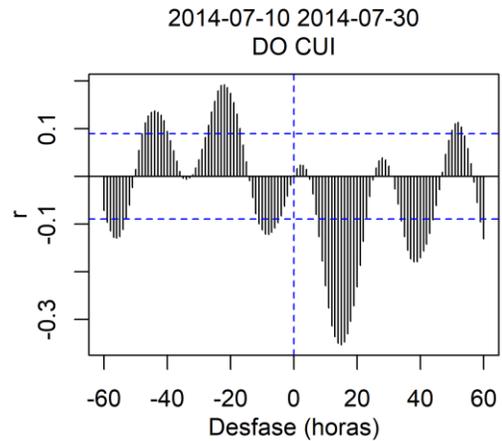


Figura 3.26. Correlación cruzada entre DO y CUI del 10 al 30 de julio de 2014. La mayor correlación es negativa y se encuentra con un desfase positivo de 15 horas ($\rho = -0.4$, $p\text{-value} < 0.05$).

El gradiente de temperatura (SSTGrad) desciende gradualmente y permanece negativo durante prácticamente todo el evento (fig. 3.24). La correlación del SSTGrad con el DO durante este evento es significativa, aunque prácticamente nula ($\rho = 0.09$, $p\text{-value} < 0.05$). Además, no es posible encontrar una mayor correlación mediante la correlación cruzada (fig. 3.27). Es decir, no se encuentra una asociación entre ambas series durante este evento.

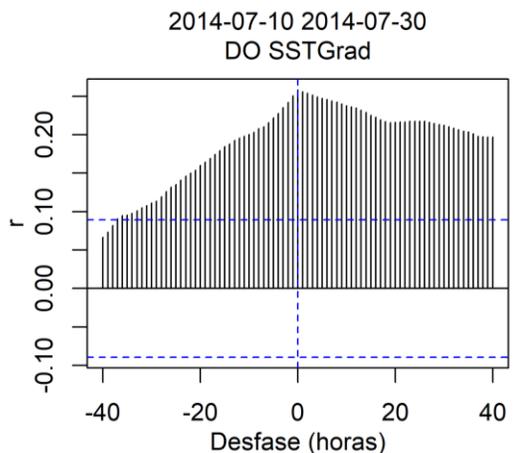


Figura 3.27. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad durante el evento del 10 al 30 de julio de 2014. La correlación máxima se alcanza sin desfase ($\rho = 0.09$, $p\text{-value} < 0.05$).

En la figura 3.28 se observa que el análisis de factores permitió confirmar la escasa correlación del evento con surgencias costeras. Los resultados de este análisis muestran al DO opuesto a la SST sobre el factor 1, mientras que ninguno aporta pesos significativos al factor 2. Respecto a los indicadores de surgencia CUI y SSTGrad, estos se encuentran alejados y

opuestos entre sí sobre el factor 1, mientras que CUI está solitario sobre el eje positivo del factor 2. Finalmente, el SLH se encuentra sobre el cero de ambos factores, es decir no aporta significativamente a ninguno de ellos. Este comportamiento difiere del esperado para confirmar el registro de una surgencia, es decir DO y SST agrupados en un factor y, CUI y SSTGrad, agrupados en un cuadrante opuesto.

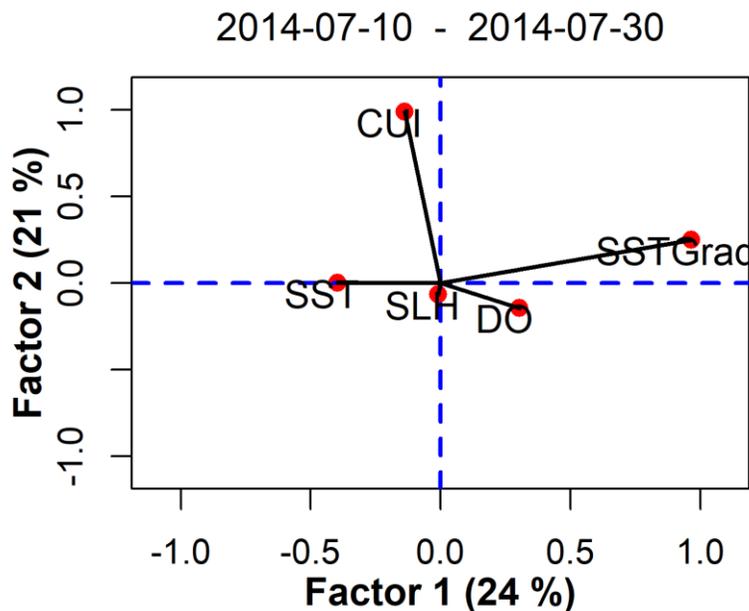


Figura 3.28. Análisis de factores de las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y SLH, durante el evento de hipoxia del 10 al 30 de julio de 2014. El primer factor explica el 24% de la variabilidad conjunta y agrupa al SSTGrad en el lado positivo y a la SST en el eje negativo, mientras que CUI y DO no le aportan pesos significativos. El segundo factor explica el 21% de la variabilidad y está compuesto prácticamente de la serie CUI.

3.3.3. Eventos de relación hipoxia-surgencia no confirmada

Durante el periodo de estudio se presentaron episodios que cumplen parcialmente algunos de los criterios para confirmar la presencia de surgencia, es decir alta correlación positiva DO y SST o correlación negativa entre el DO y los índices CUI y SSTGrad, pero que no cumplen con todos para poder ser confirmada o descartada la relación.

En la figura 3.29 se muestra el gráfico en paralelo de las series durante el evento entre el 21 y el 24 de marzo de 2014. Durante este evento se presentan una serie de mínimos de

concentración de DO, de los cuales únicamente uno alcanza el nivel de hipoxia. Estas caídas también se presentan, con bastante similitud, en la serie de SST, y la correlación entre ambas series es alta ($\rho = 0.79$, $p\text{-value} < 0.05$) y sin desfase (figs. 3.30 y 3.31).

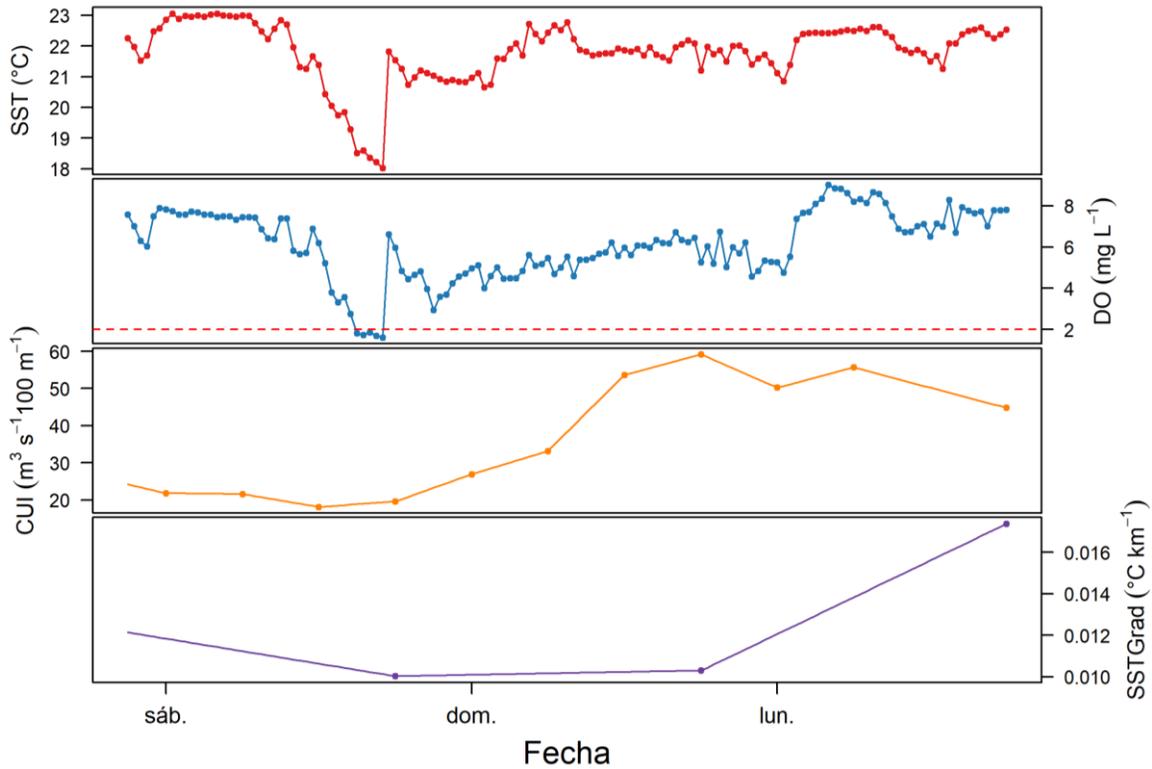


Figura 3.29. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento corto de hipoxia entre el 21 y 24 de marzo de 2014. Se observa una serie de caídas cortas en el DO que se ven replicadas en la serie de SST. El índice CUI comienza el evento con valores bajos, $\sim 20 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, posteriormente aumenta a hasta $\sim 60 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. El gradiente de temperatura SSTGrad permanece constante alrededor de $0.01 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$, aunque aumenta hacia el final del evento, cuando ya ha terminado la hipoxia.

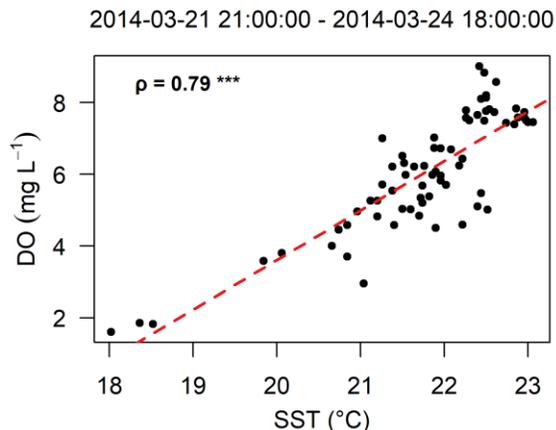


Figura 3.30. Correlación entre DO y SST entre el 21 y 24 de marzo de 2014. Se observa una buena correlación lineal entre ambas variables.

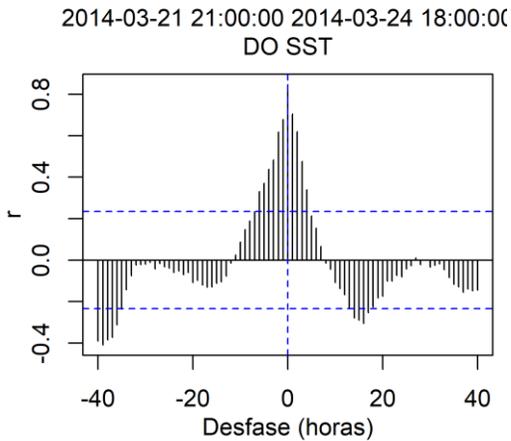


Figura 3.31. Correlación cruzada entre DO y SST entre el 21 y 24 de marzo de 2014. La máxima correlación entre ambas series se alcanza sin desfase.

El índice de surgencia (CUI) permanece positivo durante este evento, aunque con valores pequeños ($\sim 20 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), que aumentan hacia el final del evento, cuando la hipoxia ya se ha registrado (fig. 3.29). La correlación entre DO y CUI durante este evento es no significativa ($\rho = 0.17$, $p\text{-value} = 0.16$) y la mayor correlación alcanzada es positiva y se presentó con 6 horas de desfase ($\rho = 0.71$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.32). La correlación entre DO y SSTGrad durante este evento es también positiva y sin desfase ($\rho = 0.77$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.33).

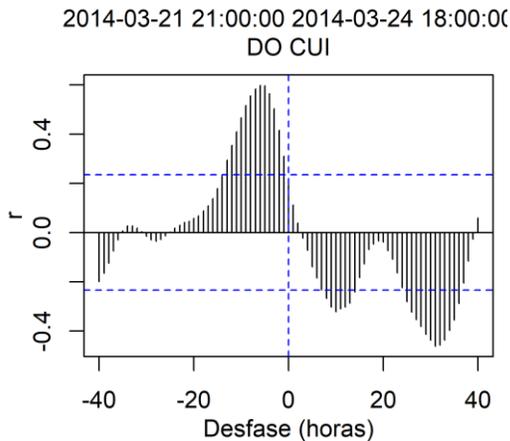


Figura 3.32 Correlación cruzada entre DO y CUI durante el periodo del 21 al 24 de marzo de 2014. La máxima correlación alcanzada es positiva ($\rho = 0.71$, $p\text{-value} < 0.05$) y se alcanza con un desfase de -6 horas.

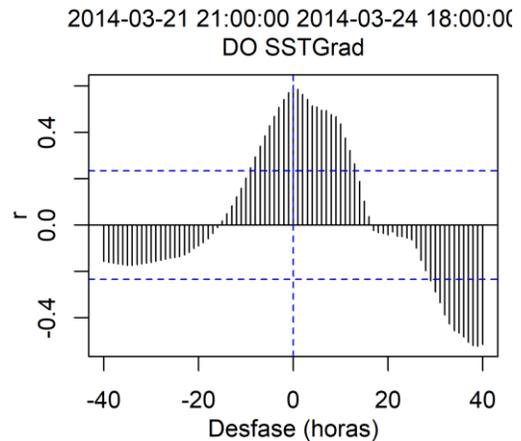
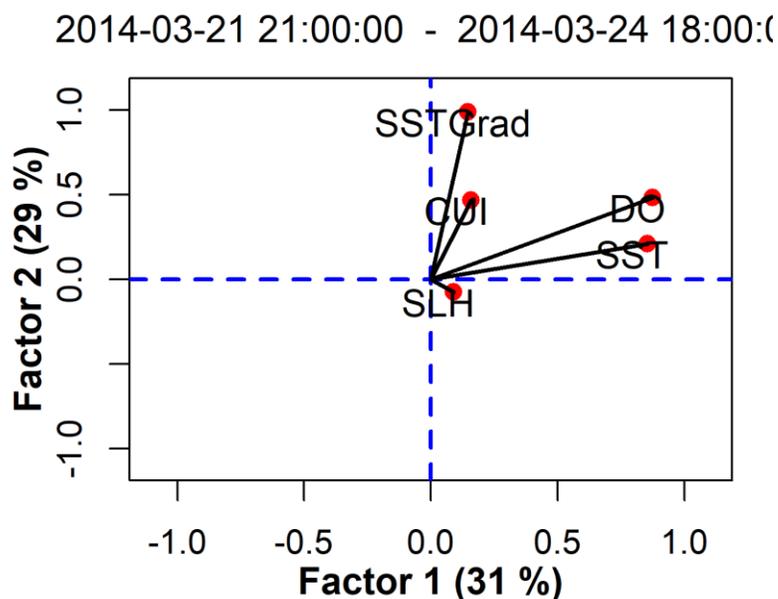


Figura 3.33. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad durante el periodo del 21 al 24 de marzo de 2014. La máxima correlación alcanzada es positiva ($\rho = 0.77$, $p\text{-value} < 0.05$) y se alcanza sin desfase.

El análisis de factores entre las series durante el evento del 21 al 24 de marzo de 2014 muestra la similitud entre DO y SST, que se agrupan positivamente sobre el factor 1 (31% de la variabilidad conjunta), y entre CUI y SSTGrad que se agrupan positivamente sobre el factor 2 (29% de la variabilidad) (fig. 3.34).

Figura 3.34. Análisis de factores de las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y SLH, durante el evento de hipoxia del 21 al 24 de marzo de 2014. El factor 1 explica el 31% de la variabilidad y agrupa sobre su eje positivo a DO y SST, mientras que las series de CUI, SSTGrad y SLH aportan pesos positivos, pero poco significativos (<0.05). El factor 2 explica el 29% y agrupa a SSTGrad, CUI y DO en el eje positivo. Todas las series, salvo SLH, quedan agrupadas en el cuadrante positivo de ambos factores.



Entre el 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015 se presentó un evento que registró dos caídas de DO de alrededor de dos días de duración, en los que se alcanzan periodos de hipoxia de hasta 6 horas, con valores mínimos de DO de 1.30 mg L^{-1} . La SST presenta una disminución continua, aunque no se observan variaciones similares a las de DO, como sucede durante otros eventos (fig. 3.35). Existe una correlación moderada significativa entre ambas series ($\rho = 0.31$, $p\text{-value} < 0.05$) y sin desfase (figs. 3.36 y 3.37). Durante este evento el CUI pasa de negativo a positivo, con valores máximos de $\sim 130 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. La correlación entre CUI y DO durante este evento es débil negativa y se encuentra con un desfase de -12 horas (fig. 3.38 y 3.39). El SSTGrad presenta un aumento gradual durante el evento, que llega hasta $\sim 0.04 \text{ }^\circ\text{C/km}$. La correlación entre DO y SSTGrad durante este evento es negativa y sin desfase ($\rho = -0.46$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.40 y 3.41).

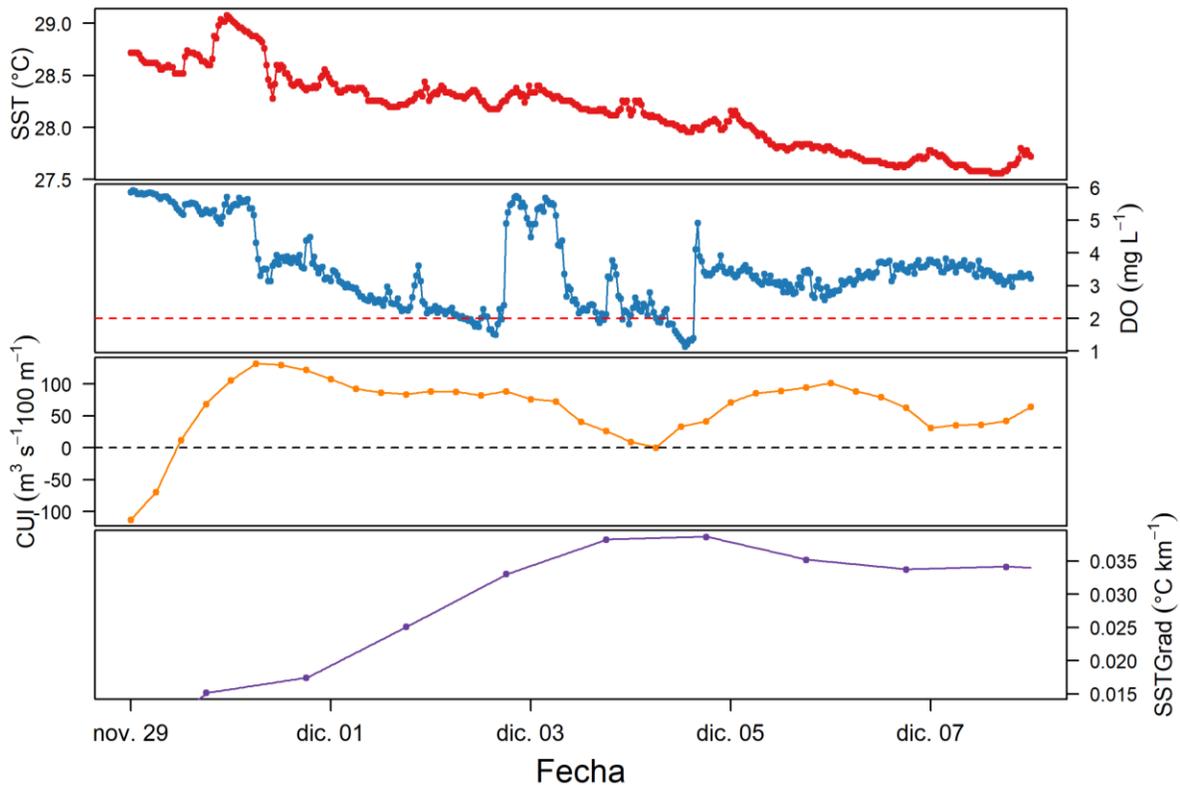


Figura 3.35. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, durante el evento corto de hipoxia entre el 29 de noviembre al 08 de diciembre de 2015. El DO presenta dos caídas entre el 01 y 05 de diciembre. El rango de variación de SST es corto, entre 29 y 27.5 °C. EL índice CUI pasa de negativo a positivo, alcanzando valores de hasta ~130 m³ 100 m⁻¹ s⁻¹, sostenidos durante aproximadamente 3 días. El SSTGrad se mantiene positivo, con un crecimiento gradual que llega hasta ~0.04 °C/km.

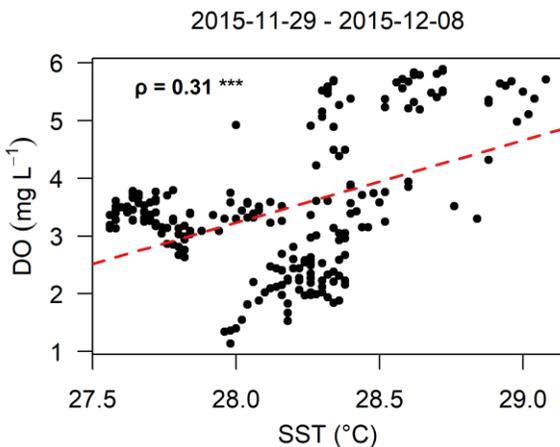


Figura 3.36. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y SST entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015. Se observa una correlación monótona moderada

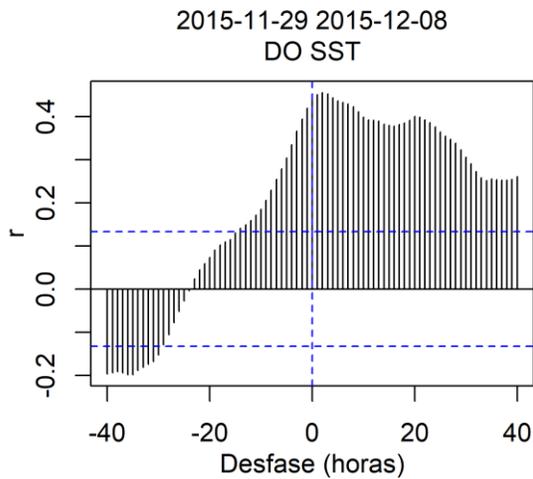


Figura 3.37. Correlación cruzada entre DO y SST entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015. La máxima correlación se alcanza sin desfase.

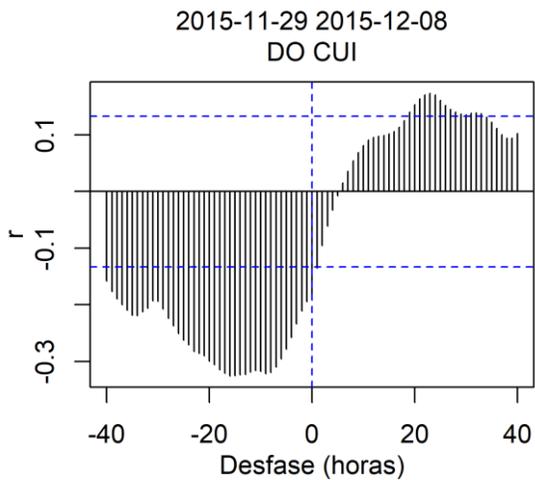


Figura 3.38. Correlación cruzada entre DO y CUI entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015. La máxima correlación es negativa y se alcanza con un desfase negativo de 12 horas (CUI antecede a DO).

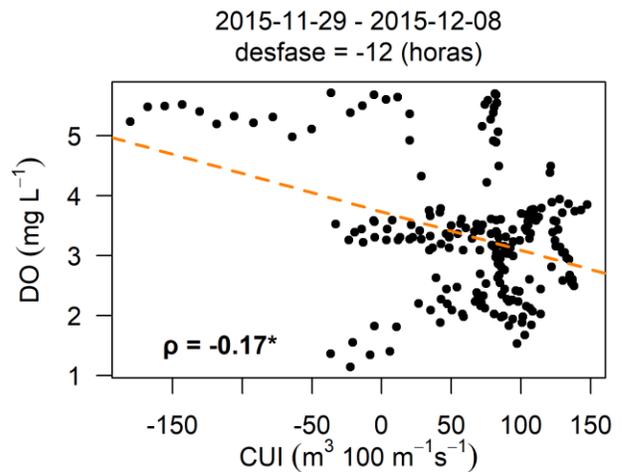


Figura 3.39. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y CUI entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015 con desfase de -12 horas.

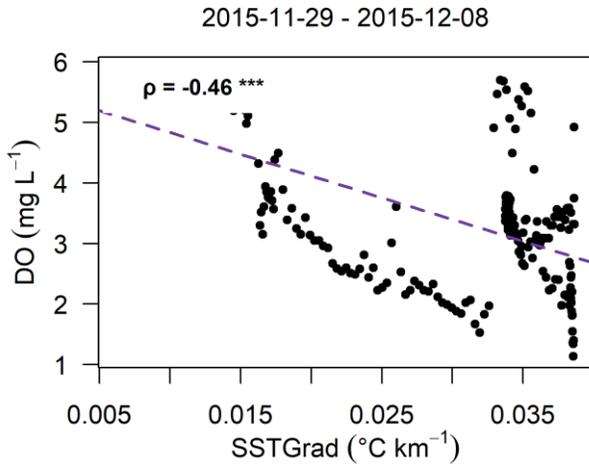


Figura 3.40. Dispersión y correlación de Spearman entre DO y SSTGrad entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015. Se observa una correlación moderada negativa.

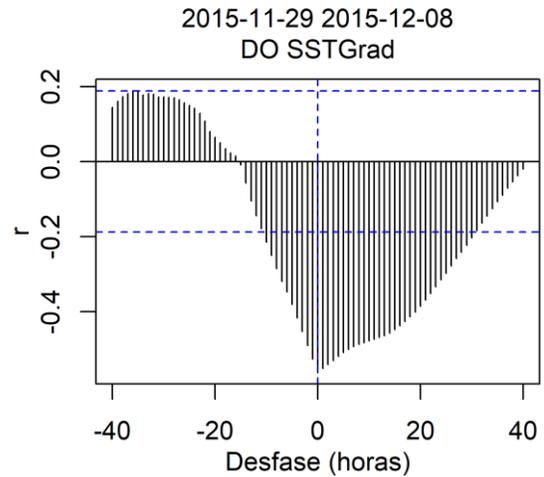


Figura 3.41. Correlación cruzada entre DO y SSTGrad entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015. La máxima correlación es negativa y se alcanza sin desfase.

El análisis de factores de este evento resalta la similitud entre el DO y SST, que se agrupan sobre el eje positivo del factor 1 (40%), opuestos al gradiente SSTGrad, que se localiza sobre el eje negativo. El factor 2 incluye únicamente a la serie CUI en el eje positivo (fig. 3.42).

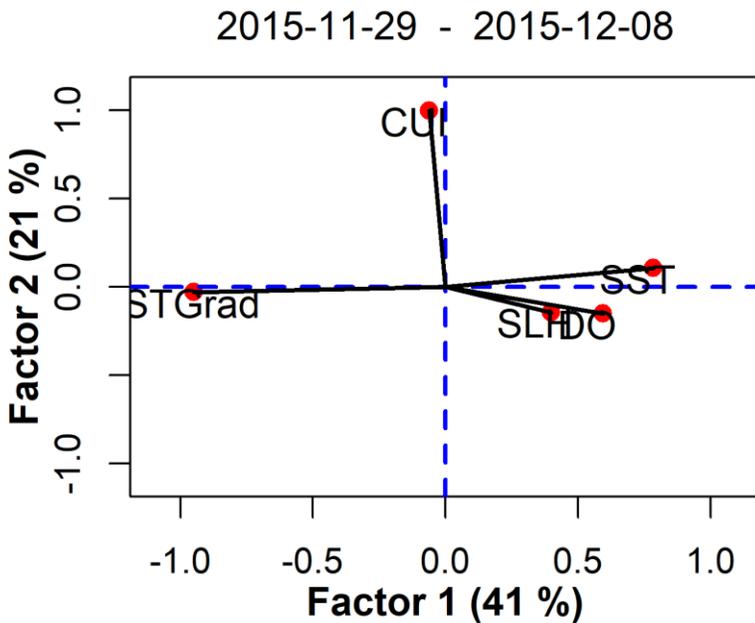


Figura 3.42. Análisis de factores de las series de DO, SST, CUI, SSTGrad y SLH, durante el evento de hipoxia del 29 de noviembre al 08 de diciembre de 2015. El factor 1 explica el 41% de la variabilidad y agrupa SST, DO y SLH en el eje positivo y a SSTGrad en el eje negativo. El factor 2 explica el 21% de la variabilidad y está compuesto únicamente por el índice CUI sobre el eje positivo.

3.4 Análisis de frecuencias

El análisis de cross-wavelets permitió estudiar la correlación entre las series de tiempo a partir de la similitud y sincronía entre sus frecuencias. Este análisis requiere disponer de series de tiempo continuas, por lo que se realizó en los 4 tramos en los que hay continuidad en la serie de DO. A continuación, se describen los análisis realizados para el tramo del 30 de enero al 21 de agosto de 2014 (tramo 1). Los análisis de los demás tramos se muestran en el anexo 2.

En la figura 3.43 se muestra el gráfico de cross-wavelet entre DO y SST durante el periodo del 30 de enero al 21 de agosto de 2014. En este análisis se puede identificar un tramo de correlación significativa entre las frecuencias de ambas series, con periodos ≤ 1 día (área delimitada en negro). Estas correlaciones ocurren en sincronía, es decir sin desfases (flechas hacia la derecha). Esto significa que, al expresar las series en el dominio de frecuencias, ambas series comparten señales similares (de igual frecuencia y amplitud), las cuales se encuentran en fase (sincrónicas). Este periodo de correlación de las frecuencias coincide con la serie de caídas y eventos de hipoxia registradas entre marzo y mayo, sin embargo, no se observa lo mismo para los eventos registrados entre julio y agosto del mismo año (sección 3.3.2).

En la figura 3.44 se muestra el gráfico de cross-wavelet entre DO y CUI del 30 de enero al 21 de agosto de 2014. Se identifican correlaciones significativas entre las frecuencias con periodos entre 1 y 4 días, entre los meses de marzo y mayo, y entre agosto y julio de 2014. De marzo a mayo las frecuencias se encuentran en fase (flechas apuntando a la derecha), mientras que, durante julio y agosto, se observa un desfase angular de aproximadamente 90° (flechas hacia arriba). Un desfase angular de 90° equivale a $\frac{1}{4}$ del periodo de la señal. El desfase en tiempo está en función de la longitud del periodo. Por ejemplo, en una señal con periodo de 1 día, el desfase de 90° equivale a 6 horas.

Finalmente, en la figura 3.45 se muestra el gráfico de cross-wavelet entre DO y el gradiente SSTGrad del 30 de enero al 21 de agosto de 2014. Entre marzo y mayo se observa un área de correlación entre las frecuencias con periodos entre ~ 4 y ~ 16 días con un desfase angular de $\sim 45^\circ$. Esto indica que durante esas fechas se pueden identificar señales compartidas entre ambas series, cuyos periodos duran entre 4 y 16 días. El desfase de 45° ($\frac{1}{8}$ del periodo)

indica que la señal se manifiesta entre 1 y 4 días ($1/8$ del periodo) antes en SSTGrad y después en DO. También se observa un área de correlación entre señales con periodos de ~60 días durante todo el tramo, que presentan un desfase angular de 90° . Por la longitud del periodo (~60 días) se sospecha que esta correlación podría estar relacionada con cambios estacionales y es probable que no estén relacionados con los eventos de hipoxia.

Tramo 1 Cross wavelet DO SST

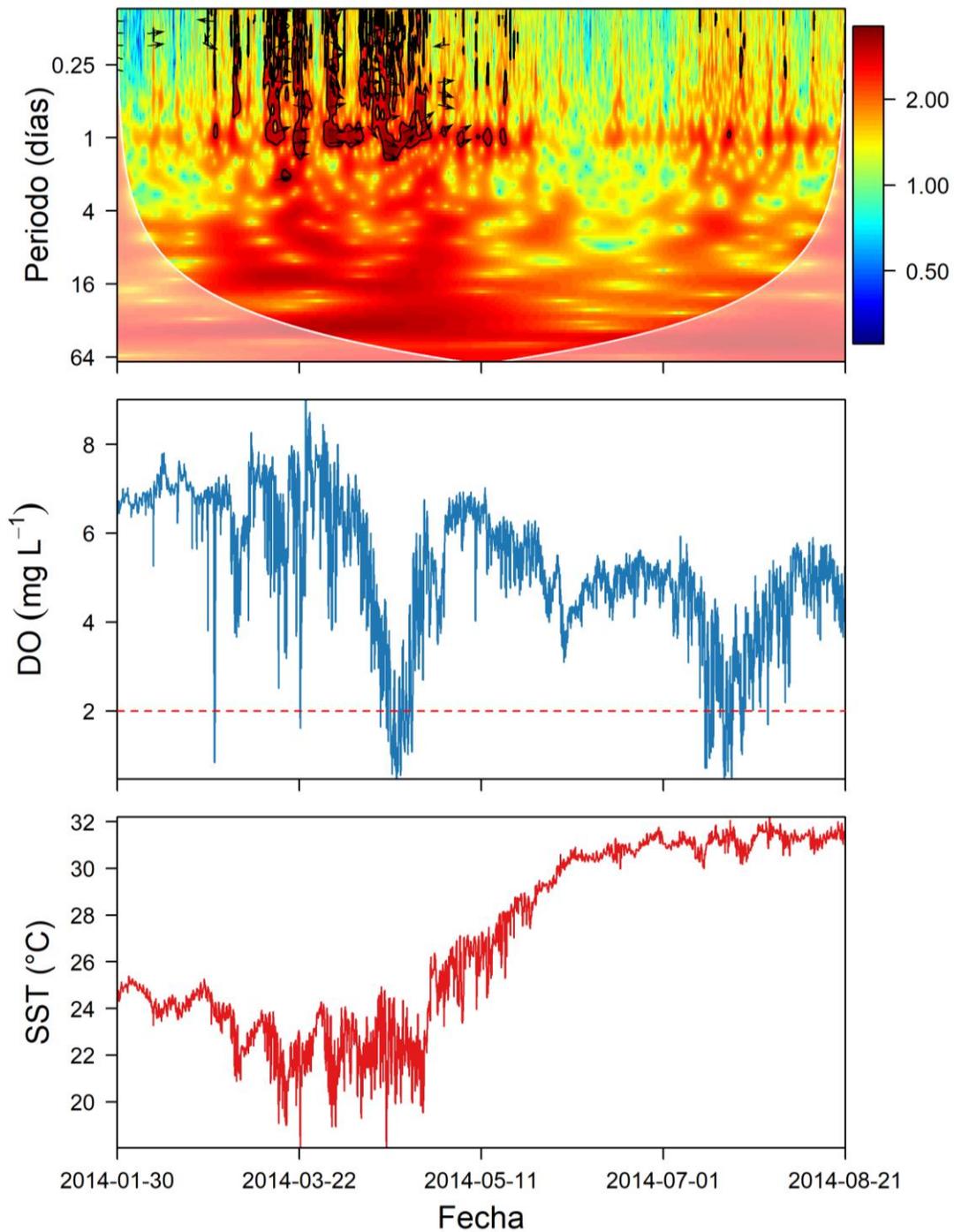


Figura 3.43. Cross-wavelet de DO y SST del 30 de enero al 21 de agosto de 2014. La barra de colores indica el poder de las frecuencias, las áreas en negro delimitan las zonas de correlación significativa entre las frecuencias de ambas series. Se puede apreciar un tramo de significancia entre las series con periodos alrededor de 1 día, las cuales se encuentran en fase.

Tramo 1 Cross wavelet DO CUI

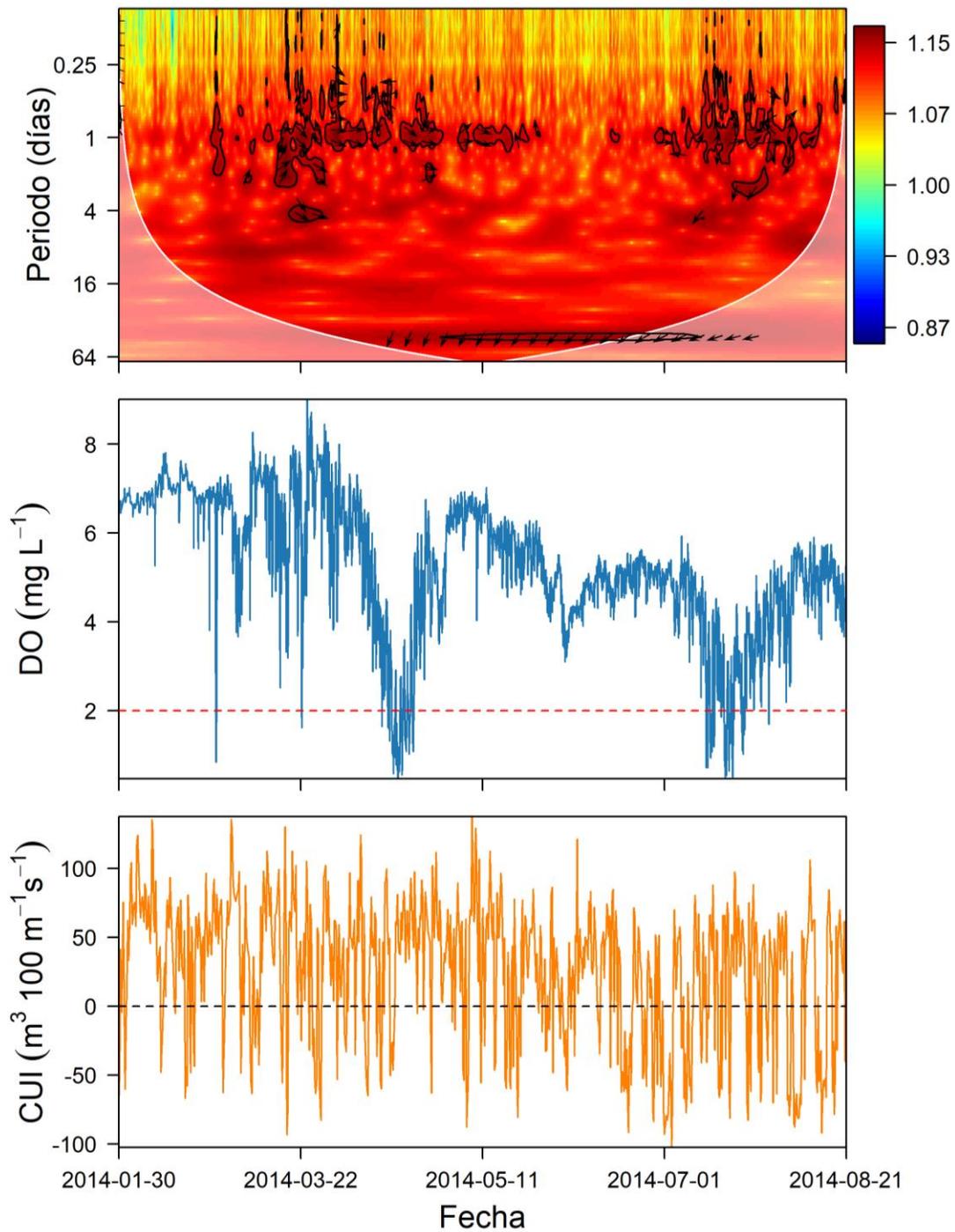


Figura 3.44. Cross-wavelet de DO y CUI del 30 de enero al 21 de agosto de 2014. Se pueden apreciar dos tramos de correlación significativa entre las frecuencias de las series, con periodos alrededor de 1 día, las cuales se encuentran con un ligero desfase.

Tramo 1 Cross wavelet DO SSTGrad

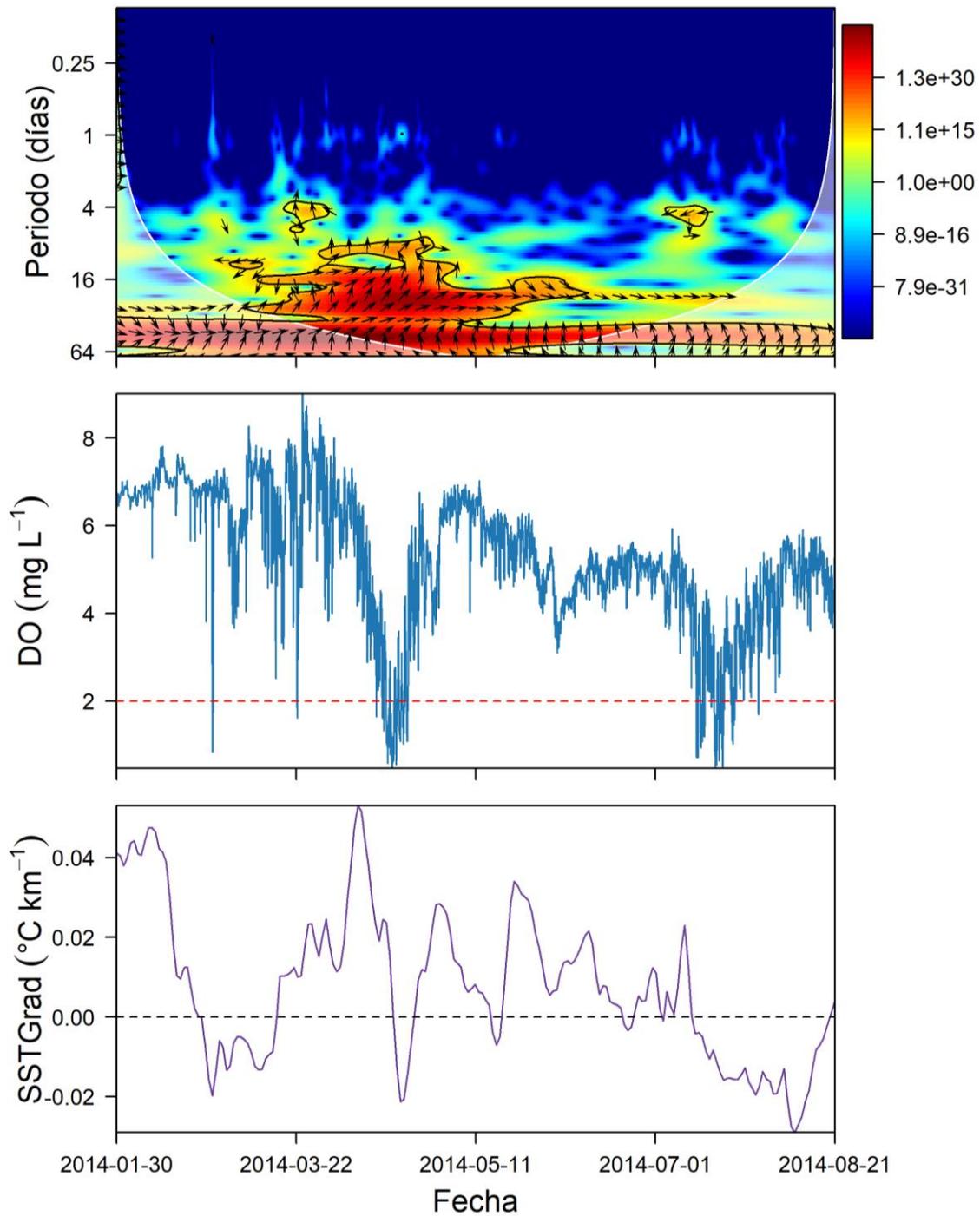


Figura 3.45. Cross-wavelet de DO y CUI del 30 de enero al 21 de agosto de 2014, se puede apreciar que la significancia se encuentra entre las series con periodos de ~16 días, con un desfase angular de $\sim 45^{\circ}$. Para los periodos de ~16 días, este desfase corresponde a ~4 días.

4. Discusión

4.1 DO en las aguas superficiales adyacentes a Mazatlán

El valor medio del DO superficial en las aguas adyacentes a Mazatlán (mediana = 6.02 mg L⁻¹) concuerda con los valores esperados para la región (DO ~ 6 mg L⁻¹) (García *et al.*, 2013). Sin embargo, un 15% de los datos muestran una baja concentración de DO < 4 mg L⁻¹ (Sato *et al.*, 2016), mientras que los registros de hipoxia representan sólo un 4% lo que sugiere que pueden considerarse como outliers (fig. 3.2). La distribución trimestral muestra una variación considerable, con una mediana desde ~5 mg L⁻¹ entre abril y junio, hasta ~7 mg L⁻¹ entre enero y marzo, y todos los trimestres presentan valores de hipoxia (fig. 3.3). El comportamiento observado en la distribución trimestral está sesgado por falta de datos durante algunos periodos de tiempo largos (meses) y la diferencia en la cantidad de datos, por lo que no puede interpretarse como una climatología.

Los eventos de hipoxia presentan tres modos principales de comportamiento, que podrían corresponder a distintos fenómenos dinámicos y biogeoquímicos, y a la interacción entre ellos: i) eventos cortos (p. ej. fig. 3.4) que se caracterizan por una disminución rápida del DO, con duración de la hipoxia de algunas horas y rápido retorno a los niveles medios de DO, ii) eventos de disminución abrupta del DO (p. ej. fig. 3.5), que permanece en condiciones hipóxicas durante días, y recuperación gradual del DO, y iii) eventos largos donde la disminución del DO es gradual y superpuesta a fluctuaciones diarias, que permanece en condiciones de hipoxia durante pocas horas y regresa gradualmente a los niveles medios (p. ej. fig. 3.6).

Los perfiles oceanográficos de oxígeno confirman que, en la columna de agua, la hipoxia se alcanza en los primeros ~50 m de profundidad. De hecho, esta es una de las regiones donde el límite superior de la OMZ del Pacífico oriental es más somera (Cepeda-Morales *et al.*, 2009 y 2013; Maske *et al.*, 2010). Cabe advertir que estos perfiles oceanográficos corresponden únicamente a dos registros (2015-04-28 y 2016-03-31) y la profundidad de la oxiclina y termoclina podrían variar estacionalmente. De hecho, se ha observado que durante el verano la termoclina se hunde hasta ~75 m (Gómez-Valdivia *et al.*, 2015), además de que fenómenos como ENSO y la propagación de ondas atrapadas a la costa pueden modificar su profundidad.

4.2 Surgencias costeras en Mazatlán

El viento presenta un comportamiento estacional, entre los meses de octubre a marzo puede provocar las surgencias (fig. 3.9). El índice de surgencia por viento (CUI) permanece positivo durante la mayor parte del tiempo (fig. 3.10), con un comportamiento similar desde octubre hasta junio. El rango del promedio diario del índice CUI está entre -179.8 y $166.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} 100 \text{ m}^{-1}$, el cual es menor que los reportados para otros lugares dentro del mismo sistema de surgencias de la Corriente California (tabla 4). Esto se debe principalmente a que la intensidad del viento es mayor en borde externo de la península de Baja California que en el borde continental del Golfo de California (fig. 4.1).

Tabla 4. Comparación de valores extremos y medios diarios de CUI estimados mediante los percentiles 5, 50 (mediana) y 95, para diferentes zonas del sistema de surgencias de California (datos de PMEL NOAA, 2020).

Coordenadas	Percentil 5	Mediana	Percentil 95
23.06N, 106.44° (Mazatlán)	-44.9	39.0	94.1
24°N, 113°O	-5.0	45.0	123.0
27°N, 116°O	5.0	62.0	141.0
30°N, 119°O	2.0	55.0	171.0
39°N, 125°O	-111.8	52.0	274.3
45°N, 125°O	-224.0	3.0	109.0

La distribución trimestral del gradiente de SST es similar a la del CUI y corrobora el comportamiento estacional de la surgencia, es decir, principalmente positiva desde octubre hasta junio y menor o negativa (hundimiento) entre julio y septiembre. Esto concuerda con el comportamiento estacional del viento, cuyos vientos dominantes entre junio y octubre fluyen del suroeste, asociados a la ocurrencia de tormentas tropicales (Lavín *et al.*, 2003).

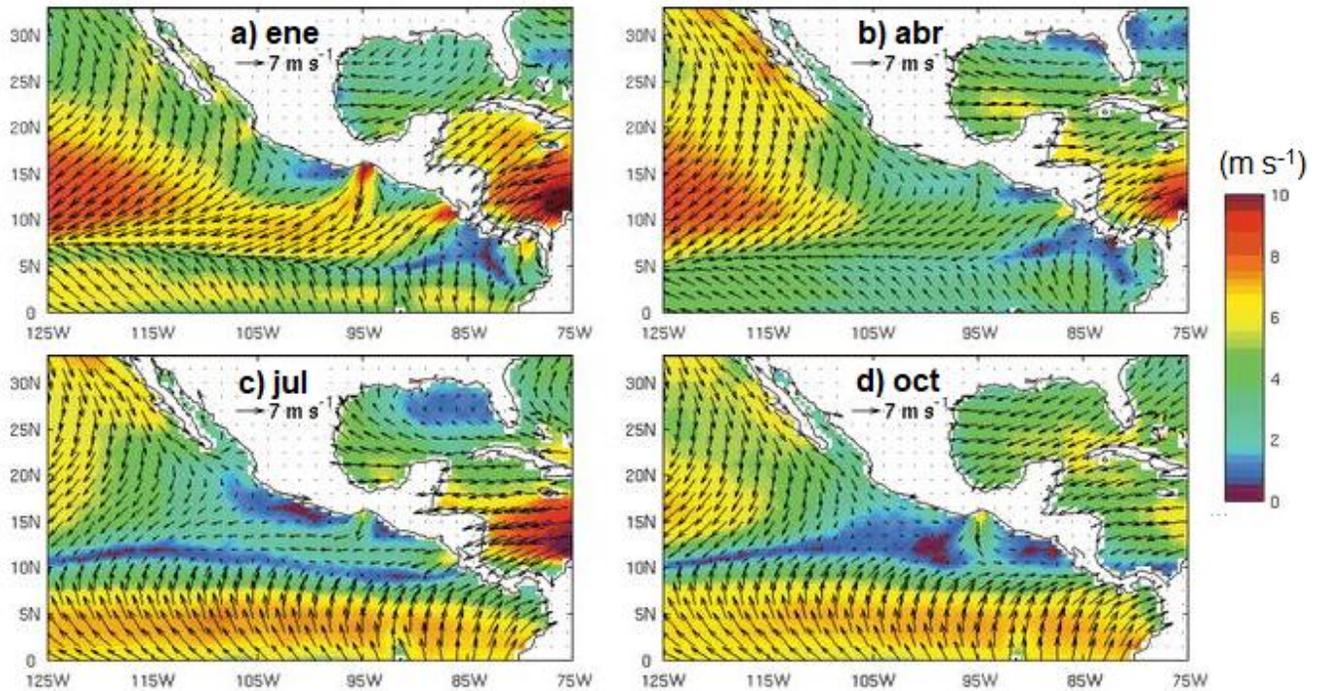


Figura 4.1. Promedio mensual del campo de viento superficial, con datos de QSCAT, entre 1999 y 2005. Se aprecia que la velocidad promedio de los vientos es mayor sobre la península de Baja California que en las mismas latitudes dentro del Golfo de California entre los meses de abril a octubre (Modificado de Romero-Centeno et al., 2007).

4.3 Relación entre hipoxia y surgencia costera

Para confirmar que un evento de hipoxia es causado por un evento de surgencia costera debe cumplir los criterios resumidos en la tabla 2, los cuales incluyen : i) correlación positiva entre DO y SST, ii) valores altos de CUI y correlación negativa con DO, con posible desfase negativo (CUI antecede a DO), iii) SSTGrad positivo y correlación negativa con DO, iv) en análisis de factores, DO y SST deben agruparse sobre un factor y opuestos a los índices CUI y SSTGrad, y v) se debe observar correlación significativa entre las frecuencias de DO y SST, DO y CUI, y DO y SSTGrad, mediante el análisis de cross-wavelets.

4.3.1. Eventos de hipoxia relacionados con las surgencias costeras

El evento ocurrido entre el 4 y 15 de marzo de 2015 cumplió con los criterios para confirmar relación con surgencia costera. El DO y SST muestran un comportamiento similar, con picos

de mínimos en ambas series (fig. 3.16) y alta correlación sin desfase ($\rho = 0.74$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.18), lo que indica que la disminución de bajo oxígeno está acompañada de agua más fría, proveniente del fondo. Durante este evento los valores de DO presentan un rango de variación de $\sim 7.4 \text{ mg L}^{-1}$ y los de SST tienen un rango de $\sim 5.5 \text{ }^\circ\text{C}$. En particular, durante el 8 de marzo se presenta una prominente caída, que va desde 22.2 hasta $18.3 \text{ }^\circ\text{C}$ en la SST y desde 5.3 hasta 0.9 mg L^{-1} , en aproximadamente 4 horas. Este rango de variación observado en DO y SST resultó ser una característica particular de los eventos relacionados con surgencia costera.

Durante el evento del 4 al 15 de marzo de 2015 (11 días), la serie CUI presentó dos máximos de aproximadamente $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} 100 \text{ m}^{-1}$. La correlación entre CUI y DO es negativa y con un desfase negativo cíclico, con máximos a ~ -12 , ~ -30 y ~ -58 horas (CUI precede a DO). Este comportamiento podría deberse a la variabilidad diaria de ambas series: mientras que el DO alcanza sus mínimos por la noche, debido a procesos de respiración, el viento es más intenso por las tardes, debido al ciclo de las brisas marinas.

Durante este evento el SSTGrad presenta un pico de valores positivos, aunque de poca intensidad ($\sim 0.01 \text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$). La correlación entre SSTGrad y DO cumple con el criterio de ser negativa y significativa ($\rho = -0.59$, $p\text{-value} < 0.05$) y se alcanza con un desfase positivo de 20 horas, es decir el cambio ocurre primero en DO y después en SSTGrad. Dado que SSTGrad se calcula originalmente cada 24 horas, este desfase correspondería únicamente a un registro. Esto podría indicar que, al desarrollarse un evento de surgencia costera, este es registrado primero mediante la caída del DO (registrado a $\sim 5 \text{ m}$ de profundidad) y posteriormente mediante el gradiente de la temperatura superficial.

El análisis de factores cumple con el criterio esperado para confirmar surgencia: el factor 1 (32%) agrupa a DO y SST en el eje positivo y opuestamente a CUI y SSTGrad en el eje negativo. Por la variabilidad contenida, este factor se puede denominar “surgencia”, mientras el gradiente de temperatura y CUI aumentan (vientos más intensos y temperatura más fría en la costa) DO y SST disminuyen (fig. 3.21).

En el mismo análisis de factores, el nivel del mar (SLH) está cercano al cero en ambos factores y se encuentra aislado de las demás variables (fig. 3.21). Esto significa que la variabilidad de SLH es única y no se relaciona con las demás variables. Este resultado permite descartar la influencia del agua del Estero de Urías sobre el evento de hipoxia, debido a que el sensor se ubica en la boca del estero de Urías.

4.3.2. Eventos de hipoxia no relacionados con las surgencias costeras

Durante el evento registrado entre del 10 al 30 de julio de 2014 (20 días) (fig. 3.22) la correlación entre DO y SST es negativa y con un desfase de ~15 horas. La SST presenta una variación corta, entre 30 y 32 °C durante todo el evento, lo que descarta la presencia de agua fría de fondo, mientras que el DO sí muestra un rango de variación mayor, de aproximadamente 5 mg L⁻¹. Además, en este evento SSTGrad permanece negativo (fig. 3.22) y su correlación con DO es positiva (fig. 3.25), es decir, se presentan aguas más cálidas en la costa (SSTGrad disminuye) al tiempo que ocurre la caída de DO (también disminuye).

Durante este evento, el índice CUI presenta varios picos positivos, aunque de menor intensidad, de ~60 m³ s⁻¹ 100 m⁻¹ (fig. 3.22) y, aunque sí se observa una correlación negativa ($\rho = -0.4$, p-value < 0.05), esta ocurre con un desfase positivo de 15 horas, es decir los cambios de manifiestan antes en DO que en CUI (fig. 3.24), con lo que se rechaza el supuesto de que los incrementos en el CUI anteceden la disminución del DO.

Finalmente, el análisis de factores confirma la escasa relación entre las variables. El factor 1 (24%), compuesto por el gradiente SSTGrad y SST, puede contener información sobre el calentamiento de la zona costera (aumenta SST y disminuye el gradiente entre SSTGrad). Por otro lado, DO y SST se encuentran muy cercanas al cero en ambos factores, lo que indica que su variabilidad es única y tienen relación con las demás variables.

Cabe resaltar que este evento ocurrió durante el verano, cuando la estratificación es mayor. Además, durante este periodo la intensidad del viento es menor, por lo que será necesario considerar otros procesos como causantes de este tipo de eventos.

4.3.3. Eventos de hipoxia parcialmente relacionados con las surgencias costeras

También se identificaron eventos que cumplieron parcialmente con algunos de los criterios, por lo que se necesitó un análisis más detallado para confirmar o descartar la relación con surgencias costeras. Por ejemplo, durante el evento presentado entre el 21 y 24 de marzo de 2014 (3 días) se observa bastante semejanza entre las series DO y SST, que se confirma con su alta correlación sin desfase (fig. 3.28 y 3.29). Además, se observa un amplio rango de variación entre ambas variables, de $\sim 6 \text{ mg L}^{-1}$ para DO y $\sim 4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ para SST. Resalta el hecho de que la caída y recuperación de ambas variables ocurre en tan solo ~ 10 horas.

Por otro lado, durante este evento los indicadores de surgencias no cumplen con los criterios para confirmar surgencia costera por viento. Si bien el índice CUI permanece positivo, su intensidad es menor a los eventos que confirman la surgencia costera, de ~ 20 a $\sim 60 \text{ m}^3 \text{ } 100 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Además, la correlación con DO es, contrario a lo esperado, positiva con -6 horas de desfase, es decir DO disminuye al tiempo que CUI también. Finalmente, la correlación de DO con SSTGrad es también positiva y sin desfase, es decir, ambas variables aumentan y disminuyen simultáneamente.

Las características de este evento confirman que el registro de hipoxia está relacionado con el arribo de agua del fondo, fría y pobre en oxígeno, pero que dicho arribo parece no estar relacionado con una surgencia costera. La duración de la caída es corta y no coincide con el tiempo necesario para el desarrollo de una surgencia costera. Debido a que el evento ocurre en marzo se espera que la termoclina y oxiclina se encuentren someras, por lo que se sospecha que este evento es el resultado de una perturbación en la estratificación de la columna de agua, posiblemente causado por la propagación de ondas internas o remolinos de mesoescala. Por lo tanto, es necesario implementar nuevas metodologías para contrastar esta nueva hipótesis.

Entre 29 de noviembre y 08 de diciembre de 2015 (10 días) se registró otro evento que cumple parcialmente con algunos criterios para confirmar surgencia. En este caso las series DO y SST

no muestran similitud en su comportamiento, el rango de variación de SST es corto (~ 1.5 °C) y la correlación entre ambas variables es menor, continúa siendo positiva y sin desfase ($\rho = 0.31$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.32, 3.33 y 3.34). Este resultado sugiere que ambas variables oceánicas están sujetas a procesos distintos, lo que sugiere que estos eventos de hipoxia no son producidos por el ascenso del agua de fondo.

Por otro lado, el comportamiento de los índices CUI y SSTGrad sí sugiere la ocurrencia de un evento de surgencia. Durante este evento, CUI alcanza valores altos (de $\sim 130 \text{ m}^3 \text{ 100 m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y la correlación con DO es negativa, con desfase de -12 horas, es decir que el incremento de CUI corresponde con la disminución de DO con un retraso de medio día (fig. 3.35 y 3.36). SSTGrad alcanza también valores altos (~ 0.04 °C km^{-1}), que incluso son superiores al percentil 90 de todo el periodo de estudio, cuya correlación con DO es negativa moderada ($\rho = -0.47$, $p\text{-value} < 0.05$) (fig. 3.37 y 3.38). Finalmente, el análisis de factores muestra el comportamiento esperado para confirmar surgencia: factor 1 (41%) agrupa a las series DO y SST en el eje positivo y al índice SSTGrad en eje negativo.

Los resultados estadísticos sugieren que efectivamente ocurre una surgencia costera que provoca una disminución del DO, que sin embargo no se refleja sobre la SST. Esto puede atribuirse a que este evento coincide con el fenómeno El Niño 2015-16, el cual es uno de los más intensos registrados (Santoso *et al.*, 2017). En el Pacífico mexicano, la ocurrencia de fenómenos El Niño provoca anomalías positivas en la SST y hundimiento de la termoclina, especialmente entre octubre y diciembre (Jacox *et al.*, 2015; Jacox *et al.*, 2016). Por lo tanto, el agua emergida por las surgencias durante condiciones El Niño es menos fría, y posiblemente con menor contenido de oxígeno, que en condiciones normales

4.3.4. Análisis de frecuencias

Finalmente, el análisis de cross-wavelets permite identificar los periodos de similitud entre las series a partir de la correlación entre sus frecuencias, lo que ayuda a corroborar o descartar la relación entre hipoxia y surgencias costeras. Durante el periodo donde se confirmó esta relación, el análisis entre las series DO y SST, muestra un área de correlación significativa entre las frecuencias de ambas series con periodos de aproximadamente un día, que además

se encuentran en fase. Esto significa que existe un señal dominante que se manifiesta en ambas series al mismo tiempo. Por el contrario, esta área de correlación no se observa durante los eventos de hipoxia durante julio (fig. 3.40).

El análisis de cross-wavelets entre DO y CUI también muestra un área de correlaciones significativas entre señales con periodos entre uno y cuatro días, aunque en este caso muestran cierto desfase (flechas orientadas con diferentes ángulos de inclinación), que coincide con lo observado en correlaciones cruzadas. También resalta un área de correlaciones durante los periodos de hipoxia de julio (fig. 3.41), los cuales no cumplieron los criterios para confirmar hipoxia.

A diferencia de los cross-wavelets de DO con CUI y SST, cuyos periodos de correlación son de entre uno y cuatro días, la correlación entre las señales de DO y SSTGrad presenta periodos más largos, de entre 4 y 16 días (fig. 3.42). Esto es debido a que esta serie tiene un periodo de muestreo diario (a diferencia de CUI que es de 6 horas y de SST que es de 30 minutos) y a que la variabilidad temporal de SSTGrad, es decir los cambios en el gradiente de temperatura, son más lentos, lo que se aprecia en la mayor suavidad de la serie. También se aprecia una correlación significativa con un periodo de ~60 días durante todo el tramo analizado, la cual corresponde a la variación estacional de ambas series.

En total, 6 de los 12 eventos de hipoxia registrados pudieron ser atribuidos a surgencias costeras, los cuales acumulan ~427 horas bajo el umbral de hipoxia y representan un 56% del total de hipoxia registrada. Estos eventos ocurrieron principalmente entre los meses de octubre a abril. La relación entre hipoxia y surgencias costeras confirma que estos eventos en particular tienen una causa natural, no antropogénica. Sin embargo, una tendencia de aumento en la intensidad de los vientos generadores de surgencias (Bakun *et al.*, 2015) y la expansión vertical de las zonas de mínimo oxígeno (Stramma *et al.*, 2008), podrían aumentar la frecuencia, duración e intensidad de tipo de eventos. Para identificar esta posible amenaza es necesario continuar con los esfuerzos para el monitoreo del DO en esta zona.

Los otros 6 de los 12 eventos de hipoxia que no se encuentran relacionados a la ocurrencia de surgencias costeras, los cuales acumulan aproximadamente 332 horas y se presentan

principalmente entre mayo y septiembre (fig. 4.2). Ante este panorama surgen dos nuevas hipótesis: i) que estos eventos están relacionados con otro tipo de procesos dinámicos como el arribo de remolinos de mesoescala, la propagación de ondas de Kelvin atrapadas a la costa o propagación de ondas internas, o ii) que estos eventos son resultados de procesos biogeoquímicos desencadenados por eventos de eutrofización.

En la entrada del Golfo de California se presenta la formación y propagación de remolinos de mesoescala ciclónicos y anticiclónicos. Estas estructuras pueden inducir variaciones en la profundidad de la termoclina e influir en la modulación de la distribución vertical de DO (Lavín *et al.*, 2013). A través del borde continental, también se propagan ondas de Kelvin atrapadas a la costa, los cuales también pueden modificar la profundidad de la picnoclina, por lo tanto, también de la oxiclina y termoclina (Gómez-Valdivia *et al.*, 2015).

Es necesario advertir que este estudio fue realizado utilizando los datos de mayor calidad disponibles para cada variable (viento, SST, y DO). Sin embargo, cada serie proviene de una fuente distinta, con diferente resolución temporal y espacial. Resaltan particularmente los datos de viento (~25 km, 6 horas) y de distribución espacial de SST (~8 km, 24 horas), utilizados para estudiar la surgencia mediante CUI y SSTGrad respectivamente. Es posible que en el sensor de DO y SST *in situ* esté registrando señales de fenómenos de diferentes escalas espaciotemporales y que no pueden ser estudiados mediante las técnicas implementadas en este estudio, por ejemplo: ondas internas y remolinos de mesoescala.

El contexto antropogénico del área de estudio incluye la cercanía con una planta de tratamiento de aguas residuales y la proximidad al Estero de Urías. Éste recibe descargas de aguas residuales urbanas, de la acuicultura e industriales y en el cual se tiene registro de hipoxia y anoxia. Todo esto sugiere la hipótesis de que algunos eventos de hipoxia son causados por eutrofización y el consumo de oxígeno por la degradación de materia orgánica. De confirmarse esta hipótesis, estos eventos representarían las primeras señales de alerta de eutrofización costera (Diaz y Rosenberg, 2008). Para contrastar esta hipótesis será necesario incorporar nuevas fuentes de información, que incluyan parámetros biogeoquímicos e indicadores de actividad antropogénica (especialmente descargas de nutrientes y materia orgánica).

Los procesos dinámicos y biogeoquímicos de estas nuevas hipótesis no están aislados mutuamente y las señales observadas pueden ser el resultado de una interacción entre ambos procesos. Estudiar estas interacciones aumenta considerablemente el grado de complejidad y requiere de nuevas aproximaciones metodológicas, como el uso de modelos acoplados físico-biogeoquímicos (Alosairi y Alsulaiman, 2019; Espinoza-Morriberón *et al.*, 2019).

4.4 Impactos esperados de la hipoxia en Mazatlán

El nivel de impacto de la hipoxia sobre los ecosistemas depende de la intensidad y duración de esta condición. En el caso de Mazatlán, la intensidad varía desde episodios de bajo oxígeno ($2-4 \text{ mg L}^{-1}$) (Sato *et al.*, 2016), de hipoxia ($<2 \text{ mg L}^{-1}$) y hasta anoxia ($<0.06 \text{ mg L}^{-1}$). Respecto a la duración, se pueden considerar como episodios esporádicos, pues los eventos más largos duran entre 24 y 34 horas bajo el umbral de hipoxia (tabla 3). Resalta que la recuperación de los niveles de DO después de cada evento ocurre de manera rápida. Esto podría ser el resultado de aumento de la producción fotosintética derivado del aporte de nutrientes causado por las propias surgencias. Aunque también podría ser el resultado de advección por otros procesos oceanográficos u de aireación de la masa de agua.

Por la duración de los episodios, la principal consecuencia esperada es que las poblaciones de peces migren a otras zonas, aunque, de aumentar la intensidad y duración de estos eventos, se podrían presentar episodios de alta mortalidad de peces (Vaquer-Sunyer y Duarte, 2008). Este tipo de eventos, así como la expansión vertical de la OMZ, representan una compresión del hábitat de estas especies (Helly y Levin, 2004; Prince y Goodyear, 2006; Stramma *et al.*, 2012).

Debido a que el camarón (*Litopenaeus vannamei*) es una de las especies explotadas en esta región (Páez-Osuna *et al.*, 2013) y a la susceptibilidad de esta especie a bajos valores de DO (Van Wyk y Scarpa, 1999; Boyd *et al.*, 2001), estos eventos de hipoxia también representan una potencial amenaza económica para la región. Por lo tanto, es necesario continuar con el monitoreo de DO y se sugiere implementar nuevos estudios que puedan el potencial impacto económico de estos eventos de hipoxia.

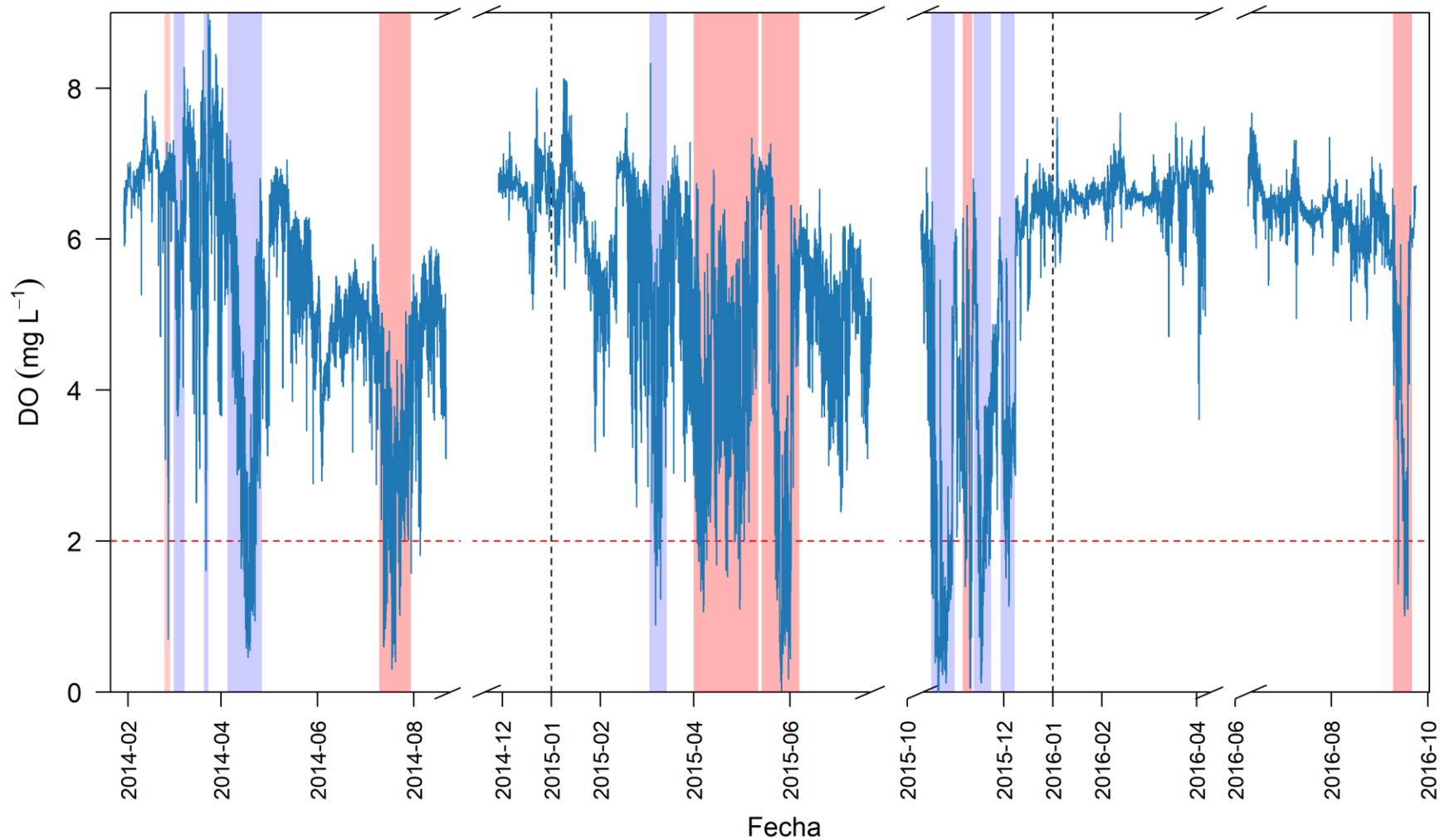


Figura 4.2. Serie de DO en Mazatlán entre enero de 2014 y septiembre de 2016. Las áreas sombreadas en azul identifican los eventos de hipoxia relacionados con surgencias costeras. Las áreas sombreadas en rojo identifican los eventos de hipoxia que no mostraron relación con surgencias costeras.

4.5 Perspectivas

Una búsqueda exhaustiva de otras fuentes de datos reveló la prácticamente nula disponibilidad de este tipo de información para esta región. Como se observa en la figura 4.3, la cantidad de observaciones superficiales de oxígeno para la zona costera del Pacífico mexicano es considerablemente menor que para el resto de otras zonas costeras del mundo, lo que evidencia un significativo retraso en el estudio y monitoreo de esta variable en los ecosistemas costeros de este país. Las series de DO y SST presentadas en este trabajo pertenecen a un conjunto muy reducido de datos de este tipo disponibles (y accesibles) en esta región. La producción de esta información forma parte de un esfuerzo por generar redes de monitoreo que permitan obtener un mejor conocimiento los ecosistemas costeros en México, así como identificar y alertar sobre los posibles impactos del cambio global sobre estos ecosistemas (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018). Por esto, es fundamental continuar y aumentar con el esfuerzo de monitorear este tipo de variables oceánicas en el futuro inmediato y a largo plazo.

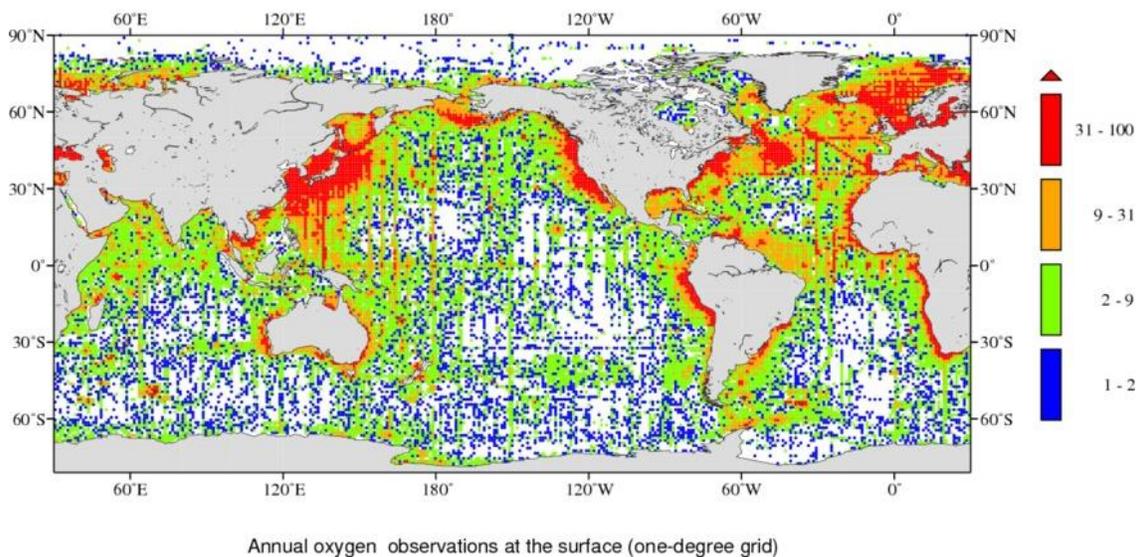


Figura 4.3. Distribución anual de observaciones superficiales de oxígeno disuelto, obtenido de World Ocean Database (Boyer et al., 2013). Unidades en observaciones superficiales anuales. Se observa que a lo largo de la costa del Pacífico mexicano se disponen de menos observaciones de que en el resto de las zonas costeras, con aproximadamente 2 a 31 observaciones por año.

Si bien este proyecto se centró en analizar la relación de la hipoxia costera con surgencias costeras, incorporar procesos biogeoquímicos a los análisis permitirá obtener una mejor comprensión del fenómeno. Una de las principales limitaciones para incluir estos procesos al análisis es la poca disponibilidad de información de parámetros biogeoquímicos, como los nutrientes, con alta resolución temporal. Además, el aumento en el grado de complejidad requiere de nuevas aproximaciones metodológicas, como puede ser el uso de modelos regionales con acoplamiento físico-biogeoquímico (Aumont y Bopp, 2006).

5. Conclusiones

La serie de oxígeno disuelto (DO) registrada en las aguas superficiales de la costa de Mazatlán entre enero de 2014 y septiembre del 2016 evidenció la ocurrencia de múltiples eventos de hipoxia cuya permanencia varía entre ~3 y ~34 horas.

El comportamiento de las series del índice de surgencia costera por viento (CUI) y el gradiente de temperatura superficial (SSTGrad) confirmó la ocurrencia de las surgencias costeras en Mazatlán. Estas surgencias ocurren predominantemente entre octubre y junio, mientras que se debilitan entre los meses de julio a septiembre.

Los resultados indican que al menos 6 de los 12 eventos de hipoxia (56% de la duración de hipoxia) fueron causados por surgencias costeras, las cuales hacen emerger aguas desde la zona de mínimo oxígeno hasta la superficie, lo que reduce la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua. Estos eventos ocurrieron entre los meses de octubre y abril, y forman parte de la variabilidad natural de la zona, por lo que no representan una presión antropogénica sobre el ecosistema.

Además, los resultados indican que otros 6 de los 12 de los eventos de hipoxia no son causados por las surgencias (44% de la duración de hipoxia). Estos ocurrieron principalmente entre mayo y septiembre. Estos eventos de hipoxia pueden ser provocados por; i) procesos dinámicos que modulan la profundidad de la oxiclina, especialmente remolinos de mesoescala y ondas de Kelvin atrapadas a la costa, o ii) eutrofización por la influencia antropogénica adyacente a la zona de estudio.

Los resultados del presente trabajo sirven para advertir sobre la ocurrencia de eventos de hipoxia costera en Mazatlán, así como demostrar que al menos la mitad de ellos son causados por surgencias costeras. Es necesario ampliar el estudio para poder determinar las causas de todos los eventos de hipoxia registrados. Para esto,

se sugiere implementar nuevas técnicas metodológicas, como el registro de variables biogeoquímicas a alta resolución temporal y el uso de modelos físicos-biogeoquímicos, que permitan evaluar las nuevas hipótesis. También es necesario continuar con el monitoreo del DO, así como aumentar sensores a diferentes profundidades, que permitan identificar y alertar sobre el posible aumento en la frecuencia, intensidad o duración de eventos de hipoxia.

6. Referencias

Aumont, O., and L. Bopp (2006). Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies, *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB2017, doi:10.1029/2005GB002591

Alosairi, Y., & Alsulaiman, N. (2019). Hydro-environmental processes governing the formation of hypoxic parcels in an inverse estuarine water body: Model validation and discussion. *Marine pollution bulletin*, 144, 92-104. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.067>

Armbrust, E. V. (2009). The life of diatoms in the world's oceans. *Nature*, 459(7244), 185-192. <https://doi.org/10.1038/nature08057>

Bakun, A. (1973). Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946 –71. U.S. Dept. Commerce, NOAA Tech. Rep., NMFS SSRF-671, 103 pp.

Bakun, A., Black, B. A., Bograd, S. J., Garcia-Reyes, M., Miller, A. J., Rykaczewski, R. R., & Sydeman, W. J. (2015). Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*, 1(2), 85-93. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0008-4>

Bentamy, A. (2018). PRODUCT USER MANUAL For Wind product WIND_GLO_WIND_L4_REP_OBSERVATIONS_012_006. (Copernicus wind).

Bibby, T. S., Gorbunov, M. Y., Wyman, K. W., & Falkowski, P. G. (2008). Photosynthetic community responses to upwelling in mesoscale eddies in the subtropical North Atlantic and Pacific Oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(10-13), 1310-1320. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.01.014>

Boyer, T.P., J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman, H. E. Garcia, A. Grodsky, D. R. Johnson, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, T.D. O'Brien, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I. V. Smolyar, and M. M. Zweng, 2013: World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72, S. Levitus, Ed., A. Mishonov, Technical Ed.; Silver Spring, MD, 209 pp.

Boyd, C. E., Treece, G., Engle, R. C., Valderrama, D., Lightner, D. V., & Pantoja, C. R. (2001). Consideraciones sobre la calidad del agua y del suelo en cultivos de camarón. *Métodos para mejorar la camaricultura en Centroamérica*, 1-30.

Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J. & Jacinto, G. S. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240. <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>

Broitman, B. R., & Kinlan, B. P. (2006). Spatial scales of benthic and pelagic producer biomass in a coastal upwelling ecosystem. *Marine Ecology Progress Series*, 327, 15-25. <https://doi.org/10.3354/meps327015>

Cardoso-Mohedano, J. G., Páez-Osuna, F., Amezcua-Martínez, F., Ruiz-Fernández, A. C., Ramírez-Reséndiz, G., & Sanchez-Cabeza, J. A. (2016). Combined environmental stress from shrimp farm and dredging releases in a subtropical coastal lagoon (SE Gulf of

California). *Marine Pollution Bulletin*, 104(1-2), 83-91.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.02.008>

Cepeda-Morales, J., Beier, E., Gaxiola-Castro, G., Lavín, M. F., & Godínez, V. M. (2009). Effect of the oxygen minimum zone on the second chlorophyll maximum. *Ciencias Marinas*, 35(4), 389-403. <https://doi.org/10.7773/cm.v35i4.1622>

Cepeda-Morales, J., Gaxiola-Castro, G., Beier, E., & Godínez, V. M. (2013). The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 76, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.02.004>

Chan, F., Barth, J. A., Kroeker, K. J., Lubchenco, J., & Menge, B. A. (2019). The dynamics and impact of ocean acidification and hypoxia. *Oceanography*, 32(3), 62-71. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.312>

Chan, F. (2019). Evidence for ocean deoxygenation and its patterns: Eastern Boundary Upwelling Systems. En Laffoley, D., & Baxter, J. M. *Ocean Deoxygenation—Everyone's Problem: Causes, Impacts, Consequences and Solutions*. DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.13.en>

Chavez, F. P., & Messié, M. (2009). A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), 80-96. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.032>

Checkley Jr, D. M., & Barth, J. A. (2009). Patterns and processes in the California Current System. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.028>

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>

Copernicus. (2017). Access to products - Copernicus. [online] Descargado de: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024. Consultado en: 2017-11-27.

Cushman-Roisin, B., & Beckers, J. M. (2008). Chapter 8. The Ekman Layer. En *Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects*. Academic press. Pp. 219-248 <https://doi.org/10.1080/00107514.2012.762047>

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and marine biology. An annual review*, 33, 245-03.

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *science*, 321(5891), 926-929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2011). Introduction to environmental and economic consequences of hypoxia. *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 71-82. <https://doi.org/10.1080/07900627.2010.531379>

Espinoza-Morriberón D, Echevin V, Colas F, Tam J, Gutierrez D, Graco Ledesma J and Quispe-Ccalluari C. (2019) Oxygen Variability During ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Front. Mar. Sci.* 5:526. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00526>

Falkowski, P. G. (1994). The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis research*, 39(3), 235-258. <https://doi.org/10.1007/BF00014586>

Garcia, H. E., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, J. I. Antonov, O.K. Baranova, M.M. Zweng, J.R. Reagan, D.R. Johnson, 2014. *World Ocean Atlas 2013, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 75, 27 pp.

García-Reyes, M., & Largier, J. (2010). Observations of increased wind-driven coastal upwelling off central California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4). <https://doi.org/10.1029/2009JC005576>

Gewin, V. (2010). Dead in the water. *Nature*, 466(7308), 812. <https://doi.org/10.1038/466812a>

Gómez-Valdivia, F., Parés-Sierra, A., & Flores-Morales, A. L. (2015). The Mexican Coastal Current: A subsurface seasonal bridge that connects the tropical and subtropical Northeastern Pacific. *Continental Shelf Research*, 110, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.010>

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics, European Geosciences Union (EGU)*, 2004, 11 (5/6), pp.561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>

Helly, J. J., & Levin, L. A. (2004). Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(9), 1159-1168. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.03.009>

Herrera-Cervantes, H., Lluch-Cota, D. B., Lluch-Cota, S. E., & Gutiérrez-de-Velasco, S. (2007). The ENSO signature in sea-surface temperature in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*, 65(5), 589-605. <https://doi.org/10.1357/002224007783649529>

Hofmann, A. F., Peltzer, E. T., Walz, P. M., & Brewer, P. G. (2011). Hypoxia by degrees: Establishing definitions for a changing ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(12), 1212-1226. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.09.004>

Howarth, R. W., Sharpley, A., & Walker, D. (2002). Sources of nutrient pollution to coastal waters in the United States: Implications for achieving coastal water quality goals. *Estuaries*, 25(4), 656-676. <https://doi.org/10.1007/BF02804898>

INEGI. (2015). *Panorama Sociodemográfico de Sinaloa*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Jacox, M. G., Fiechter, J., Moore, A. M., & Edwards, C. A. (2015). ENSO and the California Current coastal upwelling response. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(3), 1691-1702. <https://doi.org/10.1002/2014JC010650>

Jacox, M. G., Hazen, E. L., Zaba, K. D., Rudnick, D. L., Edwards, C. A., Moore, A. M., & Bograd, S. J. (2016). Impacts of the 2015–2016 El Niño on the California Current System: Early assessment and comparison to past events. *Geophysical Research Letters*, 43(13), 7072-7080 <https://doi.org/10.1002/2016GL069716>

Joos, F., Plattner, G. K., Stocker, T. F., Körtzinger, A., & Wallace, D. W. (2003). Trends in marine dissolved oxygen: Implications for ocean circulation changes and the carbon budget. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 84(21), 197-201. <https://doi.org/10.1029/2003EO210001>

Kämpf, J., & Chapman, P. (2016). The functioning of coastal upwelling systems. In *Upwelling systems of the world* (pp. 31-65). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42524-5_2

Karstensen, J., Stramma, L., & Visbeck, M. (2008). Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. *Progress in Oceanography*, 77(4), 331-350. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.05.009>

Koeve, W., & Kähler, P. (2016). Oxygen utilization rate (OUR) underestimates ocean respiration: A model study. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(8), 1166-1182. <https://doi.org/10.1002/2015GB005354>

Lavín, M. F., & Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics* (pp. 173-204). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11

Lara Cera, A.R. (2020) *Percepción remota de eventos de surgencias en el observatorio costero de Mazatlán, Sinaloa (Pacífico Noroeste)*. Tesis de Licenciatura, UNAM.

Lellouche, J. M., Legalloudec, O., Regnier, C., Levier, B., Greiner, E., & Drevillon, M. (2016). Quality information document for global sea physical analysis and forecasting product global analysis forecast phy 001 024.

Libes, S. (2011). Chapter 6: Gas Solubility and Exchange across the Air-Sea Interface. En. *Introduction to marine biogeochemistry*. Academic Press.

Limburg, K. E., Breitburg, D., Swaney, D. P., & Jacinto, G. (2020). Ocean Deoxygenation: A Primer. *One Earth*, 2(1), 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.01.001>

Lluch-Cota, D. B., Wooster, W. S., & Hare, S. R. (2001). Sea surface temperature variability in coastal areas of the northeastern Pacific related to the El Niño-Southern Oscillation and

the Pacific Decadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2029-2032. <https://doi.org/10.1029/2000GL012429>

Maske, H., Medrano, R. C., Castro, A. T., Mercado, A. J., Almeda Jauregui, C. O., Castro, G. G., & Ochoa, J. (2010). Inorganic carbon and biological oceanography above a shallow oxygen minimum in the entrance to the Gulf of California in the Mexican Pacific. *Limnology and oceanography*, 55(2), 481-491 <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.2.0481>

Matear, R. J., & Hirst, A. C. (2003). Long-term changes in dissolved oxygen concentrations in the ocean caused by protracted global warming. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4). <https://doi.org/10.1029/2002GB001997>

Montaño-Ley, Y., Peraza-Vizcarra, R., & Páez-Osuna, F. (2008). Tidal hydrodynamics and their implications for the dispersion of effluents in Mazatlán Harbor: an urbanized shallow coastal lagoon. *Water, air, and soil pollution*, 194(1-4), 343. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9721-0>

Ochoa-Izaguirre, M. J. & Soto-Jiménez, M. F. (2013). Evaluation of nitrogen sources in the Urías lagoon system, Gulf of California, based on stable isotopes in macroalgae. *Ciencias Marinas*, 39(4), 413-430. <https://doi.org/10.7773/cm.v39i4.2285>

Onset Computer Corporation (2012a). HOB0 Dissolved Oxygen Logger (U26-001) Manual. https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/15603-B-MAN-U26x.pdf

Onset Computer Corporation (2012b). Onset's HOB0 Dissolved Oxygen Logger Uses the Latest Advancements in Optical Measurement Technology. https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/DO-technology-background.pdf

Páez-Osuna, F., Gracia, A., Flores-Verdugo, F., Lyle-Fritch, L. P., Alonso-Rodriguez, R., Roque, A., & Ruiz-Fernández, A. C. (2003). Shrimp aquaculture development and the environment in the Gulf of California ecoregion. *Marine Pollution Bulletin*, 46(7), 806-815. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00107-3)

Pantoja, D. A., Marinone, S. G., Parés-Sierra, A., & Gómez-Valdivia, F. (2012). Numerical modeling of seasonal and mesoscale hydrography and circulation in the Mexican Central Pacific. *Ciencias Marinas*, 38(2), 363-379. <https://doi.org/10.7773/cm.v38i2.2007>

Paulmier, A., Ruiz-Pino, D., & Garçon, V. (2008). The oxygen minimum zone (OMZ) off Chile as intense source of CO₂ and N₂O. *Continental Shelf Research*, 28(20), 2746-2756. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.012>

Pedersen, M. F., & Borum, J. (1996). Nutrient control of algal growth in estuarine waters. Nutrient limitation and the importance of nitrogen requirements and nitrogen storage among phytoplankton and species of macroalgae. *Marine Ecology Progress Series*, 142, 261-272. <https://doi.org/10.3354/meps142261>

Pond, S., & G.L. Pickard. (1983). *Introductory Dynamical Oceanography*, 2nd ed. Oxford: Pergamon Press. 329 pp. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24288-7>

Prince, E. D., & Goodyear, C. P. (2006). Hypoxia-based habitat compression of tropical pelagic fishes. *Fisheries Oceanography*, 15(6), 451-464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00393.x>

R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
Rabalais, N. N., Turner, R. E., Díaz, R. J., & Justić, D. (2009). Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7), 1528-1537. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp047>

Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., & Raga, G. B. (2007). Midsummer gap winds and low-level circulation over the eastern tropical Pacific. *Journal of Climate*, 20(15), 3768-3784. <https://doi.org/10.1175/JCLI4220.1>

Rösch, A., & Schmidbauer, H. (2016). WaveletComp 1.1: A guided tour through the R package. URL: http://www.hsstat.com/projects/WaveletComp/WaveletComp_guided_tour.pdf.

Rykaczewski, R. R., & Checkley, D. M. (2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1965-1970. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>

Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1), 21-33.

Sánchez-Cabeza J.A., Álvarez Sánchez L.F., Cardoso-Mohedano J.G., Escalante Mancera E., Díaz-Asencio M., López-Rosas H., Machain-Castillo M.L., Merino-Ibarra M., Ruiz-Fernández A.C., Alonso-Rodríguez R., Gómez-Ponce M.A., Ávila-Torres E., Serguei Rico-Esenaro S., Gómez-Realí M. A., Herrera-Becerril C.A., Grutter M. A low-cost long-term model of coastal observatories of global change (2019). *Journal of Operational Oceanography*. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1533723>

Santoso, A., Mcphaden, M. J., & Cai, W. (2017). The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079-1129. <https://doi.org/10.1002/2017RG000560>

Sato, M., Horne, J. K., Parker-Stetter, S. L., Essington, T. E., Keister, J. E., Moriarty, P. E., ... & Newton, J. (2016). Impacts of moderate hypoxia on fish and zooplankton prey distributions in a coastal fjord. *Marine Ecology Progress Series*, 560, 57-72. <https://doi.org/10.3354/meps11910>

Schuenemeyer, J. H., & Drew, L. J. (2011). *Statistics for earth and environmental scientists*. John Wiley & Sons. pp 257 – 263. <https://doi.org/10.1002/9780470650707>

Smith, V. H., Joye, S. B., & Howarth, R. W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and oceanography*, 51(1part2), 351-355. https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351

Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here?. *Trends in ecology & evolution*, 24(4), 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>

Stramma, L., Prince, E. D., Schmidtko, S., Luo, J., Hoolihan, J. P., Visbeck, M., ... & Körtzinger, A. (2012). Expansion of oxygen minimum zones may reduce available habitat for tropical pelagic fishes. *Nature Climate Change*, 2(1), 33-37. <https://doi.org/10.1038/nclimate1304>

Stramma, L., Johnson, G. C., Sprintall, J., & Mohrholz, V. (2008). Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science*, 320(5876), 655-658. <https://doi.org/10.1126/science.1153847>

Sydeman, W. J., García-Reyes, M., Schoeman, D. S., Rykaczewski, R. R., Thompson, S. A., Black, B. A., & Bograd, S. J. (2014). Climate change and wind intensification in coastal upwelling ecosystems. *Science*, 345(6192), 77-80. <https://doi.org/10.1126/science.1251635>

Thomas, F., Garçon, V., & Minster, J. F. (1990). Modelling the seasonal cycle of dissolved oxygen in the upper ocean at Ocean Weather Station P. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 37(3), 463-491. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90020-V](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90020-V)

Van Wyk, Peter & Scarpa, John. (1999). Water quality requirements and management. In *Farming Marine Shrimp in Recirculating Freshwater Systems*. 128-138.

Vaquer-Sunyer, R., & Duarte, C. M. (2008). Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(40), 15452-15457. <https://doi.org/10.1073/pnas.0803833105>

Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2013). *Modern applied statistics with S-PLUS*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2>

Anexo 1. Análisis estadísticos por evento

Evento de hipoxia del 24-02-2014 al 28-02-2014

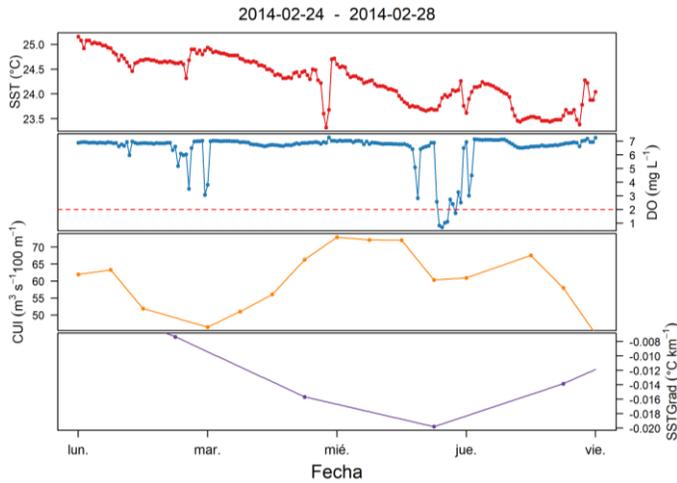


Figura A1.1. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 24-02-2014 al 28-02-2014

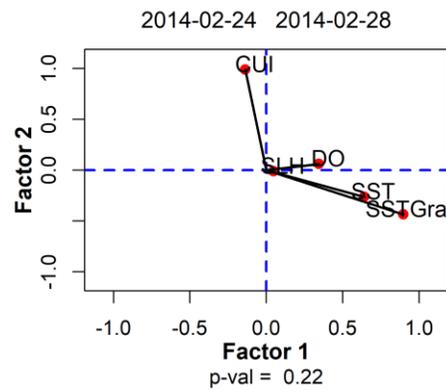


Figura A1.2. Análisis de factores evento del 24-02-2014 al 28-02-2014

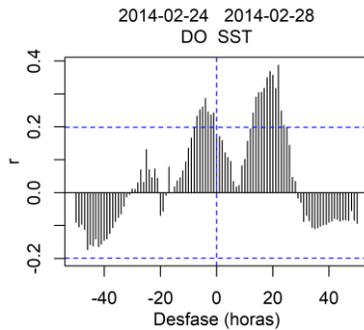


Figura A1.3. Correlación cruzada DO SST evento del 24-02-2014 al 28-02-2014

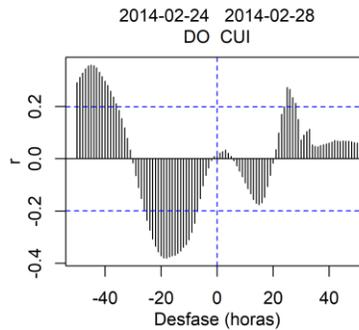


Figura A1.4. Correlación cruzada DO CUI evento del 24-02-2014 al 28-02-2014

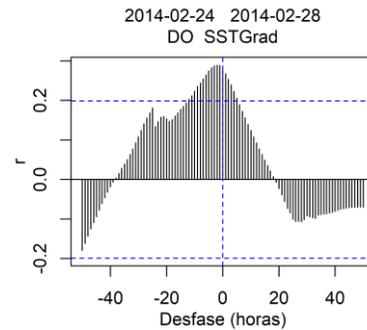


Figura A1.5. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 24-02-2014 al 28-02-2014

Evento de bajo oxígeno del 12-03-2014 al 18-03-2014

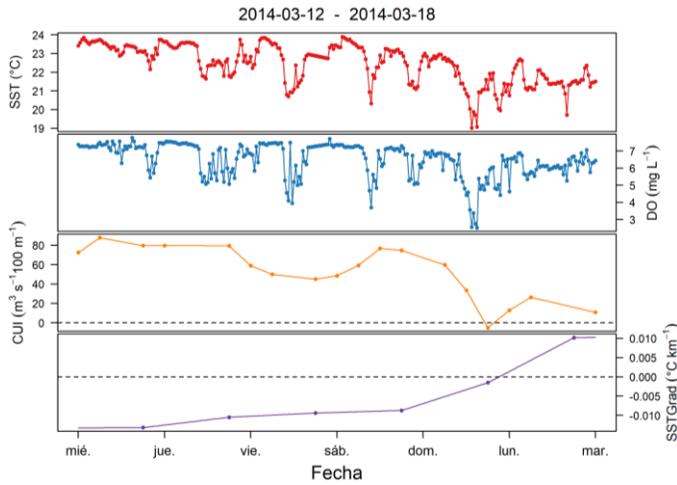


Figura A1.6. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 12-03-2014 al 18-03-2014

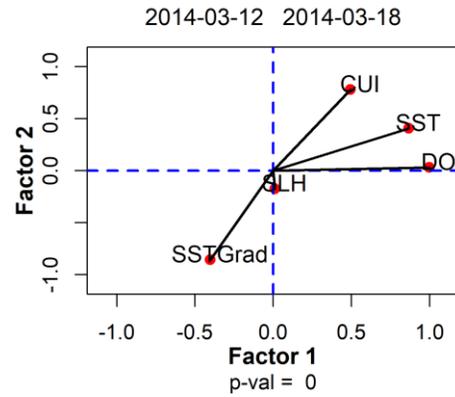


Figura A1.7. Análisis de factores evento del 12-03-2014 al 18-03-2014

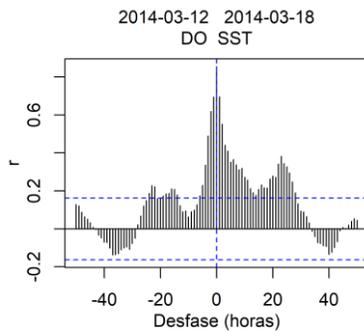


Figura A1.8. Correlación cruzada DO SST evento del 12-03-2014 al 18-03-2014

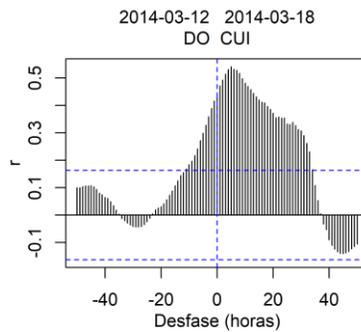


Figura A1.9. Correlación cruzada DO CUI evento del 12-03-2014 al 18-03-2014

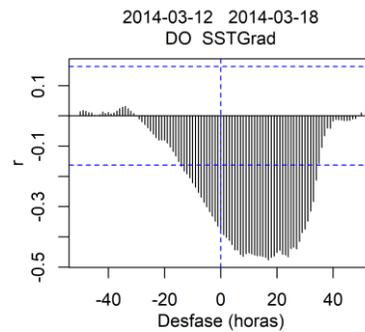


Figura A1.10. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 12-03-2014 al 18-03-2014

Evento de hipoxia del 05-04-2014 al 26-04-2014

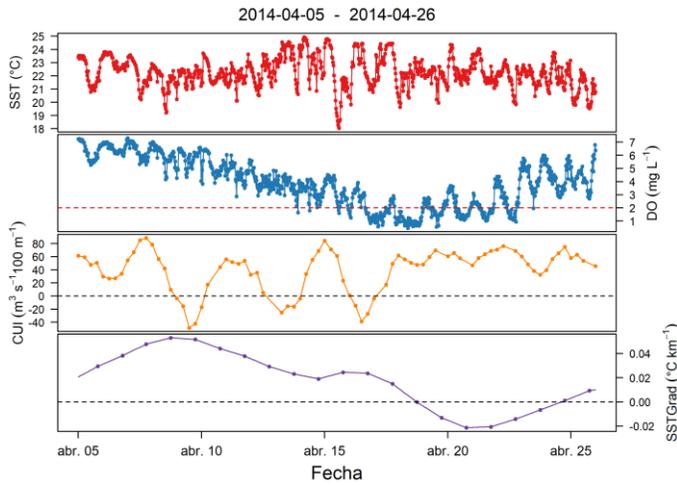


Figura A1.11. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 05-04-2014 al 26-04-2014

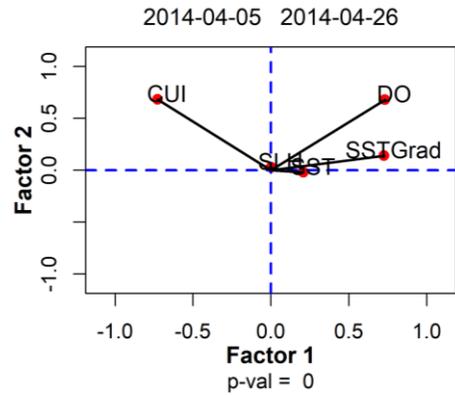


Figura A1.12. Análisis de factores evento del 05-04-2014 al 26-04-2014

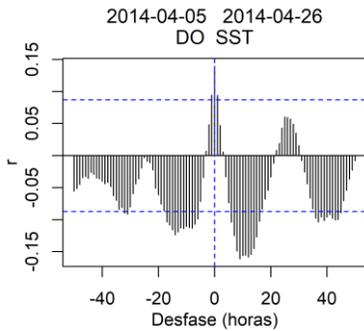


Figura A1.13. Correlación cruzada DO SST evento del 05-04-2014 al 26-04-2014

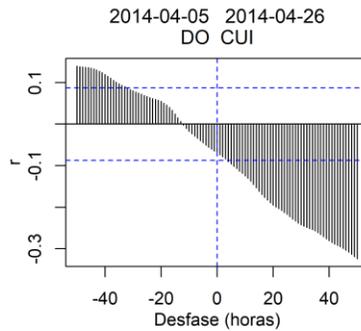


Figura A1.14. Correlación cruzada DO CUI evento del 05-04-2014 al 26-04-2014

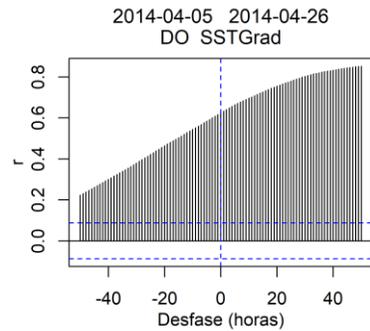


Figura A1.15. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 05-04-2014 al 26-04-2014

Evento de hipoxia del 01-04-2015 al 12-05-2015

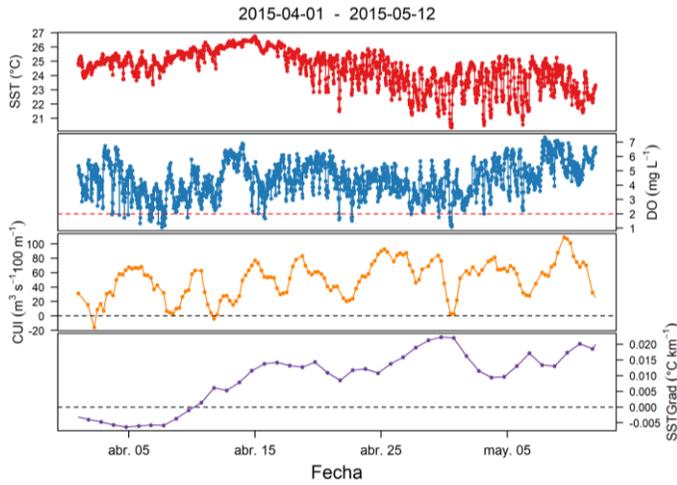


Figura A1.16. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 01-04-2015 al 12-05-2015

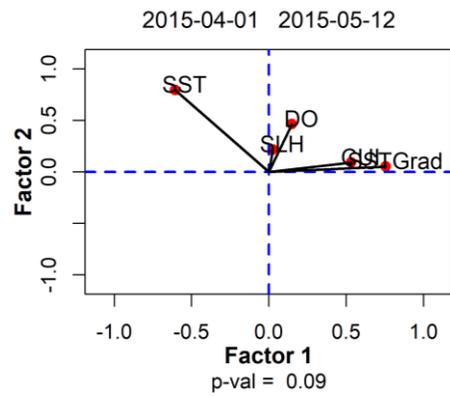


Figura A1.17. Análisis de factores evento del 01-04-2015 al 12-05-2015

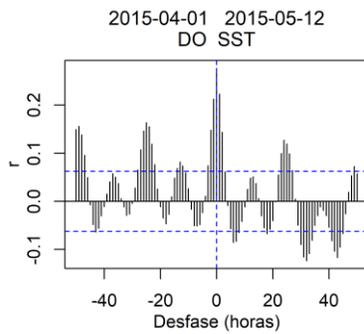


Figura A1.18. Correlación cruzada DO SST evento del 01-04-2015 al 12-05-2015

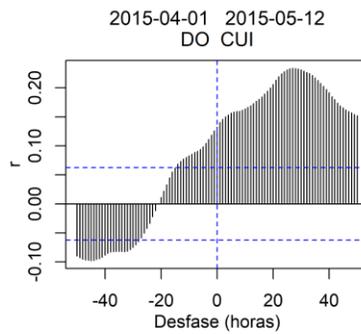


Figura A1.19. Correlación cruzada DO CUI evento del 01-04-2015 al 12-05-2015

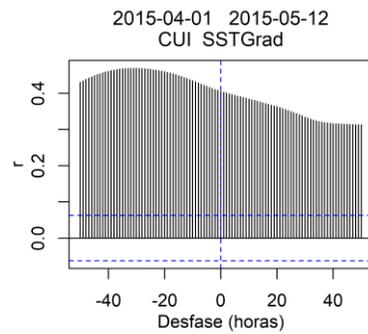


Figura A1.20. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 01-04-2015 al 12-05-2015

Evento de hipoxia del 14-05-2015 al 07-06-2015

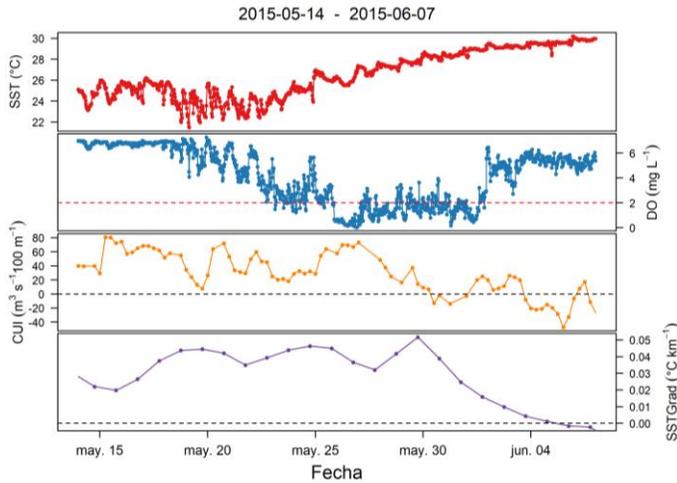


Figura A1.21. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 14-05-2015 al 07-06-2015

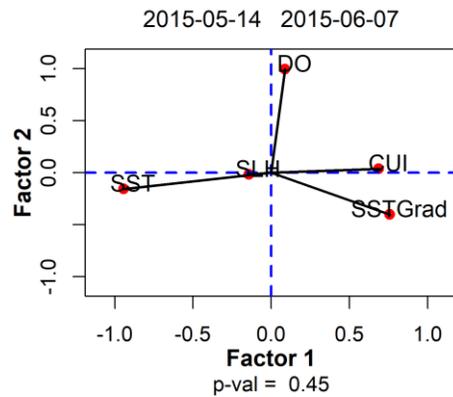


Figura A1.22. Análisis de factores evento del 14-05-2015 al 07-06-2015

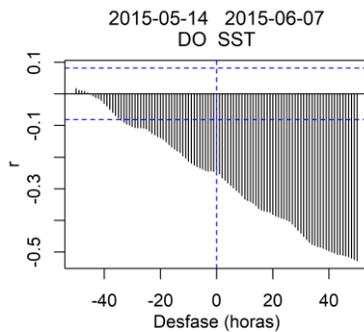


Figura A1.23. Correlación cruzada DO SST evento del 14-05-2015 al 07-06-2015

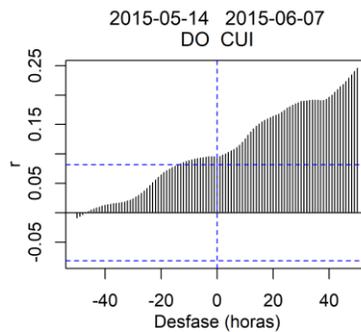


Figura A1.24. Correlación cruzada DO CUI evento del 14-05-2015 al 07-06-2015

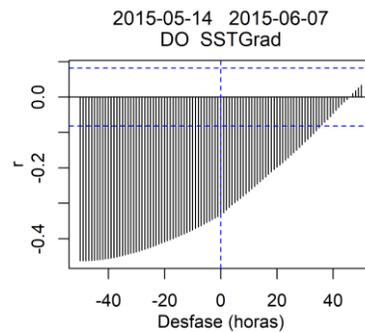


Figura A1.25. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 14-05-2015 al 07-06-2015

Evento de hipoxia del 16-10-2015 al 31-10-2015

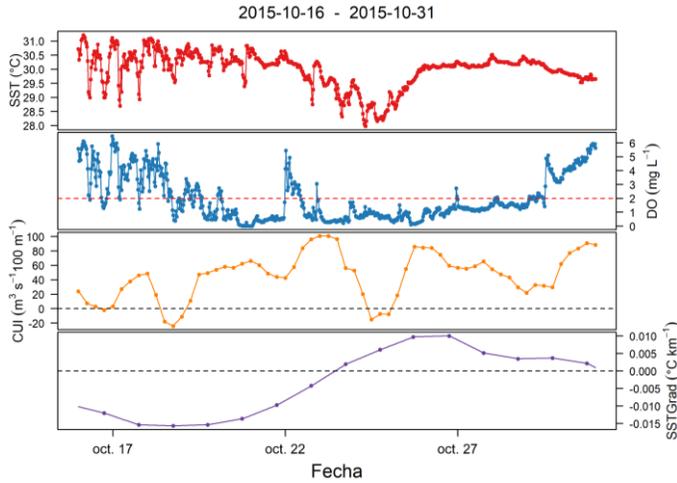


Figura A1.26. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 16-10-2015 al 31-10-2015

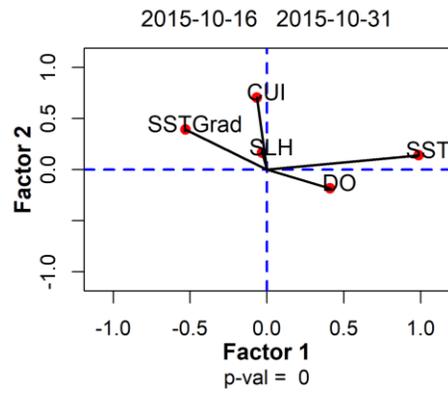


Figura A1.27. Análisis de factores evento del 16-10-2015 al 31-10-2015

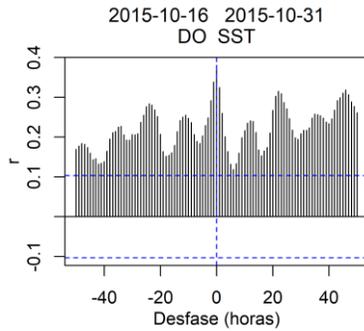


Figura A1.28. Correlación cruzada DO SST evento del 16-10-2015 al 31-10-2015

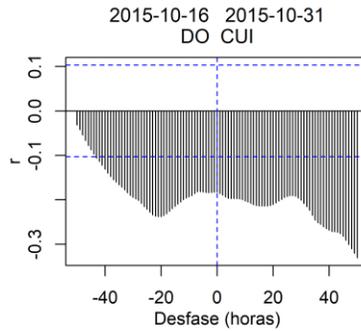


Figura A1.29. Correlación cruzada DO CUI evento del 16-10-2015 al 31-10-2015

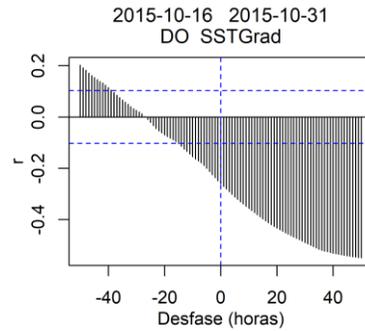


Figura A1.30. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 16-10-2015 al 31-10-2015

Evento de hipoxia del 05-11-2015 al 11-11-2015

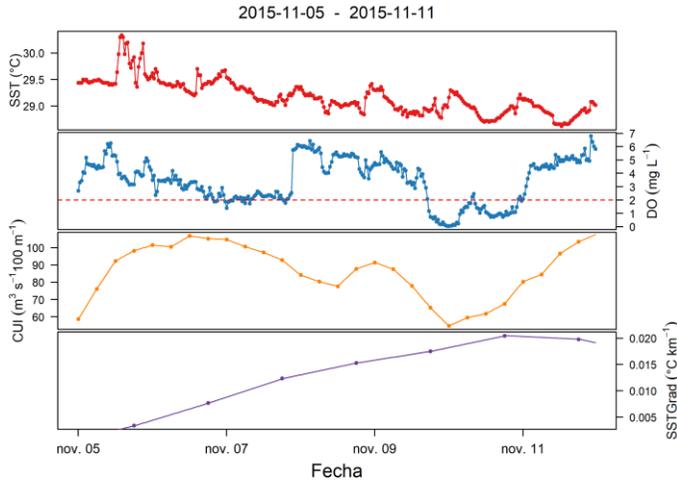


Figura A1.31. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 05-11-2015 al 11-11-2015

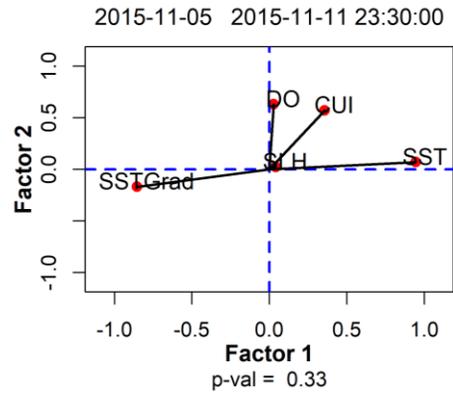


Figura A1.32. Análisis de factores evento del 05-11-2015 al 11-11-2015

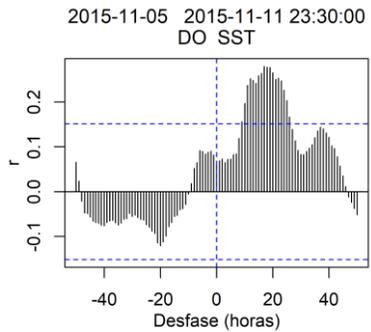


Figura A1.33. Correlación cruzada DO SST evento del 05-11-2015 al 11-11-2015

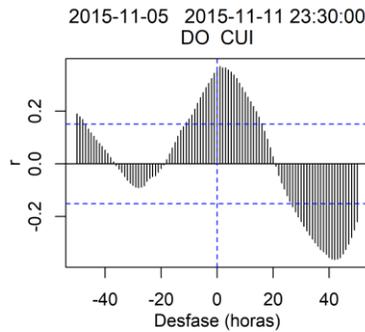


Figura A1.34. Correlación cruzada DO CUI evento del 05-11-2015 al 11-11-2015

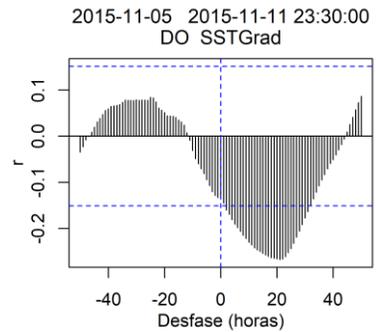


Figura A1.35. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 05-11-2015 al 11-11-2015

Evento de hipoxia del 12-11-2015 al 23-11-2015

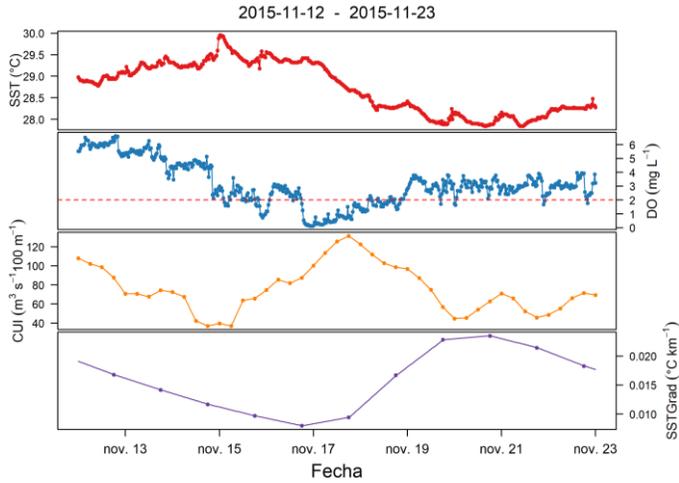


Figura A1.36. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 12-11-2015 al 23-11-2015

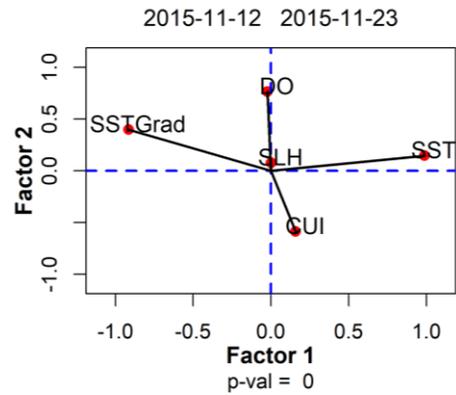


Figura A1.37. Análisis de factores evento del 12-11-2015 al 23-11-2015

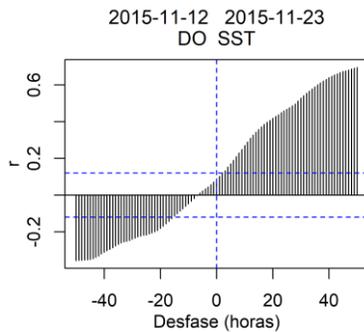


Figura A1.38. Correlación cruzada DO SST evento del 12-11-2015 al 23-11-2015

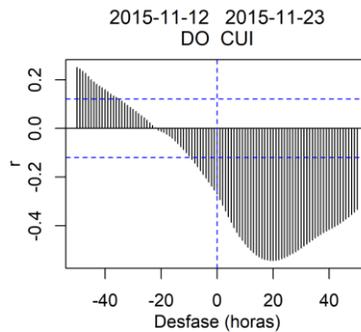


Figura A1.39. Correlación cruzada DO CUI evento del 12-11-2015 al 23-11-2015

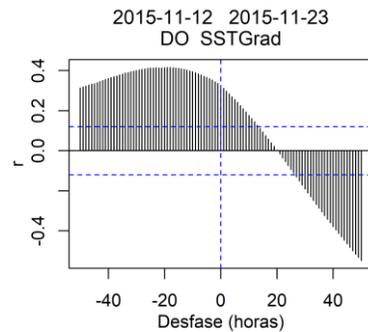


Figura A1.40. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 12-11-2015 al 23-11-2015

Evento de hipoxia del 09-09-2016 al 21-09-2016

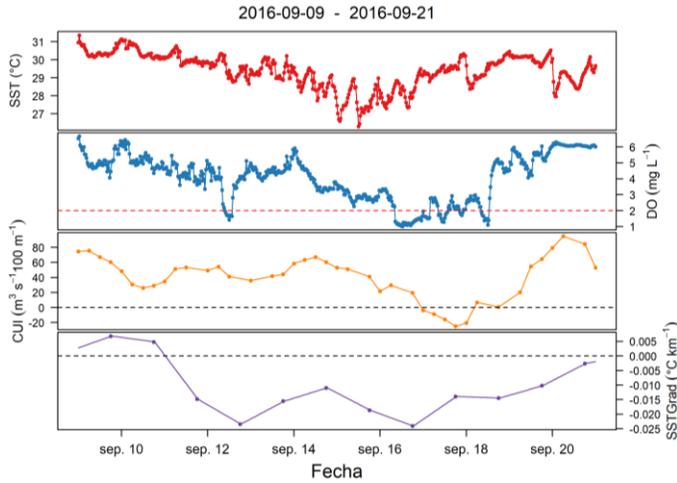


Figura A1.41. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad, evento del 09-09-2016 al 21-09-2016

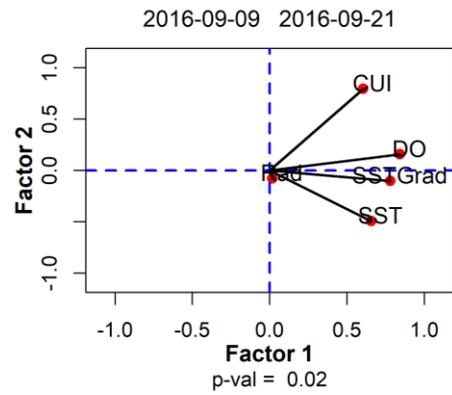


Figura A1.42. Análisis de factores evento del 09-09-2016 al 21-09-2016

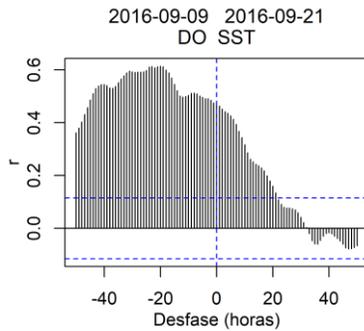


Figura A1.43. Correlación cruzada DO SST evento del 09-09-2016 al 21-09-2016

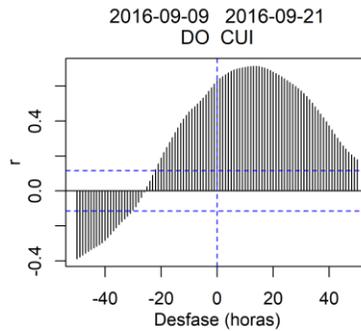


Figura A1.44. Correlación cruzada DO CUI evento del 09-09-2016 al 21-09-2016

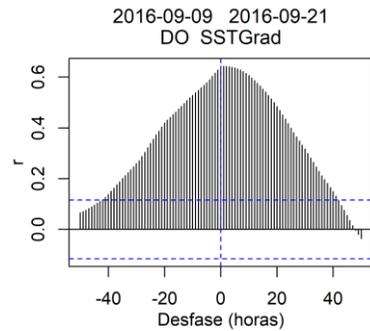


Figura A1.45. Correlación cruzada DO SSTGrad evento del 09-09-2016 al 21-09-2016

Periodo neutro del 08-01-2016 al 18-03-2016

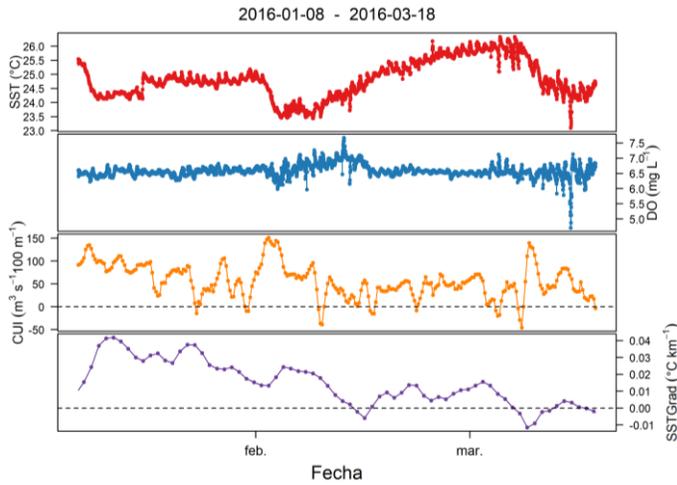


Figura A1.46. Series de DO, SST, CUI y SSTGrad del 08-01-2016 al 18-03-2016

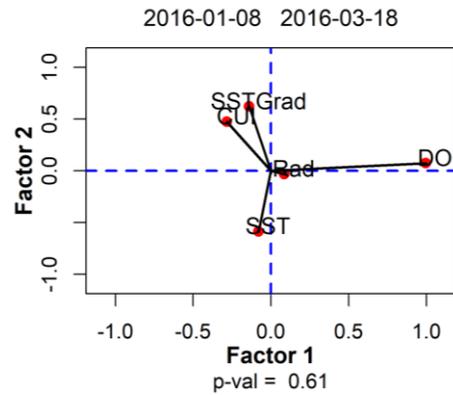


Figura A1.47. Análisis de factores del 08-01-2016 al 18-03-2016

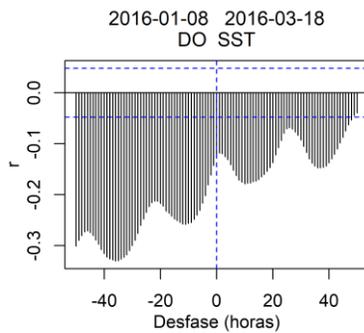


Figura A1.48. Correlación cruzada DO SST del 08-01-2016 al 18-03-2016

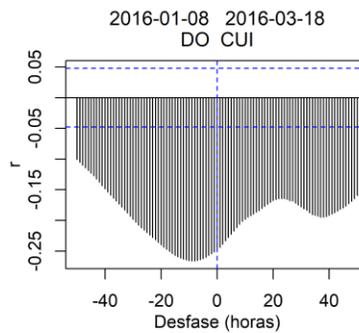


Figura A1.49. Correlación cruzada DO CUI del 08-01-2016 al 18-03-2016

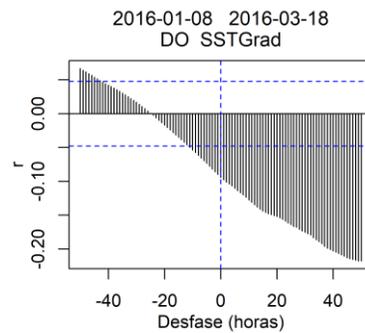


Figura A1.50. Correlación cruzada DO SSTGrad del 08-01-2016 al 18-03-2016

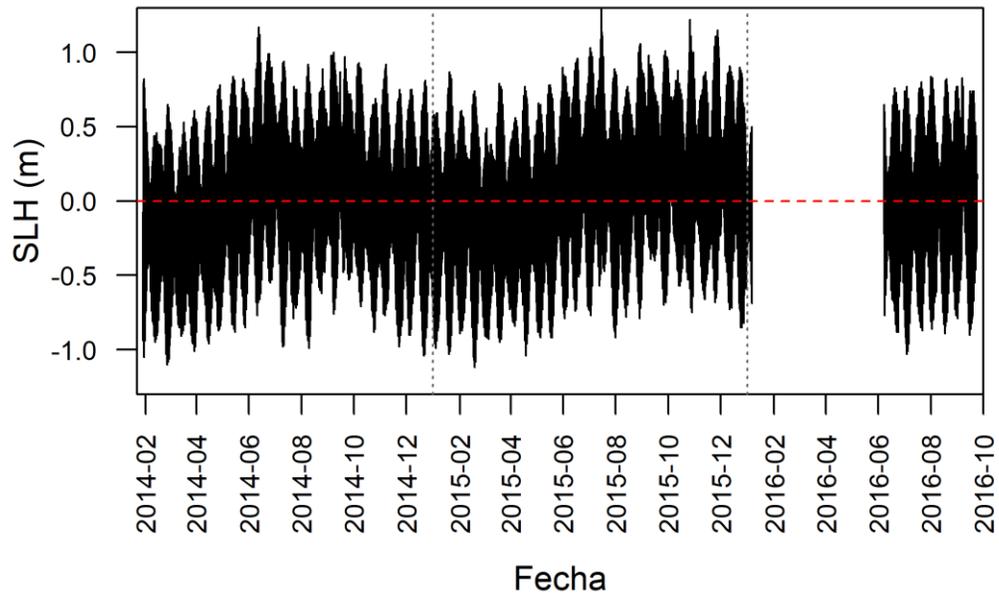


Figura A1.51. Serie de tiempo de nivel del mar (SLH).

Anexo 2. Análisis de frecuencias

Tramo 2. Del 2014-11-29 al 2015-07-22

Tramo 2 Cross wavelet DO SST

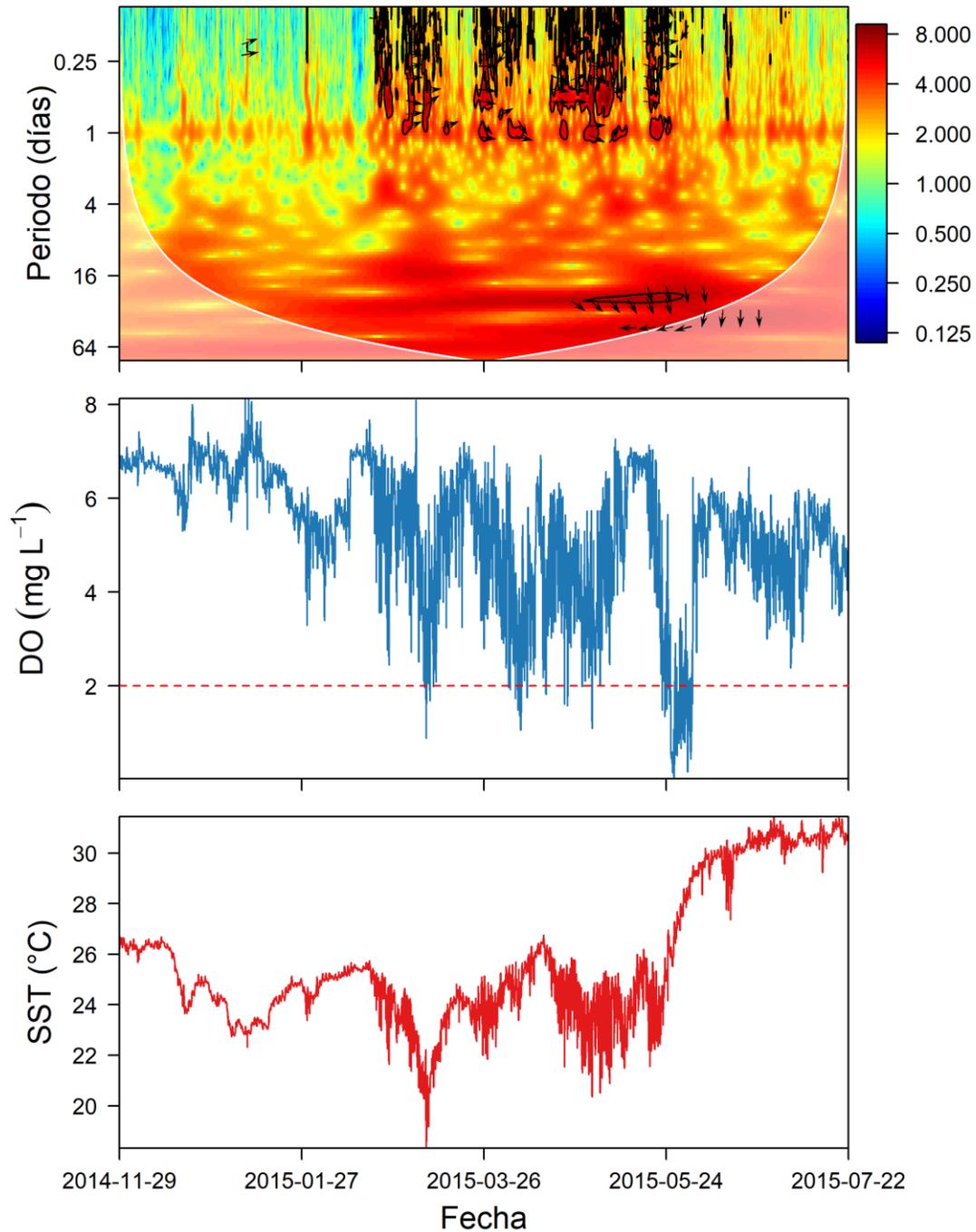


Figura A2.1. Cross-wavelets DO y SST del 2014-11-29 al 2015-07-22

Tramo 2 Cross wavelet DO CUI

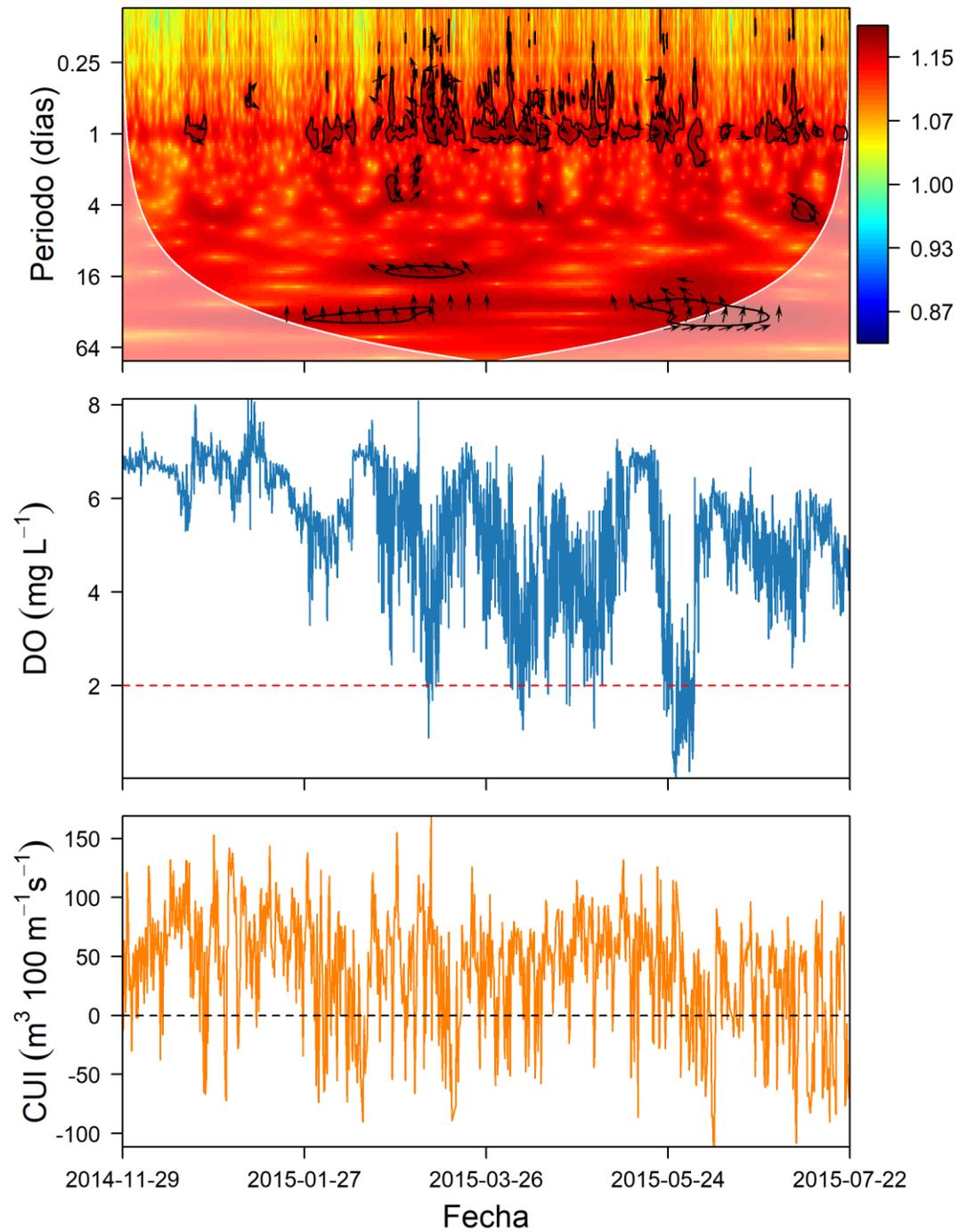


Figura A2.2. Cross-wavelets DO y CUI del 2014-11-29 al 2015-07-22

Tramo 2 Cross wavelet DO SSTGrad

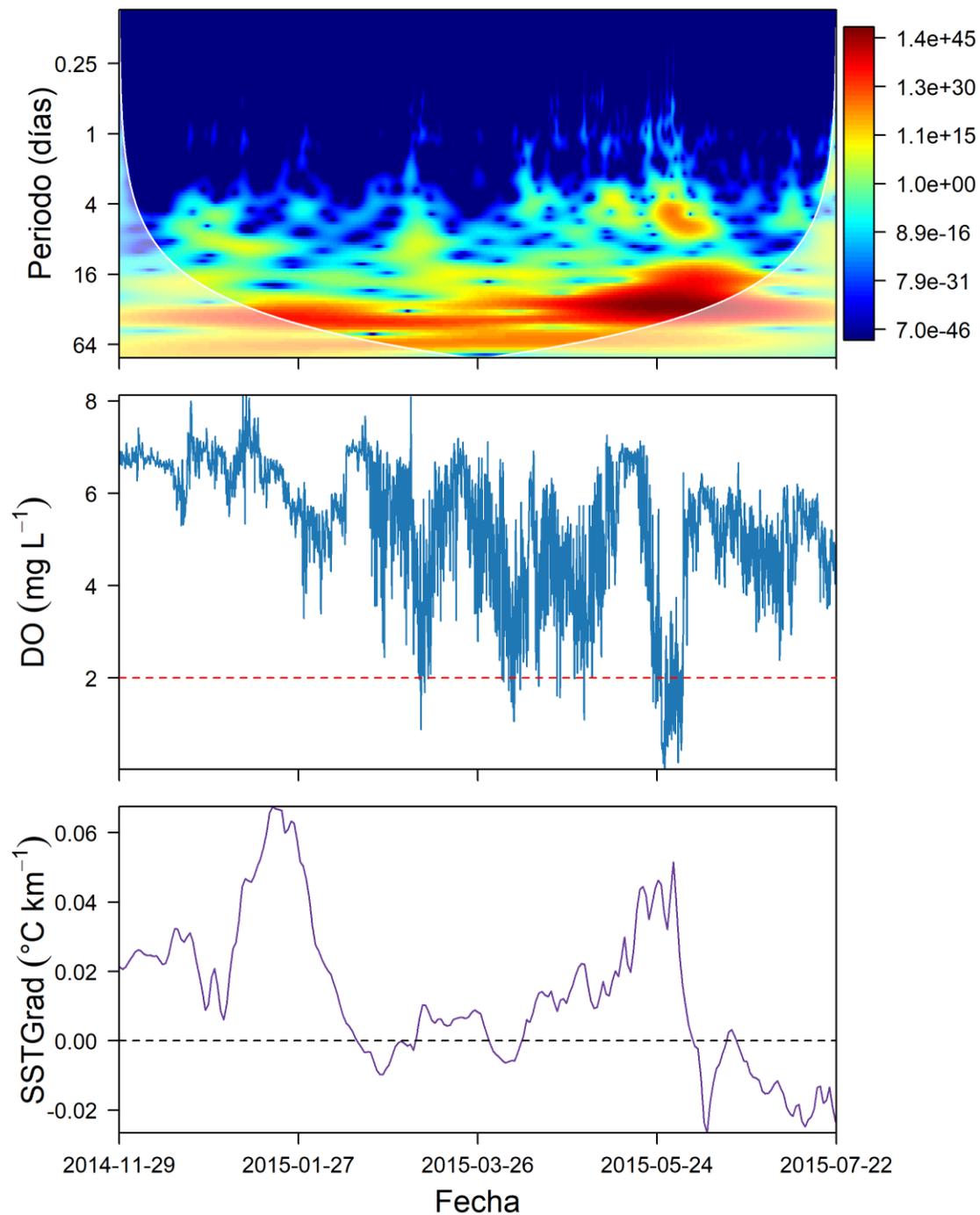


Figura A2.3. Cross-wavelets DO y SSTGrad del 2014-11-29 al 2015-07-22

Tramo 3. Del 2015-10-10 al 2016-04-11

Tramo 3 Cross wavelet DO SST

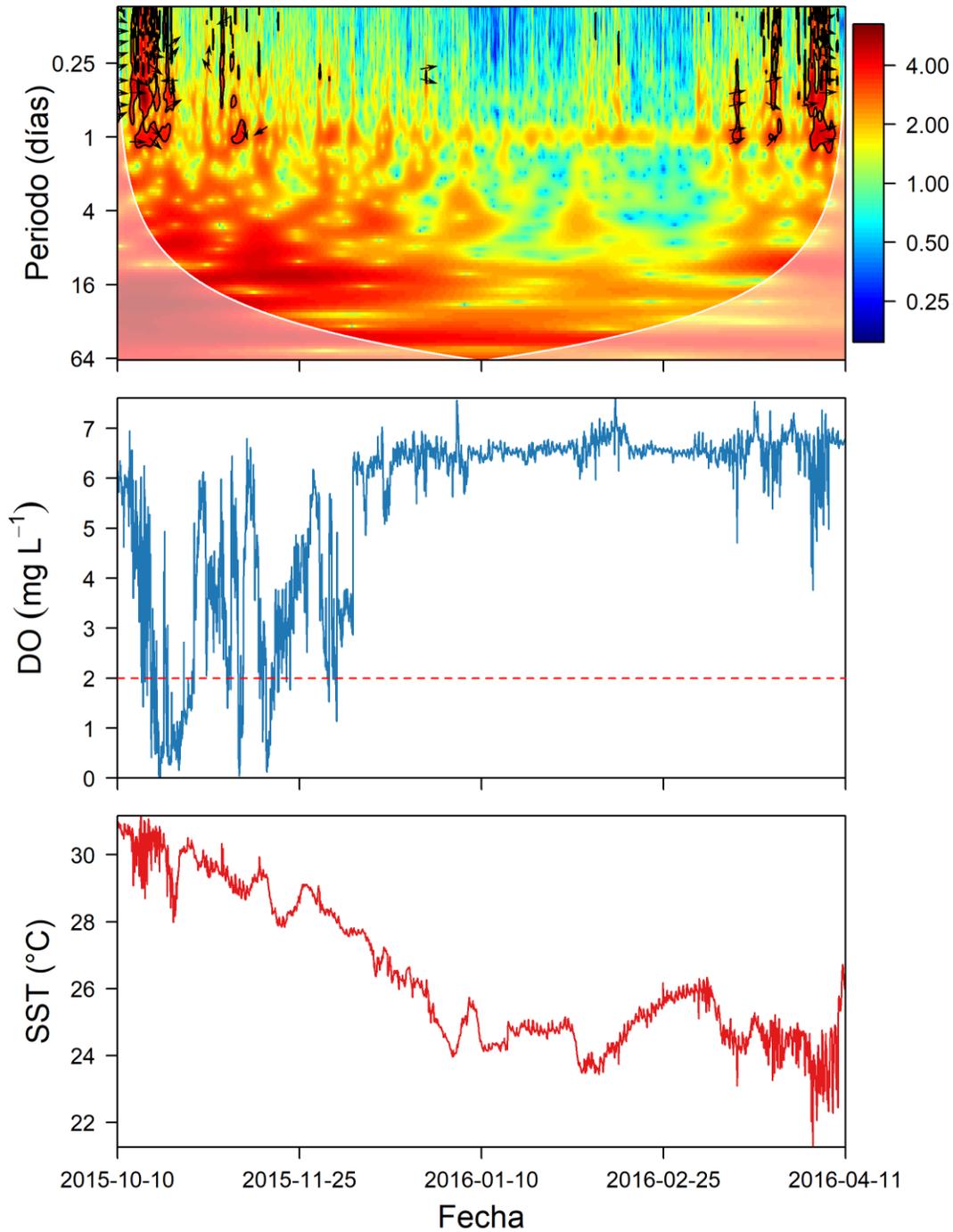


Figura A2.4. Cross-wavelets DO y SST del 2015-10-10 al 2016-04-11

Tramo 3 Cross wavelet DO CUI

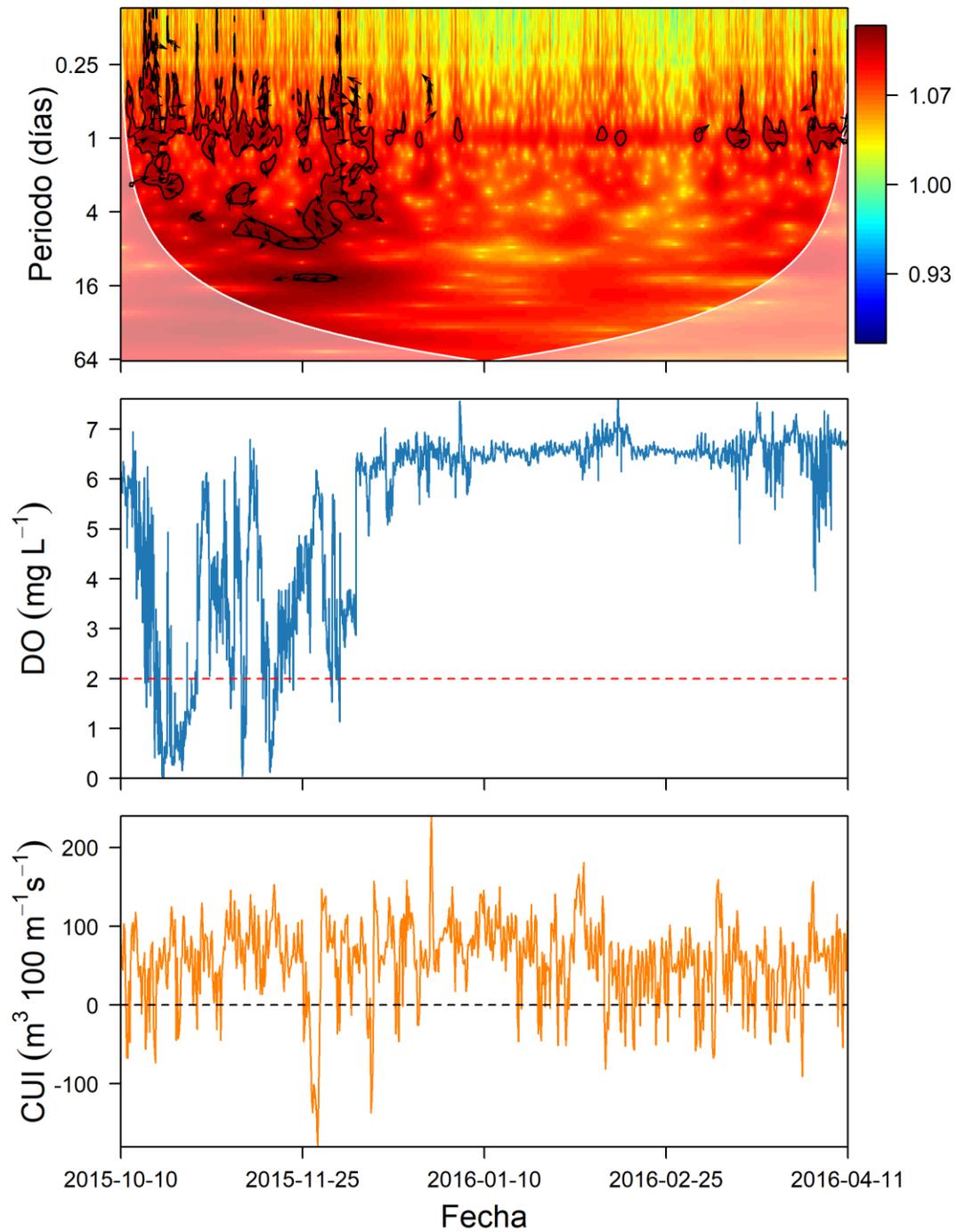


Figura A2.5. Cross-wavelets DO y CUI del 2015-10-10 al 2016-04-11

Tramo 3 Cross wavelet DO SSTGrad

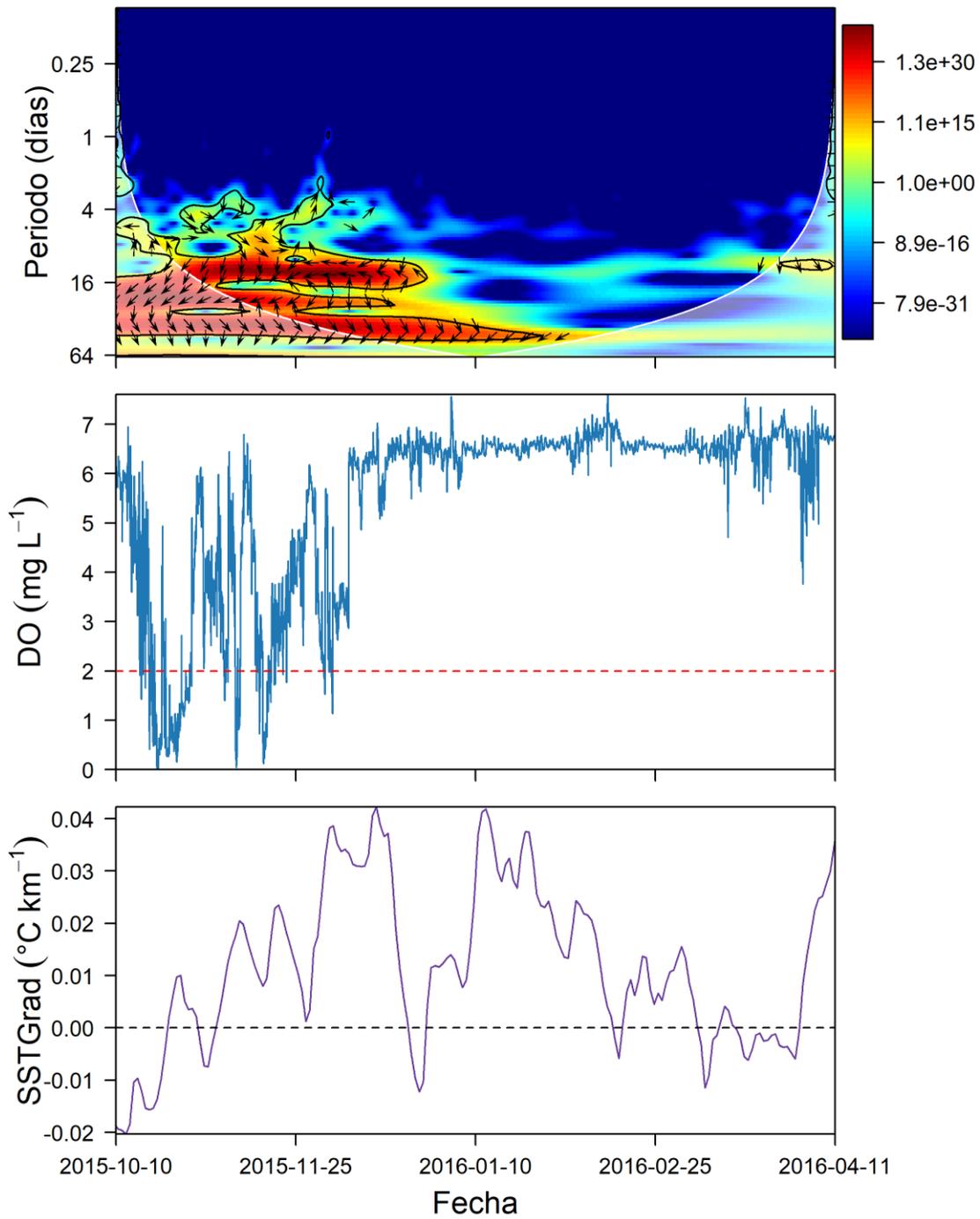


Figura A2.6. Cross-wavelets DO y SSTGrad del 2015-10-10 al 2016-04-11

Tramo 4. Del 2016-06-09 al 2016-09-23

Tramo 4 Crosswavelet DO SST

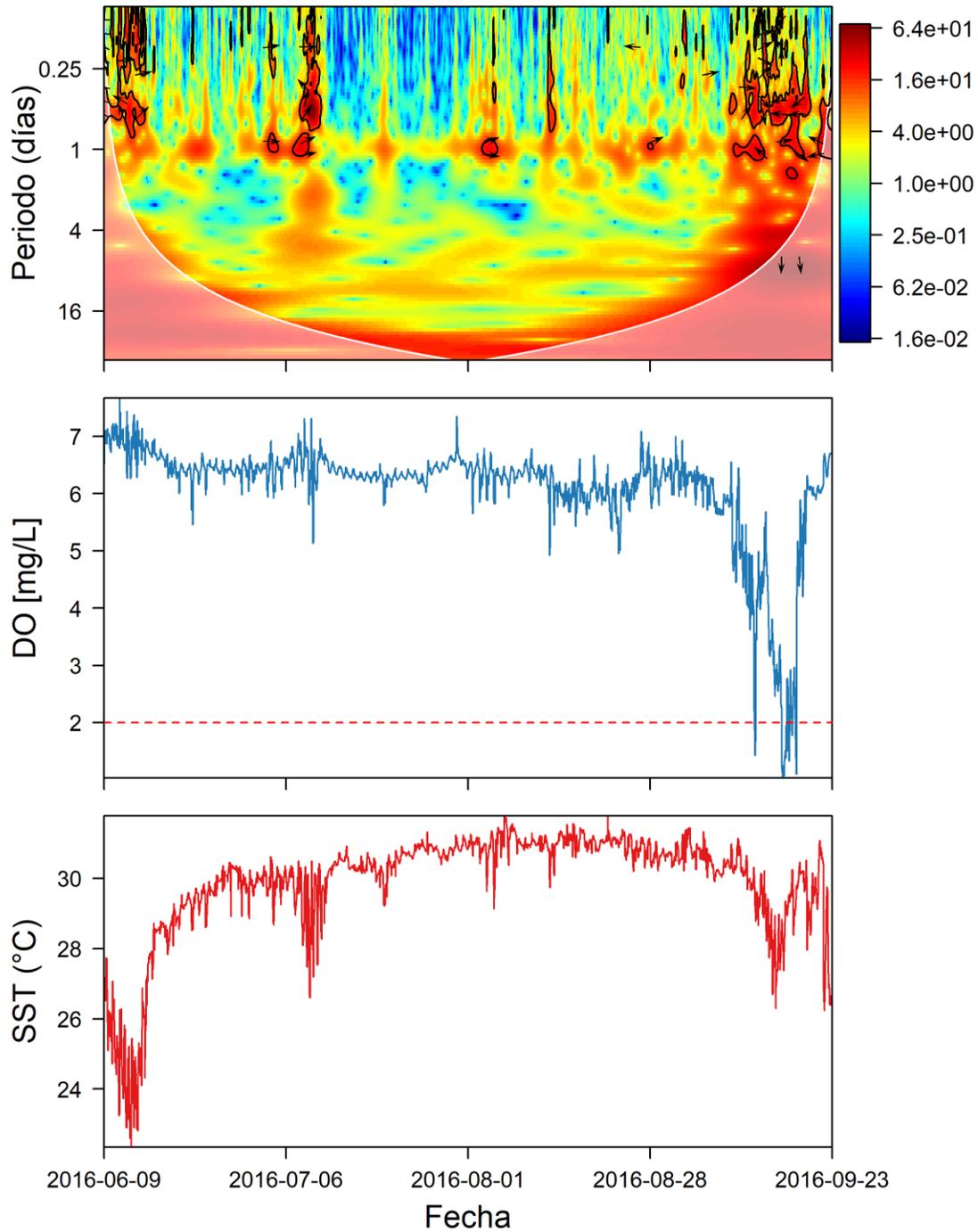


Figura A2.7. Cross-wavelets DO y SST del 2016-06-09 al 2016-09-23

Tramo 4 Cross wavelet DO CUI

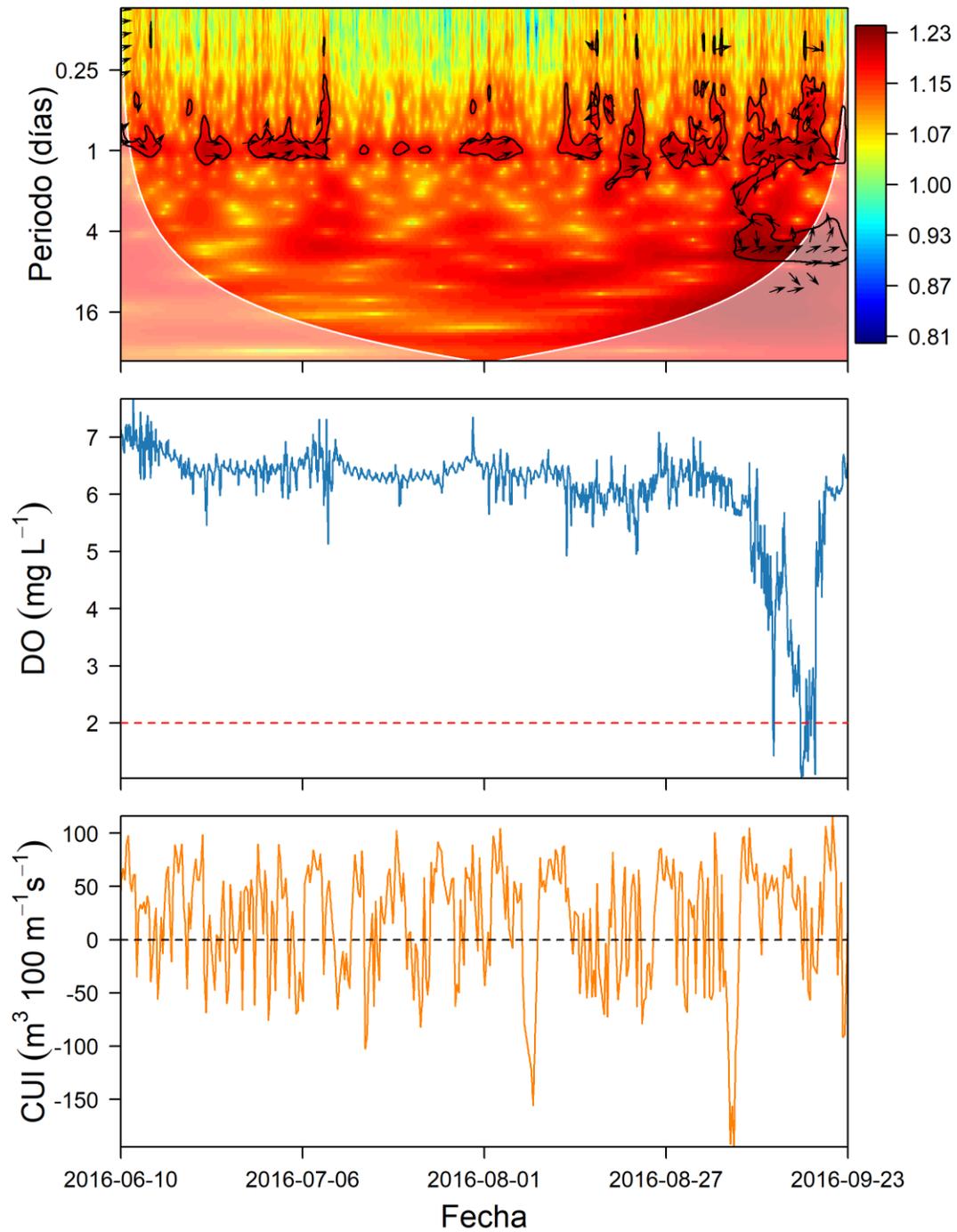


Figura A2.8. Cross-wavelets DO y CUI del 2016-06-09 al 2016-09-23

Tramo 4 Cross wavelet DO SSTGrad

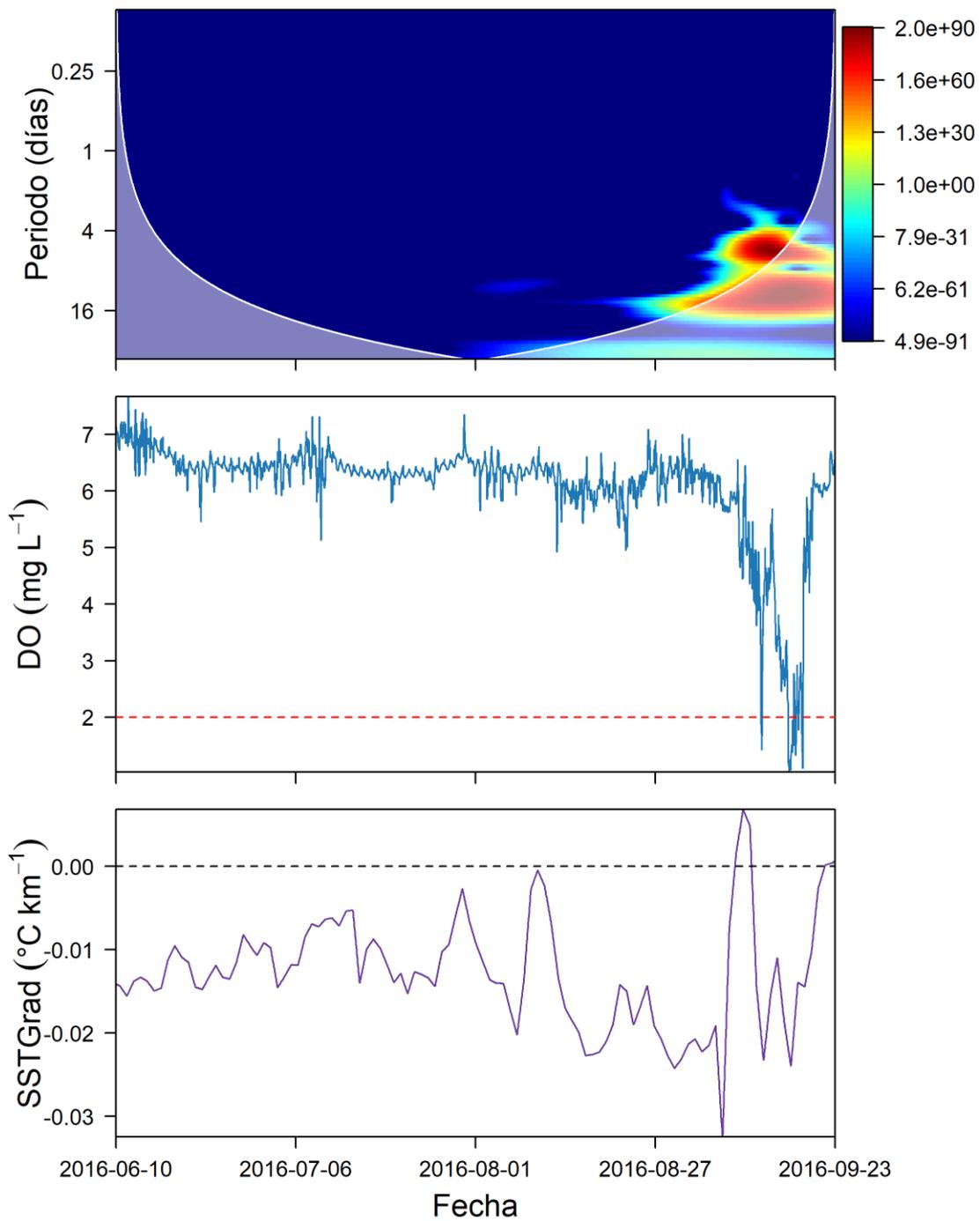


Figura A2.9. Cross-wavelets DO y SSTGrad del 2016-06-09 al 2016-09-23

Anexo 3. Scripts

```
#### Script para replicar graficas y analisis de tesis ####
# Tesis: Hipoxia en aguas superficiales...
# Autor: Carlos Alberto Herrera Becerril
## ----- ##
#### // Definiciones \\ ####
## ----- ##
{
  rm(list = ls())
  graphics.off()
  install.packages("lubridate")
  install.packages("RColorBrewer")
  library(lubridate)
  library(RColorBrewer)
  colpal = brewer.pal(n = 12, name = "Paired") #Paleta de colores
  # Definir ruta de carpeta donde se encuentran los datos:
  wd_data = "" #Ruta de carpeta de datos
  setwd(wd_data) #Definir escritorio de trabajo

  datos = readRDS("datos_tesis_CAHB.rds") #Leer matriz de datos

  # Objetos utiles:
  do_col = colpal[2]
  do_lab = c(expression(DO*" "*(("mg L"^-1))))
  sst_col = colpal[6]
  sst_lab = "SST (°C)"
  cui_col = colpal[8]
  cui_lab = c(expression(CUI*" "*(("m"^3*" "s"^-1*"100 m"^-1))))
  sstgrad_col = colpal[10]
  sstgrad_lab = c(expression(SSTGrad*" "*(("°C km"^-1))))

  # Tamaño ejes y etiquetas
  lab.size=1.1
  axes.size=1.1

  dir.create("graficas",showwarnings = F)
  setwd("graficas")
  wd_graficas <- getwd()
}

## ----- ##
#### /// Descripcion series completas \\ \\ ####
## ----- ##
## ----- ##
#### -- DO -- ####
## ----- ##
setwd(wd_graficas)
#### - Serie DO completa - ####
### cortes huecos ##
install.packages("plotrix")
library(plotrix)
{
  lim1a =as.POSIXct('2014-01-21 00:00:00 UTC'); lim1b = as.POSIXct('2014-08-25
00:00:00 UTC')
  lim2a = as.POSIXct('2014-11-25 00:00:00 UTC'); lim2b = as.POSIXct('2015-08-01
00:00:00 UTC')
  lim3a = as.POSIXct('2015-10-01 00:00:00 UTC'); lim3b = as.POSIXct('2016-04-20
00:00:00 UTC')
  lim4a = as.POSIXct('2016-06-01 00:00:00 UTC'); lim4b = as.POSIXct('2016-10-02
00:00:00 UTC')
}

ejex <- seq(from = as.POSIXct('2014-01-01 00:00:00 UTC'),
            to = as.POSIXct('2016-11-01 00:00:00 UTC'),by="1 month" )
xxx <- seq(from = as.POSIXct('2014-02-01 00:00:00 UTC'),
           to = as.POSIXct('2016-11-01 00:00:00 UTC'),by="2 months")
lab <- format(xxx,format="%Y-%b")

{
  png(filename = "DO_serie_completa.png",
```

```

width = 30,height = 15,res=400,units = "cm")
par(mar=c(5.2,3.5,1,2))
plot(datos$dateUTC, datos$DO, col=do_col, type="n",
      xlab = "", ylab = "", xaxt="n", yaxs="i", xaxs="i",
      ylim=c(0,9), las=2, cex.axis=axes.size, cex.lab=lab.size,
      xlim=c(lim1a,lim4b))
axis(1, at = xxx, labels = substring(xxx,1,7),cex.axis=0.9,las=2)

year<- c(as.POSIXct('2014-01-01'),as.POSIXct('2015-01-01'),as.POSIXct('2016-01-
01'))
axis(1, at =year, labels = substr(year,1,7), cex.axis=0.9,las=2)
abline(v=year, lty=2)

mtext(text = "Fecha", side = 1, cex = lab.size, line = 4.2)
mtext(text = do_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.1)
abline(h=2, lty=2, col="red",lwd=1)
# Cortes huecos
axis.break(axis =1 ,breakpos =as.POSIXct("2014-09-03"))
axis.break(axis =3 ,breakpos =as.POSIXct("2014-09-03"))
axis.break(axis =1 ,breakpos =as.POSIXct("2014-11-10"))
axis.break(axis =3 ,breakpos =as.POSIXct("2014-11-10"))
axis.break(axis =1 ,breakpos =as.POSIXct("2015-08-01"))
axis.break(axis =3 ,breakpos =as.POSIXct("2015-08-01"))
axis.break(axis =1 ,breakpos =as.POSIXct("2015-10-01"))
axis.break(axis =3 ,breakpos =as.POSIXct("2015-10-01"))
axis.break(axis =1 ,breakpos =as.POSIXct("2016-04-20"))
axis.break(axis =3 ,breakpos =as.POSIXct("2016-04-20"))
axis.break(axis =1 ,breakpos =as.POSIXct("2016-06-01"))
axis.break(axis =3 ,breakpos =as.POSIXct("2016-06-01"))

### SOMBREADO Conclusion ###
#### Sombreado azul ### Si surgencia
# ev2 <- c(as.POSIXct('2014-03-02'),as.POSIXct('2014-03-09'))
# polygon(x= c(ev2,rev(ev2)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA) #Azul
#
# ev4 <- c(as.POSIXct('2014-03-21'),as.POSIXct('2014-03-24'))
# polygon(x= c(ev4,rev(ev4)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA) #Azul
#
# ev5 <- c(as.POSIXct('2014-04-05'),as.POSIXct('2014-04-27'))
# polygon(x= c(ev5,rev(ev5)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA) #Azul
#
# ev8 <- c(as.POSIXct('2015-03-04'),as.POSIXct('2015-03-15'))
# polygon(x= c(ev8,rev(ev8)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA) #Azul
#
# ev10_1 <- c(as.POSIXct('2015-10-16'),as.POSIXct('2015-10-31'))
# polygon(x= c(ev10_1,rev(ev10_1)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA)
#Azul
#
# ev10_3 <- c(as.POSIXct('2015-11-12'),as.POSIXct('2015-11-23'))
# polygon(x= c(ev10_3,rev(ev10_3)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA)
#Azul
#
# ev10_4 <- c(as.POSIXct('2015-11-29'),as.POSIXct('2015-12-08'))
# polygon(x= c(ev10_4,rev(ev10_4)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(0,0,1,0.2),border=NA)
#Azul

#### Sombreado rojo NO surgencia ##
# ev1 <- c(as.POSIXct('2014-02-24'),as.POSIXct('2014-02-28'))
# polygon(x= c(ev1,rev(ev1)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,0.2),border=NA) #Red
#
# ev6 <- c(as.POSIXct('2014-07-10'),as.POSIXct('2014-07-30'))
# polygon(x= c(ev6,rev(ev6)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,.3),border=NA) #Red
#
# # ev7 <- c(as.POSIXct('2015-02-21'),as.POSIXct('2015-03-24'))
# # polygon(x= c(ev7,rev(ev7)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,.3),border=NA) #Red
#
# ev9 <- c(as.POSIXct('2015-04-01'),as.POSIXct('2015-05-12'))
# polygon(x= c(ev9,rev(ev9)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,.3),border=NA) #Red
#
# ev9bis <- c(as.POSIXct('2015-05-14'),as.POSIXct('2015-06-07'))
# polygon(x= c(ev9bis,rev(ev9bis)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,.3),border=NA)
#Red
#
# ev10_2 <- c(as.POSIXct('2015-11-05'),as.POSIXct('2015-11-11'))

```

```

# polygon(x= c(ev10_2,rev(ev10_2)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,.3),border=NA)
#Red
#
# ev11 <- c(as.POSIXct('2016-09-09'),as.POSIXct('2016-09-21'))
# polygon(x= c(ev11,rev(ev11)),y=c(0,0,10,10),col=rgb(1,0,0,.3),border=NA) #Red

lines(datos$dateUTC, datos$DO,col=do_col)
dev.off()
}

## ----- ##
#### - Boxplot DO total - ####
## ----- ##
lab.size=1
axes.size=1
{
  png(filename = "Boxplot_DO_total.png",width = 5,height = 8,res=400,units = "cm")
  par(mar=c(4, 3.5,.7,.7))
  boxplot(datos$DO,col=do_col, ylim=c(0,10), yaxs="i",
          cex.axis=axes.size,las=2,cex=0.5, pch=16)
  grid(ny = 10,nx=0,lty = 1)
  par(new=T)
  boxplot(datos$DO,col=do_col, ylim=c(0,10), yaxs="i",
          cex.axis=axes.size,las=2,cex=0.5, pch=16)
  mtext(text = do_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.1)
  abline(h=2, lty=2, col="red")
  dev.off()
}

## ----- ##
#### - Boxplot trimestral - ####
## ----- ##
{
  datos$trim <- NA
  datos$trim [month(datos$dateUTC)>=1 & month(datos$dateUTC)<=3] <- 1
  datos$trim [month(datos$dateUTC)>=4 & month(datos$dateUTC)<=6] <- 2
  datos$trim [month(datos$dateUTC)>=7 & month(datos$dateUTC)<=9] <- 3
  datos$trim [month(datos$dateUTC)>=10 & month(datos$dateUTC)<=12] <- 4
  names <- c("ene-mar","abr-jun", "jul-sep", "oct-dic")
}
{
  png(filename = "Boxplot_DO_trimestre.png",width = 13,height = 8,res=300,units =
"cm")
  par(mar=c(4, 3.5,.7,.7))
  boxplot(DO ~ trim, data = datos,col=do_col, ylim=c(0,10), yaxs="i",
          cex.axis=axes.size,las=1,cex=0.5, pch=16,names=F, ylab="",xlab="" )
  grid(ny = 10,nx=0,lty = 1)
  par(new=T)
  aa<-boxplot(DO ~ trim, data = datos,col=do_col, ylim=c(0,10), yaxs="i",
              cex.axis=axes.size,las=1,cex=0.5, pch=16,names=F, ylab="",xlab="" )
  abline(h=2, lty=2, col="red")
  axis(1, at=c(1,2,3,4),labels = names,
        tick = F,line =-0.3,xpd=T,cex.axis=axes.size)
  axis(1, at=c(1,2,3,4),labels = paste("n =",aa$n),
        tick = F,line = 0.5,xpd=T,cex.axis=0.85)

  mtext(text = do_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.1)
  mtext(text = "Trimestre", side = 1, cex = lab.size, line = 2.7)
  dev.off()
}

## ----- ##
#### - Porcentaje de hipoxia - ####
## ----- ##
hist(datos$DO)
do <- datos$DO
do <- na.omit(do)
summary(do)
( length(which(do<=2)) /length(do) )*100
( length(which(do<=4 & do>2)) /length(do) )*100
( length(which(do<4)) /length(do) )*100
rm(do)

datos[which(datos$DO == 0),]

```

```

## ----- ##
#### // CUI \ \ ####
## ----- ##
#### - Serie CUI completa ####
cui <- datos[,c("dateUTC", "CUI", "CUI_daily_rollmean")]
cui <- na.omit(cui)

lim1a =as.POSIXct('2014-01-22 00:00:00 UTC')
lim4b = as.POSIXct('2016-10-01 00:00:00 UTC')

eje2mes <- seq(from = as.POSIXct('2014-02-01 00:00:00 UTC'),
               to = as.POSIXct('2016-12-01 00:00:00 UTC'),by="2 months")
lab2mes <- format(eje2mes,format="%Y-%b")
lab.size=1
axes.size=0.8
year<-      c(as.POSIXct('2014-01-01'),as.POSIXct('2015-01-01'),as.POSIXct('2016-01-
01'))

{
  png("CUI_completa.png",width = 13,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mar=c(5.2,3.5,1,1))
  plot(cui$dateUTC, cui$CUI, col=cui_col, type="l",
       ylim=c(-250,250),xlab = "",ylab = "",xaxt="n",yaxs="i", xaxs="i",
       xlim=c(lim1a, lim4b),las=2,
       cex.axis=axes.size,cex.lab=lab.size)
  axis(1, at = eje2mes, labels = substring(eje2mes,1,7),
       cex.axis=axes.size, las=2)

  mtext(text = "Fecha", side = 1, cex = lab.size, line = 4.1)
  mtext(text = cui_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.2)
  abline(h=0, lty=2, col=1,lwd=1)
  abline(v=year, lty=3, col="gray40")
  dev.off()
}

#### BOXPLOT CUI total ####
lab.size=1
axes.size=1
{
  png(filename = "Boxplot_CUI_total.png",width = 5,height = 8,res=300,units = "cm")
  par(mar=c(4, 3.5,.7,.7))
  boxplot(datos$CUI,col=cui_col,ylim=c(-200,200), yaxs="i",
         cex.axis=axes.size,las=2,cex=0.5, pch=16)
  grid(ny = 8,nx=0,lty = 1)
  par(new=T)
  boxplot(datos$CUI,col=cui_col, ylim=c(-200,200), yaxs="i",
         cex.axis=axes.size,las=2,cex=0.5, pch=16)
  mtext(text = cui_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.1)
  abline(h=0, lty=2, col=1)
  dev.off()
}

#### Boxplot CUI trimestral ####
{
lab.size=1
axes.size=1

datos$trim <- NA
datos$trim [month(datos$dateUTC)>=1 & month(datos$dateUTC)<=3] <- 1
datos$trim [month(datos$dateUTC)>=4 & month(datos$dateUTC)<=6] <- 2
datos$trim [month(datos$dateUTC)>=7 & month(datos$dateUTC)<=9] <- 3
datos$trim [month(datos$dateUTC)>=10 & month(datos$dateUTC)<=12] <- 4
names <- c("ene-mar","abr-jun", "jul-sep", "oct-dic")
}

{
  png(filename = "Boxplot_CUI_trimestre.png",width = 13,height = 8,res=300,units =
"cm")
  par(mar=c(4, 3.5,.7,.7))
  boxplot(CUI ~ trim, data = datos,col=cui_col, ylim=c(-200,200), yaxs="i",
         cex.axis=axes.size,las=1,cex=0.5, pch=16,names=F, ylab="",xlab="" )
  grid(ny = 8,nx=0,lty = 1)
  par(new=T)
}

```

```

aa<-boxplot(CUI ~ trim, data = datos,col=cui_col, ylim=c(-200,200), yaxs="i",
            cex.axis=axes.size,las=1,cex=0.5, pch=16, names=F, ylab="", xlab="" )
abline(h=0, lty=2, col=1)
axis(1, at=c(1,2,3,4), labels = names,
      tick = F, line = -0.3, xpd=T, cex.axis=axes.size)
axis(1, at=c(1,2,3,4), labels = paste("n =", aa$n),
      tick = F, line = 0.5, xpd=T, cex.axis=0.85)

mtext(text = cui_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.1)
mtext(text = "Trimestre", side = 1, cex = lab.size, line = 2.7)
dev.off()
}

## ----- ##
#### // SSTGrad \\ ####
## ----- ##
#### Serie SSTGrad completa ####
sstgrad <- datos[,c("dateUTC", "SSTGrad")]
sstgrad <- na.omit(sstgrad)

lim1a = as.POSIXct('2014-01-22 00:00:00 UTC')
lim4b = as.POSIXct('2016-10-01 00:00:00 UTC')

eje2mes <- seq(from = as.POSIXct('2014-02-01 00:00:00 UTC'),
              to = as.POSIXct('2016-12-01 00:00:00 UTC'), by="2 months")
lab2mes <- format(eje2mes, format="%Y-%b")
year <- c(as.POSIXct('2014-01-01'), as.POSIXct('2015-01-01'), as.POSIXct('2016-01-01'))

lab.size=1
axes.size=0.8

{
  png("sstgrad_completa.png", width = 13, height = 8, units = "cm", res = 400)
  par(mar=c(5.2, 3.6, 1, 1))
  plot(sstgrad$dateUTC, sstgrad$SSTGrad, col=sstgrad_col, type="l",
       xlab = "", ylab = "", xaxt="n", yaxs="i", xaxs="i",
       xlim=c(lim1a, lim4b), ylim=c(-0.04, 0.08), las=2,
       cex.axis=axes.size, cex.lab=lab.size)
  axis(1, at = eje2mes, labels = substring(eje2mes, 1, 7),
       cex.axis=axes.size, las=2)

  mtext(text = "Fecha", side = 1, cex = lab.size, line = 4.1)
  mtext(text = sstgrad_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.3)
  abline(h=0, lty=2, col=1, lwd=1)
  abline(v=year, lty=3, col="gray40")
  dev.off()
}

#### BOXPLOT SSTgrad total ####
lab.size=1
axes.size=0.9

{
  png(filename = "Boxplot_sstgrad_total.png", width = 5, height = 8, res=400, units =
"cm")
  par(mar=c(4, 3.6, .7, .7))
  boxplot(datos$SSTGrad, col=sstgrad_col, ylim=c(-0.04, 0.08), yaxs="i",
         cex.axis=axes.size, las=2, cex=0.5, pch=16)
  grid(ny = 6, nx=0, lty = 1)
  par(new=T)
  boxplot(datos$SSTGrad, col=sstgrad_col, ylim=c(-0.04, 0.08), yaxs="i",
         cex.axis=axes.size, las=2, cex=0.5, pch=16)
  mtext(text = sstgrad_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.3)
  abline(h=0, lty=2, col=1)
  dev.off()
}

#### Boxplot SSTGrad trimestral ####
{
  lab.size=1
  axes.size=1
  datos$trim <- NA
  datos$trim [month(datos$dateUTC)>=1 & month(datos$dateUTC)<=3] <- 1

```

```

datos$trim [month(datos$dateUTC)>=4 & month(datos$dateUTC)<=6] <- 2
datos$trim [month(datos$dateUTC)>=7 & month(datos$dateUTC)<=9] <- 3
datos$trim [month(datos$dateUTC)>=10 & month(datos$dateUTC)<=12] <- 4
names <- c("ene-mar", "abr-jun", "jul-sep", "oct-dic")
}

{
  png(filename = "Boxplot_SSTgrad_trimestre.png",width = 13,height =
  8,res=300,units = "cm")
  par(mar=c(4, 4.7,.7,.7))
  aa <-boxplot(SSTGrad ~ trim, data = datos,col=sstgrad_col, ylim=c(-0.04,0.08),
  yaxs="i",
  cex.axis=axes.size,las=1,cex=0.5, pch=16,names=F, ylab="",xlab="" )
  grid(ny = 6,nx=0,lty = 1)
  par(new=T)
  boxplot(SSTGrad ~ trim, data = datos,col=sstgrad_col, ylim=c(-0.04,0.08),
  yaxs="i",
  cex.axis=axes.size,las=1,cex=0.5, pch=16,names=F, ylab="",xlab="" )
  abline(h=0, lty=2, col=1)
  axis(1, at=c(1,2,3,4),labels = names,
  tick = F,line =-0.3,xpd=T,cex.axis=axes.size)
  axis(1, at=c(1,2,3,4),labels = paste("n =",aa$n),
  tick = F,line = 0.5,xpd=T,cex.axis=0.85)

  mtext(text = sstgrad_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2.9)
  mtext(text = "Trimestre", side = 1, cex = lab.size, line = 2.7)
  dev.off()
}

## ----- ##
#### // Analisis por eventos \\ ####
## ----- ##
setwd(wd_graficas)

ev_vector<- (unique(datos$EventoHypox))
ev_vector<- ev_vector[-c(1,6)] # Borrar NA's
ev_vector

for (ii in ev_vector){
  setwd(wd_graficas)
  #print(ii)
  evento <- subset(datos, subset = datos$EventoHypox == ii)
  EvName <- as.character(ii)
  dateVector <- evento$dateUTC
  (TimeRange <-range(dateVector))
  duracion <- diff.Date(TimeRange)
  DO_min <- min(evento$DO)
  DO_max <- max(evento$DO)
  print(ii)
  print(TimeRange)
  print(duracion)
  print(DO_min)
  print("_____")

  # Crear carpeta de resultados por eventos
  dir_name = paste0(EvName,"_",
  substr(TimeRange[1],1,10), "_",
  substr(TimeRange[2],1,10))
  dir.create(path = dir_name,showwarnings = F)
  setwd(dir_name)

  ## ----- ##
  #### - Grafica DO eventos de hipoxia - ####
  ## ----- ##
  {graph_name <- paste0(ii,"DO",".png")
  png(graph_name,width = 13,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mar=c(4,3.5,1.6,0.8))
  plot(evento$dateUTC, evento$DO, col=do_col, type="o",pch=16,
  xlab="", ylab="",ylim=c(0,DO_max+0.8),
  cex.axis=axes.size, cex.lab=lab.size,
  las=1, yaxs="i",xaxs="i",cex=.5)
  lines(evento$dateUTC, evento$DO_daily_rollmean, col=colpal[10], lwd=2)
}

```

```

abline(h=2, col="red",lwd=1, lty=2)
mtext(text = "Fecha", side = 1, cex = lab.size, line = 2)
mtext(text = paste("Min = ",DO_min), side = 1, cex = lab.size, line = 3)
mtext(text = do_lab, side = 2, cex = lab.size, line = 2)
mtext(side = 3, line = 0.4,cex = lab.size,
      text = paste(substr(TimeRange[1],1,10), "-",
                    substr(TimeRange[2],1,10),sep = " "))
legend("bottomleft",lty=c(1,1),pch=c(16,NA),
      lwd=2,cex=0.9, inset = c(.01,.01),bty="n",
      col=c(do_col,colpal[10]),legend = c("DO","Media móvil diaria"))
dev.off()

## ----- ##
#### - Grafico Paralelo DO, SST, CUI y SSTGrad - ####
## ----- ##
{graph_name <- paste0(EvName,"_paralelo.png")}
png(graph_name,width = 17, height = 15,units = "cm", res = 400)
par(mfrow=c(6,1))
par(mar=c(0, 4, 0, 5))
plot(0,0,axes = F, type="n",ylab="")
#SST
par(mar=c(0.1, 4, 0, 5))
plot(evento$dateUTC, evento$SST, type="o",
      col=sst_col,pch=20, xaxt="n", ylab="", xlab="",las=2)
mtext(side = 2, line = 2.7, text = sst_lab, cex=0.8)
mtext(side=3, line=0.8, text = paste(substr(TimeRange[1],1,10), " - ",
                                       substr(TimeRange[2],1,10)))
#DO
par(mar=c(0.1, 4, 0.1, 5))
plot(evento$dateUTC, evento$DO, type="o",yaxt="n",
      col=do_col,pch=20, xaxt="n", ylab="", xlab="",las=2)
abline(h=2, col=2, lty=2)
axis(side = 4,las=2)
mtext(side = 4, line = 2.5, text = do_lab, cex=0.8)
#CUI
par(mar=c(0.1, 4, 0.1, 5))
plot(evento$dateUTC, evento$CUI_daily_rollmean, type="o",
      col=cui_col,pch=20, xaxt="n", ylab="", xlab="",las=2)
lines(evento$dateUTC, evento$CUI_daily_interpolated, col=cui_col)
abline(h=0, col=1, lty=2)
mtext(side = 2, line = 2.2, text = cui_lab, cex=0.8)
#SSTGrad
par(mar=c(0.1, 4, 0.1, 5))
plot(evento$dateUTC, evento$SSTGrad, type="o",yaxt="n",
      col=sstgrad_col,pch=20, ylab="", xlab="",las=1, cex.axis=1.2)
lines(evento$dateUTC, evento$SSTGrad_interpolated, col=sstgrad_col)
abline(h=0, col=1, lty=2)
axis(side=4, las=2)
mtext(side = 4, line = 4, text = sstgrad_lab, cex=0.8)
mtext(side = 1, line = 2.8, text = "Fecha", cex=1.1)
dev.off()

## ----- ##
#### - Distribucion estadistica - ####
## ----- ##

#seleccionar por horas:
evento_H <- evento[minute(evento$dateUTC)==0,]
rownames(evento_H)<- 1:length(evento_H$dateUTC)
# Normalidad de los datos
DO_shp <- shapiro.test(x = evento_H$DO)
SST_shp <- shapiro.test(x = evento_H$SST)
CUI_shp <- shapiro.test(x = evento_H$CUI_daily_interpolated)
SSTGrad_shp <- shapiro.test(x = evento_H$SSTGrad_interpolated)

# Histogramas
hist_name <- paste0(EvName,"_histogramas.png")
{png(hist_name,width = 10,height = 20,units = "cm", res = 400)
par(mfrow =c(4,1))
par(mar=c(4,4, 1,1))
#DO
hist(evento_H$DO, main="",xlab=do_lab,border = do_col,
      freq=F,ylab="Densidad")
lines(density(na.omit(evento_H$DO)))

```

```

legend("topleft", bty = "n",
      legend = paste("Shapiro p-val =", round(DO_shp$p.value,3)))
#SST
hist(evento_H$SST, main="", xlab=sst_lab, border = sst_col,
      freq=F, ylab="Densidad")
lines(density(na.omit(evento_H$SST)), lwd=1)
legend("topleft", bty = "n",
      legend = paste("Shapiro p-val =", round(SST_shp$p.value,3)))
#CUI
hist(evento_H$CUI_daily_interpolated, main="", xlab=sst_lab,
      border = cui_col, freq=F, ylab="Densidad")
lines(density(na.omit(evento_H$CUI_daily_interpolated)), lwd=1)
legend("topleft", bty = "n",
      legend = paste("Shapiro p-val =", round(CUI_shp$p.value,3)))
# SSTGrad
hist(evento_H$SSTGrad_interpolated, main="", xlab=sstgrad_lab, border =
sstgrad_col,
      freq=F, ylab="Densidad")
lines(density(na.omit(evento_H$SSTGrad_interpolated)), lwd=1)
legend("topleft", bty = "n",
      legend = paste("Shapiro p-val =", round(SSTGrad_shp$p.value,3)))
dev.off()}
## ----- ##
#### -- Estadística bivariada -- ####
## ----- ##
## ----- ##
#### DO vs SST ####
## ----- ##
cor <- cor.test(evento_H$SST, evento_H$DO, method = "spearman")
rho <- round(cor$estimate,2)
pval <- cor$p.value
if (pval > 0.05){
  signif = paste("pval =", round(pval,2))
} else if (pval <= 0.05 & pval > 0.01){
  signif = "*"
} else if (pval <= 0.01 & pval > 0.001){
  signif = "***"
} else if (pval <= 0.001){
  signif = "****"
}

# Grafico correlacion DO vs SST#
cor_name <- paste(EvName, "DO_vs_SST_corr.png")
{
  png(cor_name, width = 10, height = 8, units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3.5,3.5,2,1))
  #Caída:
  plot(evento_H$SST, evento_H$DO, las=1,
        pch=20, col=1,
        xlab="",
        ylab="")
  #Etiquetas:
  mtext(side = 1, line = 2.2, text = sst_lab) #etiqueta ejeX
  mtext(text = do_lab, side = 2, line = 2) #etiqueta ejeY (DO)
  mtext(text = paste(TimeRange[1], "-", TimeRange[2]), side = 3, line = 0.8)

  #Linea regresion:
  abline(lm(evento_H$DO ~ evento_H$SST),
        lty=2, col=sst_col, lwd=2)
  #Puede ajustar coordenadas manualmente:
  legend("topleft", legend = paste0("rho = ", rho, " ", signif)
        , cex=0.8, box.col = "white", #bty = "n",
        text.font = 2, inset = c(0.01,0.01))
  dev.off()
}

# Correlacion cruzada DO vs SST #
xcor_name <- paste(EvName, "CrossCorr_DO_SST.png")
{
  png(xcor_name, width = 9, height = 8, units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3,3,3,0.5))
  crosccor <- ccf(x = evento_H$SST, y=evento_H$DO, lag.max = 50,

```

```

        xlab="", ylab="", main="")
    mtext(text = "Desfase (horas)",side = 1,line = 2)
    mtext(text = "r",side = 2,line = 2)
    mtext(text = paste(TimeRange[1]," ",TimeRange[2]),side = 3,line = 1.5,cex =
lab.size)
    mtext(text = paste("DO SST"),side = 3,line = 0.5,cex = lab.size)
    abline(v=0, lty=2,col="blue")
    dev.off()
}

## ----- ##
#### DO vs CUI ####
## ----- ##
cor <- cor.test(evento_H$CUI_daily_interpolated, evento_H$DO, method =
"spearman")
rho <- round(cor$estimate,2)
pval <- cor$p.value
if (pval >0.05){
  signif = paste("pval =",round(pval,2))
} else if (pval <= 0.05 & pval > 0.01){
  signif = "*"
} else if (pval <= 0.01 & pval > 0.001){
  signif = "***"
} else if (pval <= 0.001){
  signif = "****"
}

# Grafico correlacion #
cor_name <- paste(EvName,"DO_vs_CUI_corr.png")
{
  png(cor_name,width = 10,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3.5,3.5,2,1))
  #Caída:
  plot(evento_H$CUI_daily_interpolated, evento_H$DO,las=1,
        pch=20,col=1,
        xlab="",
        ylab="")
  #Etiquetas:
  mtext(side = 1,line = 2.3,text = cui_lab) #etiqueta ejeX
  mtext(text = do_lab,side = 2,line = 2) #etiqueta ejeY (DO)
  mtext(text = paste(TimeRange[1],"-",TimeRange[2]),side = 3,line = 0.8)

  #Linea regresion:
  abline(lm(evento_H$DO ~ evento_H$CUI_daily_interpolated),
        lty=2,col=cui_col, lwd=2)
  #Puede ajustar coordenadas manualmente:
  legend("topleft", legend = paste0("rho = ",rho," ", signif)
        ,cex=0.8,box.col = "white", #bty = "n",
        text.font = 2, inset = c(0.01,0.01))
  dev.off()
}

# Correlacion cruzada #
Xcor_name <- paste(EvName, "CrossCorr_DO_CUI.png")
{
  png(Xcor_name,width = 9,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3,3,3,0.5))
  crosacor<-ccf(x = evento_H$CUI_daily_interpolated,y=evento_H$DO, lag.max = 50,
        xlab="", ylab="", main="")
  mtext(text = "Desfase (horas)",side = 1,line = 2)
  mtext(text = "r",side = 2,line = 2)
  mtext(text = paste(TimeRange[1]," ",TimeRange[2]),side = 3,line = 1.5,cex =
lab.size)
  mtext(text = paste("DO CUI"),side = 3,line = 0.5,cex = lab.size)
  abline(v=0, lty=2,col="blue")
  dev.off()
}

## ----- ##
#### DO vs SSTGrad ####
## ----- ##
cor <- cor.test(evento_H$SSTGrad_interpolated, evento_H$DO, method = "spearman")

```

```

rho <- round(cor$estimate,2)
pval <- cor$p.value
if (pval >0.05){
  signif = paste("pval =",round(pval,2))
} else if (pval <= 0.05 & pval > 0.01){
  signif = "*"
} else if (pval <= 0.01 & pval > 0.001){
  signif = "***"
} else if (pval <= 0.001){
  signif = "****"
}

# Grafico correlacion DO vs SSTGrad#
cor_name <- paste(EvName,"DO_vs_SSTGrad_corr.png")
{
  png(cor_name,width = 10,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3.5,3.5,2,1))
  #Caída:
  plot(evento_H$SSTGrad_interpolated, evento_H$DO,las=1,
        pch=20,col=1,
        xlab="",
        ylab="")
  #Etiquetas:
  mtext(side = 1,line = 2.3,text = sstgrad_lab) #etiqueta ejeX
  mtext(text = do_lab,side = 2,line = 2) #etiqueta ejeY (DO)
  mtext(text = paste(TimeRange[1],"-",TimeRange[2]),side = 3,line = 0.8)

  #Linea regresion:
  abline(lm(evento_H$DO ~ evento_H$SSTGrad_interpolated),
        lty=2,col=sstgrad_col, lwd=2)
  #Puede ajustar coordenadas manualmente:
  legend("topleft", legend = paste0("rho = ",rho," ", signif)
        ,cex=0.8,box.col = "white", #bty = "n",
        text.font = 2, inset = c(0.01,0.01))
  dev.off()
}

# Correlacion cruzada DO vs SSTGrad#
Xcor_name <- paste(EvName, "CrossCorr_DO_SSTGrad.png")
{
  png(Xcor_name,width = 9,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3,3,3,0.5))
  croscor<-ccf(x = evento_H$SSTGrad_interpolated,y=evento_H$DO, lag.max = 50,
               xlab="", ylab="", main="")
  mtext(text = "Desfase (horas)",side = 1,line = 2)
  mtext(text = "r",side = 2,line = 2)
  mtext(text = paste(TimeRange[1]," ",TimeRange[2]),side = 3,line = 1.5,cex =
lab.size)
  mtext(text = paste("DO SSTGrad"),side = 3,line = 0.5,cex = lab.size)
  abline(v=0, lty=2,col="blue")
  dev.off()
}

## ----- ##
#### CUI vs SSTGrad ####
## ----- ##
cor <- cor.test(evento_H$CUI_daily_interpolated, evento_H$SSTGrad_interpolated,
method = "spearman")
rho <- round(cor$estimate,2)
pval <- cor$p.value
if (pval >0.05){
  signif = paste("pval =",round(pval,2))
} else if (pval <= 0.05 & pval > 0.01){
  signif = "*"
} else if (pval <= 0.01 & pval > 0.001){
  signif = "***"
} else if (pval <= 0.001){
  signif = "****"
}

# Grafico correlacion CUI vs SSTGrad#
cor_name <- paste(EvName,"CUI_vs_SSTGrad_corr.png")

```

```

{
  png(cor_name,width = 10,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3.5,4,2,1))
  #Caida:
  plot(evento_H$CUI_daily_rollmean, evento_H$SSTGrad_interpolated,las=1,
        pch=20,col=1,
        xlab="",
        ylab="")
  #Etiquetas:
  mtext(side = 1,line = 2.3,text = cui_lab) #etiqueta ejex
  mtext(text = sstgrad_lab,side = 2,line = 2.5) #etiqueta ejeY
  mtext(text = paste(TimeRange[1],"-",TimeRange[2]),side = 3,line = 0.7)

  #Linea regresion:
  abline(lm(evento_H$SSTGrad_interpolated ~ evento_H$CUI_daily_interpolated),
        lty=2,col=sst_col, lwd=2)
  #Puede ajustar coordenadas manualmente:
  legend("topleft", legend = paste0("rho = ",rho," ", signif)
        ,cex=0.8,box.col = "white", #bty = "n",
        text.font = 2, inset = c(0.01,0.01))
  dev.off()
}

# Correlacion cruzada CUI vs SSTGrad#
Xcor_name <- paste(EvName, "CrossCorr_CUI_SSTGrad.png")
{
  png(Xcor_name,width = 9,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3,3,3,0.5))
  crosacor<-ccf(x
evento_H$CUI_daily_interpolated,y=evento_H$SSTGrad_interpolated, lag.max = 50,
        xlab="", ylab="", main="")
  mtext(text = "Desfase (horas)",side = 1,line = 2)
  mtext(text = "r",side = 2,line = 2)
  mtext(text = paste(TimeRange[1]," ",TimeRange[2]),side = 3,line = 1.5,cex =
lab.size)
  mtext(text = paste("CUI SSTGrad"),side = 3,line = 0.5,cex = lab.size)
  abline(v=0, lty=2,col="blue")
  dev.off()
}

## ----- ##
#### - Analisis de factores - ####
## ----- ##
rad_list <- c("neutro 01","semineutro 02", "Evento 11")
if (ii %in% rad_list){
  matriz_FA <- evento_H[,c("DO","SST",
                          "CUI_daily_interpolated",
                          "SSTGrad_interpolated","Rad")]
  matriz_FA <- na.omit(matriz_FA)
  colnames(matriz_FA) <- c("DO", "SST", "CUI", "SSTGrad","Rad")
}else{
  matriz_FA <- evento_H[,c("DO","SST",
                          "CUI_daily_interpolated",
                          "SSTGrad_interpolated","SLH")]
  matriz_FA <- na.omit(matriz_FA)
  colnames(matriz_FA) <- c("DO", "SST", "CUI", "SSTGrad","SLH")
}
FA <- factanal(matriz_FA, factors = 2, rotation = "varimax")
print(EvName)
print(FA)

fact_name <- paste(EvName, "Factor.png")
{png(fact_name, width = 10,height = 8,units = "cm", res = 400)
par(mar=c(4,4,2,1))
plot(FA$loadings, pch=16, cex=1.2, col = "red",
     xlab="",ylab="",xlim=c(-1.1, 1.1),ylim=c(-1.1, 1.1),
     cex.axis=1)
mtext(text = "Factor 1",side = 1,line = 2, cex=1.1,font = 2) # XLAB
mtext(text = "Factor 2",side = 2,line = 2, cex=1.1,font = 2) # YLAB
abline(h=0, v=0, col="blue", lty=2,lwd=2)
arrows(0, 0, FA$loadings[,1], FA$loadings[,2], length = 0, lty = 1, lwd=2)
text(FA$loadings+0.06, labels = names(matriz_FA), cex=1.1)
}

```

```

#title(main = titulo, sub = paste("p-val = ",round(matriz_fa$PVAL,2)) )
mtext(text = paste(TimeRange[1]," ",TimeRange[2]),side = 3,line = 0.7, cex=1.1)
mtext(text = paste("p-val = ",round(FA$PVAL,2)),
      side = 1,line = 3, cex=1)
dev.off()
}
print("_____")
setwd(wd_graficas)
}

## ----- ##
#### // Dispersion con desfase de maxima correlacion \\ ####
## ----- ##
# Seleccione evento:
setwd(wd_graficas)
table(datos$EventoHypox)
EvName <- "Evento 08"
{
evento <- subset(datos, subset = datos$EventoHypox == EvName)
evento_H <- evento[minute(evento$dateUTC)==0,]
dateVector <- evento_H$dateUTC
(TimeRange <- range(dateVector))
dir_name = paste0(EvName,"_",
                  substr(TimeRange[1],1,10), "_",
                  substr(TimeRange[2],1,10))
dir.create(path = dir_name,showWarnings = F)
setwd(dir_name)
}

# seleccione variables X,Y e indique sus nombres
XX <- evento_H$CUI_daily_interpolated
X_name <- "CUI"
X_lab <- cui_lab
X_col <- cui_col
YY <- evento_H$DO
Y_name <- "DO"
Y_lab <- do_lab
ccf(XX,YY,lag.max = 60)

# Indique desfase deseado:
lag = -60
len <- length(XX)

if (lag < 0){
  print("Desfase negativo")
  xxlag <- XX[-c( (len-abs(lag)+1):len ) ]
  yylag <- YY[- c(1:abs(lag))]
} else {
  print("Desfase negativo")
  xxlag<- XX[-c(1:abs(lag))]
  yylag <- YY[-c( (len-abs(lag)+1):len )]
}

{
summary(lm(YYlag~XXlag))
(cor_lag <- cor.test(xxlag,yylag, method = "spearman"))
r_lag <- round(cor_lag$estimate,2)
pval_lag <- cor_lag$p.value

if (pval_lag >0.05){
  signif_lag = paste("pval =",round(pval,2))
} else if (pval_lag <= 0.05 & pval_lag > 0.01){
  signif_lag = "*"
} else if (pval_lag <= 0.01 & pval_lag > 0.001){
  signif_lag = "***"
} else if (pval_lag <= 0.001){
  signif_lag = "****"
}
print(r_lag)
print(signif_lag)
}

cor_lag_name <- paste(EvName,Y_name,X_name,"corr_lag.png")

```

```

{
  png(cor_lag_name,width = 10,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mfrow=c(1,1))
  par(mar=c(3.3,3.3,3,0.5))
  #Caida:
  plot(XXlag,YYlag,las=1,
       pch=20,col=1,
       xlab="",
       ylab="",
       cex.axis=axes.size, cex.lab=lab.size)
  #Etiquetas:
  mtext(side = 1,line = 2.3,text = X_lab)
  mtext(side = 2,line = 1.9,text = Y_lab)
  mtext(text = paste(TimeRange[1],"-",TimeRange[2]),side = 3,line = 1.3,cex =
lab.size)
  mtext(text = paste("desfase =",lag,"(horas)"),side = 3,line = 0.3,cex = lab.size)

  #Linea regresion:
  abline(lm(YYlag~XXlag),
        lty=2, lwd=2,col=x_col )
  #Puede ajustar coordenadas manualmente:
  legend("bottomleft", legend = paste0("rho = ",r_lag, signif_lag),
        bty = "n",text.font = 2, inset = c(0.01,0.01))
  dev.off()
}

## ----- ##
#### // Analisis de factores con SSTGrad desfasado \\ ####
## ----- ##
setwd(wd_graficas)
table(datos$EventoHypox)
EvName <- "Evento 08"
{
  evento <- subset(datos, subset = datos$EventoHypox == EvName)
  evento_H <- evento[minute(evento$dateUTC)==0,]
  dateVector <- evento_H$dateUTC
  (TimeRange <-range(dateVector))
  dir_name = paste0(EvName,"_",
                    substr(TimeRange[1],1,10), "_",
                    substr(TimeRange[2],1,10))
  dir.create(path = dir_name,showWarnings = F)
  setwd(dir_name)
}

# seleccione matriz con un solo SSTGrad (elija desfase )
matriz_FA <- evento_H[,c("DO","SST",
                        "CUI_daily_interpolated",
                        #"SSTGrad_interpolated", #sin desfase
                        #"SSTGrad_lag_24H", #Desfase 1 dia,
                        #"SSTGrad_lag_48H", #Desfase 2 dias
                        "SSTGrad_lag_72H", #Desfase 3 dias
                        "SLH")]
matriz_FA <- na.omit(matriz_FA)
colnames(matriz_FA) <- c("DO", "SST", "CUI", "SSTGrad","SLH")

FA <- factanal(matriz_FA, factors = 2, rotation = "varimax")
print(EvName)
print(FA)

## Indicar la proporcion de varianza de cada factor
Var1 = "(32%)"
Var2 = "(24%)"
# Indique desfase seleccionado para SSTGrad
lag = "SSTGrad lag -3 dias"

fact_name <- paste(EvName, lag,"Factor.png")
{png(fact_name,width = 10,height = 8,units = "cm", res = 400)
  par(mar=c(4,4,2.5,1))
  plot(FA$loadings, pch=16, cex=1.2, col = "red",
       xlab="",ylab="",xlim=c(-1.1, 1.1),ylim=c(-1.1, 1.1),
       cex.axis=1)
  mtext(text = paste("Factor 1", Var1),side = 1,line = 2, cex=1.1,font = 2) # XLAB

```

```

mtext(text = paste("Factor 2",Var2),side = 2,line = 2, cex=1.1,font = 2) # YLAB
abline(h=0, v=0, col="blue", lty=2,lwd=2)
arrows(0, 0, FA$loadings[,1], FA$loadings[,2], length = 0, lty = 1, lwd=2)
text(FA$loadings+0.06, labels = names(matriz_FA), cex=1.1)
mtext(text = paste(TimeRange[1]," ",TimeRange[2]),side = 3,line = 1.3, cex=1.1)
mtext(text = lag, side = 3,line = 0.3)
mtext(text = paste("p-val = ",round(FA$PVAL,2)),
      side = 1,line = 3, cex=1)
dev.off()
}

setwd(wd_graficas)

## ----- ##
#### // Cross-wavelets \\ ####
## ----- ##
{
install.packages("biwavelet")
library(biwavelet)
setwd(wd_graficas)
dir.create("Cross-wavelets",showWarnings = F)
setwd("Cross-wavelets/")
datos_H <- datos[minute(datos$dateUTC)==0,]

datos_H$dia <- yday(datos_H$dateUTC) + (hour(datos_H$dateUTC)/24)+
  (minute(datos_H$dateUTC)/1440)
}

#### 1 Separar por tramos ####
# Seleccionar "Tramo 1", "Tramo 2", "Tramo 3" o "Tramo 4"
EvName <- "Tramo 4"
{
evento <- subset(datos_H, subset = datos_H$tramo ==EvName) ### Por tramo
evento <- evento[,c("dateUTC","dia","DO","SST",
  "SSTGrad_interpolated","CUI_daily_interpolated")]
evento <- na.omit(evento)
rownames(evento) <- 1:length(evento$dateUTC)
(TimeRange <- range(evento$dateUTC))
(diff.Date(TimeRange))
titulo <- paste(substr(TimeRange[1],1,10)," - ", substr(TimeRange[2],1,10))
evento$diax1 <- evento$dateUTC - as.POSIXct("2014-01-01") ### Dias desde 2014-
01-01
evento$diax2 <- yday(evento$dateUTC) + (hour(evento$dateUTC)/24)
XX <- 1:length(evento$dateUTC)
}

#### 2. Definir series Y1 y Y2 ####
# Seleccione variables e indique sus atributos (color, etiqueta y nombre)
{
Y1 <- evento$DO #Variable 1
Y1col <- do_col #Color de la variable (do_col, cui_col, sst_col, sstgrad_col)
Y1lab <- do_lab
Y1name <- "DO"

Y2 <- evento$CUI_daily_interpolated #variable2
Y2col <- cui_col #Color variable2
Y2lab <- cui_lab
Y2name <- "CUI"
fig.name <- paste0("Paralelo ",EvName," xwave ",Y1name,"-",Y2name,".png")
}

#### 3. Calcular Cross-wavelet ####
xwave <- xwt(cbind(evento$diax1,Y1), cbind(evento$diax1,Y2))

#### 4 Grafico Paralelo Crosswavelet y 2 series ####
lab.size=1.2
axes.size=1.2
{
png(filename = fig.name,width = 15,height = 20,units = "cm",res=400)
par(mfrow=c(3,1)) #3 filas 1 columna
## Xwavelet ##
par(mar = c(0.2,5.2, 4,7.5))

```

```

plot(xwave, plot.cb = T, plot.phase = T,
     cex.axis=axes.size, las=2,
     lwd.sig = 1, xaxt = "n",
     xlab="", ylab="",
     yaxs="i", las=2)
# Eje X (por fechas):
axs.pos <- seq(xwave$t[1],to = tail(xwave$t,1), length.out = 5) #Ubicacion en
ejex en unidades de "t"
axs.date <- seq(1, length(xx),length.out = 5) # indices correspondientes a
axs.pos
axs.lab <- substr(evento$dateUTC[axs.date],start = 1,stop = 10) #Etiquetas
axis(1, at=axs.pos, labels = NA,cex.axis=axes.size) # Pinta lineas sin etiquetas
mtext("Periodo (días)",side = 2,line = 3.3,cex = lab.size)
mtext(paste(EvName,"Cross-wavelet",Y1name,Y2name),side = 3.3,line = 1.5,cex =
1.5)

## Serie 1 #
par(mar = c(1.5, 5.2, 1.5, 7.5))
plot(evento$diaX1, Y1, col=Y1col,
     type="l",xaxs="i",yaxs="i",xaxt="n",
     xlab = "", ylab="",cex.axis=axes.size,las=2)
axis(1, at=axs.pos, labels = NA,cex.axis=axes.size) # Pinta lineas sin etiquetas
mtext(text = Y1lab,side = 2,line = 2.9,cex = lab.size)
if (Y1name == "DO"){
  abline(h=2, col="red",lty=2) ## Linea de hipoxia
}
abline(h=0, lty=2) # Linea 0 para indices

## Serie 2 #
par(mar = c(5,5.2,0.2,7.5))
plot(evento$diaX1, Y2,col=Y2col,
     type="l",xaxs="i",yaxs="i",xaxt="n",
     xlab = "", ylab="",cex.axis=axes.size,las=2)
axis(1, at=axs.pos, labels = axs.lab,cex.axis=axes.size)
#mtext(text =paste(Y2lab,Y2unit), side = 2,line = 2.9,cex = lab.size)
mtext(text =Y2lab,side = 2,line = 2.9,cex = lab.size)
mtext("Fecha", side=1, line=2.8, cex=lab.size)
abline(h=0, lty=2) # Linea 0 para indices

dev.off()
}

```