

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



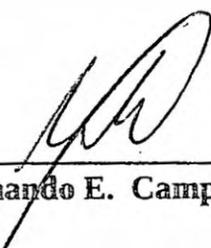
**CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCALAS DE
VARIABILIDAD INTRA-ANUAL DEBIDO AL
FORZAMIENTO FÍSICO EN LA ZONA DE MÍNIMO
OXÍGENO FRENTE A PERÚ**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
LICENCIADO EN FÍSICA**

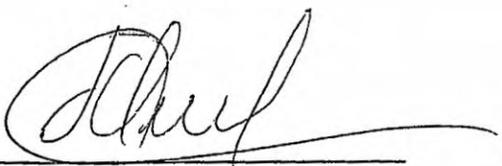
FERNANDO EDER CAMPOS GONZALES

Callao, Diciembre, 2015

PERÚ



Bach. Fernando E. Campos Gonzales



Mg. Jorge Quispe Sánchez
(asesor)

HOJA DE PRESENTACIÓN

CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCALAS DE VARIABILIDAD INTRA-ANUAL DEBIDO A FORZAMIENTO FÍSICO EN LA ZONA DE MÍNIMO OXÍGENO FRENTE AL PERÚ

FERNANDO EDER CAMPOS GONZALES

Tesis presentada a consideración del Cuerpo de Docentes de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad Nacional del Callao, como parte de los requisitos para obtener el Título de Licenciado en Física

Aprobado por:

Dr. Pablo Godofredo Arellano Ubilluz

Presidente

Dr. Rafael Edgardo Carlos Reyes

Vocal

Dr. Richard Saúl Toribio Saavedra

Secretario

**Callao-Perú
Diciembre-2015**

FICHA CATALOGRÁFICA

CAMPOS GONZALES, FERNANDO EDER

Caracterización de las escalas de variabilidad intra-anual debido al forzamiento físico en la Zona de Mínimo Oxígeno frente a Perú (2015).

134, (UNAC, licenciado en Física, 2015)

Tesis, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.

Física.

AGRADECIMIENTOS

Muchas personas fueron las que me brindaron su apoyo durante el comienzo, elaboración y fin de este trabajo; tanto con su apoyo moral como intelectual, por tanto, en estos primeros párrafos quiero darles las gracias.

Primero debo de agradecer a mi padre Segundo y mi madre Justina por todo ese apoyo incondicional que me han brindado por tantos años, muchísimas gracias. También quiero dar agradecimientos especiales a mis asesores Aurélien Paulmier, Jorge Quispe y mi co-asesor Boris Dewitte por todo su apoyo durante la elaboración desarrollo y fin de ésta tesis, por toda su paciencia y tiempo que dedicaron a las continuas revisiones de los resultados.

Agradezco también el gran apoyo que me brindó el equipo del IGP: Ivonne Montes, Kobi Mosquera, Ken Takahashi y JeanCarlo Fajardo. Así mismo quiero agradecer a Arnoldo Valle-Levinson de la Universidad de Florida, Rocio Mancilla del Instituto Politécnico Nacional CICATA en México, Moira Luz Clara del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) en Argentina y Serena Illig del Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS) en Francia, muchas gracias por todo su apoyo.

Así mismo quiero agradecer al Instituto de investigación para el Desarrollo (IRD) por haber financiado mi trabajo de tesis y al Instituto del Mar del Perú por brindar sus instalaciones durante todo el año 2013.

Finalmente quiero agradecer a mis amigos de la Universidad Nacional del Callao que me dieron ánimos de seguir con este trabajo, a Ronnie Sinche, Ricardo Otazu, Carlos Salvatierra, Martin Arteaga, Bryan Motta y Juvenal Tordocillo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	16
RESUMEN	17
ABSTRACT	18
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	19
1. Identificación del problema	19
2. Formulación del problema	21
3. Objetivo de la investigación	22
4. Justificación e importancia	22
II. MARCO TEÓRICO	24
1. Antecedentes del estudio	24
2. Herramientas matemáticas	33
3. Definiciones de términos básicos	42
III. VARIABLES E HIPÓTESIS	47
1. Variables de la investigación	47
2. Operacionalización de variables	47
3. Hipótesis	48
IV. METODOLOGÍA	49
1. Tipo de investigación	49
2. Diseño de la investigación	49
3. Población y muestra	52

4.	Datos	52
5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	59
6.	Procesamiento estadístico y análisis de datos	61
V.	RESULTADOS	64
1.	Variabilidad intra-diaria	65
2.	Variabilidad intra-mensual (1-8 días)	68
3.	Variabilidad intra-mensual (8-15 días)	70
4.	Variabilidad intra-estacional (15-90 días)	71
VI.	DISCUSIONES	73
1.	Variabilidad de la estructura vertical de la ZMO y eventos de oxigenación	73
2.	Masas de agua involucradas en la variabilidad de la ZMO	80
3.	Rol del forzamiento físico	90
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	104
	BIBLIOGRAFÍA	106
	ANEXOS.	113
A.	Matriz de consistencia	113
B.	Teoría complementaria del análisis wavelet	114
C.	Espectro de potencias wavelet para los parámetros físicos (P, T, S y vientos)	116
D.	Criterio para detectar eventos de oxigenación por mecanismos físicos	129

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Mapa del promedio anual del oxígeno a nivel mundial para la profundidad de 300 metros tomados del Atlas de las regiones oceánicas de la Organización de investigación Industrial y Científica en el 2009 (con siglas en inglés: CSIRO-CARS 2009). La barra de colores (derecha) muestra el rango de las concentraciones de oxígeno en <i>ml/L</i> cercanas a cero (color morado) hasta concentraciones de oxígeno próximas a 7 <i>ml/L</i>	20
2.1.	a) Distribución de O_2 a 250 m. de profundidad (datos de WOCE de 1992-1995 líneas punteadas). Lugares de muestreo y profundidad de las estaciones: b) 21° Sur Iquique (80-1880m.); c) 30° Sur de Coquimbo (700-4000 m.); d) 36° Sur de Concepción (hasta 60 m.).	25
2.2.	Wavelet cruzado para las series de tiempo del nivel del mar y esfuerzo de vientos en dos estaciones(arriba). Series de tiempo del nivel del mar para dos pares diferentes de estaciones (abajo). 27	
2.3.	Series de tiempo del peso dinámico ecuatorial y variables oceanográficas frente a Callao (12° Sur): a) promedio 5 días del peso dinámico ecuatorial a 95° Oeste (GAL DYNH) (línea negra, escala en reversa) y altura superficial del mar en Callao (línea azul, escala en reversa); b) Variabilidad temporal de la temperatura (°C coloreado) y densidad (líneas de contorno); c) Variabilidad temporal del oxígeno disuelto.	28

2.4.	a) Amplitud climatológica y b) Varianza corrida del esfuerzo de vientos por 30 días a lo largo de la costa (hacia el Ecuador) derivado de QuikSCAT de 2000-2008. Las unidades son dyn/cm^2 .	30
2.5.	Perfiles verticales de oxígeno (en mL/L y $M.$) usando los datos de crucero Interacción en el Océano Tropical , Biogeoquímica y clima-Meteor 77, Leg 4, 2009-0102: a) Variación de 0 a 5000 m, b) Detalle de 0 a 1000 m y c) Detalle de 0 a 1000 m y hasta 2.0 mL/L	32
2.6.	Modos dominantes del análisis de las funciones empíricas ortogonales (FEO) de observaciones satelitales diarias de TMI-OI y de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) a escala sub-estacional capturando el 33 de la varianza. a) Patrones espaciales (color en $^{\circ}C$); b) Espectro de potencia wavelet global normalizado (EPWN) de la primera componente principal de TSM adimensional (período en días). La línea punteada indica el 95 del nivel de confianza; c) 8 años de climatología del EPWN estimado dentro del período de Junio 2000 a Mayo 2008. La línea de color blanco muestra el intervalo de confianza.	33
2.7.	Diagrama T-S para los datos de las operaciones oceanográficas Mar-Chile. (tomado como ejemplo aplicativo). El eje Y representa a la temperatura potencial (en $^{\circ}C$) y el eje X en porcentaje por millón.	42
4.1.	Estación fija AMOP mostrando el anclaje con los 5 sensores midiendo presión, temperatura, salinidad y oxígeno desde el 5 de enero del 2013 hasta 21 de febrero del 2014 (figura parte superior). Cruceros de cercanía l'Atalante con 14 estaciones (201 a 214) mostrando las variaciones del perfil de oxígeno durante los dos días que duró los cruceros (figura inferior).	54

4.2. Concentraciones de oxígeno en la oxiclina (parte superior) y núcleo (parte inferior) del anclaje AMOP representados por las profundidades de 30 y 145 metros.	55
4.3. Series temporales del anclaje AMOP para la presión (1 y 4), temperatura (2 y 5) y salinidad (3 y 6) de las profundidades que representan a la oxiclina y al núcleo (30 metros y 145 metros de profundidad respectivamente).	57
4.4. Serie de tiempo del esfuerzo de vientos cercanos al anclaje AMOP (77,66° Oeste y 12,05° Sur) extraídos del satélite ASCAT.	58
4.5. Serie de tiempo de la profundización de la isoterma 20°C (izquierda) describiendo las variaciones en altura de la termoclina del Pacífico Ecuatorial y las anomalías de la elevación del mar (derecha) describiendo las anomalías de la superficie del mar. Ambos datos serán usados para la descripción de la propagación de ondas ecuatoriales.	59
5.1. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria del oxígeno a la profundidad de 30 metros. 1) EPWN mostrando la distribución de la energía espectral durante 3 intervalos de tiempo: 150-178, 185-257 y 277-368 días. 2) EPWN global (línea azul) mostrando 2 períodos significativos dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos (picos espectrales) son representados por la línea de color azul.	66
5.2. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria del oxígeno a la profundidad de 145 metros. 1) EPWN mostrando la distribución de la energía espectral durante 3 intervalos de tiempo: 220-260, 320-330 y 370-417 días. 2) EPWN global (línea azul) mostrando 1 período significativo dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde el máximo significativo (pico espectral) es representado por la línea de color azul.	67

5.3. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual 1-8 días del oxígeno a la profundidad de 30 metros. 1) EPWN muestra la distribución de la energía espectral wavelet para ambos períodos y 2) EPWN global (línea azul) mostrando 2 períodos significativos dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos (picos espectrales) son representados por la línea de color azul.	69
5.4. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual 1-8 días del oxígeno a la profundidad de 145 metros. 1) EPWN muestra la distribución de la energía espectral wavelet para ambos períodos y 2) EPWN global (línea azul) mostrando 2 períodos significativos dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos (picos espectrales) son representados por la línea de color azul.	70
6.1. Eventos de oxigenación (rectángulos de color amarillo) en las 5 profundidades tomadas del perfil AMOP. Las profundidades son tomadas de la más cercana a superficie (30 metros, superior) hasta las localizadas en el núcleo (160 metros, inferior). Se visualiza gran diferencia entre los eventos de oxigenación cercanos a la oxiclina y cercanos al núcleo tanto en término de duración de eventos como cantidad en concentración de oxígeno.	75
6.2. Climatología CARS2009 con mostrando datos de 1 año cercanos al anclaje AMOP (12,00° Sur, 77,50° Oeste). La oxiclina (entre 17.98 y 28.49 $\mu\text{mol/L}$) muestra profundización en invierno austral, mientras que en verano austral 2013 y 2014 muestra ser más somero.	78

6.3. Perfil del oxígeno del crucero l'Atalante para los días 27 y 28 de enero 2014 cerca al anclaje. Se puede ver eventos semi-diurnos de profundización de la oxiclina (entre 5 a.m. y 7 p.m. del 27 de enero y 12 p.m. del 28 de enero). La oxiclina muestra mayor profundización a las 5 a.m. del 27 de enero y más somera a las 7 a.m. del 28 de enero.	79
6.4. Diagramas Höwmoller Longitud vs Tiempo a lo largo de la línea ecuatorial de datos observados y resultados del modelo lineal oceánico del IGP. a) Anomalías del esfuerzo de vientos zonal de ASCAT, b) Anomalías de la profundidad de la isoterma 20°C de TAO, c) Anomalías de la profundidad de la isoterma 20°C de ARGO, d) Anomalías del nivel del mar de JASON-2 y e) Anomalías del modelo lineal oceánico (LOM-IGP) forzado con anomalías de vientos zonales de ASCAT. Los rectángulos de color rojo representan a las estaciones de verano 2013 (superior) y 2014 (inferior). Los rectángulos de color rojo representan las estaciones de verano.	81
6.5. Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de verano austral 2013 (de 01-01-13 a 19-03-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. La líneas negras representan a las isopicnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a las masas de agua STSW.	83

6.6.	Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de otoño austral 2013 (de 20-03-13 al 20-06-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopicnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.	85
6.7.	Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de invierno austral 2013 (de 21-06-13 a 21-09-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopicnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.	86
6.8.	Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de primavera austral 2013 (de 21-09-13 a 20-12-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopicnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.	88
6.9.	Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de verano austral 2014 (de 21-12-13 a fin de la medición) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopicnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.	90

- 6.10. EPPW en la oxiclina, comparando en la misma escala de variabilidad (intra-diaria) el oxígeno con otros parámetros físicos. Parte superior: El oxígeno (línea azul) con la presión (línea negra) y parte inferior: el oxígeno (línea azul) y la temperatura (línea roja) en la profundidad de 30 metros. Los niveles de significancia están dados por las líneas punteadas. Los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación 92
- 6.11. EPPW en la oxiclina, comparando las fluctuaciones para diferentes escalas para el oxígeno. Para el oxígeno en la escala intra-diaria (línea azul) con el oxígeno en la escala intra-mensual (línea negra). Los niveles de significancia están dados por las líneas punteadas. Los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación 93
- 6.12. EPPW en el núcleo, comparando las fluctuaciones para diferentes escalas para el oxígeno. Para el oxígeno en la escala intra-diaria (línea azul) con el oxígeno en la escala intra-mensual (línea negra). Los niveles de significancia están dados por las líneas punteadas. Los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación 94
- 6.13. EPPW de la oxiclina. (arriba) Comparando las fluctuaciones para temperatura (línea negra) y vientos (línea roja) con el oxígeno (línea azul) en la escala 1-8 días. O_2 vs Temperatura (arriba) y O_2 vs vientos (abajo). Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación 95

6.14. EPPW del núcleo, comparando las fluctuaciones del oxígeno en la escala 1-8 días. O_2 2.56 días representado por la línea azul vs O_2 5.4 días representado por la línea negra. Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación	96
6.15. EPPW de la oxiclina, comparando las fluctuaciones del oxígeno en la escala 8-15 días. la figura superior muestra al O_2 (línea azul) vs temperatura (línea negra) y la figura inferior al O_2 (línea azul) vs salinidad (línea roja). Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación.	97
6.16. EPPW del núcleo, comparando las fluctuaciones del oxígeno en la escala 8-15 días. O_2 4.36 días representado por la línea azul vs O_2 14.1 días representado por la línea negra. Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación	98
6.17. EPPW de la oxiclina en la escala intra-estacional, comparando las fluctuaciones de oxígeno representado por la línea azul vs la temperatura representado por la línea negra. Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación	100

C.1. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la presión a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno y diurno significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	116
C.2. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la presión a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno y diurno significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	117
C.3. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la temperatura a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno significativo dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde el máximo significativo se muestra a la derecha.	118
C.4. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la temperatura a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando encontrarse cercano al nivel de significancia (línea punteada).	119

C.5. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la salinidad a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno significativo dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde el máximo significativo se muestra a la derecha.	120
C.6. Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la salinidad a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando encontrarse cercano al nivel de significancia (línea punteada).	121
C.7. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la presión a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	122
C.8. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la presión a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	123

C.9. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la temperatura a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	124
C.10. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la temperatura a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	125
C.11. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la salinidad a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	126

C.12. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la salinidad a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	127
C.13. Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de vientos locales. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.	128
D.14. Eventos de oxigenación para la profundidad de 30 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refeja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $50 \mu\text{mol}/L$	130
D.15. Eventos de oxigenación para la profundidad de 50 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refeja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $20 \mu\text{mol}/L$	131

- D.16. Eventos de oxigenación para la profundidad de 75 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $6 \mu\text{mol}/L$ 132
- D.17. Eventos de oxigenación para la profundidad de 145 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $3.5 \mu\text{mol}/L$ 133
- D.18. Eventos de oxigenación para la profundidad de 160 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $3 \mu\text{mol}/L$ 134

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo brindar una descripción completa de la variabilidad presente a escalas menores de un año en la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) frente a Perú debido a mecanismos físicos. Para ello se usaron datos de una línea instrumentada colocada a 50 Km. frente a las costas del Callao ($12^{\circ} 02'$ Sur, $77^{\circ} 40'$ Oeste) enfocándose en los sensores que midieron simultáneamente presión, temperatura, salinidad y oxígeno a 5 diferentes profundidades (30, 50, 75, 145 y 160 metros bajo la superficie) en intervalos de 15 minutos. Estos datos fueron registrados desde el 5 de Enero del 2013 hasta el 21 de Febrero del 2014 dentro del marco del proyecto trans-disciplinario AMOP (Actividad de investigación dedicada a la Mínima de Oxígeno del Pacífico Este), documentando la dinámica de la zona del gradiente de oxígeno (oxiclina) así como la zona con muy bajas concentraciones de oxígeno (núcleo, con concentraciones de $O_2 < 20\mu\text{mol}/L$).

Los resultados muestran por primera vez, 3 regímenes de variabilidad principales: 1) Sub-diario (<1 día) asociado a la marea interna y cambios en la estratificación debido a modulación por otras escalas de variabilidad, 2) sub-mensual (1-30 días) asociado a vientos, ondas inercio-gravitacionales y ondas mixtas Rossby-gravitatorias y 3) sub-estacional (30-90 días) asociado a la presencia de La Niña costera, el afloramiento y las ondas Kelvin internas.

Palabras clave: ZMO, variabilidad intra-anual, oxiclina, núcleo, forzamiento físico, AMOP, Perú.

ABSTRACT

This study aimed to provide a full description of scales of variability less than a year in the oxygen minimum zone (OMZ) off Peru by of physical mechanisms. To do this, it was used the data from an instrumented line moored at 50 kilometers from Callao at the coast ($12^{\circ} 02'$ South, $77^{\circ} 40'$ West) focusing in the sensors of pressure, temperature, salinity and oxygen at 5 depths (30, 50, 75, 145 and 160 meters below the surface) with a frequency of 15 minutes. These data acquired between January 5th, 2013 until February 21th, 2014 within the framework of the trans-disciplinary AMOP project (Activity of investigation dedicated to Oxygen Minimum Zone of the eastern Pacific) are documenting the dynamics of both the oxycline and the core ($O_2 < 20\mu\text{mol}/L$). The results show for the first time, three main variability regimes: 1) Sub-daily (<1 day) associated with the internal tide and changes in stratification due to modulation by other variability scales, 2) sub-monthly (1-30 days) associated with inertio-gravitational waves, mixed Rossby-gravitatory waves and winds and 3) sub-seasonal (30-90 days) associated with the presence of Coastal La Niña, upwelling and internal Kelvin waves.

Key words: Oxygen Minimum Zone (OMZ), intra-annual/intra-seasonal variability, oxycline, OMZ core, physical forcing, AMOP, Peru.

Capítulo I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1. Identificación del problema

Las Zonas de Mínimo de Oxígeno (ZMO) son capas sub-óxicas (con baja concentración de oxígeno disuelto: O_2 inferior a $20 \mu mol/L$, véase figura 1.1 como ejemplo) extendiéndose verticalmente entre 50 y 1000 metros de profundidad en promedio ([30]) localizadas principalmente en el Océano Índico Norte y Pacífico Este. Se presenta en particular una de las ZMO más someras e intensas (se define intensas, cuando las concentraciones de oxígeno en su núcleo son muy bajas) frente a las costas de Perú.

Las ZMO son conocidas por tener un rol importante en la evolución del clima (ej.: producción de gases con efecto invernadero; [30]) y la modificación del ecosistema (ej.: barrera respiratoria para los peces, producción de gases tóxicos como los sulfuros; [35] y [34]).

En contraparte las ZMO son muy sensibles a cambios climáticos (ej.: desoxigenación de los océanos debido a la estratificación y disminución de la solubilidad del oxígeno asociado al calentamiento global; [2] y [38]) y del ecosistema (ej.: fertilización artificial por actividades humanas induciendo anoxia en el océano

costero; [8]).

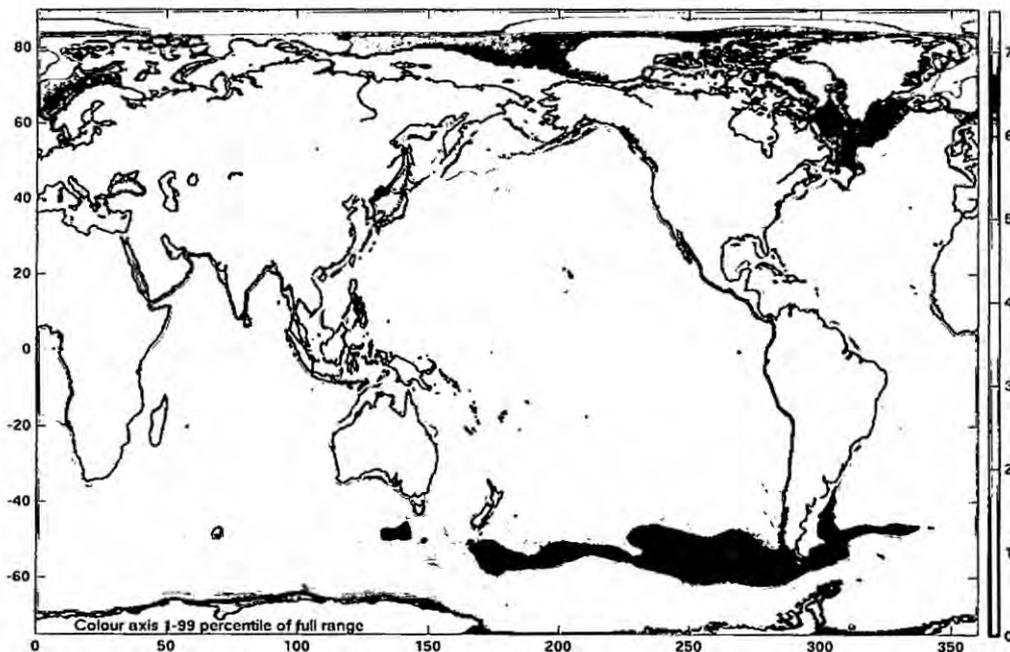


Figura 1.1: Mapa del promedio anual del oxígeno a nivel mundial para la profundidad de 300 metros tomados del Atlas de las regiones oceánicas de la Organización de investigación Industrial y Científica en el 2009 (con siglas en inglés: CSIRO-CARS 2009). La barra de colores (derecha) muestra el rango de las concentraciones de oxígeno en ml/L cercanas a cero (color morado) hasta concentraciones de oxígeno próximas a $7 ml/L$

La existencia de la ZMO es debido a mecanismos de consumo biogeoquímico de O_2 ([31]) asociados a forzamientos físicos de origen local o remoto y a varias escalas de tiempo ([38]; [7]; [20]; [17]).

Los forzamientos físicos involucran ventilación a baja frecuencia de las masas de agua y mecanismos de difusión y/o advección en un rango de frecuencias muy amplio (intra-estacional a inter-anual). Dentro de las corrientes claves que están involucradas en el transporte y advección de O_2 se encuentra la subcorriente Perú-Chile conocida como PCUC (siglas en inglés de: Peru-Chile Undercurrent; [16], [5]), la cual conecta el sistema de corriente ecuatorial (conocido como: Equatorial Undercurrent-EUC) con el sistema de corriente costero ([19]).



2482

La ZMO y sus mecanismos de formación (de escala global a local: [30]) presentan variabilidad desde grandes escalas temporales: de millones de años ([32]) hasta ciclos interanuales (Oscilación Sur El Niño: [21]; [15]) y anuales ([18]). Pero la variabilidad de la ZMO a más alta frecuencia y su respuesta biogeoquímica no han sido caracterizadas en detalle. En particular, las escalas intra-anales de la ZMO y las interacciones entre escalas nunca han sido exploradas a pesar del impacto conocido sobre el sistema por procesos a escala inferior a un año: mareas, ondas internas y ciclos diurnos de estratificación (escalas de horas), eventos de afloramiento y hundimiento controlados por vientos (escalas de días), propagación de ondas Kelvin intra-estacionales atrapadas en la costa (escala de meses).

Un estudio de la variabilidad a escalas de tiempo intra-anales del sistema completo de las ZMO resulta ser de mayor importancia, en particular para mejorar la definición de las cotas de pesca (ej.: monitoreo durante la profundización de la ZMO que sería asociado al aumento del habitat de la anchoveta y juveniles lo que induciría a una sobre-estimación de recursos).

También la caracterización intra-anual permitirá detectar eventos extremos asociados a la actividad biogeoquímica específica ([31]) induciendo anoxia y producción de sulfuros ([34]) que conducirían a una potencial mortalidad masiva ([8]).

2. Formulación del problema

1. ¿Cuáles son las escalas de tiempo en el rango de frecuencia (de horas a meses) asociadas a la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente al Perú?
2. ¿Cuáles serán los mecanismos físicos que intervienen en la variación de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) en estas escalas de tiempo frente al Perú?

3. Objetivo de la investigación

3.1. Objetivo general

Caracterizar las diferentes escalas de variabilidad intra-anual de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) frente al Perú debido a forzamientos físicos.

3.2. Objetivos específicos

Determinar si el oxígeno presenta variabilidad asociada a escalas temporales específicas:

1. < 1 día: relacionado a marea y ondas internas.
2. Entre 1 y 15 días: relacionado con la variabilidad sinóptica-atmosférica.
3. Entre 15 y 90 días: relacionado con ondas de período largo (ej.: ondas atrapadas en la costa).

4. Justificación e importancia

La necesidad de describir los cambios en la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) es de interés científico y económico. Dependiendo de las sub-capas específicas (ej.: oxiclina, núcleo) donde se esté analizando, podrá mostrarse si los cambios son debido a mecanismos físicos (ej.: circulación de masas de agua de interés para oceanógrafos físicos) o biogeoquímicos (ej.: actividad de remineralización y respiración de interés para químicos, biólogos marinos así como paleo-oceanógrafos). A su vez se puede analizar si estos cambios afectan en la intensificación de las ZMO frente al calentamiento global, ya que trae como consecuencia grandes repercusiones sobre recursos pesqueros (interés económico) y cambios climáticos globales (gases con efecto invernadero), como cambios locales (capa de ozono, formación de nubes).

Trabajos realizados en las ZMO se centran en el análisis de grandes escalas de tiempo (ej.: escala inter-decadal y escala de millones de años-escala paleoclimática) asociadas a diferentes mecanismos (ej.: variabilidad de la corriente sub-superficial Perú-Chile, variabilidad de la Zona de Convergencia Inter-Tropical). A corta escala de tiempo (inferiores a un año) con alta resolución (alta resolución se refiere a 15 minutos de intervalo entre cada muestra) no han sido documentado hasta el momento.

A su vez la ZMO peruana se puede considerar como una zona piloto de estudio por ser muy somera (es decir muy superficial, con mayor impacto sobre la pesquería y el clima) comparándola con las de otros lugares (Ej.: frente a México), tiene una mayor productividad (10 % de la pesquería mundial) y es sometida a variabilidad de alta magnitud como la de El Niño. El siguiente trabajo por lo tanto servirá de guía para futuras investigaciones tanto de mecanismos físicos como biogeoquímicos (ej.: análisis de marea, marea interna, vientos, ondas atrapadas a la costa, procesos biogeoquímicos específicos e interacciones entre la física y la biogeoquímica).

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

1. Antecedentes del estudio

Paulmier y Ruiz-Pino. (2006). Caracterizan la ZMO y analizan el papel biogeoquímico del consumo de O_2 en el mantenimiento local de la ZMO frente a Chile (véase figura 2.1). Para ello determina en las zonas costeras, los cambios producidos en la intensidad, profundidad y espesor de la ZMO. Cuatro cruceros fuera de la plataforma continental a 21° y 30° Sur permitieron una descripción de las diferentes regímenes biogeoquímicos y dinámicos. Una estación fija a 36° Sur monitoreando mensualmente datos desde septiembre del 2000 hasta mayo del 2001 documentando la variabilidad estacional. Se concluyó que la ZMO de Chile entre 5 y 800 metros de profundidad es mantenida en toda plataforma con una intensa oxiclina y concentraciones mínimas de oxígeno menores a $1 \mu mol/L$ en el núcleo, presentando una variabilidad anual en término de profundidad y oxigenación de la oxiclina. El mantenimiento de la ZMO requiere advección física de aguas pobres en oxígeno por la sub-corriente Perú-Chile (PCUC). Además, también se requiere una alta remineralización local de la oxiclina, 3 veces más intensa que en el núcleo de la ZMO, que sugiere considerar a la oxiclina como un motor de la ZMO.

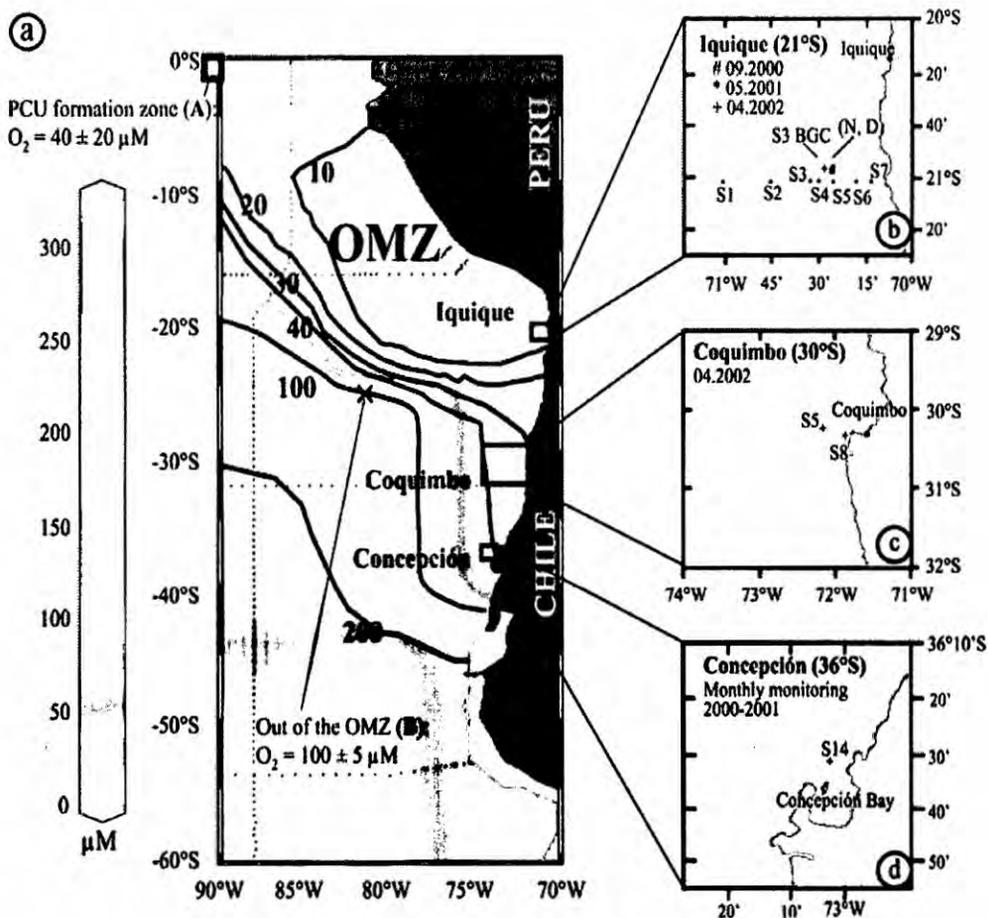


Figura 2.1: a) Distribución de O_2 a 250 m. de profundidad (datos de WOCE de 1992-1995 líneas punteadas). Lugares de muestreo y profundidad de las estaciones: b) 21° Sur Iquique (80-1880m.); c) 30° Sur de Coquimbo (700-4000 m.); d) 36° Sur de Concepción (hasta 60 m.).

Camayo, R. et al. (2006). Usaron los datos históricos de las series de tiempo del nivel del mar del Centro de Datos Oceanográficos Nacionales del NOAA (de sus siglas en inglés NODC), de 1982 a 2003 con resolución temporal de 1 día y datos satelitales de vientos del Instituto Francés de Investigación para la Exploración del Mar (IFREMER) de 1991 a 1996 con resolución temporal de 7 días. Para los datos hidrográficos locales usaron información de las estaciones en: La libertad (2° 12' Sur, 80° 55' Oeste), Lobos de Afuera (6° 56' Sur, 80° 43' Oeste), Paita (5° 5' Sur, 81° 10' Oeste), Santa Cruz (0° 45,3' Sur, 90° 18,8' Oeste), Callao (12° 3' Sur, 77° 9' Oeste), Pisco (13° 25' Sur, 76° 8' Oeste), San

Juan ($15^{\circ} 22'$ Sur, $75^{\circ} 12'$ Oeste), Matarani (17° Sur, $72^{\circ} 7'$ Oeste), Arica ($18^{\circ} 28'$ Sur, $70^{\circ} 20'$ Oeste), Antofagasta ($23^{\circ} 39'$ Sur, $70^{\circ} 24'$ Oeste) y Caldera ($27^{\circ} 4'$ Sur, $70^{\circ} 50'$ Oeste). Se encontró la presencia de oscilaciones intra-estacionales con períodos de 20 y 90 días a lo largo de la región costera de 2° a 27° Sur, especialmente durante los meses donde El Niño 97-98 mostraba máxima extensión y fuerte intensidad. Alrededor de 2° Sur se encontró oscilaciones con períodos menores a 70 días, en la costa central de Perú se encontró oscilaciones menores a 50 días. Se observó fuerte correlación entre el nivel del mar y los vientos con períodos de 10-50 días con larga intensidad durante 1991 a 1992 (en los wavelets cruzados, véase figura 2.2), posiblemente asociados a ondas costeras débiles. El radio de deformación es más largo que la escala topográfica frente a las costas de Perú y al Norte de Chile, posiblemente sea un indicador que las perturbaciones son debido a las ondas Kelvin, el valor pequeño obtenido para el parámetro de la estratificación, sugiere que pueden ser ondas barotrópicas de plataforma. En 1991-1992 (con banda de 6-11 días) y 1997-1998 (con banda de 25-40 días) entre 6° y 12° Sur se encontró oscilaciones asociados probablemente a ondas de Kelvin. Por último se observó oscilaciones con período 6-30 días para 1997 posiblemente asociados a ondas de Kelvin barotrópicas (o también llamadas ondas Kelvin superficiales).

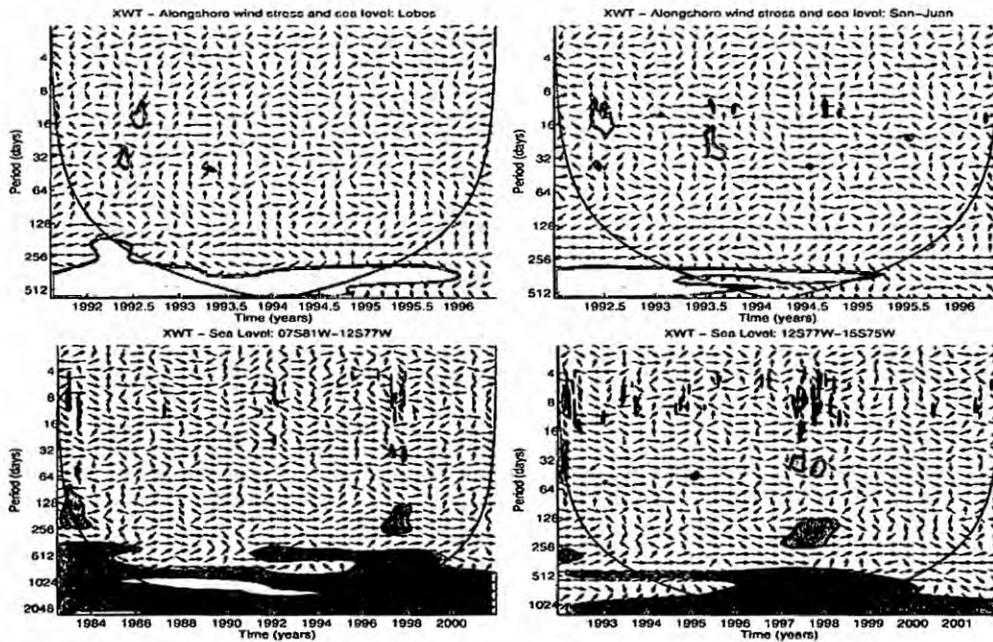


Figura 2.2: Wavelet cruzado para las series de tiempo del nivel del mar y esfuerzo de vientos en dos estaciones(arriba). Series de tiempo del nivel del mar para dos pares diferentes de estaciones (abajo).

Gutiérrez, D. et al. (2008). Analizaron: 1) la variabilidad en el tiempo del oxígeno costero sub-superficial en el centro del Perú en relación a las anomalías oceanográficas ecuatoriales, 2) la señal, duración y acoplamiento de la biomasa, cambios diversos en la microbiota y miobiota asociados con cambios en el régimen de oxígeno. Para ello se usó datos de la serie de tiempo mensual de la estación localizada a 10 millas náuticas del Callao ($12^{\circ} 2,8'$ Sur, $77^{\circ} 17,1'$ Oeste) a una profundidad de 94 metros, desde octubre de 1992 hasta diciembre del 2005; temperatura, salinidad y oxígeno disuelto fueron determinados a profundidad estándar (véase figura 2.3). Por otro lado, oxígeno disuelto de aguas del fondo, temperatura y densidad fueron medidos a 90 metros de profundidad; igualmente con datos mensuales. Con respecto al parámetro de bentos (comunidad formada por los organismos que habitan el fondo de los ecosistemas acuáticos), la meiofauna (pequeños animales que habitan entre los granos de arena y en los fangos) fue muestreada de octubre del 2002

hasta diciembre del 2005 usando nucleador corto de gravedad. Por último se usó interpolación lineal para el estudio mensual de los perfiles a estimar de las profundidades a 45, 22 y menores a $10 \mu\text{mol}/L$ de nivel de oxígeno. Sin caracterizar la variabilidad se concluyó que el forzamiento remoto controla el régimen de oxígeno en la plataforma frente al Callao a escala mensual e inter-anual, teniendo en cuenta los períodos característicos asociados al paso de ondas costeras. Cuando tal forzamiento es débil, los procesos biológicos, biogeoquímicos y físicos locales parecen controlar el nivel de oxigenación cerca del fondo. La intensidad y frecuencia de los episodios y desarrollo del control anóxico de los sistemas bentónicos de los sedimentos de la plataforma peruana, bajo condiciones de anoxia permanente son desfavorables para la microbiota.

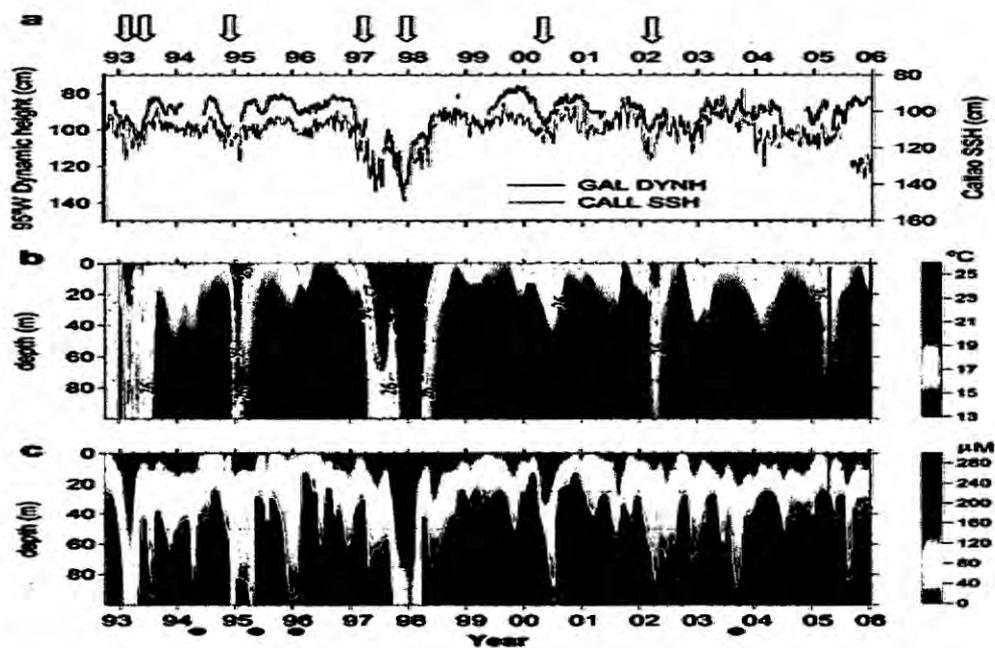


Figura 2.3: Series de tiempo del peso dinámico ecuatorial y variables oceanográficas frente a Callao (12° Sur): a) promedio 5 días del peso dinámico ecuatorial a 95° Oeste (GAL DYNH) (línea negra, escala en reversa) y altura superficial del mar en Callao (línea azul, escala en reversa); b) Variabilidad temporal de la temperatura ($^\circ\text{C}$ coloreado) y densidad (líneas de contorno); c) Variabilidad temporal del oxígeno disuelto.

Dewite, B. et al. (2011). Documentaron la variabilidad intra-estacional

del viento favorable al afloramiento (paralelo a la línea de costa) y su modulación estacional de su actividad a partir de datos satelitales. Además documentan la variabilidad intra-estacional de la temperatura superficial del mar (TSM) sobre la base de un registro a largo plazo de los datos satelitales. Son encontradas regiones de variabilidad intra-estacional significativa: la primera, alejada de Piura (en el norte de Perú: 5° Sur) y el otro en Pisco (15° Sur). Este último tiene variabilidad más pronunciada con una estacionalidad marcada de la actividad intra-anual en dos rangos de frecuencia (o regímenes): 5-25 días y 30-90 días (véase figura 2.4). El análisis de covarianza revela una variación significativa de las anomalías de la temperatura superficial del mar a lo largo de la costa asociándolo al forzamiento directo por el esfuerzo del viento. En la región de Pisco, el modo dominante de las anomalías de la TSM consiste en una banda alargada de aguas más frías/calientes que se extiende mar adentro más cerca del sur de Pisco y norte del mismo. En la región de Piura, dos modos dominantes emergen: El primero asociado a la variabilidad de surgencia forzada por los vientos a lo largo de la costa y el segundo relacionado con la incursión de las aguas ecuatoriales cálidas en el sistema costero. El segundo modo en Piura se asocia a las ondas Kelvin intra-estacionales y a la radiación de las ondas Rossby reflejadas al norte de la latitud crítica (latitud a la cual la onda Kelvin ecuatorial está atrapada a la costa y no se refleja en una onda Rossby). El análisis de covarianza revela que el patrón de la tensión del viento de este modo es característica de la respuesta directa de la circulación de bajo nivel a las anomalías de la TSM locales. El análisis de covarianza también revela un máximo de energía bien definida en torno al período de 50 días. Este pico no se puede explicar solamente por la dinámica de Ekman. No es un artefacto de la filtración, ya que también es prominente en los datos sin filtrar (en bruto). Este resultado muestra que está asociado con las ondas Kelvin intra-estacionales del primer y segundo modo baroclínico (sub-superficial). Debido a la variabilidad del sistema de la presión a nivel del mar (PNM) en las latitud es medias también exhibe una variabilidad con un máximo de energía a un período de 50 días,

existiendo la posibilidad de una interacción destructiva/constructiva de las anomalías de la temperatura superficial del mar a costas inducidas por las ondas Kelvin oceánicas y por la modulación del sistema PNM en las latitudes medias en la banda de 30 a 60 días. Esto sugiere entonces posibles interacciones no lineales entre diferentes escalas temporales (inter-anales) del forzamiento.

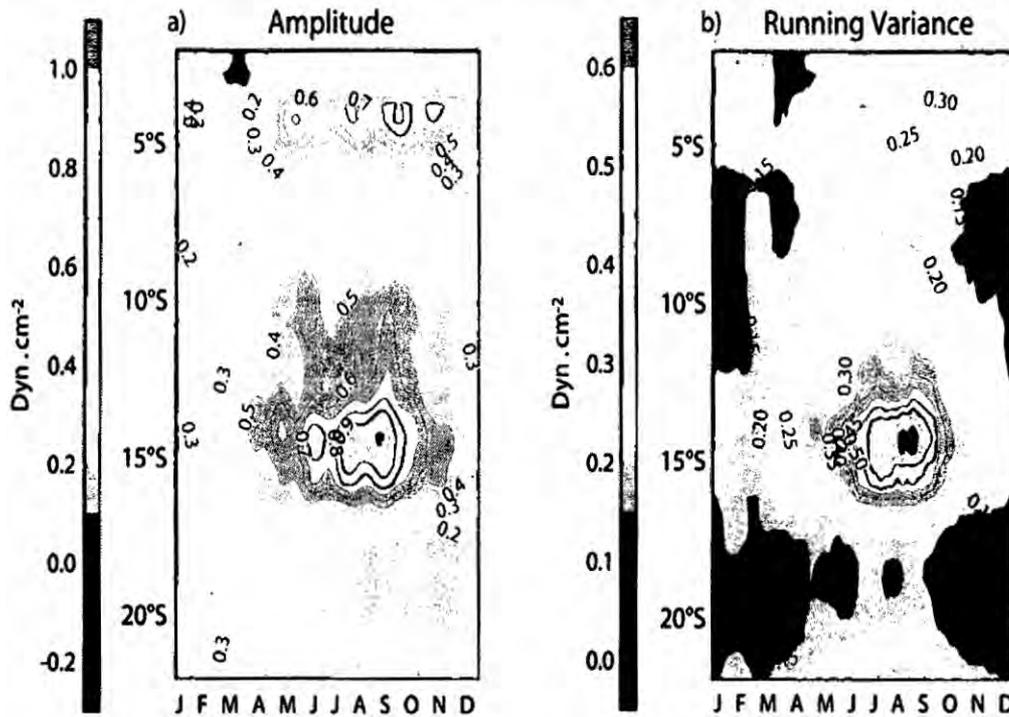


Figura 2.4: a) Amplitud climatológica y b) Varianza corrida del esfuerzo de vientos por 30 días a lo largo de la costa (hacia el Ecuador) derivado de QuikSCAT de 2000-2008. Las unidades son dyn/cm^2 .

Ledesma, J. et al. (2013). Analizan la distribución y evolución del oxígeno disuelto en la columna de agua para proporcionar elementos de caracterización y variabilidad de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) del Perú. Los datos fueron adquiridos en un área a escala regional y local complementado por series temporales con estaciones fijas cerca de Callao (a 12° Sur). El área de estudio regional comprende desde los 3° Norte hasta 14° Sur donde llevaron a cabo estaciones hidrográficas durante el crucero alemán Meteor 77-4 2009-0102 en Puerto Pizarro, Punta Falsa, Callao y Pisco colectando muestras de

oxígeno disuelto a niveles estándares de 0, 10, 25, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 500 y 4000 metros. Localmente en la bahía de Callao, el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) realizó estaciones costeras fijas entre 10 y 20 millas náuticas de la costa con visita y muestreo regular (cada 1-2 meses) entre 1999 y 2008 (véase figura 2.5). Las determinaciones del oxígeno disuelto se realizaron *in-situ* empleando el método volumétrico Winkler modificado por Carrit y Carpenter, 1966). En la interpolación usaron el Ocean Data View versión 4.3.8 (2011) y Surfer versión 9.0 (2009). Se llegó a concluir que frente al Perú (03° 30' - 14° 00' Sur / 76° 30' - 85° 50' Oeste) el espesor de la ZMO fue en promedio de 677,28 ± 50,90 m. Además en Callao (12° 02' Sur 77° 29' Oeste), de manera general el promedio anual de la profundidad del límite superior de la ZMO ($O_2 = 0.5$ ml/L o aproximadamente 20 $\mu\text{mol/L}$, documentando la capa de la oxiclina) se ubica a los 47.5 ± 20.2 metros, y durante los veranos sin El Niño (1999-2008) a los 30.6 ± 8.8 metros. En particular y en términos de variabilidad temporal, los datos del estudio muestran un ciclo anual e inter-anual marcado de la profundidad del límite superior de la ZMO respectivamente con variaciones de unos 20 metros y hasta 80 metros. Los valores hipóxicos se acentúan hacia el centro de la Bahía de Callao (2 millas náuticas), registrándose el límite superior más somero de la ZMO a 2.5 m. durante el verano del 2006.

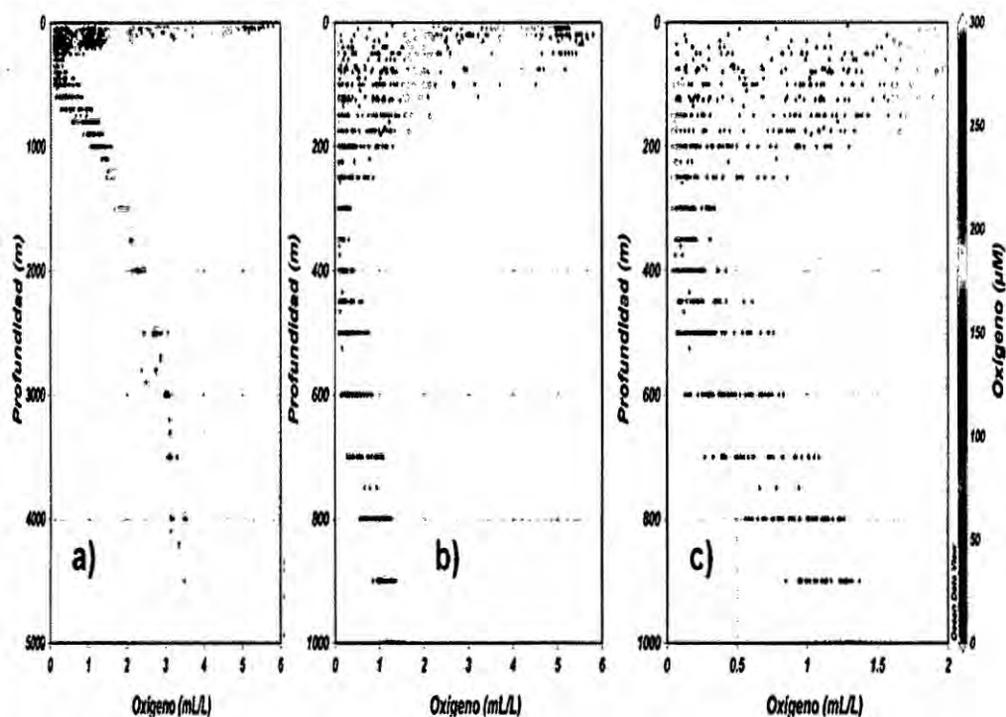


Figura 2.5: Perfiles verticales de oxígeno (en mL/L y $M.$) usando los datos de crucero Interacción en el Océano Tropical , Biogeoquímica y clima-Meteor 77, Leg 4, 2009-0102: a) Variación de 0 a 5000 m, b) Detalle de 0 a 1000 m y c) Detalle de 0 a 1000 m y hasta 2.0 mL/L

Illig, S. et al. (2014). Usó un modelo para probar las hipótesis planteadas en Dewitte et al., (2011) y estudiar los mecanismos asociados a los dos regímenes en la región central de Perú (véase figura 2.6). Confirmándose que el primer régimen entre 5-25 días es debido a la actividad de vientos (por lo tanto más marcado en la estación de invierno austral). El segundo régimen (30-90 días) está asociado a dos mecanismos: 1) Onda Kelvin intra-estacional (con un actividad más marcada en verano y otoño austral) y vientos (siendo débil la influencia de vientos en este rango de frecuencia). En la sub-superficie (relacionado con la termoclina). 2) El otro régimen está asociado de manera predominante a la onda Kelvin.

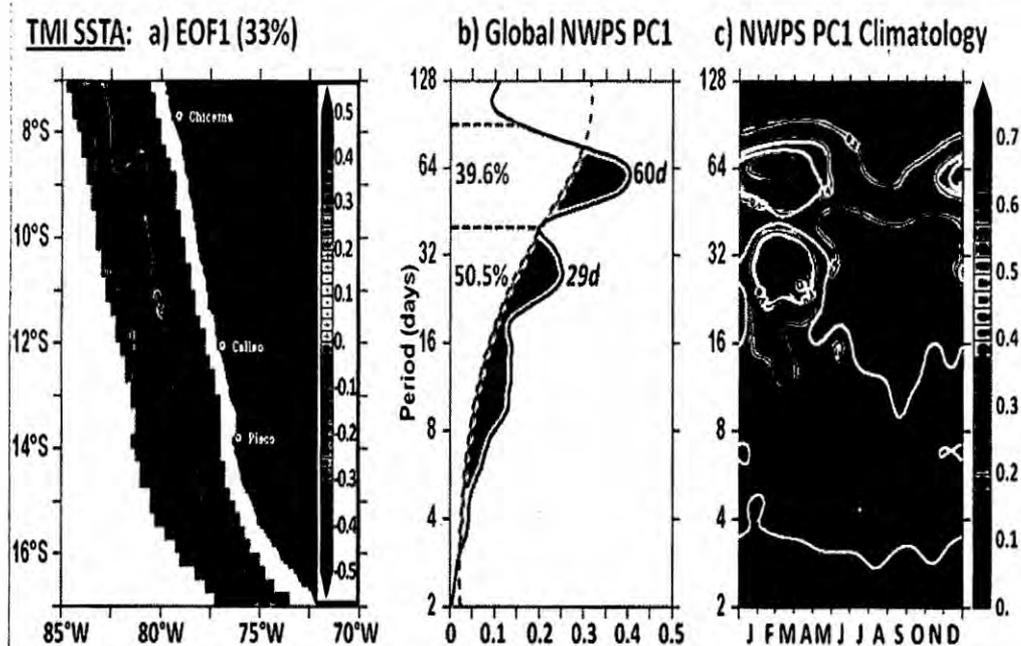


Figura 2.6: Modos dominantes del análisis de las funciones empíricas ortogonales (FEO) de observaciones satelitales diarias de TMI-OI y de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) a escala sub-estacional capturando el 33 de la varianza. a) Patrones espaciales (color en °C); b) Espectro de potencia wavelet global normalizado (EPWN) de la primera componente principal de TSM adimensional (período en días). La línea punteada indica el 95 del nivel de confianza; c) 8 años de climatología del EPWN estimado dentro del período de Junio 2000 a Mayo 2008. La línea de color blanco muestra el intervalo de confianza.

2. Herramientas matemáticas

El estudio se centra en la documentación de la zona que representa al gradiente de oxígeno (oxiclina) y a la zona con muy bajas concentraciones de oxígeno (núcleo) analizando las frecuencias dominantes durante todo el período del año (como datos complementarios se documenta la temperatura, salinidad, presión, vientos y altimetría para luego compararla con oxígeno encontrando así una relación entre estos).

La descripción más detallada de las variaciones del oxígeno dentro de la oxiclina y el núcleo es vista mediante las funciones empíricas ortogonales (FEO). Donde

la normalización de los datos permite enfatizar regiones donde la amplitud de las fluctuaciones son bajas, como es el caso del núcleo de la ZMO. La normalización consiste en dividir las series por su variabilidad en el punto considerado. El análisis de las FEO normalizadas del oxígeno enfatizan las profundidades donde las concentraciones de oxígeno son muy bajas representando al núcleo de la ZMO (representado por la profundidad de 145 metros) mientras que las FEOs no normalizadas enfatizan profundidades donde las concentraciones de oxígeno son muy altas correspondiendo a la oxiclina de la ZMO (representado por la profundidad de 30 metros).

Para la elección de la herramienta matemática más adecuada que describa la variabilidad del oxígeno es necesario tener en cuenta si las series son estacionarias (con periodicidad definida) o no estacionarias (no periódicas). Las series de tiempo estacionarias son fácilmente descritas mediante análisis del espectro de Fourier, mientras que las no estacionarias necesitan una herramientas más sofisticada como es el caso del análisis wavelet. Las funciones de densidad de probabilidad (FDP) brindan un criterio basado en comparación de histogramas con la función gaussiana. Este método empírico define: si el histograma muestra tendencia a la curva gaussiana, la serie es estacionaria, en caso contrario no. Al no mostrar ser tener tendencia a la forma gaussiana de las series temporales analizadas, se sugiere el uso de análisis wavelet para la descripción de las series temporales no estacionarias.

Finalmente se documentará el análisis completo en alta y baja frecuencia (períodos menores a un día y mayores de un día respectivamente) usando como método central la transformada wavelet (espectro de potencia wavelet normalizado – EPWN) que es adecuado para encontrar las frecuencias dominantes junto al intervalo de tiempo (meses de año) en las series temporales no estacionarias del oxígeno, adicionalmente la escala promedio de potencia wavelet (EPPW) es usada en las discusiones mostrando las fluctuaciones dentro de una banda específica encontrando los intervalos de tiempo donde dos parámetros tienen buena correlación y el análisis de las propiedades de las masas de agua

(diagramas T-S) que nos brindan las características de las masas de aguas presentes en un determinado período del año.

2.1. Funciones empíricas ortogonales (FEO)

Las funciones empíricas ortogonales son usadas frecuentemente para brindar una descripción compacta de la variabilidad espacial y temporal de las series de tiempo en términos de funciones ortogonales o llamados también modos estadísticos ([1]). Generalmente, la mayor cantidad de varianza de la distribución de las series de tiempo se encuentran en los primeros modos estadísticos. Pudiendo tener una conexión con mecanismos dinámicos, sin embargo no necesariamente puede representar algún proceso físico.

Existen dos métodos para calcular las funciones empíricas ortogonales. En este trabajo se usó el método de la descomposición de valores singulares (DVS), ya que es más rápido y estable computacionalmente.

Para encontrar las funciones empíricas ortogonales, se comienza encontrando las anomalías de la matriz X de rango $m \times n$ (anomalías de la matriz X : A con el mismo rango, donde m representa la parte espacial y n la parte temporal):

$$A_{m,n} = \frac{X_{m,n} - \bar{X}_{m,n}}{\sigma_m} \quad (2.1)$$

Donde:

$\bar{X}_{m,n}$ – representa las anomalías (valor promedio) de la matriz X .

σ_m – representa la desviación estandar con respecto a la parte espacial.

La matriz A puede ser expresada por la multiplicación de otras 3 matrices, de la siguiente forma:

$$A = U * \Gamma * V^+ \quad (2.2)$$

Donde:

La matriz rectangular Γ de orden $m \times n$ con elementos fuera de la diagonal iguales a cero y en la diagonal diferentes o iguales a cero (llamados *valores*

singulares colocados en orden decreciente de magnitud) contiene a los valores proporcionales a los eigenvalores.

La matriz U cuadrada de rango m contiene a los vectores columna ortogonales que representan a los eigenvectores (vectores propios). Ellos son los patrones de las funciones empíricas ortogonales asociados con cada valor singular.

La matriz V^+ cuadrada de rango n contienen a los vectores fila ortogonales, proporcionales a las componentes principales de la matriz A , de la siguiente forma:

$$A = \Gamma * V^+$$

El rango de la matrix A es k n conteniendo a los datos de las primeras componentes principales de la matrix X (siendo k el máximo valor: $k \leq \min(m, n)$).

Para una descripción más detallada de los dos métodos para encontrar las funciones empíricas ortogonales, se recomienda revisar el texto de [1].

2.2. Función de Densidad de Probabilidad (FDP)

La FDP de una variable es la medida de la probabilidad de una variable a tener un determinado valor. La FPD es básicamente un histograma, es decir los recuentos del número de ocurrencias de un valor en un rango determinado. La FDP puede tener muchas formas diferentes dependiendo de la variable y del procesos físico analizado.

$$f dp = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2} \quad (2.3)$$

Donde:

x – Representa la serie de tiempo.

\bar{x} – Representa el valor medio de la variable x .

σ – Representa a la desviación estándar de la variable x .

Esta FDP Gaussiana nos describirá si la serie de tiempo es estacionaria o no estacionaria ([3]) con lo cual se justifica el uso del análisis wavelet (usado principalmente para series de tiempo no estacionarias).

2.3. Análisis Wavelet

El análisis wavelet es usado frecuentemente para la descripción de series temporales geofísicas (ej.: Convección tropical [43]; El Niño Oscilación Sur, [14]; etc.). Esta herramienta permite la descripción de mecanismos presentes en las series de tiempo localizando las variaciones en el tiempo y frecuencia ([41]) y es una versión mejorada de la transformada de Gamor ([11]).

Para hallar los mecanismos presentes en una serie de tiempo, se parte de la premisa que existe una serie temporal (representada por $x(i)$) a la cual le aplicamos una transformación. En el caso de la transformada wavelet, se obtiene una nueva función que depende de la escala (representado por λ , menor unidad de la herramienta física; [45]) y del tiempo (representado por t). La transformada continua wavelet es definida como la convolución de la serie de tiempo x con la función ψ (denominada wavelet generadora o madre):

$$W_{(\lambda,t)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)\psi_{\lambda,t}(u)du \quad (2.4)$$

También puede ser expresado de la siguiente forma:

$$W_{(\lambda,t)} = \int_{-\infty}^{\infty} x(u) \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \psi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right) du \quad (2.5)$$

Donde:

u – es la variable de integración.

t – es la variable de traslación (tiempo).

λ – es la variable de escala (mayor que cero).

ψ – son las funciones de onda, llamadas wavelets generadoras.

Las wavelets generadoras, para ser calificados como tal, deben de cumplir ciertas condiciones:

1. La amplitud $|\psi(t)|$ debe de caer rápidamente a cero, en el límite cuando $|t|$ tiende al infinito.
2. la media de $\psi(t)$ debe de ser cero, conocido como *condición de admisibilidad*.
3. Los wavelet son frecuentemente funciones regulares.

Ahora la elección del tipo de wavelet generador va a depender del tipo de análisis que se quiera hacer. Por ejemplo: wavelet real o complejo, wavelet discreto o continuo. Una de las más populares wavelet generadoras (usadas en oceanografía física) es *Morlet wavelet* (la cual se usó en este trabajo), que está muy bien localizado en escala y por lo tanto en frecuencia, se puede esperar una buena resolución en la frecuencia. La forma que presenta este tipo de wavelet es la siguiente ([6]):

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{iw_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2.6)$$

Donde:

w_0 – Es un término adimensional que tiene el valor de 6, cumpliendo la *condición de admisibilidad* descrita en [10].

En el caso de la transformada discreta wavelet ($W_n(\lambda)$), la forma de la transformada wavelet de la serie de tiempo X_n con N valores, es de la siguiente forma (siguiendo el procedimiento de [41]):

$$W_n(\lambda) = \sum_{i=0}^{N-1} X_i \psi^* \left[\frac{(i-n)\delta t}{\lambda} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

X_i – representa a la serie de tiempo discreta.

n – es el índice del tiempo.

N – representa la cantidad de valores en la serie de tiempo.

λ – representa la variable de escala.

δt – representa el intervalo del paso del tiempo.

A continuación se describe todas las herramientas matemáticas basadas en la transformada wavelet para la descripción de los mecanismos presentes en las series de tiempo discretas.

2.3.1. Espectro de potencia wavelet

Los espectros de potencia wavelet muestran zonas donde están localizadas tanto en el tiempo como en amplitud (representado por el período dominante), diferentes mecanismos dominantes en términos de energía wavelet. Las altas energías (la energía aquí es referida a la varianza; [41]) son representadas por zonas de color rojo, mientras que la baja energía por el color azul. Las zonas de color blanco son zonas sin energía. Los *espectros locales de potencia wavelet* son calculados de la siguiente manera:

$$S_n(\lambda) = |W_n(\lambda)|^2 \quad (2.8)$$

Donde:

W_n – Es la transformada wavelet de la serie de tiempo discreta X_i .

S_n – Es el espectro local de potencia wavelet.

2.3.2. Cono de influencia (COI)

Es la región del espectro wavelet en la que los efectos de borde se vuelven importantes (representada por una parábola) y se define aquí como el tiempo de plegamiento para la autocorrelación de la potencia wavelet en cada escala ([41]).

2.3.3. Nivel de significancia

Si un pico en el espectro de potencia wavelet está significativamente por encima del espectro de fondo ([41]), entonces puede suponerse que es una característica verdadera con un cierto porcentaje de confianza. Se representa por las líneas cerradas dentro del espectro de potencia wavelet.

2.3.4. Wavelet global

El análogo al espectro de Fourier para una señal, el wavelet global ($\bar{S}^2(\lambda)$) nos permite detectar los modos dominantes de determinados mecanismos en una serie de tiempo. Se define como el promedio de la varianza contenido en todo los coeficientes wavelet de la misma frecuencia de la serie de tiempo X , es decir:

$$\bar{S}^2(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |W_i(\lambda)|^2 \quad (2.9)$$

Los mecanismos dominantes son representados por los máximos relativos superiores al nivel de significancia (líneas punteadas).

2.3.5. Escala promedio de potencia wavelet (EPPW)

Usado para examinar la influencia (modulación) de un parámetro sobre otro en una determinada escala de tiempo o de diferentes escalas temporales sobre un mismo parámetro. Para una escala entre λ_1 y λ_2 se define la escala de potencia wavelet promediada:

$$\bar{W}_n^2 = \frac{\delta j \delta t}{C_\delta} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|W_n(\lambda_j)|^2}{\lambda_j} \quad (2.10)$$

Donde:

δj – representa al factor de escala promedio (para el wavelet Morlet es 0.6).

C_δ – representa al factor de reconstrucción (para el wavelet Morlet es 0.776).

2.3.6. Espectro de potencias wavelet normalizado (EPWN)

Para comparar el espectro de potencias wavelet a diferentes frecuencias se usa el EPWN ([41]). Para una serie de tiempo con N datos e igualmente espaciada δt estimando la transformada wavelet $W_n(\lambda_j)$ con escala λ_j , resolución δj y largo de escala J . La conservación de la energía de la varianza de una serie

de tiempo, verifica:

$$\sigma^2 = \frac{\delta j \delta t}{C_\delta N} \sum_{n=1}^N \sum_{j=0}^J \frac{|W_n(\lambda_j)|^2}{\lambda_j} \quad (2.11)$$

Por último se define el espectro de potencias wavelet normalizado global como:

$$EPWN = \frac{\delta t}{C_\delta \lambda_j} |W_n(\lambda_j)|^2 \quad (2.12)$$

Compuesta de las contribuciones locales a la varianza total de la energía de la serie temporal siendo independiente de la resolución de la escala δj .

2.4. Diagramas T-S

Las principales características para la identificación de las masas de agua presentes en una determinada zona oceánica son la temperatura y salinidad. Los diagramas T-S son las representaciones gráficas usando la temperatura y la salinidad en la que cada par de valores corresponden a un punto en una profundidad y tiempo.

La curva T-S está determinada por los diversos puntos que se alinean aproximadamente según una recta que define la masa de agua. El diagrama se completa trazando las isolíneas de densidad que ayudan a determinar la estabilidad de las masas de agua a manera de referencia. El diagrama T-S suele mostrar curvas formadas por trazos aproximadamente rectos, unidos por trazos que no lo son, indicando así la presencia de diferentes masas de agua.

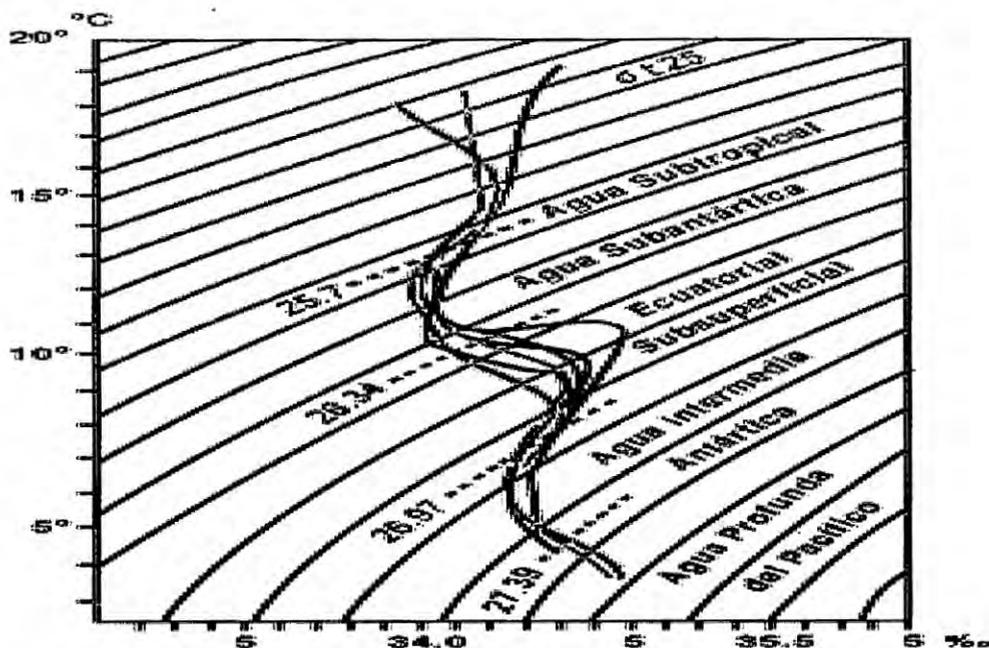


Figura 2.7: Diagrama T-S para los datos de las operaciones oceanográficas Mar-Chile. (tomado como ejemplo aplicativo). El eje Y representa a la temperatura potencial (en °C) y el eje X en porcentaje por millón.

3. Definiciones de términos básicos

AMOP: Es un proyecto internacional (en particular, Francia, Perú y Alemania) trans-disciplinario de crucero, amarre y modelado, asociada a un esfuerzo de desarrollo experimental (instrumentación, sensores), que apunta a una mejor comprensión de las Zonas de Mínimo de Oxígeno (ZMO) y la desoxigenación del océano.

Análisis Wavelet (ondículas): Un wavelet es una oscilación en forma de onda con una amplitud que comienza en cero, aumenta y luego disminuye de nuevo a cero.

Escalas de variabilidad: Es una forma de estimación de la variabilidad, documentando períodos característicos.

Evento de hundimiento: Hundimiento (downwelling en inglés) es el proceso de hundimiento de agua bajo un forzamiento físico de viento específico. Lo contrario de surgencia (upwelling en inglés). Un evento de hundimiento (surgencia) esta asociado a la temperatura superficial del mar cálida (fría) por procesos de advección vertical (transporte vertical).

Evento de afloramiento: La surgencia es un fenómeno oceanográfico físico impulsado por el viento intensos (paralelo a la costa cuando se habla de surgencia costera). La surgencia involucra el movimiento impulsado por el viento de aguas densas, más frías y por lo general ricas en nutrientes hacia la superficie del océano, en sustitución de las aguas superficiales más cálidas por lo general libres de nutrientes. El agua de surgencia rica en nutrientes estimula el crecimiento y la reproducción de los productores primarios como el fitoplancton lo que hace que el fenómeno se vuelva a llamar afloramiento (consecuencia biológica de la surgencia). Debido a las condiciones atmosféricas, a la presencia de agua fría y a la biomasa de fitoplancton en estas regiones, zonas de afloramiento pueden ser identificados por: i) la dirección e intensidad de los vientos (forzamiento físico); ii) la temperatura superficial del mar fresco (TSM); iii) la huella del cambio de las características físicas de las masas de agua en superficie) y iv) las altas concentraciones de clorofila (impacto biológico). Teniendo en cuenta que aquellos tres parámetros se pueden detectar, por ejemplo, por satélite.

Forzamientos físicos: Son procesos físicos presentes que impactan la circulación y las configuraciones de las masas de agua por advección y/o difusión tales como: mareas, ondas internas, ondas Kelvin, ondas Rossby, vientos (de surgencia y hundimiento u otros), remolinos, corrientes y sub-corrientes.

Marea: Las mareas son el auge y caída de los niveles del mar causados por los efectos combinados de las fuerzas gravitacionales ejercidas por la Luna, el Sol y la rotación de la Tierra. Presentan 105 modos (de horas a ciclo anual)

considerados en los estudios de mareas, en los cuales el diurno y semi-diurno son los más dominantes. Tenga en cuenta que se habla, por analogía, también de marea atmosférica asociadas a los brisas de tierra y de mar en regiones costeras.

Marea diurna: Tipo de marea con período de un día (aproximadamente 24 horas).

Marea semi-diurna: Tipo de marea con período aproximadamente de 12 horas.

Masas de agua: Volúmenes de agua localizados a diferentes profundidades en un punto geográfico determinado que guardan relación entre ellos mediante la temperatura y salinidad.

Núcleo de la ZMO: Representa a la parte o sub-capa de la ZMO donde las concentraciones de oxígeno son inferiores a $20 \mu\text{mol}/L$. Se encuentra por debajo de la oxiclina.

Ondas internas: Las ondas internas son ondas de gravedad que oscilan dentro de un medio fluido (en lugar de la superficie de un medio fluido). La marea genera ondas internas, pero todas las ondas internas no son de marea, ej.: ondas debido a la interacción de las corrientes con la topografía (como el talud continental).

Ondas de Rossby: Las ondas de Rossby son ondas planetarias que oscilan y se producen en los fluidos geofísicos (océano y atmósfera) y que tienen su origen en el principio de conservación de la vorticidad potencial. La propagación de la fase de las ondas de Rossby puede ser hacia el este (ondas cortas) o el oeste (ondas largas). Las ondas de Rossby se conocen también en geofísica como

ondas planetarias y pueden generar por reflexión de ondas Kelvin ecuatoriales como en el Pacífico oeste que se propagan hacia el este.

Ondas inercio-gravitacionales: Las ondas inercio-gravitacionales se producen cuando un flujo estáticamente estable también es inercialmente estable. Son esencialmente ondas de gravedad que tienen una longitud de onda suficientemente grande para ser afectados por la rotación de la tierra. Para su estudio se necesita incluir los términos de Coriolis en las ecuaciones que gobiernan los fluidos.

Ondas Kelvin: Las ondas Kelvin son ondas planetarias oceánicas o atmosféricas que equilibran la fuerza de Coriolis de la Tierra contra un límite topográfico tal como una onda atrapada a la costa, o una guía de onda como el Ecuador (donde la fuerza de Coriolis se cancela). Las ondas Kelvin ecuatoriales, como en el Pacífico, pueden generar a la costa americana ondas Kelvin costeras o atrapadas a la costa (hacia el Sur frente al Perú), y también ondas Rossby (ecuatorial y extra-ecuatorial) que se van a propagar hacia el oeste.

Ondas mixtas de Rossby-gravedad: Son ondas comunes en los trópicos profundos, generalmente son forzados por tormentas eléctricas por lo que estas ondas son importantes para la predicción del tiempo a corto plazo en los trópicos.

Oxiclina de la ZMO: Capa de discontinuidad de la ZMO al límite superior asociada a un gradiente vertical extremo en concentraciones de oxígeno (con O_2 aproximadamente de $40 \mu\text{mol}/L$) en el cual el O_2 cae bruscamente desde concentraciones cerca de la saturación en superficie hasta concentraciones al límite de detección en sub-superficie (con $O_2 < 1 \text{ ml}/L$ o aproximadamente $0.1 \mu\text{mol}/L$).

Remolinos: Es un cuerpo de agua producida por el encuentro de corrientes con direcciones y/o intensidades distintas opuestas induciendo un movimiento giratorio.

Valor atípico (Outliers): Es una observación que es numéricamente distante del resto de los datos.

Variabilidad: En este estudio, es como cambian las concentraciones y distribuciones del O_2 y los diversos parámetros físicos (temperatura, salinidad) asociado a la ZMO de la zona de estudio, en relación a los procesos oceanográficos y atmosféricos, en particular físicos.

Capítulo III

VARIABLES E HIPÓTESIS

1. Variables de la investigación

Dependientes: Escalas de variabilidad intra-anual

Independientes: Forzamiento físico en la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) frente a Perú.

2. Operacionalización de variables

La tabla 3.1 resume las variables de investigación.

Variable	Dimensión	Indicador	Escala
Forzamiento físico (independiente)	cantidad de O_2 disuelto	concentración de O_2 en la oxiclina y núcleo	$\mu mol/L$
Escalas de variabilidad (dependiente)	tiempo	variación del tiempo	horas y días

Tabla 3.1: Operacionalización de variables

3. Hipótesis

Los forzamientos físicos producen en las Zonas de Mínimo Oxígeno (ZMO) frente al Perú, variabilidades a escalas intra-anales.

Capítulo IV

METODOLOGÍA

1. Tipo de investigación

La variabilidad a escala intra-anual de la ZMO hasta el momento no ha sido documentado en el Perú. Por tanto, este trabajo brinda nuevos conocimientos dentro de esta escala temporal. A su vez, esta investigación es de tipo cuasi-experimental ya que los análisis realizados (análisis Wavelet) brindan información desconocida de los períodos, duración e intervalos de meses del año cuando se presentó determinado forzante físico, el cual se relaciona a un determinado mecanismo (mecanismo físico o biogeoquímico). Por último, es aplicada ya que este trabajo abre un campo de investigación novedoso con respecto a la ZMO a cortas escalas de tiempo con aplicaciones para la oceanografía física, oceanografía química, oceanografía biológica, paleo-oceanografía pesquería y microbiología marina y climatología.

2. Diseño de la investigación

Para llegar a la descripción completa de las escalas intra-anales de la ZMO del Perú, el diseño del presente trabajo cuenta con 3 etapas. A continuación se detalla cada una de ellas:

1. Procesamiento preliminar y calidad de las series de tiempo:

La primera etapa comenzó eliminando datos erróneos de los datos en bruto de la presión, temperatura, salinidad y oxígeno de los 5 sensores localizados en el anclaje AMOP. Son considerados erróneos los primeros datos cuando se colocaron los sensores (5 de enero 2013), cuando se visitó y volvió a colocar (25-26 de junio 2013) y cuando se retiraron los sensores del anclaje (21 de febrero 2014). No obstante, al nuevamente colocar los sensores estos sufren un cambio en la profundidad lo cual antes de seguir con el siguiente paso, se debió realizar el ajuste necesario (dividiendo los datos en dos grupos: antes y después de la visita al anclaje, para encontrar la media aritmética de ambos tramos, haciendo la diferencia de la segunda a la primera y restándole a los datos originales).

El segundo paso fue eliminar los datos atípicos de las series de tiempo. La presión mostró carácter periódico, por lo cual se usó el método de Grubbs ([13]). Por el contrario los datos de temperatura, salinidad y oxígeno mostraron características no estacionarias, para lo cual la eliminación se hizo empíricamente (se procedió a eliminar datos que mostraban visualmente ser diferentes a los datos más cercanos. Ej.: datos atípicos por ruido o por fallos electrónicos en la medida de los sensores).

Como tercer paso, los datos eliminados se llenaron mediante interpolación lineal para luego ser promediados a 1 hora y 1 día. Así se elimina parte del ruido aún presente en los datos y se elimina parte de la variabilidad intra-diaria, en el caso de la variabilidad intra-mensual e intra-estacional. Para la descripción de la variabilidad intra-diaria se usó datos promediados a 1 hora y para la variabilidad intra-mensual e intra-estacional datos promediados a 1 día.

Para las series temporales diarias de vientos locales (cercaños al anclaje), no es necesario el uso de un promedio, ni eliminación de datos erróneos ya que los datos fueron previamente filtrados.

Por último, los resultados obtenidos para el oxígeno se comparan con

los datos climatológicos de CARS2009 cercanos al anclaje (12,00° Sur, 77,50° Oeste). La comparación solamente permitió hacer una comparación general anual de los datos sin poder especificar la variabilidad intra-diaria o intra-mensual (e incluso la intra-estacional adecuadamente).

2. Uso de herramientas matemáticas para la caracterización temporal de la ZMO:

Se comenzó encontrando la primera componente principal del oxígeno normalizando los datos (para la descripción del núcleo) y sin normalizar (para la descripción de la oxiclina), mostrando similitudes a la profundidad de 30 metros (oxiclina) y a la de 145 metros (núcleo).

Como segundo paso, se usó las funciones de densidad de probabilidad (FDP) para brindar un argumento matemático sólido para el uso del análisis wavelet. Finalmente, se usó el análisis del espectro wavelet para documentar las frecuencias dominantes (períodos) y los intervalos de tiempo donde se presentaron estas frecuencias dividiendo el análisis en tres bandas principales.

3. Interpretación de resultados:

Se brindó una descripción completa de los eventos de oxigenación en toda la columna de agua (usando las 5 profundidades) comparando los intervalos comunes, diferentes, el intervalo de tiempo, etc. Para tal motivo se utilizó como criterio, la comparación entre las zonas donde se encuentra energía superior al nivel de significancia de los EPWN y las series de tiempo del oxígeno para las 5 profundidades (véase figura D.14, D.15, D.16, D.17, D.18 de Anexos). Luego se procedió a documentar los tipos de masas de agua presentes durante el año así como los posibles mecanismos que intervienen en su variabilidad (principalmente eventos de La Niña Costera y ondas Kelvin). Finalmente, se identificó a los posibles mecanismos físicos que intervienen en las variaciones del oxígeno tanto

en la oxiclina como en el núcleo usando la escala promedio de potencias wavelet (EPPW).

3. Población y muestra

Población: Compuesto por los datos de oxígeno obtenidos a 5 profundidades: 30, 50, 75, 145 y 160 metros desde el 5 de enero del 2013 hasta el 21 de febrero del 2014.

Muestra: Compuesto por los datos de oxígeno tomados a la profundidad de 30 metros y 145 metros (representando a la oxiclina y el núcleo respectivamente, véase figura 4.2).

Adicionalmente, se usan datos de presión, temperatura, salinidad tomados en el proyecto AMOP (véase figura 4.3), vientos del satélite ASCAT de enero 2013 a marzo 2014 con intervalo de 1 día entre cada muestra (véase figura 4.4), altura dinámica tomado de TOPEX/POSEIDON y profundización de la termoclina $20^{\circ}C$ del proyecto de boyas TAO/TRITON (véase figura 4.5). Estos datos adicionales se usaron para determinar la influencia de mecanismos físicos en la variación del oxígeno (vientos u ondas ecuatoriales).

4. Datos

4.1. Proyecto AMOP

El proyecto AMOP se centró en un zona biológica muy variable e intensa en el Pacífico Oriental Tropical. Esta zona representativa es una de las más grandes ZMO cubriendo el 68 % de las áreas de ZMO de todo el mundo ([30]). Los objetivos del proyecto propusieron una estimación integral de la media

de O_2 dentro de la ZMO frente a Perú, teniendo en cuenta las contribuciones físicas y biogeoquímicas del O_2 tanto local como remoto y su variabilidad espacio-temporal. En particular, para esta estimación se tendrá en cuenta la circulación oceánica y procesos de difusión, así como consumo y producción de O_2 a través de bacterias, fitoplancton, zooplancton y partículas de degradación. El uso combinado de alta resolución en el modelado y observaciones acopladas permitirán el acceso a la estimación O_2 en una amplia gama de escalas de tiempo, desde la diurna a la estacional.

4.1.1. Medida del oxígeno en el amarre AMOP y cruceros de cercanía

La hipótesis central del proyecto AMOP consistía en que el mayor acoplamiento físico y biogeoquímico toma lugar en dos zonas representativas: la oxiclina y el núcleo. Por tal motivo de las 5 series temporales del oxígeno del amarre AMOP (30, 50, 75, 145 y 160 metros de profundidad, véase figura 4.1) se consideró las series temporales de 30 y 145 metros (véase figura 4.2) como las series que representan a la oxiclina y al núcleo de la ZMO respectivamente (su justificación es por la similitud que muestran las funciones empíricas ortogonales no normalizadas y normalizadas con estas dos profundidades). Por otro lado, en la descripción de las variaciones del oxígeno en la estructura vertical (visto en Discusiones) se considera los resultados de los 5 sensores.

Los 14 perfiles tomados por el crucero l'Atalante próximos al anclaje AMOP (véase tabla 4.1), documentaron la variabilidad diaria del oxígeno en la columna de agua. Estos perfiles fueron tomados del 26 al 28 de enero del 2014 (véase tabla 4.1) desde la superficie (de ≈ 0 metros) hasta 160 metros de profundidad. Dos sensores de oxígeno estuvieron presentes tomando datos de subida y bajada de los sensores. La tesis solamente documenta los datos de subida del sensor 1.

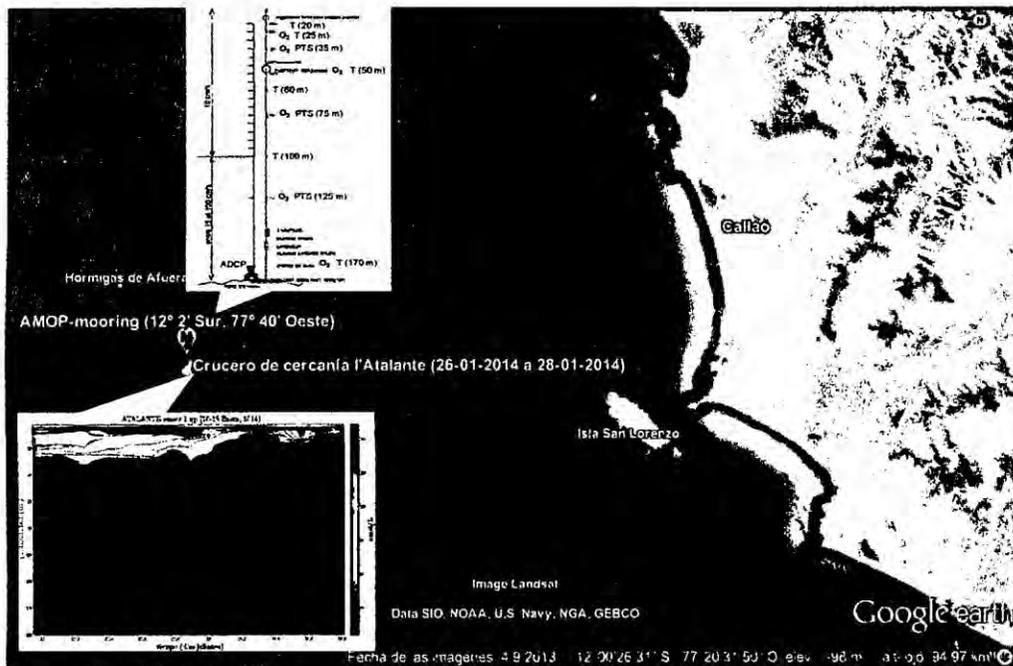


Figura 4.1: Estación fija AMOP mostrando el anclaje con los 5 sensores midiendo presión, temperatura, salinidad y oxígeno desde el 5 de enero del 2013 hasta 21 de febrero del 2014 (figura parte superior). Cruceros de cercanía l'Atalante con 14 estaciones (201 a 214) mostrando las variaciones del perfil de oxígeno durante los dos días que duró los cruceros (figura inferior).

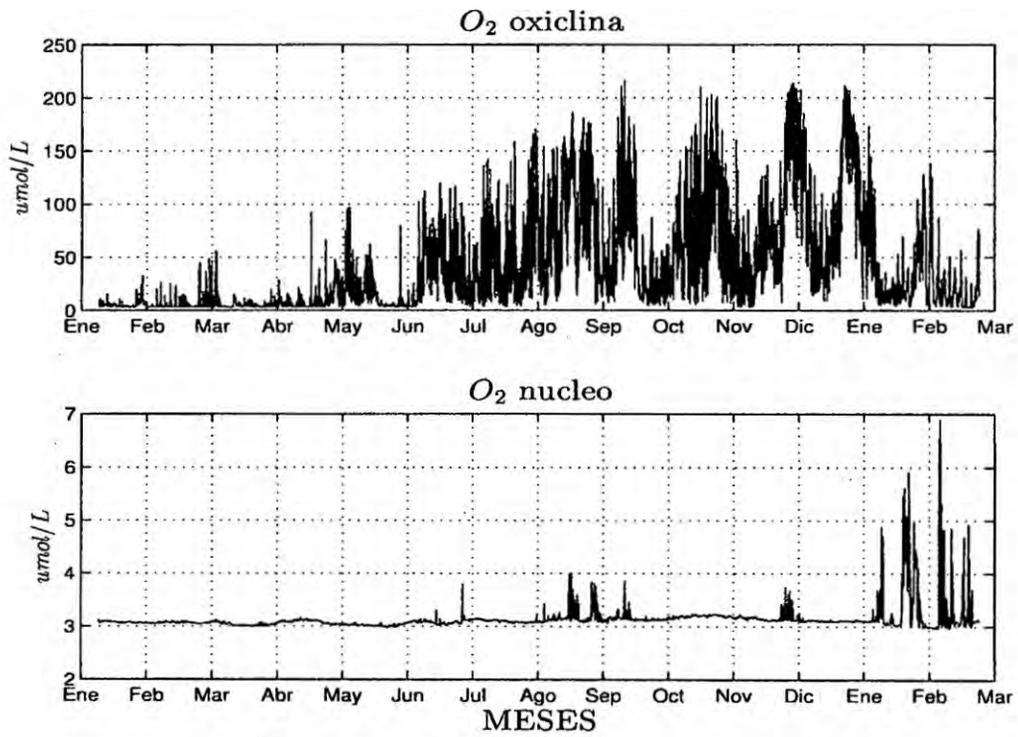


Figura 4.2: Concentraciones de oxígeno en la oxiclina (parte superior) y núcleo (parte inferior) del anclaje AMOP representados por las profundidades de 30 y 145 metros.

Estación	Fecha	Latitud	Longitud
00201	26-01-2014 (22:46:00)	12°02,99' S	77°40,15' O
00202	27-01-2014 (02:22:01)	12°02,86' S	77°40,04' O
00203	27-01-2014 (05:57:51)	12°03,00' S	77°40,15' O
00204	27-01-2014 (09:30:40)	12°03,04' S	77°40,22' O
00205	27-01-2014 (15:32:02)	12°03,01' S	77°40,37' O
00206	27-01-2014 (18:38:56)	12°03,14' S	77°40,17' O
00207	27-01-2014 (21:17:02)	12°02,95' S	77°40,23' O
00208	28-01-2014 (01:17:31)	12°03,02' S	77°40,22' O
00209	28-01-2014 (04:14:25)	12°03,01' S	77°40,12' O
00210	28-01-2014 (07:15:59)	12°03,05' S	77°40,21' O
00211	28-01-2014 (10:06:05)	12°03,01' S	77°40,10' O
00212	28-01-2014 (13:12:50)	12°02,90' S	77°40,16' O
00213	28-01-2014 (15:53:50)	12°03,09' S	77°40,19' O
00214	28-01-2014 (19:26:28)	12°02,99' S	77°40,14' O

Tabla 4.1: Lista de estaciones del crucero de cercanía l'Atalante, mostrando el número de estación, fecha exacta, latitud y longitud de cada perfil mostrado, tomados del 26-28 de enero del 2014. Para el análisis solo se usó el sensor 1 en subida.

4.1.2. Presión, temperatura y salinidad del amarre AMOP

Adicionalmente a los datos de oxígeno del amarre AMOP se usan las series de tiempo de la temperatura, salinidad y presión del mismo anclaje a las cinco profundidades para analizar el rol del forzamiento físico en las variaciones del oxígeno en toda la estructura vertical.

Similarmente a lo visto en el oxígeno, se considera las profundidades de 30 y 145 metros que representan a la oxiclina y núcleo de la ZMO (véase figura 4.3).

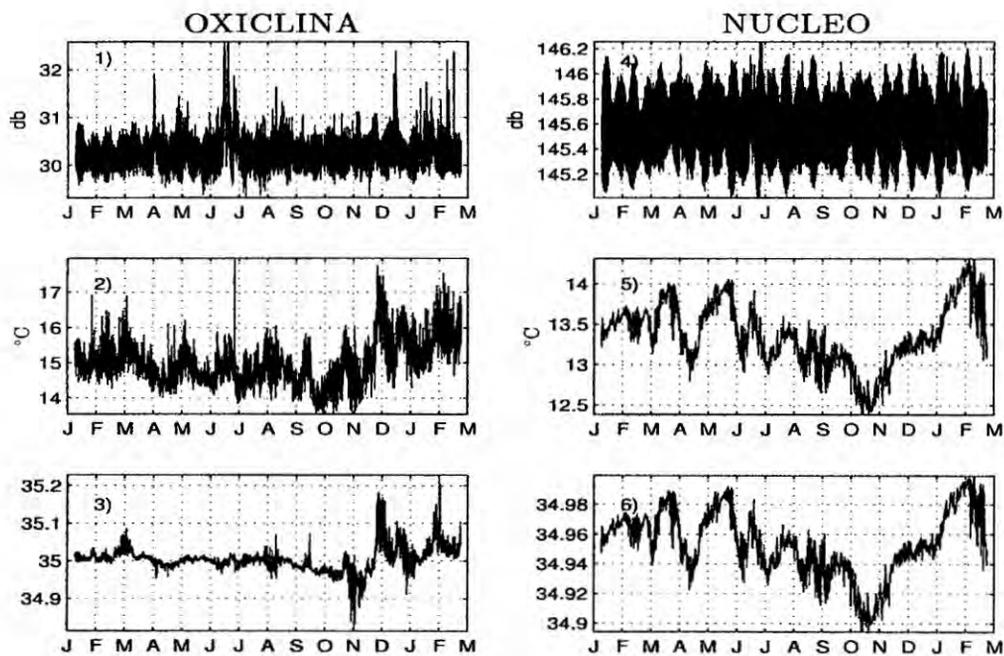


Figura 4.3: Series temporales del anclaje AMOP para la presión (1 y 4), temperatura (2 y 5) y salinidad (3 y 6) de las profundidades que representan a la oxiclina y al núcleo (30 metros y 145 metros de profundidad respectivamente).

4.2. Vientos locales

Datos diarios de vientos meridionales y zonales tomados del satélite ASCAT (<http://manati.star.nesdis.noaa.gov/datasets/ASCATData.php/>) con $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de grilla latitudinal-longitudinal (de 85° a $69,5^\circ$ Oeste y de $21,2^\circ$ Sur a $0,2^\circ$ Norte) fueron usados para extraer una serie temporal lo más próxima al anclaje (a $77,66^\circ$ Oeste y $12,05^\circ$ Sur mediante interpolación lineal). Estos datos se usarán para documentar el acoplamiento aire-océano (véase figura 4.4).

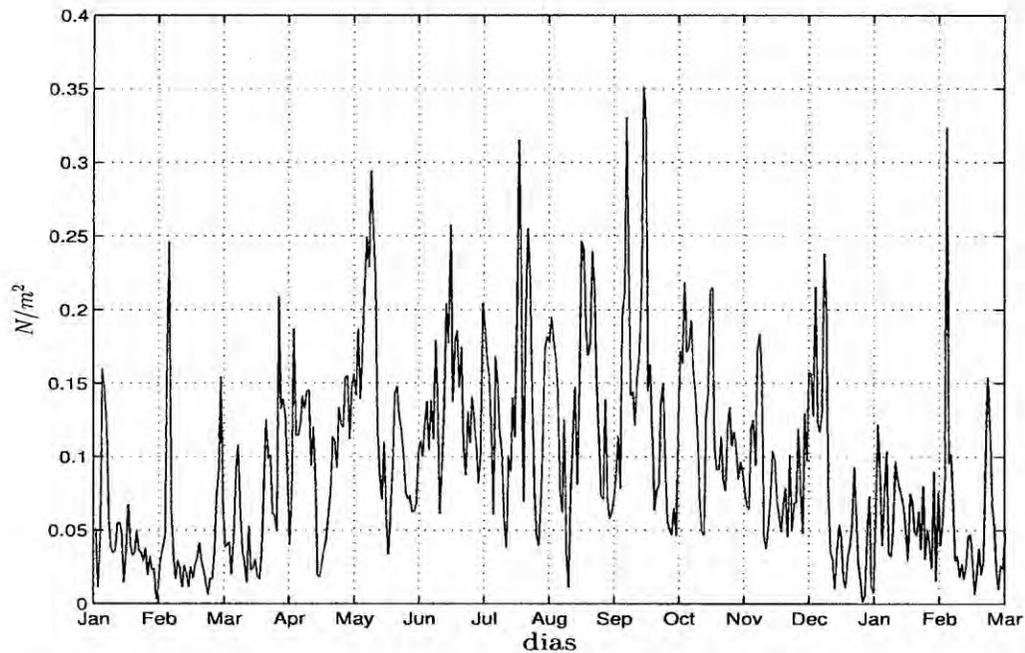


Figura 4.4: Serie de tiempo del esfuerzo de vientos cercanos al anclaje AMOP ($77,66^\circ$ Oeste y $12,05^\circ$ Sur) extraídos del satélite ASCAT.

4.3. Isoterma 20°C y altura dinámica

Datos diarios de la profundización de la isoterma 20°C (para la descripción de la termoclina en el Pacífico Ecuatorial) son extraídos de las boyas del proyecto TAO/TRITON (<http://www.pmel.noaa.gov/tao/jsdisplay/>) más cercanos al anclaje (2° Sur y 95° Oeste).

Similar a los datos de la isoterma, datos diarios de las anomalías de la elevación del mar tomados del satélite TOPEX/POSEIDON cercanos al anclaje (12° Sur y $77,5^\circ$ Oeste) son extraídos de <https://sealevel.jpl.nasa.gov/data/>. Ambos datos se usarán para corroborar la propagación de ondas ecuatoriales (en particular ondas Kelvin, véase figura 4.5).

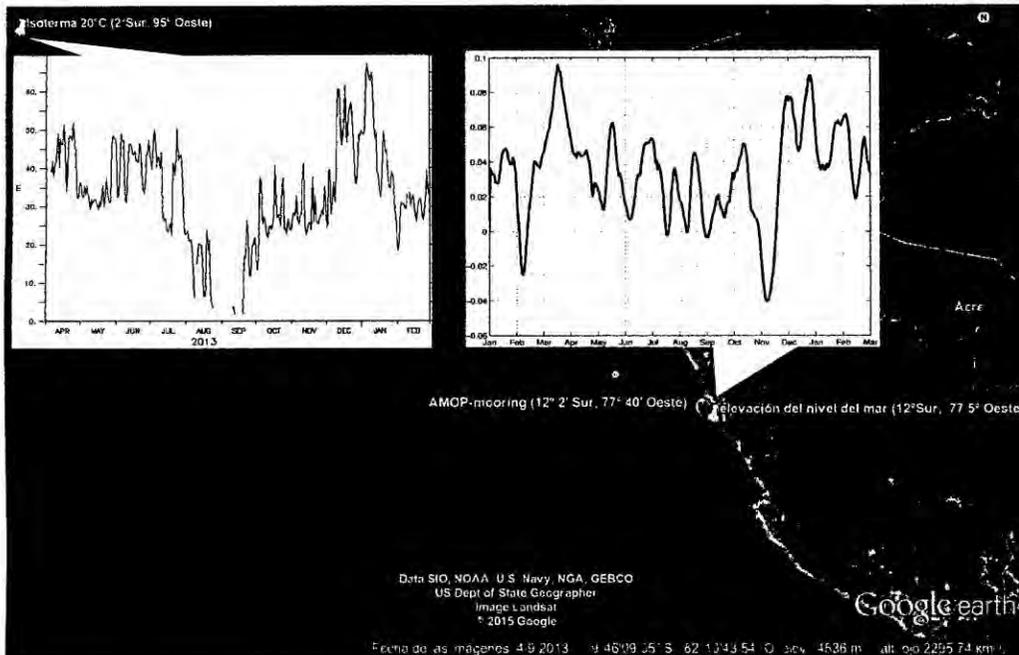


Figura 4.5: Serie de tiempo de la profundización de la isoterma 20°C (izquierda) describiendo las variaciones en altura de la termoclina del Pacífico Ecuatorial y las anomalías de la elevación del mar (derecha) describiendo las anomalías de la superficie del mar. Ambos datos serán usados para la descripción de la propagación de ondas ecuatoriales.

5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realizó en el marco del proyecto internacional y trans-disciplinario AMOP (Actividad de investigación dedicada a la Mínima de Oxígeno del Pacífico Este) que se basa en 4 enfoques en la ZMO frente al Perú:

1. Un anclaje sub-superficial (entre 20 m. y 160 m. cerca del fondo) sembrado el 5 de enero del 2013 para una duración de aproximadamente 14 meses hasta el 21 de febrero del 2014 (incluyendo una visita con recuperación y re-sembrado de la línea del 24 al 26 de junio 2013), en una estación fija en el radial histórico central considerada como la estación de referencia para un monitoreo temporal y vertical con alta resolución de la estructura de

la ZMO.

2. Un crucero orientado hacia el estudio del proceso de aproximadamente 30 días centrado en 8 estaciones fijas de aproximadamente 54 horas repartidas en 3 trayectorias cruzando las orillas (cross-shore en inglés), en un recorrido en forma de caja rectangular con el barco de investigación oceanográfico francés R/V (L'Atalante) asociado a lanzamiento de flotadores-perfiladores Argo. El crucero permite documentar simultáneamente la contribución de oxígeno para cada componente del sistema de la ZMO peruana, así como las diferentes configuraciones costeras y de mar abierto según la latitud.
3. Un enfoque satelital, permitiendo una documentación sinóptica de la región de estudio en superficie ampliando la serie temporal del anclaje y la cobertura espacial del crucero.
4. Una plataforma de modelado acoplado océano-atmósfera y física-biogeoquímica de alta resolución que proporcionó una guía para la estrategia de muestreo durante los experimentos de AMOP pero sobre todo la interpretación de todo el conjunto de datos AMOP.

La tesis se apoyará sobre todo en el punto (1) complementado por los puntos (2), (3) y (4).

Instrumentos de recolección

Anclaje AMOP (in situ, local y vertical):

1. Sistema de 5 sensores 37-SMP (P-T-S) en una interface incluyendo un sensor de O_2 tipo SBE-63 en los cuales se enfoca la tesis.
2. 5 sensores de temperatura SBE-56 (adicionales y/o complementarios).
3. Sensor de fluorescencia WETLabsECO.

4. Perfilador acústico de corriente Quatermaster.
5. 2 trampas de sedimentos PPS3 (muestreando las partículas en la caída), asociadas a inclinómetros que documentan y certifican un rango mínimo de verticalidad de la línea instrumentada sembrada.

Datos complementarios (sinóptico, solamente en superficie): Satélite ASCAT (variabilidad sinóptica en superficie) midiendo el esfuerzo de vientos.

6. Procesamiento estadístico y análisis de datos

El siguiente procedimiento estadístico se llevó a cabo para el trabajo:

1. Para eliminar los datos atípicos de la presión (serie de carácter periódico), se usó el test de Grubbs ([13]) que está basado en la diferencia entre el valor atípico y el promedio de la muestra dividido por la desviación estándar de la muestra. Este resultado debe ser menor que el 5 % del nivel de significancia, lo cual nos indica si el valor es de confianza, mientras que para los datos de temperatura, salinidad y oxígeno, se eliminó solo los datos que visualmente fueron incorrectos, ya que estas series temporales presentan un carácter no estacionario bien marcado.
2. Ajuste en los datos de presión para junio del 2013, cuando se realizó la visita del anclaje (cuando la línea instrumentada se recuperó y re-sembró, la profundidad exacta de cada sensor en la línea se puede re-ajustar a partir del parámetro de presión). Se calculó la media aritmética: la primera media con los datos hasta la fecha de visita del anclaje y la segunda con los datos después de la visita del anclaje. Luego se hizo la diferencia de la segunda media menos la primera lo que corresponden a los datos a tomar de la presión.

3. Aplicación de regresión lineal para el llenado de los datos atípicos que fueron eliminados mediante el test de Grubbs y la eliminación visual en T, S y O_2 .
4. Aplicación de la media aritmética a los datos en todas las profundidades promediando a 1 hora para escalas menores a 1 día y a 1 día para escalas mayores a 1 día.
5. Comparación entre el histograma de frecuencias con la función de densidad de probabilidad (FDP) Gaussiana. Si los resultados visualmente son similares, las series temporales son estacionarias, en caso contrario son no estacionarias y se procede a usar el análisis wavelet para series no estacionarias. Los resultados muestran diferencias muy marcadas entre la FDP Gaussiana y el histograma de frecuencias, por lo tanto las series son no estacionarias y es necesario un análisis específico para series no estacionarias (análisis wavelet).
6. Cálculo de las FEO normalizadas y no normalizadas para caracterizar la profundidad representativa a la oxiclina y el núcleo de los datos de oxígeno para ambas escalas (intra-diaria, mensual e intra-estacional). Posteriormente, se infiere que la FEO normalizado que representa al núcleo es bien descrito por los datos de oxígeno a la profundidad de 145 m. mientras que la FEO no normalizado que caracteriza a la oxiclina es mejor descrito por los datos de oxígeno a la profundidad de 30 m.
7. Cálculo de los períodos dominantes de las series temporales para el oxígeno a la profundidad de 30 y 145 metros (que describen adecuadamente a la oxiclina y al núcleo) usando el EPWN y el EPWN global en las bandas menores a 1 día y mayor a 1 día. En el EPWN se considera valores significativos los que se encuentran dentro del cono de influencia (COI) y dentro del nivel de significancia (revisar nivel de significancia del Marco teórico). El color rojo oscuro representa mayor energía espectral mientras

que los azules intensos representan baja energía espectral. El color blanco representa la energía espectral mínima y no es considerado. Para el EPWN se considera los picos que sobrepasan el nivel de significancia (línea punteada en el EPWN global). Los resultados del EPWN y EPWN global se consideran solo hasta el período de 100 días debido a la corta serie temporal que se tiene (de solamente 1 año) no permitiendo analizar la significatividad para períodos superiores.

8. Criterio para encontrar los eventos de oxigenación dentro de la columna de agua. Se comparan los EPWN de las 5 profundidades (a 30, 50, 75, 145 y 160 metros) para datos promediados a 1 hora con las series de tiempo de cada profundidad. Las energías espectrales superiores al 5% del nivel de significancia representarán eventos de oxigenación.
9. Se calcula la escala promedio de potencia wavelet (EPPW) de la presión, temperatura, salinidad y oxígeno para una determinada banda y se compara el oxígeno con los demás parámetros (para el promedio de 1 día se compara adicionalmente con las series de vientos), esto medirá el nivel de correlación entre el oxígeno y los demás parámetros durante el año.

Capítulo V

RESULTADOS

El siguiente capítulo describe los resultados encontrados en la zona del gradiente de oxígeno también llamado oxiclina (representado por la profundidad de 30 metros) y de la zona con muy bajas concentraciones de oxígeno, llamada núcleo de la ZMO (representado por la profundidad de 145 metros) mediante el uso del análisis espectral wavelet. Esta herramienta se usó para detectar eventos de oxigenación a diferentes escalas de variabilidad temporal (EPWN) originados por diversos mecanismos (entre físicos y biogeoquímicos). Se debe de tener en cuenta dos cosas:

1. Para detectar los períodos dominantes se usó el espectro de potencias wavelet normalizado global (EPWN global). Donde el eje X representa la potencia cuadrada $((\mu\text{mol}/L)^2)$ y el eje Y representa el período dominante. Se considera solamente los picos o también llamados máximos relativos (representado por las líneas azules) que se encuentran fuera del nivel de significancia (representado por las líneas de punteadas azules).
2. Para detectar los intervalos de tiempo donde se encuentra los períodos dominantes, se utiliza el espectro de potencias wavelet normalizado (EPWN) donde las zonas coloreadas representan la energía espectral wavelet. El eje X representa al tiempo tomado en días julianos y el eje Y al período dominante en días. Las energías espectrales wavelet consideradas se en-

cuentran dentro del cono de influencia (véase COI de Marco teórico). Así mismo, los valores que representan a mecanismos dominantes se encuentran dentro de los contornos negros (energías espectrales wavelet consideradas significativas). Los colores rojos intensos representan altas energías espectrales wavelet y los colores azules, representan lo contrario.

1. Variabilidad intra-diaría

1.1. Oxiclina

Los períodos dominantes para esta profundidad son vistos en el espectro de potencias wavelet normalizado global (EPWN global, véase figura 5.1.2). Para la banda intra-diaría representa el 18.6 % de la potencia total del espectro para el oxígeno promediados a 1 hora. Además se encuentran 2 períodos significativos (superiores al 5 % del nivel de significancia) dentro de esta escala: 6.33 y 12 días (véase figura 5.1.2). El período de 12 horas también es encontrado en la temperatura y la presión en la misma profundidad.

Los intervalos de tiempo en los cuales se encuentran estos períodos dominantes son 3: 1) de 150 a 178 días (junio 2013), 2) de 185 a 257 días (julio hasta mediados de septiembre 2013) y 3) de 277 a 368 días (de octubre a diciembre 2013) y las altas energías espectrales wavelet son principalmente encontradas entre el día 251 (septiembre 2013) y del día 284 al día 300 (octubre 2013).

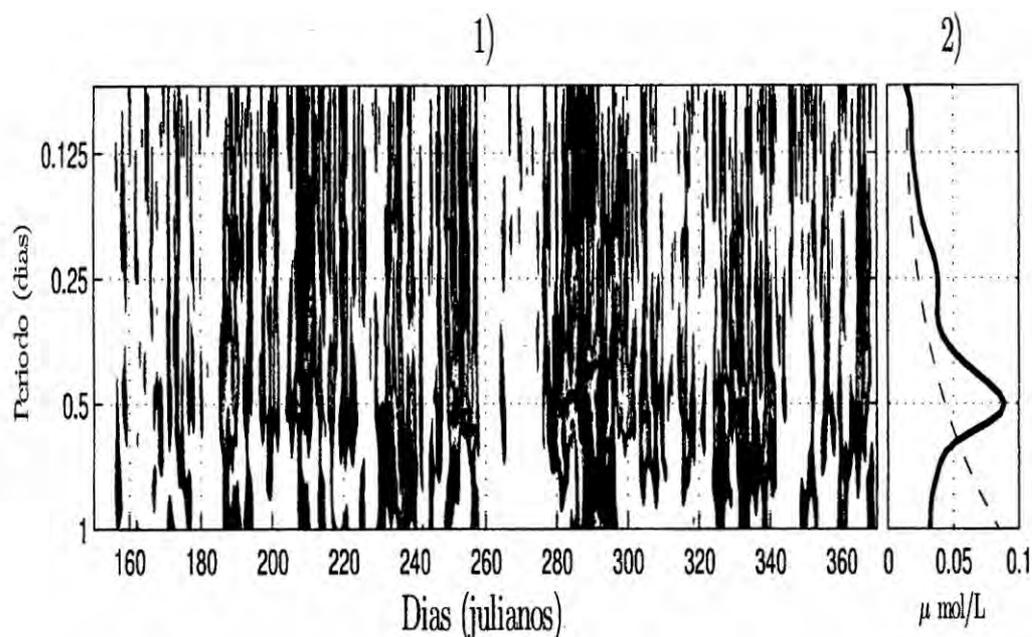


Figura 5.1: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria del oxígeno a la profundidad de 30 metros. 1) EPWN mostrando la distribución de la energía espectral durante 3 intervalos de tiempo: 150-178, 185-257 y 277-368 días. 2) EPWN global (línea azul) mostrando 2 periodos significativos dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos (picos espectrales) son representados por la línea de color azul.

1.2. Núcleo

Los períodos dominantes para esta profundidad son vistos en el espectro de potencias wavelet normalizado global (EPWN global, véase figura 5.2.2). Para la banda intra-diaria representa el 22.1 % de la potencia total del espectro para el oxígeno. Además se encuentra solamente 1 período significativo (superior al 5 % del nivel de significancia) dentro de esta escala con valor de 9.7 horas (véase figura 5.1.2). Este período no es encontrado en otro parámetro ni en otra profundidad para el oxígeno.

Los intervalos de tiempo en los cuales se puede localizar este pico, se encuentran en el espectro de potencias wavelet normalizado (EPWN, véase figura 5.2.1). Este período es localizado en 3 intervalos de tiempo: 1) entre 220 y 260 días (de agosto a septiembre 2013) se localiza 3 pequeñas zonas con energías espectral

wavelet baja: entre 227 (15 de agosto 2013), 238 (26 de agosto 2013) y 252 días (9 de septiembre 2013), 2) 320 y 330 días (quincena a fin de noviembre 2013) se encuentra también energía espectral wavelet baja centrado en el día 327 (23 de noviembre 2013) y 3) de 370 a 417 (enero a fin de la medición) se encuentra alta energía espectral wavelet centrada en 4 pequeñas zonas: entre el día 371 (6 de enero 2014), 381-388 (16 de enero a 23 de enero 2014), 397-404 (primeros días de febrero 2014) y 408-413 (quincena de febrero 2014), la mayor energía espectral wavelet es localizada en el día 398 (primeros días de enero 2014).

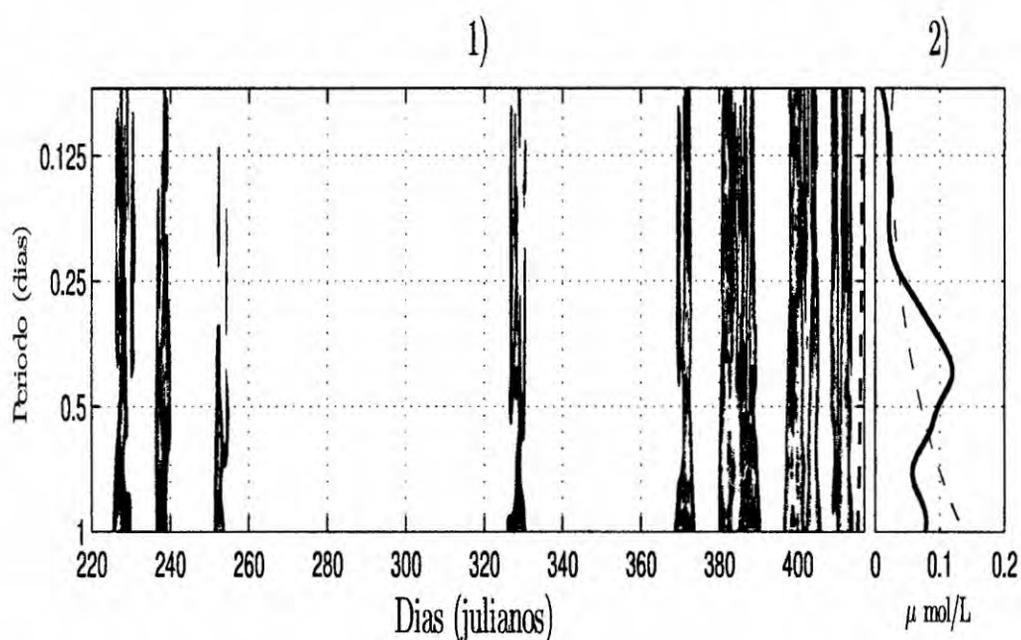


Figura 5.2: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria del oxígeno a la profundidad de 145 metros. 1) EPWN mostrando la distribución de la energía espectral durante 3 intervalos de tiempo: 220-260, 320-330 y 370-417 días. 2) EPWN global (línea azul) mostrando 1 período significativo dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde el máximo significativo (pico espectral) es representado por la línea de color azul.

2. Variabilidad intra-mensual (1-8 días)

2.1. Oxiclina

Los períodos dominantes en esta banda son encontrados en el EPWN global de la figura 5.3.2 y representan el 10.2% de la potencia total del espectro del oxígeno promediado a 1 día. Se pueden encontrar dos picos o máximos relativos de 2.43 días y 4.36 días. Además podemos encontrar estos 2 picos máximos en la serie de tiempo del esfuerzo de vientos para datos cercanos al anclaje, adicionalmente el período de 2.43 días es también visto en la temperatura para la misma profundidad.

La figura 5.3.1 muestra los EPWN. Donde el primer período (2.43 días) se encuentra desde el día 150 hasta el día 400 (junio 2013 a enero 2014) concentrándose mayor energía wavelet entre el día 392 (27 de enero 2014). El segundo período se encuentra entre el día 218 y el día 236 (agosto 2013).

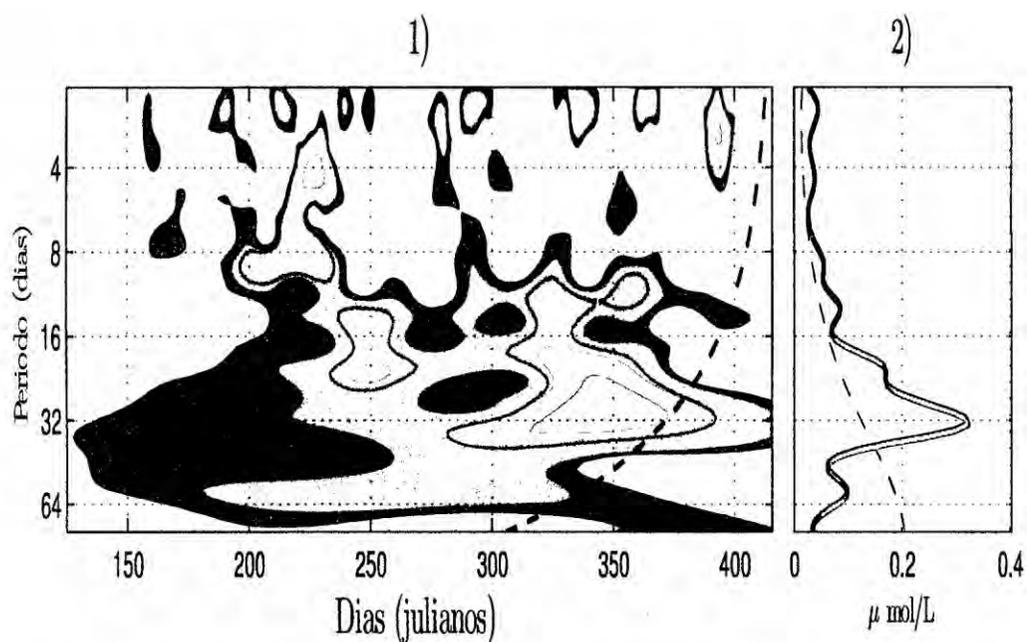


Figura 5.3: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual 1-8 días del oxígeno a la profundidad de 30 metros. 1) EPWN muestra la distribución de la energía espectral wavelet para ambos períodos y 2) EPWN global (línea azul) mostrando 2 períodos significativos dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos (picos espectrales) son representados por la línea de color azul.

2.2. Núcleo

Los períodos dominantes en esta banda son encontrados en el EPWN global de la figura 5.4.2 y representan el 35.31 % de la potencia total del espectro del oxígeno promediado a 1 día. Se pueden encontrar dos picos o máximos relativos de 2.6 días y 5.4 días.

La figura 5.3.1 muestra los EPWN. Donde ambos períodos son encontrados en el mismo intervalo de tiempo desde el día 369 hasta el día 409 (de enero a inicios de febrero 2014). Además la mayor energía espectral es encontrada en los días 382-389 (de la quincena a fin de enero 2014) y 394-401 (primera semana de febrero 2014) para el período de 2.6 días.

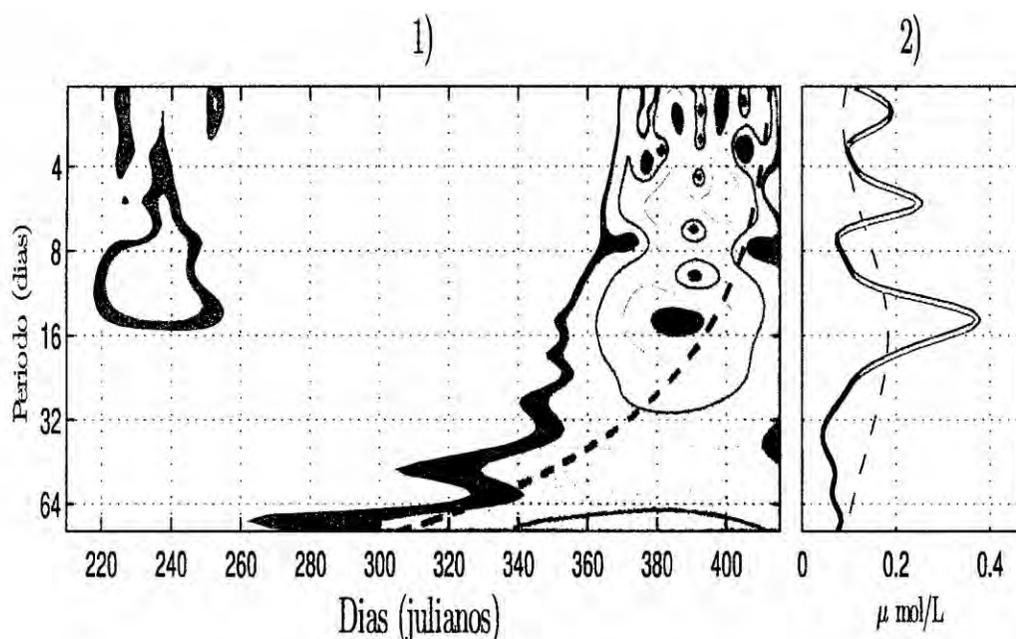


Figura 5.4: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual 1-8 días del oxígeno a la profundidad de 145 metros. 1) EPWN muestra la distribución de la energía espectral wavelet para ambos períodos y 2) EPWN global (línea azul) mostrando 2 períodos significativos dentro de esta escala y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos (picos espectrales) son representados por la línea de color azul.

3. Variabilidad intra-mensual (8-15 días)

3.1. Oxiclina

Los períodos dominantes en esta banda son también encontrados en el EPWN global de la figura 5.4.2 y representan el 8.7% de la potencia total del espectro del oxígeno promediado a 1 día. A diferencia de la banda 1-8 días, se encuentra solamente 1 período dominantes de 12.7 días que también es encontrado en la temperatura para la misma profundidad.

La figura 5.3.1 muestra los EPWN. Donde el período dominante se encuentra en el intervalo de tiempo de 320 a 360 días (de la quincena de noviembre a diciembre 2013) con débil energía espectral wavelet comparada con las demás

escalas.

3.2. Núcleo

Los períodos dominantes en esta banda son también encontrados en el EPWN global de la figura 5.4.2 y representan el 22.6 % de la potencia total del espectro del oxígeno promediado a 1 día. Esta banda solamente presenta 1 período dominante de 14.1 días sin contraparte en otro parámetro.

La figura 5.4.1 muestra los EPWN. Donde parte de la energía espectral dentro del nivel de significancia se encuentra fuera del cono de influencia. Por tal motivo se considera solamente el intervalo de 363-395 días (enero 2014) concentrándose mayor energía espectral del día 378 (13 de enero 2014) hasta el día 392 (27 de enero 2014).

4. Variabilidad intra-estacional (15-90 días)

4.1. Oxiclina

Esta banda representa el 53.5 % de la potencia total del espectro del oxígeno promediado a 1 día. Además, para esta escala solamente se puede detectar 1 período superior al nivel de significancia con valor de 33.1 días. Este período no presenta contraparte en otro parámetro (la temperatura muestra un período muy cercano al del oxígeno en esta escala y a esta profundidad).

La figura 5.3.1 muestra dos intervalos temporales donde se encuentra energía espectral wavelet: de 230 a 270 días (quincena de agosto a septiembre 2013) y de 280 a 370 días (octubre 2013 al 5 de enero 2014; parte de la energía que es superior al nivel de significancia se encuentra fuera del cono de influencia). La mayor energía espectral es encontrada desde el día 320 (16 de noviembre 2013) hasta el día 370 (5 de enero 2014).

4.2. Núcleo

Para esta profundidad, el EPWN global no muestra ningún valor superior al nivel de significancia.

Finalmente, se muestra un cuadro donde se resume todas las escalas de variabilidad encontradas en el oxígeno así como su período representativo y porcentaje en potencia total.

Profundidad re-presentativa	Escala de variabilidad	Período representativo	Porcentaje en potencial total
Oxiclina	Intra-diaria	6.33 y 12 horas	18.6 %
	Intra-mensual (1-8 días)	2.43 y 4.36 días	10.2 %
	Intra-mensual (8-15 días)	12.7 días	8.7 %
	Intra-estacional (15-90 días)	33.1 días	53.5 %
Núcleo	Intra-diaria	9.7 horas	22.1 %
	Intra-mensual (1-8 días)	2.6 y 5.4 días	35.31 %
	Intra-mensual (8-15 días)	14.1 días	22.6 %
	Intra-estacional (15-90 días)	---	---

Tabla 5.1: Resumen de las escalas de variabilidad encontradas en la oxiclina (30 metros de profundidad) y núcleo (145 metros de profundidad) de la ZMO.

Capítulo VI

DISCUSIONES

En este capítulo se describe las diferentes escalas de variabilidad temporal presentes en la estructura vertical de la ZMO asociados a eventos de oxigenación, las masas de agua involucradas conjuntamente con los eventos cálidos/fríos y finalmente los mecanismos físicos responsables de la variabilidad en la ZMO. Los intervalos de tiempo son expresados en días julianos mostrando su equivalencia en días gregorianos.

1. Variabilidad de la estructura vertical de la ZMO y eventos de oxigenación

La figura 6.1 muestra las series de tiempo del oxígeno para el anclaje AMOP tomados durante todo el tiempo de muestreo (5 de enero 2013 hasta 21 de febrero 2014). Adicionalmente, en la figura se presenta rectángulos de color amarillo que representan a los eventos de oxigenación generados por mecanismos físicos. Este nuevo criterio presentado, está basado en la comparación directa entre las energías de los espectros de potencia wavelet normalizados (superiores al nivel de significancia) para cada profundidad y sus respectivas series de tiempo (véase figura D.14, D.15, D.16, D.17, y D.18 de Anexos). Bajo este criterio, en cada profundidad se puede encontrar un valor mínimo que

representa a la contribución física (ej.: ondas internas, forzamiento por vientos, cambios en la estratificación, surgencias, etc.) en las variaciones del oxígeno. Por tal motivo, pequeñas variaciones del oxígeno menores a estos valores son considerados contribuciones debido a mecanismos biogeoquímicos (exceptuando la zona del núcleo, donde la contribución biogeoquímica es nula).

Para la profundidad de 30 metros, se considera las concentraciones mayores a $50 \mu\text{mol/L}$; para 50 metros, mayores a $20 \mu\text{mol/L}$; para 75 metros, mayores a $6 \mu\text{mol/L}$; para 145 metros, mayores a $3.5 \mu\text{mol/L}$ y para 160 metros, mayores a $3 \mu\text{mol/L}$.

Eventos de oxigenación en las profundidades cercanas al gradiente de oxígeno (30, 50 y 75 metros) muestran diferencias en la cantidad de eventos y duración de ellos. A los 30 metros, se encuentran 4 eventos de oxigenación: 1) entre los días 57 y 64 (26 de febrero a 5 de marzo 2013), 2) entre los días 109 y 133 (19 de abril a 1 de mayo 2013), 3) entre los días 154 y 370 (3 de junio 2013 a 5 de enero 2014) y 4) entre 379 y 418 (14 de enero 2014 a 23 de enero 2014). A la profundidad de 50 metros se encuentran 5 eventos de oxigenación: 1) entre los días 178 y 259 (27 de junio a 16 de septiembre 2013), 2) entre los días 276 y 308 (3 de octubre a 4 de noviembre 2013), 3) entre los días 320 y 341 (16 de noviembre a 7 de diciembre 2013), 4) entre los días 352 y 369 (18 de diciembre 2013 al 4 de enero 2014) y 5) entre los días 389 y 398 (24 de enero a 3 de febrero 2014). A los 75 metros, se encuentran 6 eventos de oxigenación: 1) entre los días 116 y 119 (26 de abril a 29 de abril 2013), 2) entre los días 157 y 192 (6 de junio a 11 de julio 2013), 3) entre los días 198 y 262 (17 de julio a 19 de septiembre 2013), 4) entre los días 272 y 286 (29 de septiembre a 13 de octubre 2013), 5) entre los días 316 y 337 (12 de noviembre a 3 de diciembre 2013) y 6) entre los días 385 y 389 (20 de enero a 24 de enero 2014).

Los eventos de oxigenación en la zona con muy bajas concentraciones de oxígeno (núcleo, profundidades de 145 y 160 metros) muestran similitudes con respecto a los eventos de oxigenación, difiriendo solamente en las concentraciones de oxígeno que podemos encontrar entre una y otra capa. En total se pueden

encontrar 8 eventos de oxigenación para la profundidad de 145 metros y 7 para la profundidad de 160 metros. Los eventos comunes son: 1) día 175 a 179 (24 de junio a 28 de junio 2013), 2) días 225 a 230 (13 de agosto a 18 de agosto 2013), 3) día 236 a 241 (24 de agosto a 29 de agosto 2013), 4) día 324 a 333 (20 de noviembre a 29 de noviembre 2013), 5) día 368 a 372 (3 de enero a 7 de enero 2014), 6) día 380 a 389 (15 de enero a 24 de enero 2014) y 7) día 398 a 403 (3 de febrero a 8 de febrero 2014). La profundidad de 145 metros, muestra un evento adicional del día 252 a 258 (9 de septiembre a 15 de septiembre 2013).

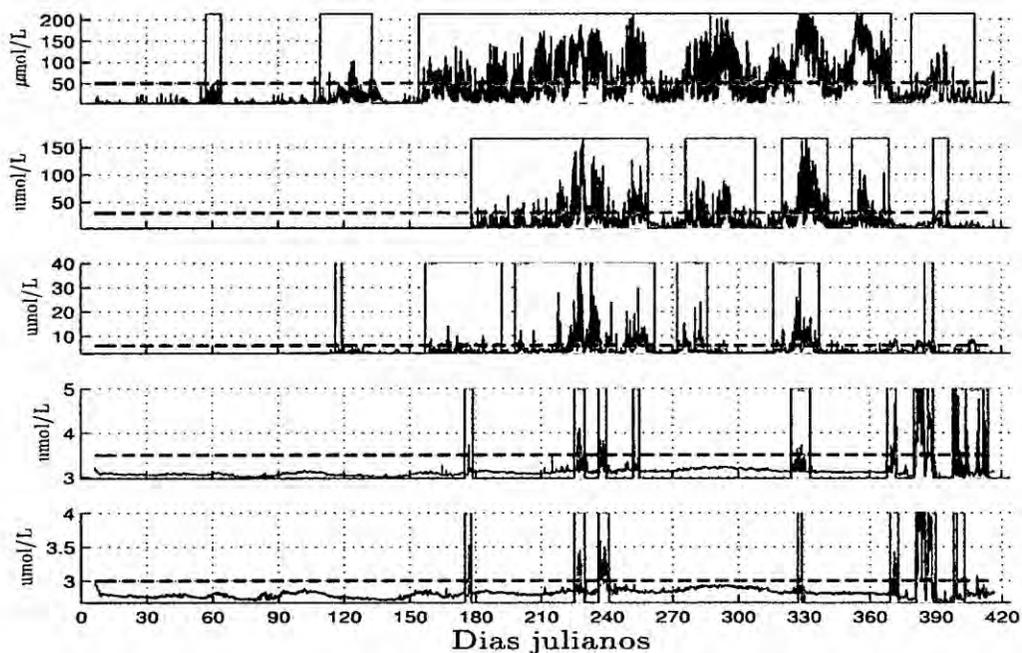


Figura 6.1: Eventos de oxigenación (rectángulos de color amarillo) en las 5 profundidades tomadas del perfil AMOP. Las profundidades son tomadas de la más cercana a superficie (30 metros, superior) hasta las localizadas en el núcleo (160 metros, inferior). Se visualiza gran diferencia entre los eventos de oxigenación cercanos a la oxiclina y cercanos al núcleo tanto en término de duración de eventos como cantidad en concentración de oxígeno.

El análisis de la transformada wavelet para las series de tiempo, muestra la presencia de mecanismos dominantes en el espacio del tiempo-frecuencia (período) para toda la columna de agua. Estas variaciones muestran similitudes

y/o diferencias al comparar una profundidad con la otra. A continuación se describe estas diferencias y similitudes para todas las escalas de variabilidad del oxígeno:

1. La variabilidad a escala intra-diaria analizada para períodos menores a 1 día está presente en todo el espesor de la ZMO y explica la variabilidad del oxígeno encontrada entre 30 y 120 días (febrero y abril 2013) a los 30 metros de profundidad. Las profundidades cercanas a la oxiclina (30, 50 y 75 metros) muestran entre 2 y 3 períodos dominantes a diferencia de las profundidades cercanas al núcleo (145 y 160 metros) que muestran solamente 1 período dominante. La profundidad de 30 metros muestra los períodos de 12 y 6.3 horas, la profundidad de 50 y 75 muestran 2 períodos comunes: 12.7 y 5.7 horas y un período adicional de 2.7 horas en la profundidad de 75 metros. La profundidad de 145 metros muestra el período de 9.7 horas y la profundidad de 160 metros el período de 14.9 horas. Con respecto al porcentaje total de la potencia, se muestra un incremento luego de cierta profundidad un descenso en el porcentaje total. A 30 metros: 18.58 %, a 50 metros: 27.36 %, a 75 metros: 28.36 %, a 145 metros: 22.1 % y a 160 metros: 13.61 %.
2. La variabilidad a escala intra-mensual 1-8 días explica parte de los eventos de oxigenación vistos entre los días 187 y 400 (de julio 2014 a enero 2014) para las profundidades cercanas a la oxiclina (30, 50 y 75 metros de profundidad), mientras que en el núcleo (145 y 160 metros) explica parte de los eventos de oxigenación vistos entre los días 368 y 410 (de enero a febrero 2014). La profundidad de 30 metros muestra 2 períodos comunes con el esfuerzo de vientos (2.4 días y 4.4 días). El segundo período también es encontrado en la profundidad de 50 metros (posiblemente también en la de 30, ya que la serie de tiempo empezó a tomar datos a la mitad del intervalo total). La profundidad de 75 y 145 metros muestran también un período común de 2.6 días. El porcentaje de potencia total para esta

escala aumenta casi hasta 4 veces si comparamos la profundidad de 30 y la de 145 metros. Pero disminuye en la profundidad de 160 metros. Los valores son: 1) para 30 metros: 10.2 %, 2) para 50 metros: 23.38 %, 3) para 75 metros: 31.36 %, 4) para 145 metros: 35.31 % y 5) para 160 metros: 23.0 %.

3. La variabilidad a escala intra-mensual 8-15 días está presente en toda la columna de agua. Para las profundidades cercanas a la oxiclina (30, 50 y 75 metros) se encuentra en 2 intervalos: 1) entre los días 235 y 260 (Agosto y Septiembre 2013) y 2) entre los días 362 y 410 (enero y febrero 2014). Para la profundidad cercanas al núcleo (145 y 160 metros) esta escala de variabilidad es encontrada solamente entre enero y febrero 2014. Los períodos dominantes y el porcentaje en potencia en esta escala de variabilidad son: 1) para la profundidad de 30 metros: 12.6 días representando el 8.74 % de la potencia total, para la profundidad de 50 metros: 8.7 días representando el 13.05 % de la potencia total, 3) para la profundidad de 75 metros no muestra un período en esta escala de variabilidad (9 % de la potencia total), 4) para la profundidad de 145 metros: 14.1 días representando el 22.57 % de la potencia total y 5) para la profundidad de 160 metros: 15.7 días representando el 17.15 % de la potencia total.
4. La variabilidad intra-estacional solamente se encuentra en las profundidades cercanas a la oxiclina (30, 50 y 75 metros). Esta escala de variabilidad es localizada entre los días 220 a 275 (agosto a septiembre 2013) y 280 a 380 (octubre 2013 a enero 2014). Los períodos dominantes y el porcentaje en potencia en esta escala de variabilidad son: 1) Para la profundidad de 30 metros: 33.1 días representando el 53.54 % de la potencia total, 2) para la profundidad de 50 metros: 31.3 días representando el 49.03 % de la potencia total y 3) para la profundidad de 75 metros: mostrando dos períodos dominantes (uno más energético que el otro): 25.3 y 50.6 días

representando el 40.97% de la potencia total.

La figura 6.2 muestra la climatología de las capas más superficiales en el lugar más cercano al anclaje (12,00° Sur, 77,50° Oeste) usando datos de CARS2009 (<http://www.marine.csiro.au/dunn/cars2009/>), la oxiclina se encuentra entre 17.87715 y 28.4917 $\mu\text{mol/L}$. ([31]). Profundización de la oxiclina es mostrada en invierno austral 2013 (de julio a noviembre), confirmando eventos de oxigenación a escalas mayores de 1 día durante esta temporada. Conjuntamente se muestra elevación de la oxiclina en verano austral 2013 y 2014. Para verano austral 2013, eventos de oxigenación son vistos en escala intra-diaria (véase figura 6.1) los cuales no pueden ser documentados en estos datos climatológicos. Por otro lado, verano austral 2014 muestra adicionalmente eventos de oxigenación para enero y febrero 2014 los cuales no son consistentes con climatología de CARS en estas fechas.

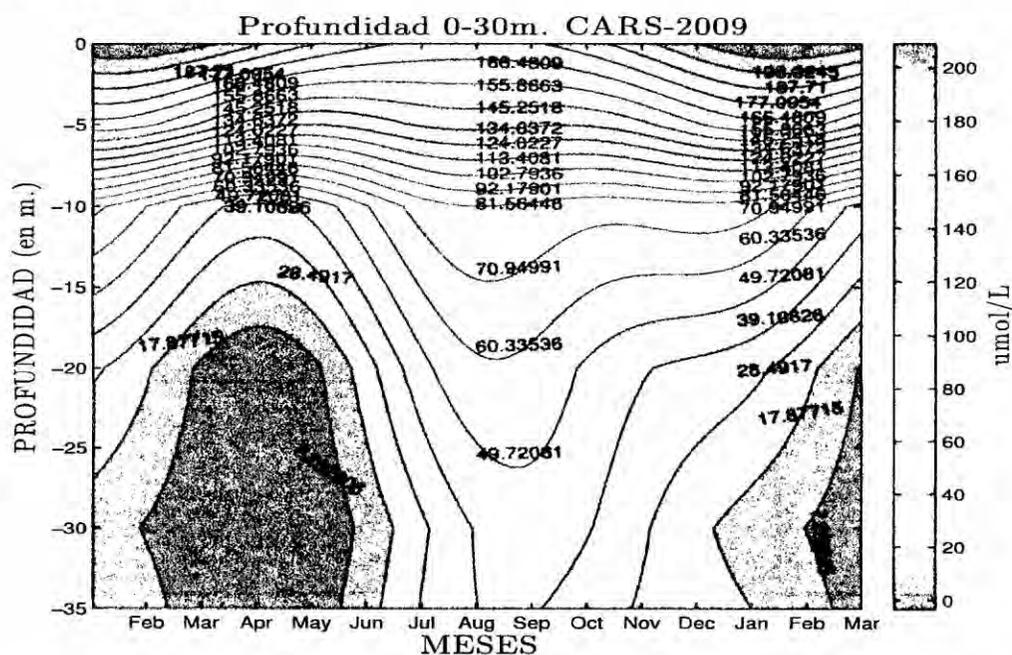


Figura 6.2: Climatología CARS2009 con mostrando datos de 1 año cercanos al anclaje AMOP (12,00° Sur, 77,50° Oeste). La oxiclina (entre 17.98 y 28.49 $\mu\text{mol/L}$) muestra profundización en invierno austral, mientras que en verano austral 2013 y 2014 muestra ser más somero.

Para verificar las variaciones las concentraciones de oxígeno en verano 2014 se

usan datos del crucero de cercanía l'Atalante documentando las concentraciones de oxígeno en la columna de agua para los días 27 y 28 de enero 2014 del sensor 1 en subida. Los resultados muestran variaciones en la profundización de la oxiclina próximas a períodos semi-diurnos (véase figura 6.3) mayor profundización de la oxiclina se encuentra entre las 5 a.m. y 7 p.m. del 27 de enero y 12 p.m. del 28 de enero. La oxiclina llega a profundizarse hasta 40 metros bajo la superficie a las 7 a.m. y llega a ser más somera a las 7 a.m. el 28 de enero. Estos resultados confirman variaciones de la cantidad de oxígeno a intervalos temporales de horas.

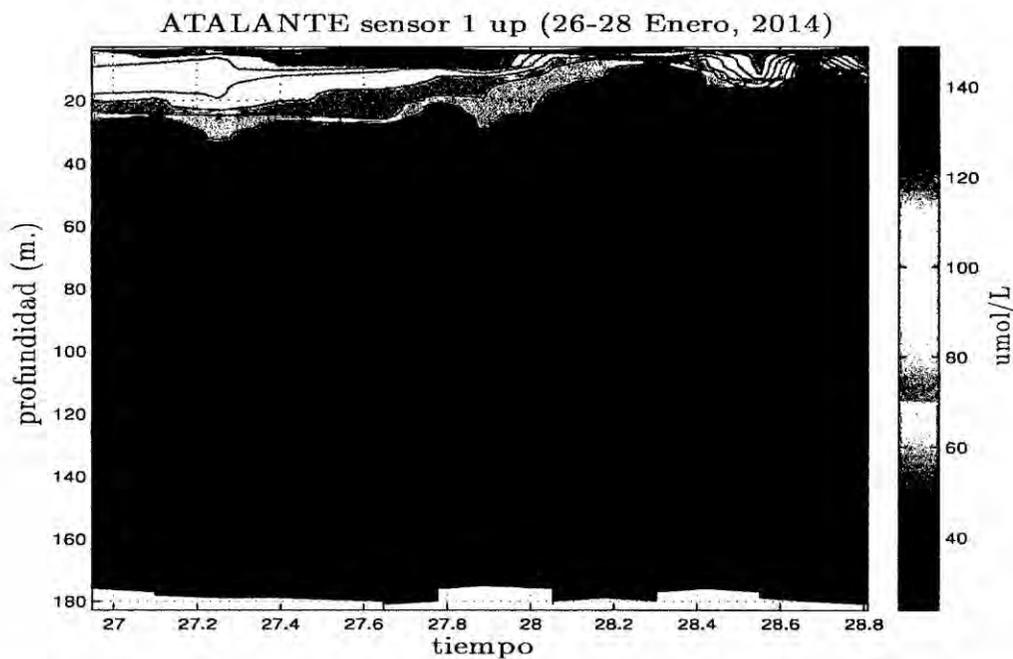


Figura 6.3: Perfil del oxígeno del crucero l'Atalante para los días 27 y 28 de enero 2014 cerca al anclaje. Se puede ver eventos semi-diurnos de profundización de la oxiclina (entre 5 a.m. y 7 p.m. del 27 de enero y 12 p.m. del 28 de enero). La oxiclina muestra mayor profundización a las 5 a.m. del 27 de enero y más somera a las 7 a.m. del 28 de enero.

2. Masas de agua involucradas en la variabilidad de la ZMO

La región del Océano Pacífico Tropical contiene 4 masas de agua principales: 13CW (siglas en inglés de 13°C Equatorial Water), STUW (siglas en inglés de Sub-Tropical Under-Water) STSW y (siglas en inglés de Sub-Tropical Surface Water) y ESW (siglas en inglés de Equatorial Surface Water) visto en [33]. Los resultados de los diagramas T-S para los datos del anclaje AMOP muestran influencia de las masas de agua 13CW (principalmente en la profundidad que representa al núcleo de la ZMO pero también visto en la profundidad que representa a la oxiclina de la ZMO) y STUW (visto en la oxiclina) pero no de las STSW y ESW (véase figura 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8). Las masas de agua 13CW están asociadas a la Corriente Sub-Superficial Perú-Chile-PCUC [33] mientras que la STUW proviene del Sur trae consigo aguas oxigenadas ([29]). A continuación se describe los cambios en los rangos de las masas de agua que se producen durante las estaciones en las profundidades que representan a la oxiclina (30 metros) y al núcleo (145 metros) tomando en cuenta el inicio de estación brindado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para el 2013 (<http://www.senamhi.gob.pe/?p=0280>), la lista de los eventos de El Niño mostrados por la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrosfera del Instituto Geofísico del Perú (IGP) en la lista publicada por el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN, http://www.met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html) y los resultados de las anomalías a lo largo de la línea ecuatorial del modelo lineal oceánico del IGP (véase figura 6.4).

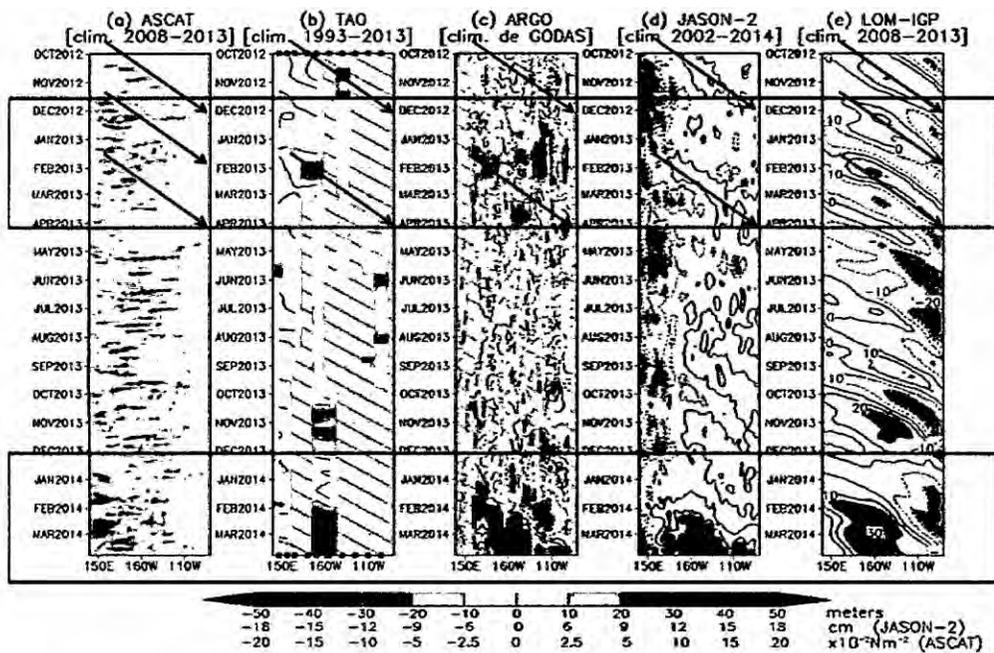


Figura 6.4: Diagramas Höwmmoller Longitud vs Tiempo a lo largo de la línea ecuatorial de datos observados y resultados del modelo lineal oceánico del IGP. a) Anomalías del esfuerzo de vientos zonal de ASCAT, b) Anomalías de la profundidad de la isoterma 20°C de TAO, c) Anomalías de la profundidad de la isoterma 20°C de ARGO, d) Anomalías del nivel del mar de JASON-2 y e) Anomalías del modelo lineal oceánico (LOM-IGP) forzado con anomalías de vientos zonales de ASCAT. Los rectángulos de color rojo representan a las estaciones de verano 2013 (superior) y 2014 (inferior). Los rectángulos de color rojo representan las estaciones de verano.

2.1. Verano 2013

La figura 6.5 muestra el rango de la temperatura y salinidad a la profundidad de 30 metros (círculos color lila) y 145 metros (círculos color verde), los resultados muestran estar fuera del rango de las masas de agua STSW y ESP. En la oxiclina los resultados muestran estar cercanos a las masas de agua STUW y 13CW. La temperatura varía de 14,71°C a 15,86°C y la salinidad de 34.99 a 35.05. Este rango anómalo puede estar relacionado con la disminución en la intensidad de vientos locales ([39] y véase figura 4.4.1 de Metodología). Los resultados del modelo oceánico lineal del IGP (LOM-IGP, [22]; [26]; véase

figura 6.4.e) muestran que en verano 2013 las anomalías de la termoclina cercana la línea ecuatorial fueron positivas, lo que indica una termoclina más somera asociándose a la presencia de ondas Kelvin de hundimiento ([23]). Sin embargo, los resultados del análisis del espectro wavelet de la temperatura a la profundidad de 30m. (véase figura C.9 de Anexos) no muestra energía espectral significativa para esta estación. Por tanto las variaciones de las masas de agua en esta estación no son asociados al paso de ondas Kelvin, sino a la disminución de vientos locales y/o otros mecanismos sin poder ser detallados en la tesis. En la profundidad de 145 metros (véase figura 6.5), la temperatura varía de 13,25°C a 13,97°C y salinidad de 34.95 a 34.99. La masas de agua dominante durante los primeros 2 meses (enero y febrero 2013) es la 13CW asociada a la Corriente Sub-superficial Perú-Chile – PCUC ([5]; [33]). A finales de verano austral 2013 se encuentra mezcla entre STUW y 13CW con mayor porcentaje de la 13CW. El análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad a la profundidad de 145 metros (véase figura C.10 y C.12 de Anexos), muestra débil energía espectral wavelet de marzo a junio 2013 con período de 59.92 días posiblemente asociado a los cambios en las masas de agua pero sin poder detallar el mecanismo que lo origina.

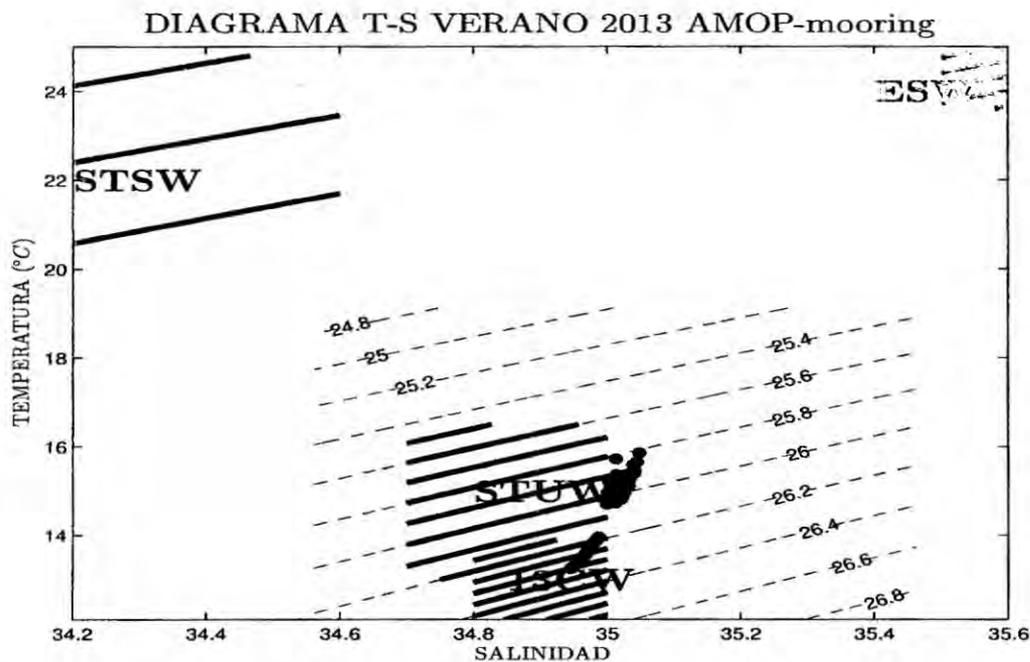


Figura 6.5: Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de verano austral 2013 (de 01-01-13 a 19-03-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopícnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a las masas de agua STSW.

2.2. Otoño 2013

La figura 6.6 muestra el rango de la temperatura a la profundidad de 30 metros (círculos de color lila) que varía de 14,21°C a 15,45°C y la salinidad de 34.97 a 35.01. Las masas de agua en la oxiclina y núcleo se encuentran fuera del rango de la STSW y ESW. A inicios de estación, se encuentra masas de agua fuera del rango de la STUW, similarmente sucede a fines de estación. Estas anomalías en las masas de aguas pueden ser asociadas a débiles vientos locales a inicios y fines de estación (véase figura 4.4.1 de Metodología). Durante los demás días de la estación se encuentra masas de agua del tipo STUW asociándose al aumento de vientos locales lo que conllevaría a los primeros eventos de afloramiento del año ([39]) y posible subducción ([29]; [19]). Los resultados del EFEN muestran eventos de La Niña Costera con fuerte magnitud

desde abril hasta agosto 2013 asociados a estos vientos. Por otro lado, los resultados del LOM-IGP muestran anomalías negativas en la profundidad de la termoclina en esta estación (elevación de la termoclina) asociándose a ondas Kelvin de afloramiento ([24]). El análisis del espectro Wavelet para la temperatura y salinidad a la profundidad de 30 m. (véase figura C.9 y C.11 de Anexos) muestran débil energía espectral para la fecha donde se localiza este evento, confirmando así la presencia de La Niña Costera con influencia hasta la profundidad de 30m y posibles ondas Kelvin internas de afloramiento con débil energía.

En la profundidad de 145 metros (círculos color verde, véase figura 6.6), la temperatura varía de 12,95°C a 14°C y salinidad de 34.93 a 34.99. Las masas de agua 13CW se encuentran durante casi toda la estación (asociada a la PCUC), excepto la segunda y tercera semana de mayo donde se encuentra mezcla entre STUW y 13CW. El análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad a la profundidad de 145 metros (véase figura C.10 y C.12 de Anexos) muestra débil energía espectral en la banda intra-estacional en toda la estación asociándose posiblemente a las variaciones en las masas de agua sin poder detallar algún mecanismo físico responsable.

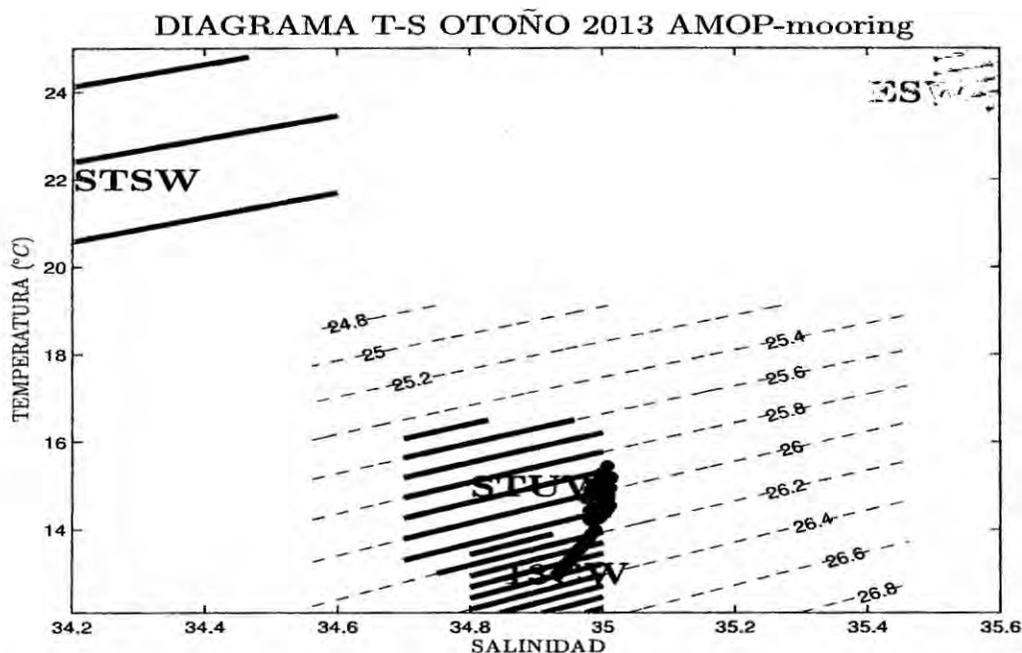


Figura 6.6: Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de otoño austral 2013 (de 20-03-13 al 20-06-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopícnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.

2.3. Invierno 2013

La figura 6.7 muestra el rango de la temperatura a la profundidad de 30 metros (círculos de color lila), que varía de 13,82°C a 15,43°C y la salinidad de 34.97 a 35.02. Durante toda la estación, no se encuentran presentes las masas de agua ESW y STSW. La masa de agua STUW se encuentra presente a inicios de estación conjuntamente con el aumento en la intensidad de vientos locales (véase figura 4.4.1 de Metodología), lo cual se asocia a eventos de afloramiento ([39]). En julio 2013 se encuentra nuevamente fuera del rango de las masas de agua STUW y 13CW, asociándose al debilitamiento en la intensidad de vientos. A fines de estación se encuentran masas de agua en el rango de la STUW y 13CW asociándose al afloramiento de aguas profundas provenientes del núcleo. Los resultados del OLM-IGP muestran anomalías negativas de la termoclina

para esta estación, asociándose a ondas Kelvin de afloramiento asociadas a La Niña Costera (duración hasta agosto 2013). El análisis del espectro wavelet para la temperatura a la profundidad de 30 metros (véase figura C.9 de Anexos) muestra débil energía del espectro wavelet para la estación de invierno 2013 localizado en la banda 16-32 días asociándose al afloramiento de aguas profundas y/o a posibles ondas Kelvin de afloramiento que intervienen en la variabilidad de las masas de agua.

En la profundidad de 145 metros (círculos de color verde, véase figura 6.7), la temperatura varía de 12,79°C a 13,44°C y salinidad de 34.92 a 34.96. Durante toda la temporada se encuentra la masa de agua tipo 13CW asociada a la PCUC ([39], [5]). Así mismo, el análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad en esta profundidad (véase figura C.10 y C.12 de Anexos) no muestra energía espectral wavelet en esta estación.

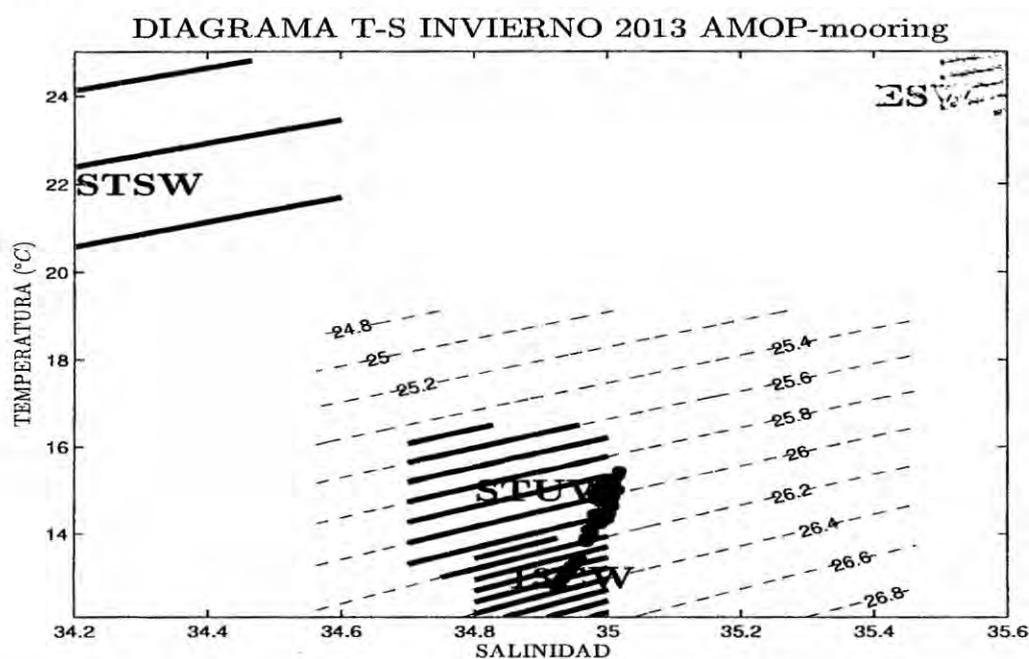


Figura 6.7: Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de invierno austral 2013 (de 21-06-13 a 21-09-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. La líneas negras representan a las isopícnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.

2.4. Primavera 2013

El rango de la temperatura a la profundidad de 30 metros (círculos color lila, véase figura 6.8) varía de $14,05^{\circ}\text{C}$ a $17,04^{\circ}\text{C}$ y la salinidad de 34.91 a 35.15. Los resultados de los diagramas T-S presentan masas de agua del tipo 13CW y STUW en toda la estación. Durante la primera mitad de la estación la masa de agua es del tipo STUW y la intensidad de vientos locales muestran ser elevada (véase figura 4.4.1 de Metodología) lo que se podría asociar a eventos de afloramiento. En la segunda mitad la masa de agua está fuera del rango de la STUW. El análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad a esta profundidad (véase figura C.9 y C.11 de Anexos) muestra elevada energía espectral para esta temporada en la banda intra-estacional además de elevación en el nivel del mar (véase figura 4.5 de Metodología) y aumento de la temperatura en la serie de tiempo del anclaje AMOP a partir de octubre 2013 (véase figura 4.3 de Metodología) sugiriendo la presencia de ondas Kelvin internas de hundimiento. Los resultados del OLM-IGP muestran en la primera mitad de la estación anomalías positivas en la termoclina y en la segunda mitad, anomalías negativas en la termoclina. Estos resultados sugieren la presencia de ondas Kelvin de afloramiento en la primera mitad y ondas Kelvin de hundimiento en la segunda mitad de la estación.

En la profundidad de 145 metros (círculos color verde, véase figura 6.8), la temperatura varía de $12,45^{\circ}\text{C}$ a $13,43^{\circ}\text{C}$ y salinidad de 34.9 a 34.96. Al igual que en la estación anterior, la masa de agua corresponde a tipo 13CW posiblemente asociada a la PCUC ([39]). Los resultados del análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad en esta profundidad (véase figura C.10 y C.12 de Anexos) muestran débil energía espectral en esta estación, significativa solamente hasta diciembre 2013. El mecanismo asociado a esta variabilidad posiblemente sea las ondas Kelvin de hundimiento que transportan masas de agua superficiales a las partes más profundas, pero en cantidades mínimas, ya que no muestra influencia sobre las masas de agua.

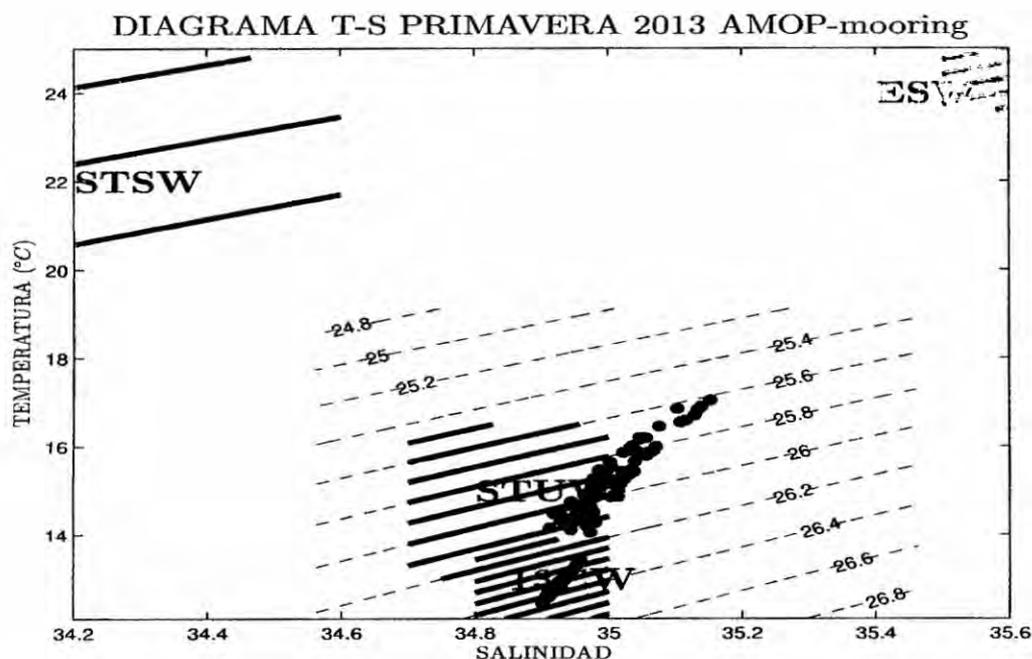


Figura 6.8: Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de primavera austral 2013 (de 21-09-13 a 20-12-13) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. La líneas negras representan a las isopicnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a las masa de agua STSW.

2.5. Verano 2014

El rango de la temperatura a la profundidad de 30 metros (círculo color lila, véase figura 6.9) varía de 15,04°C a 16,56°C y la salinidad de 34.98 a 35.14. Similar a los resultados obtenidos en las demás temporadas, las masas de agua no se encuentran dentro del rango de las masas de agua ESW y STSW. Durante la primera semana de esta estación las masas de agua presentes corresponden a la STUW. Posteriormente, las masas de agua se encuentran fuera del rango de la STUW y 13CW. Para esta estación, los vientos locales muestran aumento en su intensidad en la quincena de diciembre 2013 y los primeros días de febrero 2014. Las masas de agua STUW a inicios de la estación posiblemente correspondan a la influencia que tiene los vientos en diciembre 2013. Por otro lado, el aumento en la intensidad de vientos en febrero 2014 puede tener influencia en las masas

de agua. La serie de tiempo de la temperatura y la salinidad del anclaje AMOP (véase figura 4.3 de Metodología) para esta estación, muestran sus máximos valores en esta estación, la elevación del mar para esta temporada (véase figura 4.5) muestra valores altos (pero no máximos) y el análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad en la profundidad de 30m. (véase figura C.9 y C.11 de Anexos) muestran energía espectral en la banda 2-4 días (en la temperatura), 2-8 días (en la salinidad) y en la banda intra-estacional (significativas, hasta Enero 2014 en la temperatura y salinidad). Estos resultados sugieren variaciones en las masas de agua debido a vientos (banda 2-8 días en la temperatura y salinidad) así como presencia de ondas Kelvin de hundimiento (banda intra-estacional) que influyen en las variaciones de las masas de agua en verano 2014. Los resultados de LOM-IGP muestran anomalías negativas en la profundidad de la termoclina para esta estación, sugiriendo la presencia de ondas Kelvin de afloramiento cercanos a la línea ecuatorial.

En la profundidad de 145 metros (círculos color verde, véase figura 6.9), la temperatura varía de 13,26°C a 14,25°C y salinidad de 34.95 a 34.99. A inicios de estación y fines de ella, se encuentra presente la mezcla de masas de agua 13CW y STUW, mientras que en el resto de la estación las masas de agua son de tipo 13CW asociadas a la PCUC ([33]). Los resultados del análisis del espectro wavelet para la temperatura y salinidad en esta estación (véase figura B.10 y B.12 de Anexos) muestran débil energía espectral en verano pero fuera del nivel de significancia. Las series de tiempo de la temperatura y salinidad para esta profundidad (véase figura 4.3 de Metodología) muestra máximos valores en esta temporada. Estos resultados posiblemente sean por la influencia de las ondas Kelvin de hundimiento en las aguas superficiales con influencia hasta esta profundidad.

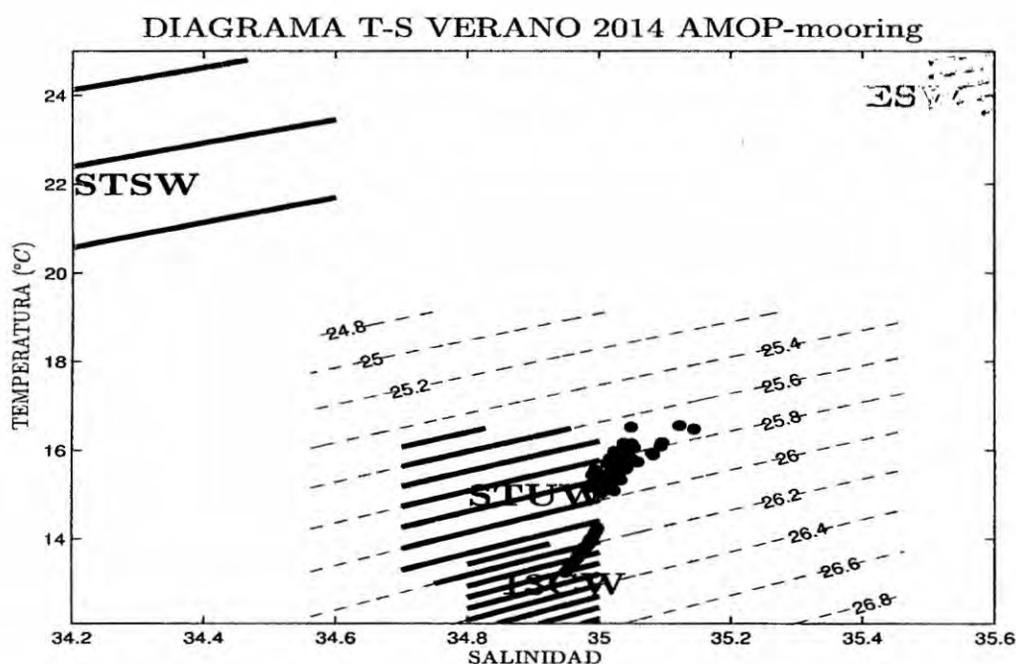


Figura 6.9: Diagrama T-S para los datos AMOP-mooring de verano austral 2014 (de 21-12-13 a fin de la medición) para la oxiclina (puntos lila) y el núcleo (puntos verdes) de la ZMO. Las líneas negras representan a las isopícnas, las líneas azules a la masa de agua tipo STUW, las líneas rojas a la masa de agua tipo 13CW, las líneas amarillas a la masa de agua ESW y las líneas celestes a la masa de agua STSW.

3. Rol del forzamiento físico

La presencia de ondas en el océano puede verse reflejado en las variaciones de la estratificación del océano (densidad, temperatura, salinidad y presión), altura del nivel del mar y variaciones en la profundidad de la termoclina (los cambios en el nivel del mar y profundización de la termoclina reflejan el paso de ondas de período largo como las ondas Kelvin). Así mismo, vientos son otra forma de generar ondas en el océano ([40]). A continuación, se documenta en términos de variaciones de la temperatura (la temperatura muestra los mismos resultados en términos de energía espectral wavelet que la densidad así como similitudes en las series de tiempo), salinidad, presión, variación del nivel del mar y de la termoclina 20°C (estos dos último para documentar ondas de

período largo) e intensidad de vientos las diferentes ondas que tienen influencia sobre las variaciones del oxígeno en términos de escalas temporales intra-diarias, intra-mensuales e intra-estacionales.

3.1. Escala intra-diaria

La figura 6.10 muestra los resultados de la escala promedio de potencias wavelet para la escala semi-diurna, tanto para analizar la modulación del oxígeno con la presión (véase figura 6.10 superior) como al oxígeno con la temperatura (véase figura 6.10 inferior). Para la modulación del oxígeno con la presión, se encuentra 4 intervalos de tiempo donde se puede visualizar buena modulación de un parámetros sobre el otro (presión modula al oxígeno): 1) entre 185 y 200 días (julio 2013), 2) entre 233 y 252 días (entre quincena de agosto y primera semana de septiembre 2013), 3) entre 288 y 298 días (quincena de octubre 2013) y 4) entre 325 y 363 días (noviembre a diciembre 2013). La buena modulación entre la temperatura y el oxígeno se puede encontrar en 3 intervalos: 1) entre los días 100 y 222 (de abril a la primera semana de agosto 2013), 2) entre los días 240 y 365 (de septiembre a diciembre 2013) y 3) entre los días 382 y 397 (de la quincena de enero a fin de enero 2014).

El período dominante semi-diurno encontrado en el análisis wavelet del oxígeno también es encontrado sobre la temperatura y la presión a la misma profundidad. Estos resultados nos sugieren la presencia de ondas internas generadas por marea (llamada marea interna o baroclínica; [28]; [27]; [12]; [40]). La formación de esta marea interna se debe a la marea superficial (o barotrópica) que interactúa con la topografía produciendo ondas en el interior del océano. Esto generalmente se puede ver en los cambios en la estratificación de las masas de agua (variaciones en la temperatura). Así mismo como se encontró en los resultados, estas ondas internas generadas por marea mueven verticalmente masas de agua con oxígeno disuelto.

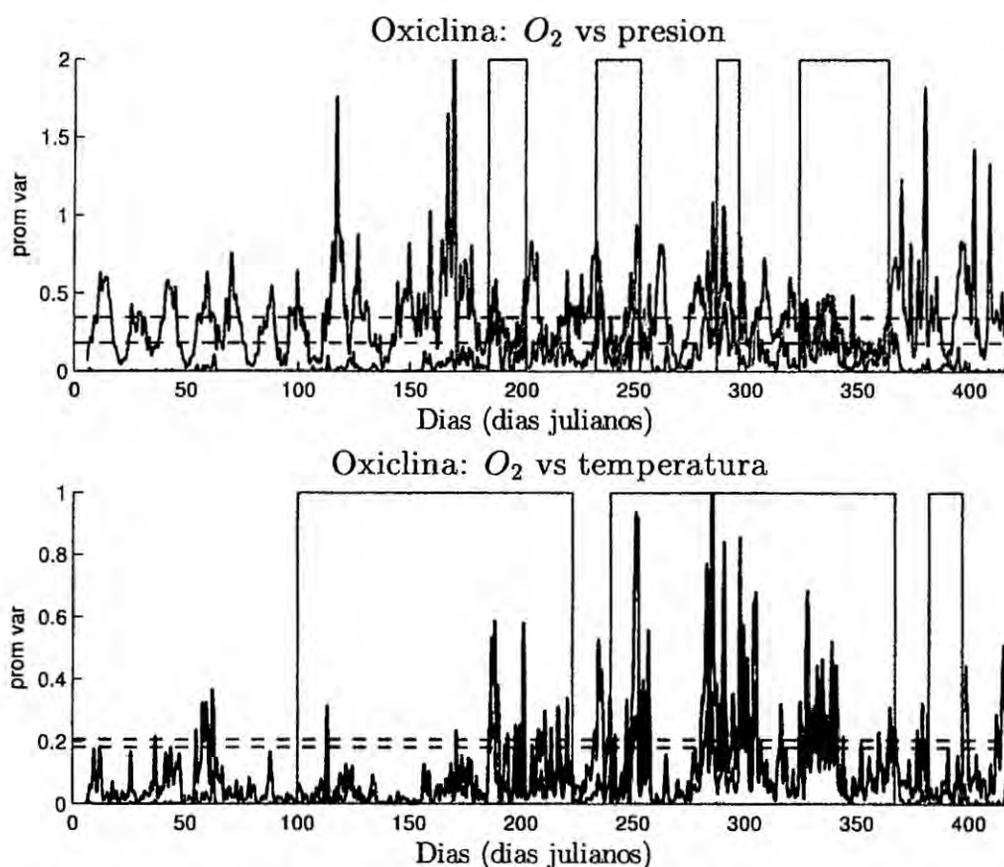


Figura 6.10: EPPW en la oxiclina, comparando en la misma escala de variabilidad (intra-diaria) el oxígeno con otros parámetros físicos. Parte superior: El oxígeno (línea azul) con la presión (línea negra) y parte inferior: el oxígeno (línea azul) y la temperatura (línea roja) en la profundidad de 30 metros. Los niveles de significancia están dados por las líneas punteadas. Los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación

La figura 6.11 muestra la influencia del oxígeno a escala intra-mensual sobre el oxígeno a escala intra-diaria. Se visualiza buena correlación entre ambos en 5 zonas: 1) entre los días 50 y 62 (entre la quincena de febrero y comienzos de marzo 2013), 2) entre los días 100 y 135 (entre la quincena de abril y la quincena de mayo 2013), 3) entre los días 150 y 190 (entre junio y julio 2013), 4) entre los días 224 y 248 (agosto 2013) y 5) entre los días 325 y 400 (entre noviembre 2013 a enero 2014). Estos resultados sugieren modulación del período intra-mensual sobre el período intra-diario. Algo que hasta el momento no ha sido estudiado en detalle.

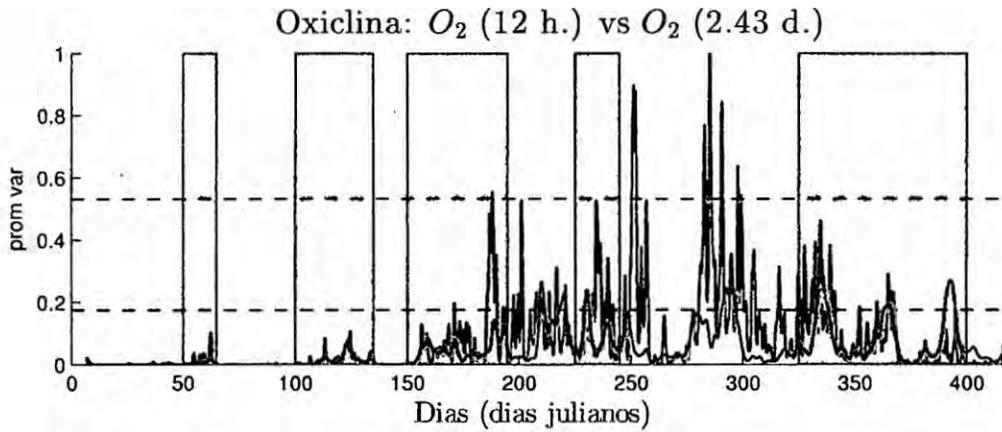


Figura 6.11: EPPW en la oxiclina, comparando las fluctuaciones para diferentes escalas para el oxígeno. Para el oxígeno en la escala intra-diaria (línea azul) con el oxígeno en la escala intra-mensual (línea negra). Los niveles de significancia están dados por las líneas punteadas. Los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación

La figura 6.12 muestra la variabilidad intra-diaria encontrada en la profundidad que representa al núcleo no muestra contraparte en la presión, temperatura ni salinidad. Pero al comparar las fluctuaciones entre la escala intra-diaria y la escala intra-mensual (con el período 2.43 días, inclusive con las demás escalas temporales) muestra buena correlación durante 4 intervalos de tiempo: 1) entre los días 160 y 180 (junio 2013), 2) entre los días 225 y 258 (agosto 2013), 3) entre los días 323 y 333 (noviembre 2013) y 4) entre los días 366 y 415 (enero a quincena de febrero 2014). Por lo tanto, se puede concluir que las ondas internas (de período intra-diario) encontradas en la variabilidad intra-diaria son influenciadas por ondas de período más largo ([37]).

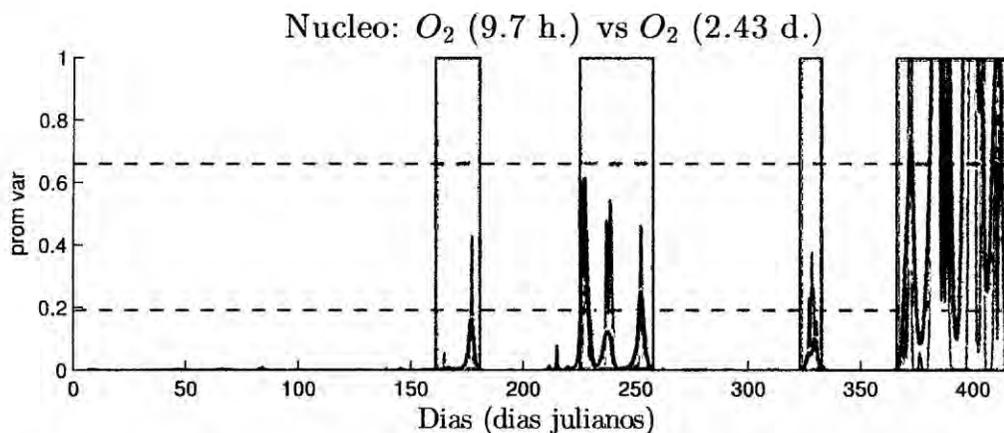


Figura 6.12: EPPW en el núcleo, comparando las fluctuaciones para diferentes escalas para el oxígeno. Para el oxígeno en la escala intra-diaria (línea azul) con el oxígeno en la escala intra-mensual (línea negra). Los niveles de significancia están dados por las líneas punteadas. Los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación

3.2. Escala intra-mensual 1-8 días

En esta escala de variabilidad, el oxígeno a la profundidad que representa a la oxiclina muestra 2 períodos dominantes: de 2.43 y 4.36 días. El primer período es encontrado tanto en la serie de tiempo de la temperatura como la del esfuerzo de vientos, adicionalmente el segundo es encontrado en el esfuerzo de vientos.

La figura 6.13 muestra la influencia de la temperatura sobre el oxígeno (parte superior) y la influencia de los vientos sobre el oxígeno (parte inferior). Para la temperatura y el oxígeno, la correlación es buena entre los días 150 a 220 (de junio a la primera semana de agosto 2013), 233 a 267 (de la quincena de agosto a septiembre 2013), 307 a 370 (de noviembre 2013 a la primera semana de enero 2014) y 387 a 395 (enero 2014) mientras que buena correlación entre vientos y el oxígeno es encontrado en los días 208 a 242 (agosto 2013) y 318 a 406 (quincena de noviembre 2013 a quincena de febrero 2014). En ambos se encuentran intervalos de tiempo comunes, lo cual nos sugiere que los vientos modulan las variaciones de temperatura en las masas de agua ([39]) y estas a

su vez modulan las concentraciones de oxígeno. Para las zonas donde el esfuerzo de vientos no tiene influencia sobre la variabilidad del oxígeno y solamente se ve influenciado por los cambios de temperatura, esta variabilidad es posiblemente influenciada por ondas de período corto presumiblemente ondas inerciales-gravitacionales. Esto se debe a que en el Océano Pacífico Tropical Oeste y Central ha sido documentado la presencia de ondas inerciales-gravitatorias atrapadas al Ecuador ([44]; frente a Chile: [36]).

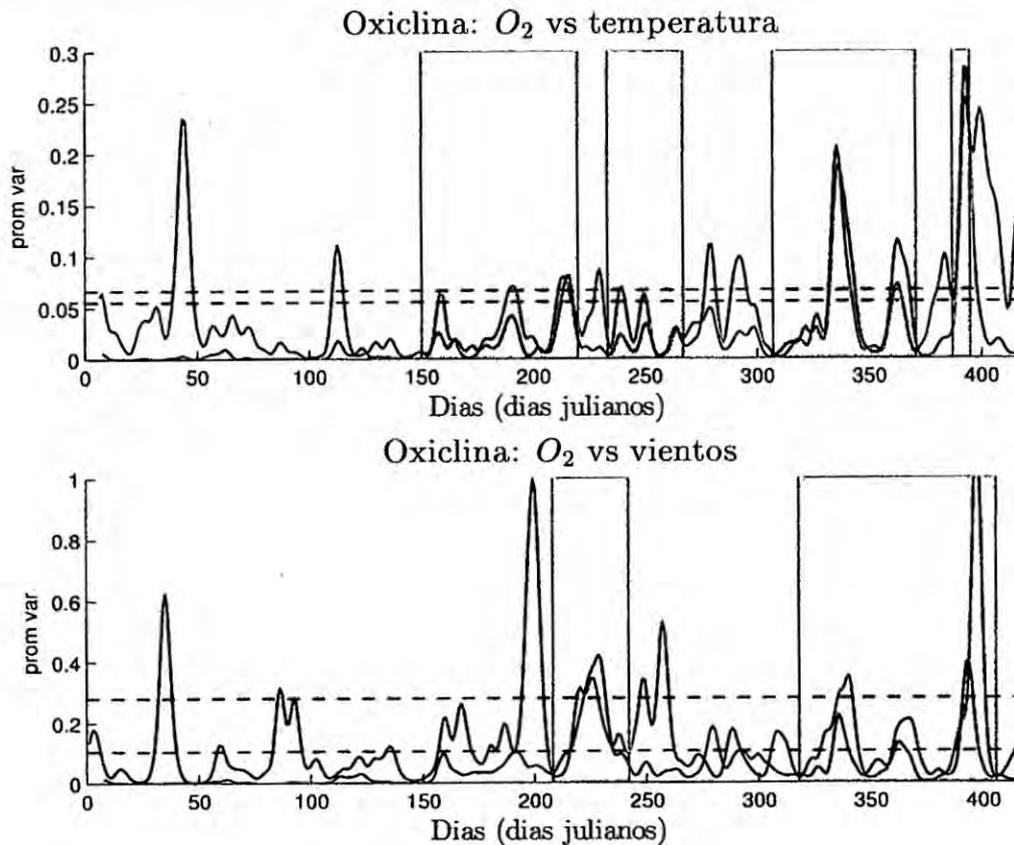


Figura 6.13: EPPW de la oxiclina. (arriba) Comparando las fluctuaciones para temperatura (línea negra) y vientos (línea roja) con el oxígeno (línea azul) en la escala 1-8 días. O_2 vs Temperatura (arriba) y O_2 vs vientos (abajo). Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación

Los períodos de 2.56 y 5.4 días presentes en esta escala de variabilidad temporal en el núcleo, no muestran buena correlación con otros parámetros

físicos (temperatura, salinidad, presión y vientos). Pero al ser comparados estos períodos muestran buena correlación. La figura 6.14 muestra los intervalos de tiempo donde estas escalas presentan buena correlación: 1) entre los días 218 y 260 (agosto a la quincena de septiembre 2013) y 2) del días 361 al 415 (27 de diciembre 2013 al 20 de febrero 2014). Similar a lo encontrado en la escala de variabilidad intra-diaria. La oxiclina y el núcleo muestran algunos períodos asociados a ondas que son modulados por ondas pre-existentes ([37]). Por tanto, los períodos dentro de esta escala de variabilidad temporal, son generados por la presencia de otras ondas por medio de la modulación ([?]).

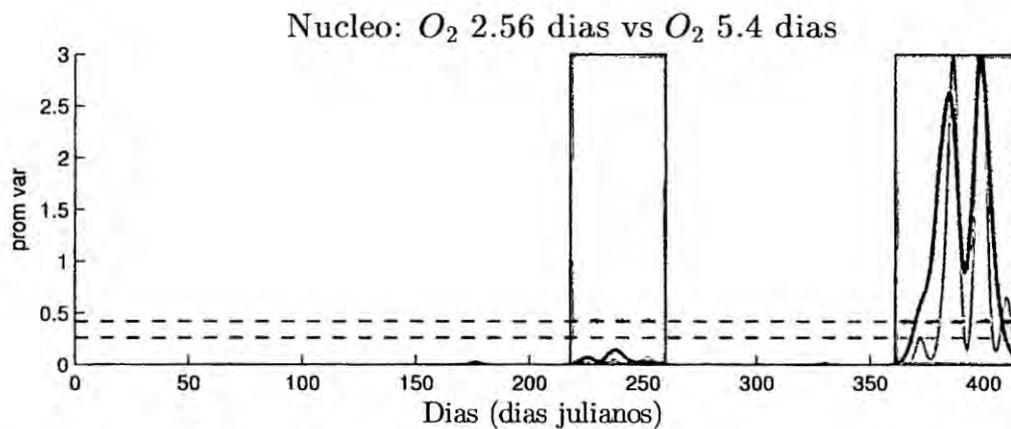


Figura 6.14: EPPW del núcleo, comparando las fluctuaciones del oxígeno en la escala 1-8 días. O_2 2.56 días representado por la línea azul vs O_2 5.4 días representado por la línea negra. Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación

3.3. Escala intra-mensual 8-15 días

Dentro de esta escala de variabilidad, la profundidad que representa a la oxiclina muestra buena correlación con la temperatura y salinidad a la misma profundidad. La figura 6.15 superior muestra el EPPW entre la temperatura (línea azul) y el oxígeno (línea negra) y la misma figura la parte inferior el EPPW entre la salinidad (línea roja) y el oxígeno (línea azul). Se puede encontrar buena correlación solamente en un intervalo de tiempo, entre

el día 275 y 342 (de octubre a la segunda semana de diciembre 2013).

Esta buena correlación entre el oxígeno y los parámetros que definen las masas de agua (temperatura y salinidad) sugiere un mecanismo que transporta verticalmente masas de agua. Además el período encontrado en esta escala de variabilidad denota la presencia de ondas mixtas Rosbby-gravitatorias forzadas la componente meridional (componente Y) de los vientos ([4]; [9]; [44]).

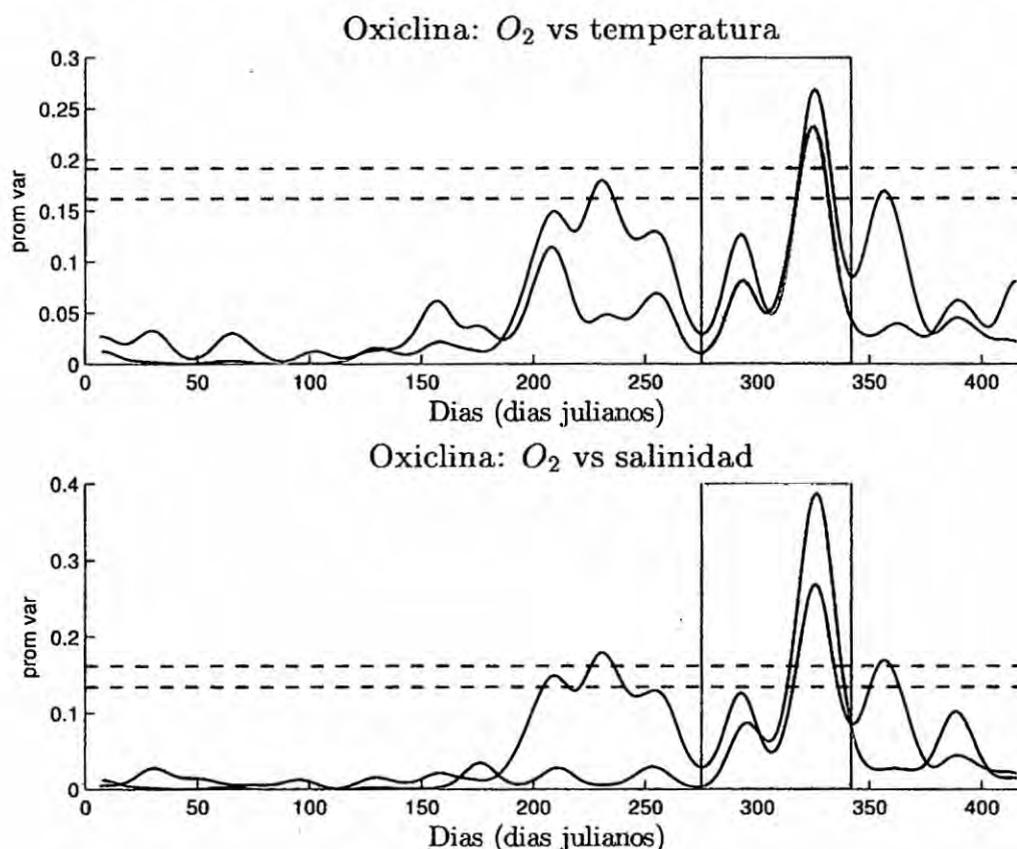


Figura 6.15: EPPW de la oxiclina, comparando las fluctuaciones del oxígeno en la escala 8-15 días. la figura superior muestra al O₂ (línea azul) vs temperatura (línea negra) y la figura inferior al O₂ (línea azul) vs salinidad (línea roja). Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación.

El núcleo muestra en esta escala de variabilidad solamente un período significativo, sin buena correlación con los parámetros que definen las masas de agua (temperatura y salinidad). Pero muestra buena correlación con las demás

escalas de variabilidad para el mismo parámetro. La figura 6.16 muestra los intervalos de tiempo donde existe modulación entre dos escalas de variabilidad (1-8 días y 8-15 días): 1) de 215 días a 260 días (entre agosto hasta la quincena de septiembre 2013) y 2) del día 350 hasta el día 416 (desde la quincena de diciembre 2013 hasta febrero 2014). Resultados de la banda intra-estacional, muestran la presencia de ondas Kelvin internas o baroclínicas de afloramiento en invierno austral 2013 y hundimiento en verano austral 2014 ([42]). Estas ondas pueden mover masas de agua en forma vertical ([46]) afectando, incluso levemente, en las medidas del oxígeno a profundidades de 160 metros. Así mismo, otro posible evento con influencia en la variabilidad vista en invierno austral 2013 son los eventos de vientos con influencia sobre el afloramiento que tendrían influencia sobre la variabilidad intra-mensual 8-15 días del oxígeno y posiblemente module toda la variabilidad encontrada en el núcleo para el oxígeno.

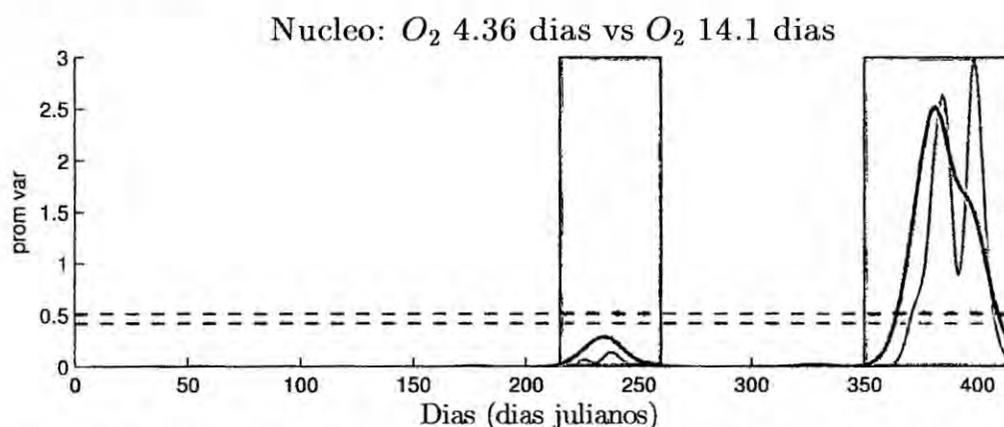


Figura 6.16: EPPW del núcleo, comparando las fluctuaciones del oxígeno en la escala 8-15 días. O_2 4.36 días representado por la línea azul vs O_2 14.1 días representado por la línea negra. Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color celeste representan las zonas con buena correlación

3.4. Escala intra-estacional

Esta escala es encontrada solo en las proximidades de la oxiclina (30, 50 y 75 metros) con posible influencia (aunque débil) sobre las masas de agua

cercanas al núcleo de la ZMO (145 y 160 metros) modulando posiblemente otras escalas de variabilidad temporal. La figura 6.17 muestra la correlación entre el oxígeno y la temperatura para la profundidad de 30 metros. Se puede ver buena correlación entre estos parámetros entre el día 200 y 400 (quincena de Julio 2013 hasta inicios de Febrero 2014). En invierno parte de las masas de agua proceden de la mezcla entre la STUW y la 13CW asociándose a eventos de afloramiento y en verano austral 2014 el rango de la temperatura y salinidad se encuentra fuera del rango de las masas de agua 13CW o STUW ([33]). Variaciones en la profundidad de la termoclina 20°C muestra ser más profundo en invierno austral 2013 y más somero en verano austral 2014. La altura dinámica muestra disminución de la altura en invierno austral 2013 y aumento en verano austral 2014. Estos resultados conjuntamente con las variaciones de las masas de agua y la correlación entre la temperatura y el oxígeno son evidencias de la presencia de ondas Kelvin internas de afloramiento en invierno austral 2013 y de hundimiento en verano austral 2014 ([39]; [42]; [25]; [24]). Los resultados del modelo lineal oceánico del IGP (LOM-IGP, véase figura 6.4) muestran elevaciones en la termoclina en verano 2013 y profundización para verano 2014, en otoño e invierno 2013 muestra profundización de la termoclina y en primavera 2013 muestra elevación de la termoclina en la primera mitad de la estación y en la segunda mitad, profundización de la termoclina. Estos resultados sugieren la presencia de ondas Kelvin de afloramiento (en otoño, invierno y la primera mitad de la primavera 2013 y verano 2014) y ondas Kelvin de hundimiento (verano 2013 y la segunda mitad de la primavera 2013) cercanos a 110° Oeste. demás la señal de las ondas Kelvin de afloramiento en invierno 2013 cercanos al Ecuador tienen influencia hasta las costas del Callao (donde se localizó el anclaje AMOP) donde es el mecanismo responsable de la variación intra-estacional del oxígeno y en verano 2014 los resultados del modelo no muestran ser coherentes con los obtenidos en el anclaje AMOP donde se pueden encontrar influencia de ondas Kelvin de hundimiento.

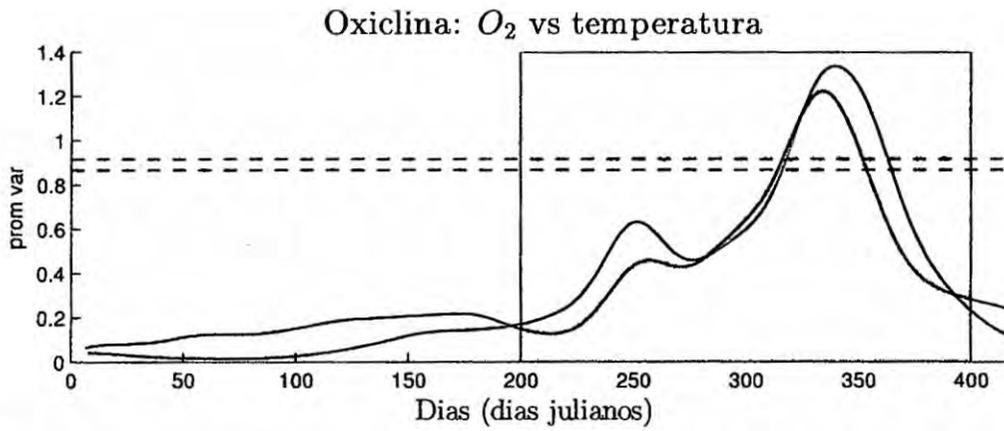


Figura 6.17: EPPW de la oxiclina en la escala intra-estacional, comparando las fluctuaciones de oxígeno representado por la línea azul vs la temperatura representado por la línea negra. Los niveles de significancia son representados por las líneas punteadas y los rectángulos de color amarillo representan las zonas con buena correlación

CONCLUSIONES

Este estudio describió las escalas de variabilidad intra-anual presentes en la ZMO del Perú usando como herramienta principal el análisis wavelet y complementado por el análisis de las masas de agua (diagrama T-S). Para ello la ZMO fue representada por 2 capas, la primera representa la zona donde se encuentra el gradiente de oxígeno (oxiclina) y la segunda, la zona con muy bajas concentraciones de oxígeno (núcleo). Ellas muestran la mayor parte del acoplamiento entre los forzantes físicos y el oxígeno.

Los resultados muestran varios puntos nuevos a tener en cuenta en los análisis de las variaciones del oxígeno a cortas escalas de tiempo:

1. **Un nuevo criterio para la documentación de la contribución física en las variaciones de oxígeno:** Comparando directamente la energía espectral wavelet significativa con las series de tiempo, se encontró un valor mínimo para el cual se considera evento de oxigenación originado por mecanismos físicos. Mostrando para las 5 profundidades tomadas por los sensores, valores mínimos diferentes. La profundidad de 30 metros muestra un valor mínimo de $50 \mu\text{mol}/L$, la profundidad de 50 metros un valor mínimo de $20 \mu\text{mol}/L$, la profundidad de 75 metros un valor de $6 \mu\text{mol}/L$, la profundidad de 145 metros un valor de $3.5 \mu\text{mol}/L$ y la profundidad de 160 metros un valor de $3 \mu\text{mol}/L$.
2. **Diferencias y/o similitudes entre eventos de oxigenación a diferentes profundidades:** Cercanas a la oxiclina (30, 50 y 75 metros) muestran similitudes con respecto a los intervalos de tiempo donde se

encuentran eventos de oxigenación difiriendo solamente en profundidad de 30 metros que muestra un evento de oxigenación adicional en otoño 2013. Cercanos al núcleo (145 y 160 metros) muestra dos eventos de oxigenación principales: en invierno 2013 y verano 2014.

3. **Escalas de variabilidad:** La oxiclina y el núcleo muestran 3 escalas de variabilidad principales.

La escala intra-diaria (menor a un día) en la oxiclina tiene dos contribuciones principales, la primera atribuida a la marea baroclínica y la segunda a la modulación por ondas pre-existentes posiblemente moduladas por vientos de escala intra-mensual (1-8 días). El núcleo muestra modulación por otras escalas de variabilidad, principalmente escala intra-mensual 8-15 días.

La escala intra-mensual en la oxiclina es atribuida a varios factores: 1) ondas inerciales-gravitatorias, 2) ondas mixtas Rossby-gravitatorias y 3) vientos. El núcleo muestra modulación entre los períodos presentes en esta escala. Así mismo esta variabilidad puede atribuirse a las ondas Kelvin internas de hundimiento que mueven masas de agua superficiales de forma vertical, llegando hasta esta profundidad.

La variabilidad intra-estacional solo es atribuida a la oxiclina y está asociada a las ondas Kelvin internas de afloramiento (invierno austral 2013) y ondas Kelvin de hundimiento (verano austral 2014), lo cual se corrobora con los cambios en la termoclina (isoterma 20°C), variación en las anomalías de la altura del mar y resultados de la profundización de la termoclina en el modelo lineal oceánico del IGP.

4. **Cambios en las masas de agua:** Existen dos tipos de masas de agua presentes en la oxiclina y núcleo, la 13CW (Aguas Ecuatoriales de 13°C) asociada a la Corriente Sub-Superficial Perú-Chile (PCUC) y STUW (Aguas Sub-Superficiales Sub-Tropicales) asociada a aguas oxigenadas provenientes del Sur. Los cambios en estas masas de agua son principal-

mente debido a: 1) disminución de la intensidad de vientos en verano 2013; 2) ondas Kelvin de afloramiento, así como primeros eventos de afloramiento costero en otoño 2013; 3) afloramiento debido al aumento de vientos en invierno 2013; 4) ondas Kelvin internas de hundimiento y finales del afloramiento en primavera 2013 e 5) intrusión de ondas Kelvin de hundimiento en verano 2014.

Finalmente, estos resultados deben ser considerados en futuros modelos numéricos para una mejor descripción de la realidad física.

RECOMENDACIONES

- a) Respecto al método de filtrado se usó el test de Grubbs para filtrar los datos atípicos de las series temporales siendo un protocolo adecuado para series temporales estacionarias, por el contrario para series no estacionarias es necesario buscar un método más adecuado. En la tesis se eliminó adicionalmente datos considerados visualmente atípicos en las series no estacionarias (temperatura, salinidad y oxígeno).
- b) Para el llenado de los datos eliminados se usó interpolación lineal siendo un protocolo general en el control de calidad de datos. Se recomienda usar este método en series temporales con datos faltantes teniendo en cuenta que estos no deben ser demasiado largos.
- c) Los promedios a 1 hora y 1 día son una buena forma de filtrar los datos reduciendo ruido y frecuencias menores aunque se puede recomendar el uso del promedio móvil para el filtrado de datos, en la tesis se tomó la forma más sencilla de filtrado, usando promedios de 1 hora y 1 día.
- d) Para una mejor representación de las profundidades que representen a la oxiclina y al núcleo es necesario tener mayor cantidad de datos de perfiles teniendo en cuenta que el proyecto AMOP solo contó con 5 sensores a diferentes profundidades en el anclaje describiendo las variaciones durante todo el año de P, T, S y O_2 .
- e) Para la descripción de la variabilidad intra-diaria por forzamiento de vientos es necesario tener series temporales de vientos a esa misma escala (cada

hora) en la zona del anclaje. Esto llevaría a una mejor descripción de las interacciones aire-océano.

f) Para la descripción de corrientes de cizalladura, que podría afectar la variabilidad del oxígeno en diferentes escalas temporales y brindar una descripción más detallada de las corrientes presentes con influencia sobre la ZMO, es necesario tener datos de corrientes la cual es una limitante en esta tesis.

g) Finalmente, el uso de modelos a dicho sistema acoplado físico-biogeoquímico nos permitiría interpretar los datos en términos de mecanismos tanto físicos como biogeoquímicos y probar las hipótesis que se han planteado en la tesis para explicar las diferentes escalas de variabilidad temporal observada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BJORNSSON, H., AND VENEGAS, S. A manual for eof and svd analyses of climatic data. *CCGCR Report 97*, 1 (1997).
- [2] BOPP, L., LE QUÉRE, C., HEIMANN, M., MANNING, A., AND MONFRAY, P. Climate-induced oceanic oxygen fluxes: Implications for the contemporary carbon budget. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 2 (2002), 6–1.
- [3] BOUCHARTEL, J., DEWITTE, B., DU PENHOAT, Y., GAREL, B., YEH, S.-W., AND KUG, J.-S. Enso nonlinearity in a warming climate. *Climate dynamics* 37, 9-10 (2011), 2045–2065.
- [4] CLARKE, A. Low-frequency reflection from a nonmeridional eastern ocean boundary and the use of coastal sea level to monitor eastern pacific equatorial kelvin waves. *Journal of physical oceanography* 22, 2 (1992), 163–183.
- [5] CZESCHEL, R., STRAMMA, L., SCHWARZKOPF, F., GIESE, B., FUNK, A., AND KARSTENSEN, J. Middepth circulation of the eastern tropical south pacific and its link to the oxygen minimum zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 116, C1 (2011).
- [6] DAUBECHIES, I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *Information Theory, IEEE Transactions on* 36, 5 (1990), 961–1005.

- [7] DEWITTE, B., ILLIG, S., RENAULT, L., GOUBANOVA, K., TAKAHASHI, K., GUSHCHINA, D., MOSQUERA, K., AND PURCA, S. Modes of covariability between sea surface temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of peru from satellite observations (2000–2008). *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 116, C4 (2011).
- [8] DIAZ, R. J., AND ROSENBERG, R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *science* 321, 5891 (2008), 926–929.
- [9] ENFIELD, D., CORNEJO-RODRIGUEZ, M., SMITH, R., AND NEWBERGER, P. The equatorial source of propagating variability along the peru coast during the 1982–1983 el niño. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 92, C13 (1987), 14335–14346.
- [10] FARGE, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual review of fluid mechanics* 24, 1 (1992), 395–458.
- [11] GARAY DE PABLO, J. Transformadas matemáticas en teoría de señales. *Discurso de Ingreso* (1998).
- [12] GARRETT, C., AND KUNZE, E. Internal tide generation in the deep ocean. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 39 (2007), 57–87.
- [13] GRUBBS, F. Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics* 11, 1 (1969), 1–21.
- [14] GU, D., AND PHILANDER, S. Secular changes of annual and interannual variability in the tropics during the past century. *Journal of Climate* 8, 4 (1995), 864–876.
- [15] GUTIÉRREZ, D., ENRIQUEZ, E., PURCA, S., QUIPÚZCOA, L., MARQUINA, R., FLORES, G., AND GRACO, M. Oxygenation episodes on the continental shelf of central peru: Remote forcing

- and benthic ecosystem response. *Progress in Oceanography* 79, 2 (2008), 177–189.
- [16] HORMAZÁBAL, S., SHAFFER, G., SILVA, N., AND NAVARRO, E. The Perú-chile undercurrent and the oxygen minimum zone variability off central Chile. *Gayana* 70 (2006), 37–45.
- [17] ILLIG, S., DEWITTE, B., GOUBANOVA, K., CAMBON, G., BOUCHARREL, J., MONETTI, F., ROMERO, C., PURCA, S., AND FLORES, R. Forcing mechanisms of intraseasonal SST variability off central Peru in 2000–2008. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119, 6 (2014), 3548–3573.
- [18] LEDESMA, J., T. J. G. M. L. V. F. G. Y. M. O. Variabilidad espacio-temporal del espesor y la profundidad del límite superior de la zona de mínima de oxígeno (ZMO) en el norte del ecosistema de la corriente de Humboldt. Tech. rep., IMARPE, 2013.
- [19] MONTES, I., COLAS, F., CAPET, X., AND SCHNEIDER, W. On the pathways of the equatorial subsurface currents in the eastern equatorial Pacific and their contributions to the Peru-Chile undercurrent. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 115, C9 (2010).
- [20] MONTES, I., DEWITTE, B., GUTKNECHT, E., PAULMIER, A., DADOU, I., OSCHLIES, A., AND GARÇON, V. High-resolution modeling of the eastern tropical Pacific oxygen minimum zone: Sensitivity to the tropical oceanic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119, 8 (2014), 5515–5532.
- [21] MORALES, C., HORMAZÁBAL, S. E., AND BLANCO, J. Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18–24s):

- Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research* 57, 6 (1999), 909–932.
- [22] MOSQUERA, K. Variabilidad intra-estacional de la onda de kelvin ecuatorial en el pacífico (2000-2007): Simulación numérica y datos observados.
- [23] MOSQUERA, K. Ondas kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico. Tech. rep., 2014.
- [24] MOSQUERA, K., DEWITTE, B., AND ILLIG, S. The central pacific el niño intraseasonal kelvin wave. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119, 10 (2014), 6605–6621.
- [25] MOSQUERA, K., DEWITTE, B., ILLIG, S., TAKAHASHI, K., AND GARRIC, G. The 2002/2003 el nino: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118, 1 (2013), 346–357.
- [26] MOSQUERA, K., DEWITTE, B., AND LAGOS, P. *Variabilidad Intra-estacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados*. PhD thesis, Tesis para optar el grado de Magíster en Física-Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2009.
- [27] MÜLLER, P., AND BRISCOE, M. Diapycnal mixing and internal waves. In *Dynamics of oceanic internal gravity waves, II. Proceedings Aha Hulikoa Hawaiian Winter Workshop* (1999), DTIC Document, pp. 289–294.
- [28] MUNK, W. Internal waves and small-scale processes. *Evolution of physical oceanography* (1981), 264–291.
- [29] OCONNOR, B., FINE, R. A., MAILLET, K., AND OLSON, D. Formation rates of subtropical underwater in the pacific ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 49, 9 (2002), 1571–1590.

- [30] PAULMIER, A., AND RUIZ-PINO, D. Oxygen minimum zones (omzs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography* 80, 3 (2009), 113–128.
- [31] PAULMIER, A., RUIZ-PINO, D., GARÇON, V., AND FARIAS, L. Maintaining of the eastern south pacific oxygen minimum zone (omz) off chile. *Geophysical Research Letters* 33, 20 (2006).
- [32] ROGERS, A. The role of the oceanic oxygen minima in generating biodiversity in the deep sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 47, 1 (2000), 119–148.
- [33] RYABENKO, E., KOCK, A., BANGE, H., ALTABET, M., AND WALLACE, D. Contrasting biogeochemistry of nitrogen in the atlantic and pacific oxygen minimum zones. *Biogeosciences (BG)* 9 (2012), 203–215.
- [34] SCHUNCK, H., LAVIK, G., DESAI, D., GROSSKOPF, T., KALVELAGE, T., LÖSCHER, C. R., PAULMIER, A., CONTRERAS, S., SIEGEL, H., HOLTAPPELS, M., ET AL. Giant hydrogen sulfide plume in the oxygen minimum zone off peru supports chemolithoautotrophy. *PLoS One* 8, 8 (2013), e68661.
- [35] SEIBEL, B. Critical oxygen levels and metabolic suppression in oceanic oxygen minimum zones. *The Journal of experimental biology* 214, 2 (2011), 326–336.
- [36] SHAFFER, G., PIZARRO, O., DJURFELDT, L., SALINAS, S., AND RUTLLANT, J. Circulation and low-frequency variability near the chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991-92 el niño. *Journal of Physical Oceanography* 27, 2 (1997), 217–235.

- [37] ST. LAURENT, L., AND GARRETT, C. The role of internal tides in mixing the deep ocean. *Journal of Physical Oceanography* 32, 10 (2002), 2882–2899.
- [38] STRAMMA, L., JOHNSON, G., SPRINTALL, J., AND MOHRHOLZ, V. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *science* 320, 5876 (2008), 655–658.
- [39] STRUB, P., MONTECINO, V., RUTLLANT, J., AND SALINAS, S. . coastal ocean circulation off western south america. *The global coastal ocean: regional studies and syntheses* 11 (2005), 273.
- [40] TALLEY, L. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press, 2011.
- [41] TORRENCE, C., AND COMPO, G. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society* 79, 1 (1998), 61–78.
- [42] WANG, B. Dynamics of tropical low-frequency waves: An analysis of the moist kelvin wave. *Journal of the atmospheric sciences* 45, 14 (1988), 2051–2065.
- [43] WENG, H., AND LAU, K. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western pacific. *Journal of the atmospheric sciences* 51, 17 (1994), 2523–2541.
- [44] WUNSCH, C., AND GILL, A. Observations of equatorially trapped waves in pacific sea level variations. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* (1976), vol. 23, Elsevier, pp. 371–390.
- [45] YARLEQUÉ, C. *Análisis de campos de biomasa del altiplano usando wavelet y parámetros universales multifractales*. PhD thesis, Tesis de Licenciatura en Física, 2009.

[46] ZUTA, S., AND GUILLÉN, O. Oceanografía de las aguas costeras del Perú. Tech. rep., IMARPE, 1970.

ANEXOS

A. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
<p>Problema General: A escala intra-anual, ¿la variabilidad de la zona de mínimo oxígeno frente al Perú se vera afectado por forzamientos físicos?</p> <p>Problemas Específicos:</p> <ol style="list-style-type: none"> ¿Cuáles son las escalas de tiempo en el rango de frecuencia (de 1 hora a 3 meses) asociadas a la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente al Perú? ¿Cuáles serán los mecanismos físicos que intervienen en la variación de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) a estas escalas de tiempo frente al Perú? 	<p>Objetivo general: Caracterizar las diferentes escalas de variabilidad intra-anual de la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) frente al Perú debido a forzamientos físicos.</p> <p>Objetivos Específicos:</p> <ol style="list-style-type: none"> Alta frecuencia (< 1 día) relacionado a marea y ondas internas. Baja frecuencia (entre 1 y 30 días) relacionado con la variabilidad sinóptica-atmosférica. Baja frecuencia (entre 30 y 90 días) relacionado con ondas de período largo (ej.: ondas atrapadas en la costa). 	<p>Hipótesis General: Los forzamientos físicos producen en las Zonas de Mínimo Oxígeno (ZMO) frente al Perú, variabilidades a escalas intra-anales.</p> <p>Hipótesis Específica:</p> <ol style="list-style-type: none"> Alta frecuencia (< 1 día) el oxígeno se ve afectado por la marea interna. Baja frecuencia (entre 1 y 90 días) el oxígeno se ve afectado por ondas de período largo y/o variabilidad sinóptica. 	<p>Tipo de Investigación: La investigación es de tipo cuasi-experimental y aplicada.</p> <p>Método y diseño de la investigación:</p> <ul style="list-style-type: none"> El diseño de la investigación es descriptiva. La investigación se desarrolla con el tiempo y la profundidad como variables indirectas y la concentración de oxígeno como variable directa. 	<p>Población: Concentraciones de oxígeno tomados de los 5 sensores del proyecto AMOP.</p> <p>Muestra: Conformada por las dos series de tiempo de 30 y 145 metros de profundidad que representan a la oxiclina y al núcleo de la ZMO.</p>

B. Teoría complementaria del análisis wavelet

En esa parte se detallará como se obtiene la localización del tiempo-frecuencia del espectro de potencias wavelet.

B.1. Localización en términos de frecuencia-tiempo usando wavelet

En orden de comprender las características de la transformada wavelet en el dominio de la frecuencia, es útil reconocer que la transformada wavelet $Wf(\lambda, t)$ usando el teorema de Parseval puede ser representado de la siguiente forma:

$$Wf(\lambda, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{f}(\omega) \overline{\widehat{\psi}_{\lambda,t}(\omega)} d\omega$$

Se define el centro de masa o también llamado primer momento respecto al origen:

$$W^0 \widehat{f}_{\lambda,t} = \frac{\int_0^{\infty} W |\widehat{f}_{\lambda,t}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\infty} |\widehat{f}_{\lambda,t}(\omega)|^2 d\omega}$$

Se define las desviaciones estándares $\sigma_{\widehat{f}_{\lambda,t}}$ y $\sigma_{f_{\lambda,t}}$ como:

$$\sigma_{\widehat{f}_{\lambda,t}} = \left(\int_0^{\infty} (W - W^0_{\widehat{f}_{\lambda,t}})^2 |\widehat{f}_{\lambda,t}(\omega)|^2 d\omega \right)^{1/2}$$

$$\sigma_{f_{\lambda,t}} = \left(\int_0^{\infty} (u - t_0)^2 |f_{\lambda,t}(u)|^2 du \right)^{1/2}$$

donde t_0 se obtiene:

$$t_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} u |f_{\lambda,t}(u)| du}{\int_{-\infty}^{\infty} |f_{\lambda,t}(u)| du}$$

Las propiedades más importantes son:

- **Desviación estándar:** $\sigma_{f_{\lambda,t}}$, que satisface:

$$\sigma_{f_{\lambda,t}} = \lambda \sigma_{f_{1,0}}$$

- **Desviación estándar:** $\sigma_{\hat{f}_{\lambda,t}}$, que satisface:

$$\sigma_{\hat{f}_{\lambda,t}} = \frac{\sigma_{f_{1,0}}}{\lambda}$$

- **Centro de banda pasante:** $W^0 \hat{f}_{\lambda,t}$, corresponde al wavelet $f_{\lambda,t}(u)$, que satisface la relación:

$$W^0 \hat{f}_{\lambda,t} = \frac{W^0_{\hat{f}_{1,0}}}{\lambda}$$

Finalmente, en las transformadas wavelet, la incertidumbre es controlada, esto es debido a las diversas propiedades importantes que presentan los valores de desviación estándar de los parámetros de escala y de translación temporal.

C. Espectro de potencias wavelet para los parámetros físicos (P, T, S y vientos)

C.1. Escala intra-diaria

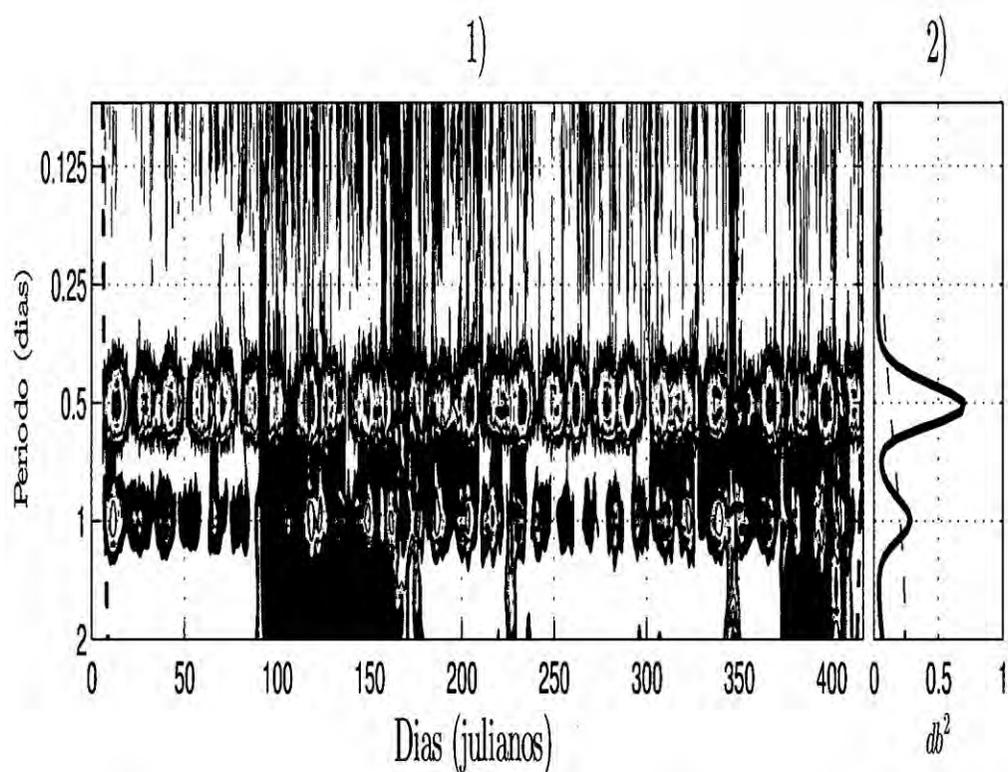


Figura C.1: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la presión a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno y diurno significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

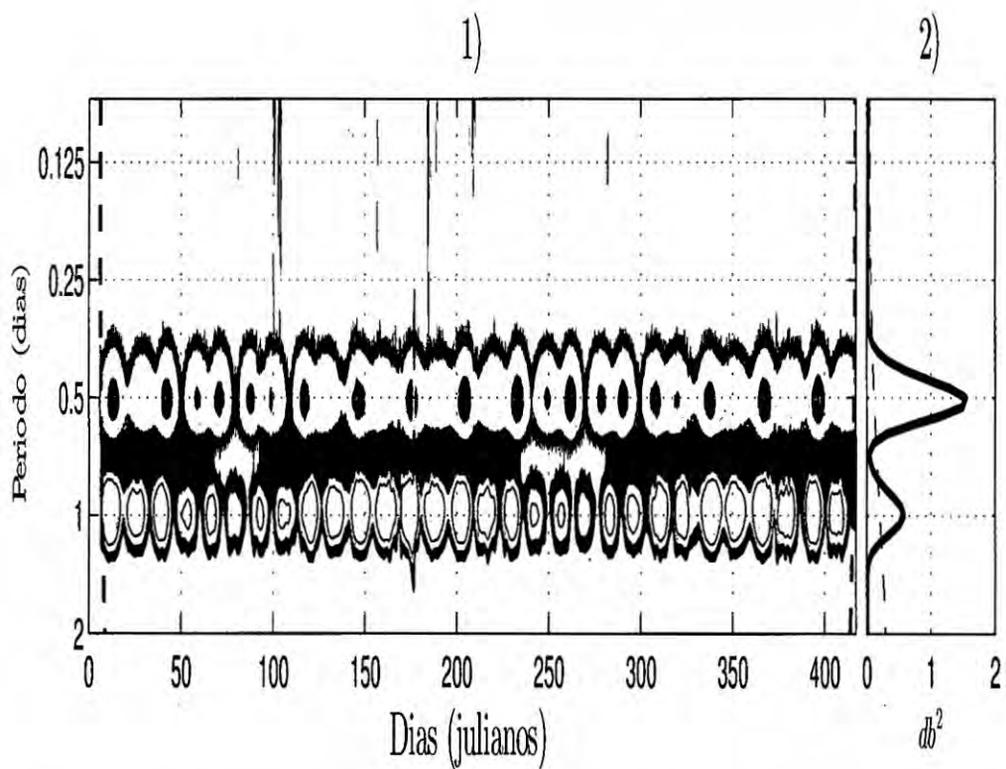


Figura C.2: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la presión a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno y diurno significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

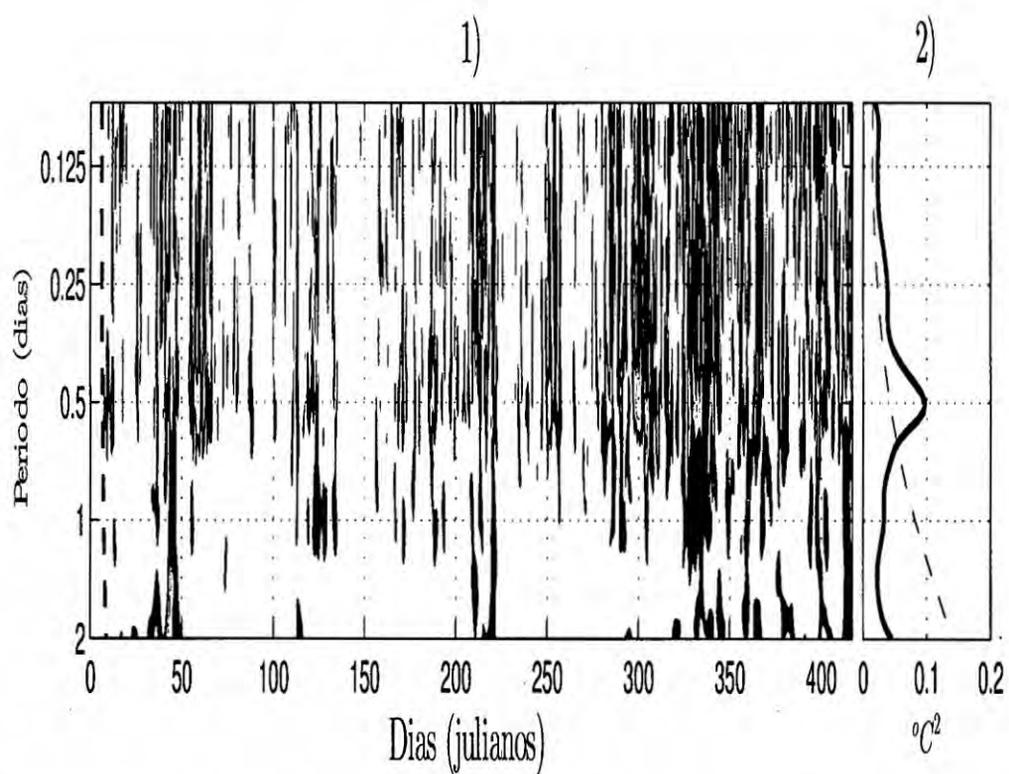


Figura C.3: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la temperatura a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno significativo dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde el máximo significativo se muestra a la derecha.

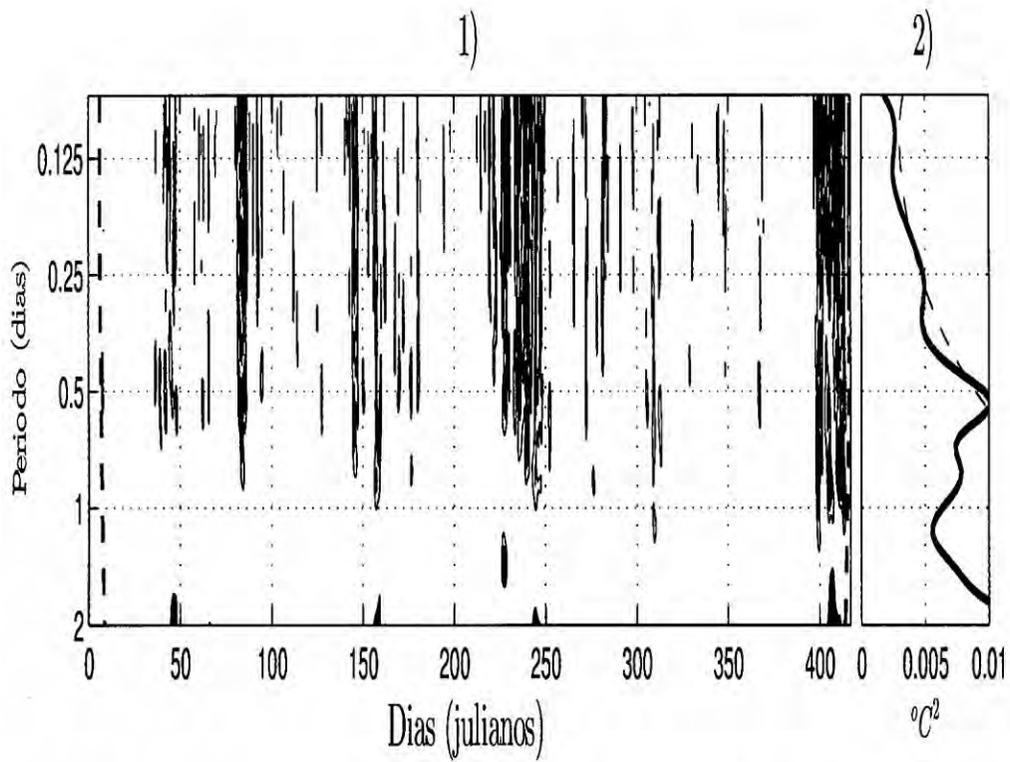


Figura C.4: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la temperatura a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando encontrarse cercano al nivel de significancia (línea punteada).

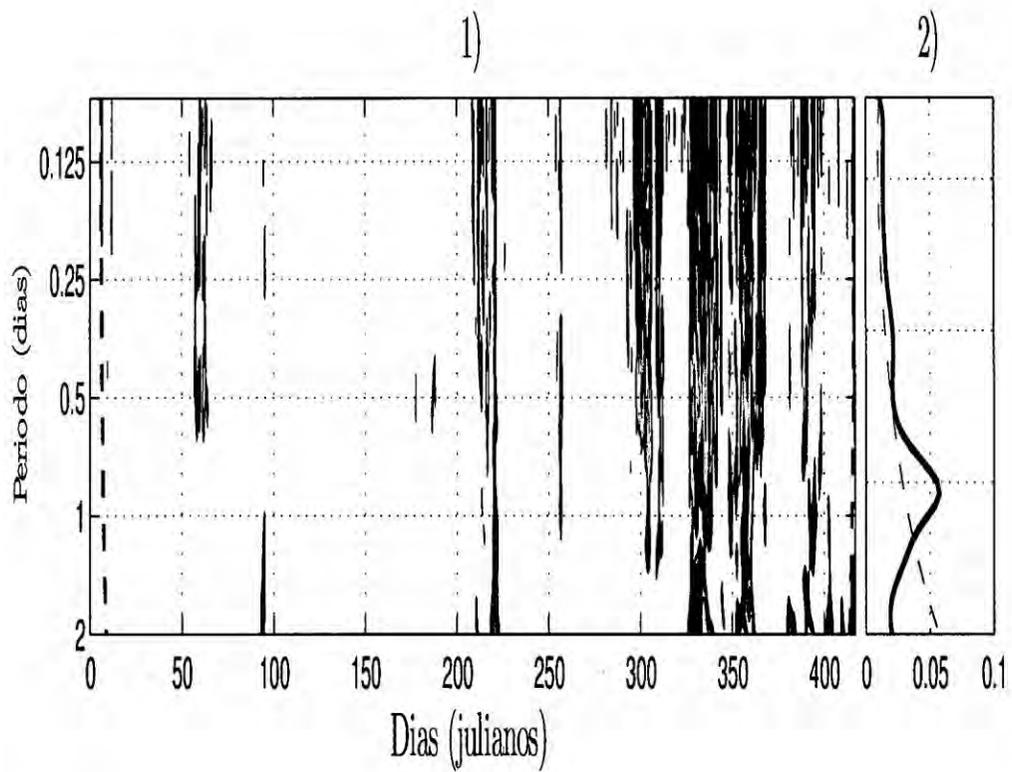


Figura C.5: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la salinidad a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando el período semi-diurno significativo dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde el máximo significativo se muestra a la derecha.

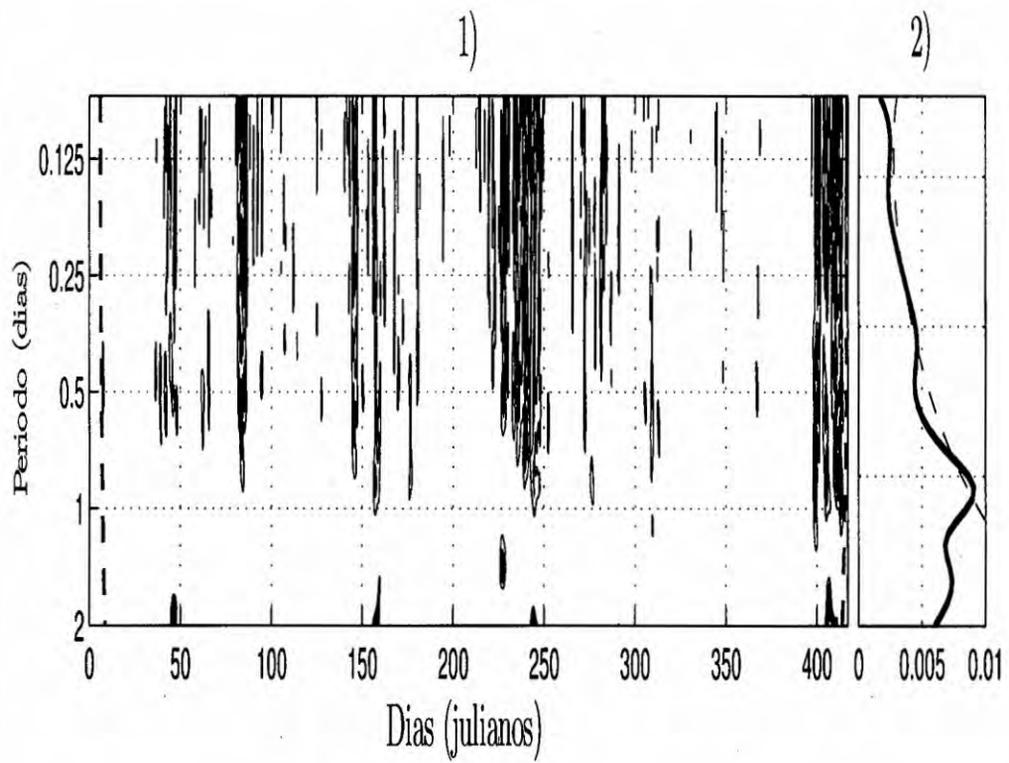


Figura C.6: Análisis espectral wavelet de la banda intra-diaria de la salinidad a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando encontrarse cercano al nivel de significancia (línea punteada).

C.2. Escala intra-mensual e intra-estacional

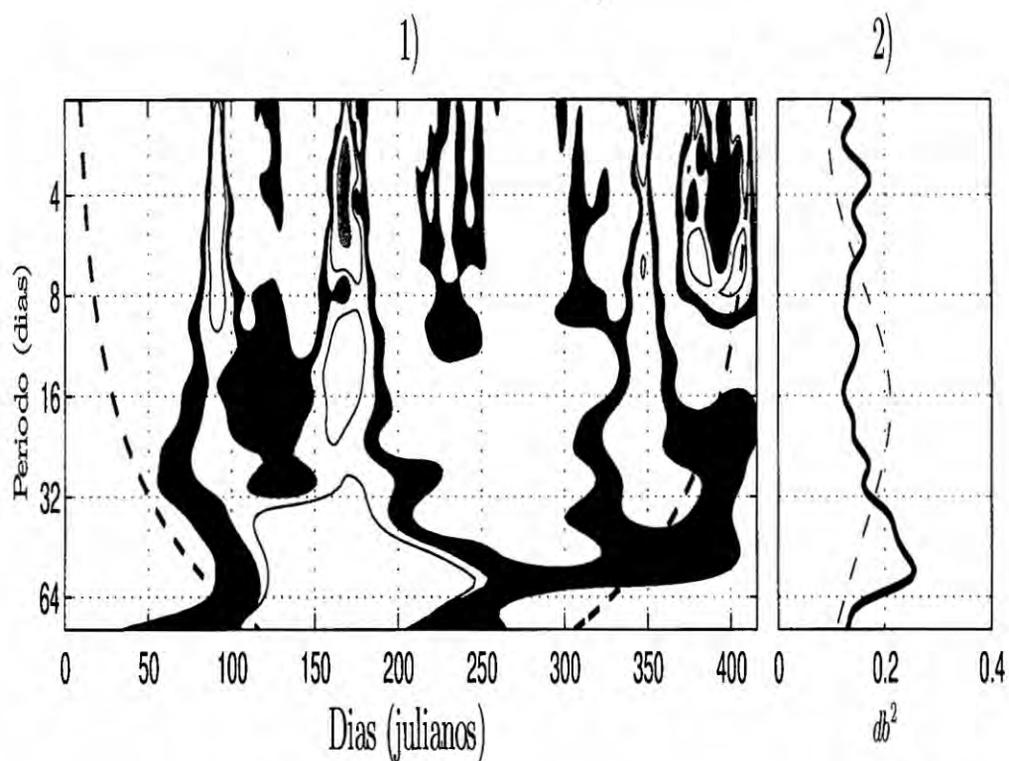


Figura C.7: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la presión a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

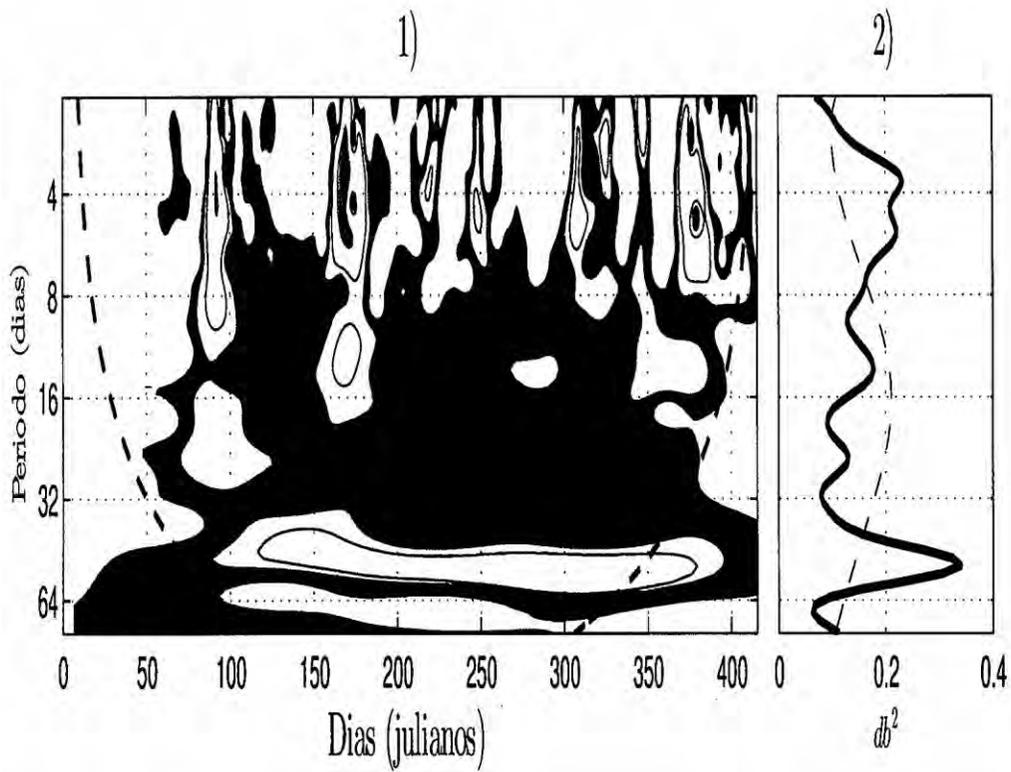


Figura C.8: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la presión a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

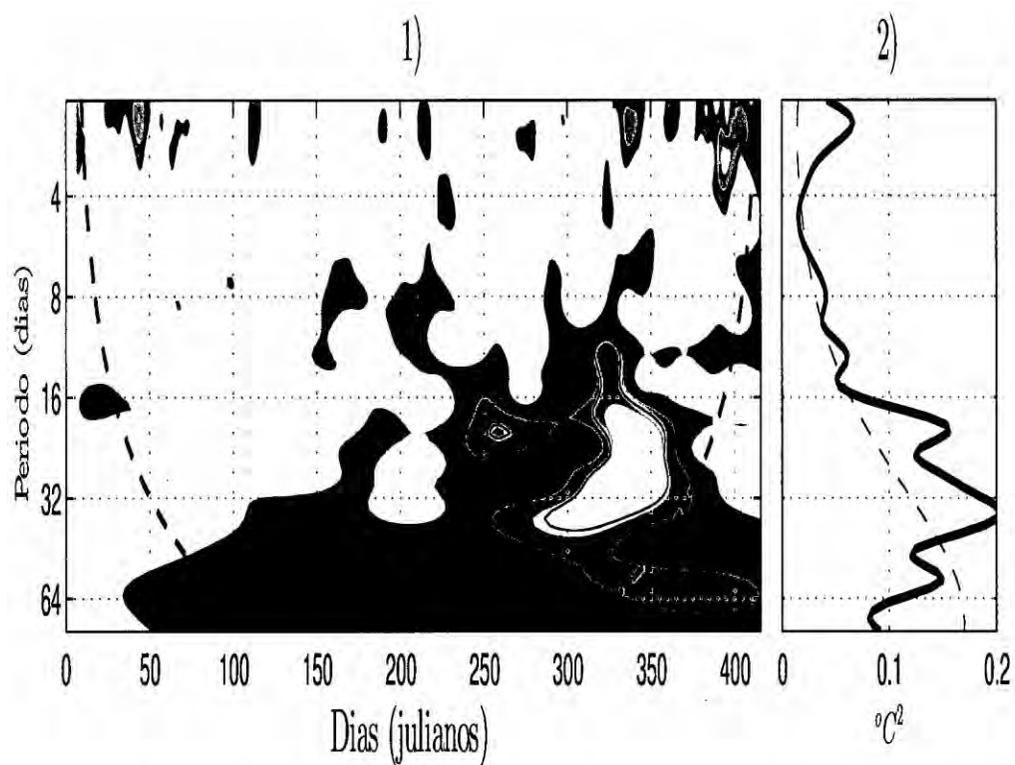


Figura C.9: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la temperatura a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

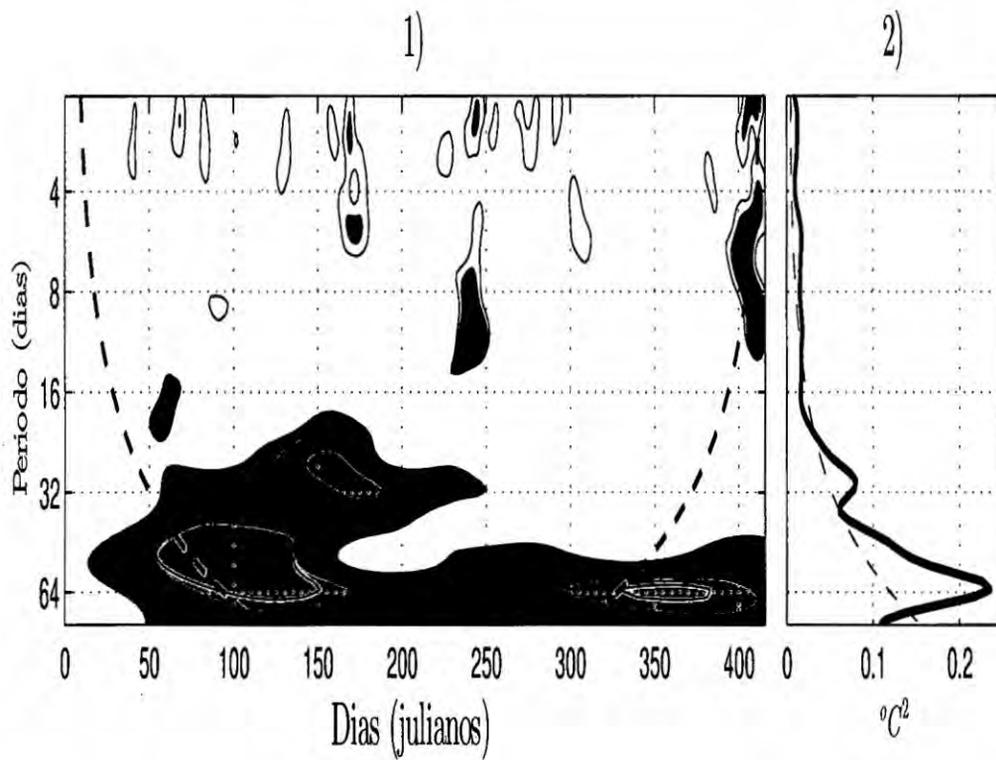


Figura C.10: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la temperatura a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

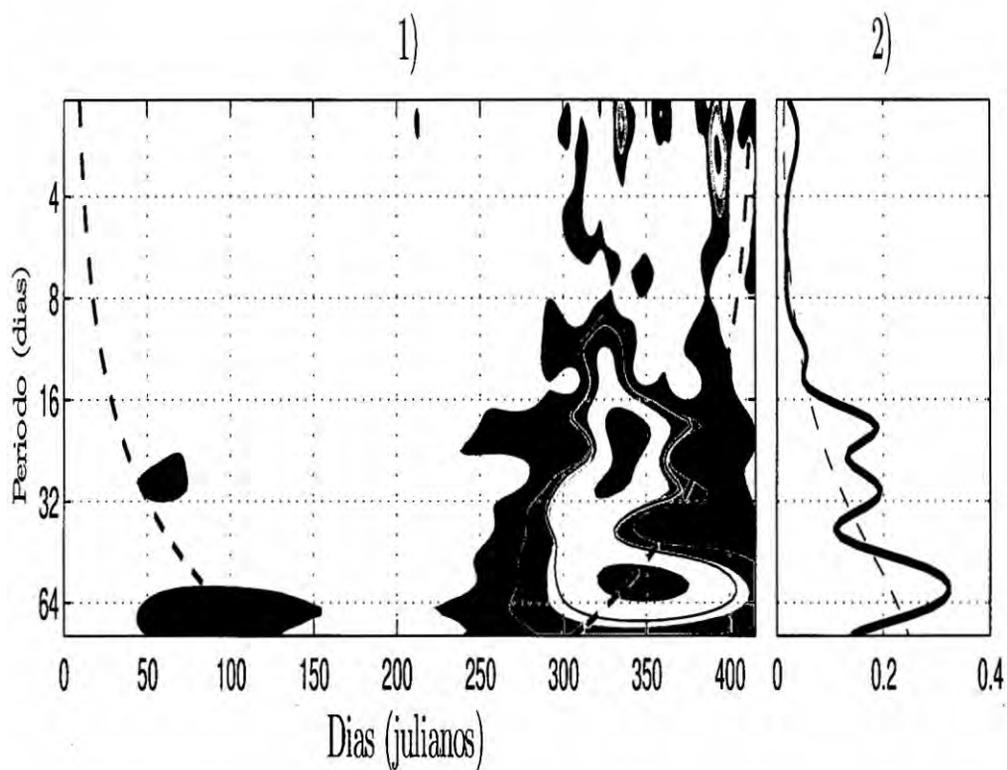


Figura C.11: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la salinidad a la profundidad de 30 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

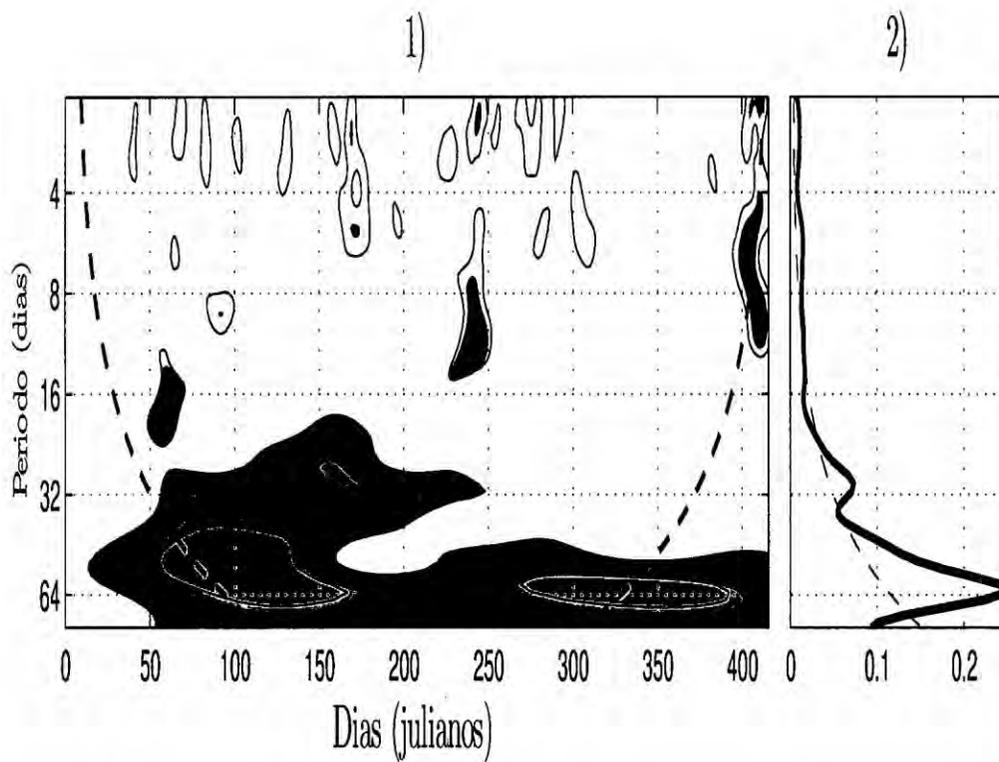


Figura C.12: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de la salinidad a la profundidad de 145 metros. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

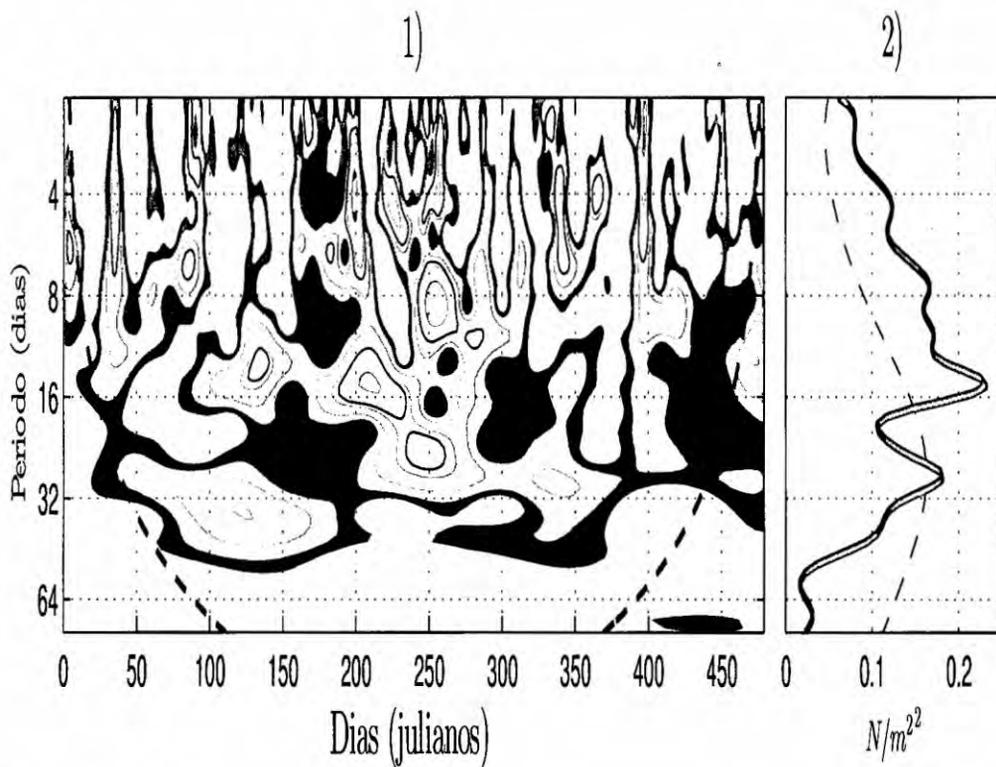


Figura C.13: Análisis espectral wavelet de la banda intra-mensual e intra-estacional de vientos locales. 1) Espectro de potencia wavelet normalizado mostrando la distribución de la energía espectral durante todo el año; 2) Espectro de potencias wavelet global (línea azul) mostrando los períodos intra-mensuales e intra-estacionales significativos dentro de esta banda y el nivel de significancia (línea punteada) donde los máximos significativos se muestran a la derecha.

C.3. Períodos dominantes en los forzantes físicos

Profundidad representativa	Parámetro físico	Período representativo
Oxiclina	Presión	11.96 y 23.92 horas
	Temperatura	11.96 horas
	Salinidad	12.53 horas
Núcleo	Presión	11.96 y 23.92 horas
	Temperatura	13.12 horas
	Salinidad	13.12 horas

Tabla C.1: Períodos dominantes en la variabilidad intra-diaria para los diferentes mecanismos físicos.

Profundidad representativa	Parámetro físico	Período representativo
Oxiclina	Presión	3.74, 5.56 y 49.18 días.
	Temperatura	2.52, 8.26, 12.28 y 33.08 días.
	Salinidad	3.07, 18.26, 33.08 y 59.92 días.
Núcleo	Presión	3.74, 5.56 y 49.18 días.
	Temperatura	59.92 días.
	Salinidad	59.92 días.
	Vientos locales	4.56, 14.98 y 27.13 días.

Tabla C.2: Períodos dominantes en la variabilidad intra-mensual (1-8 y 8-15 días) e intra-estacional (15-90 días) para los diferentes mecanismos físicos.

D. Criterio para detectar eventos de oxigenación por mecanismos físicos

Se muestra los resultados comparando las energías espectrales obtenidas de las 5 profundidades con sus respectivas series de tiempo. Estos resultados serán

tomados como criterio para detectar el valor límite donde ocurren los eventos de oxigenación debido a mecanismos físicos tales como ondas y vientos. Los resultados que se muestran menores al valor límite son considerados por otros mecanismos (ej.: biogeoquímica).

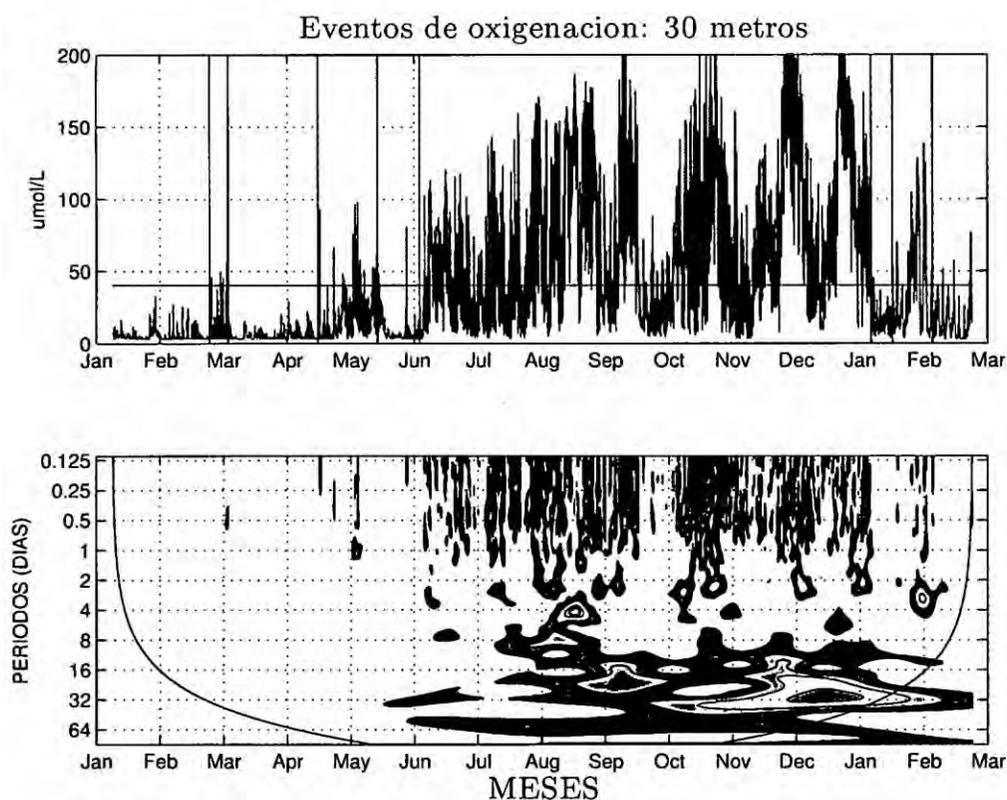


Figura D.14: Eventos de oxigenación para la profundidad de 30 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $50 \mu\text{mol/L}$.

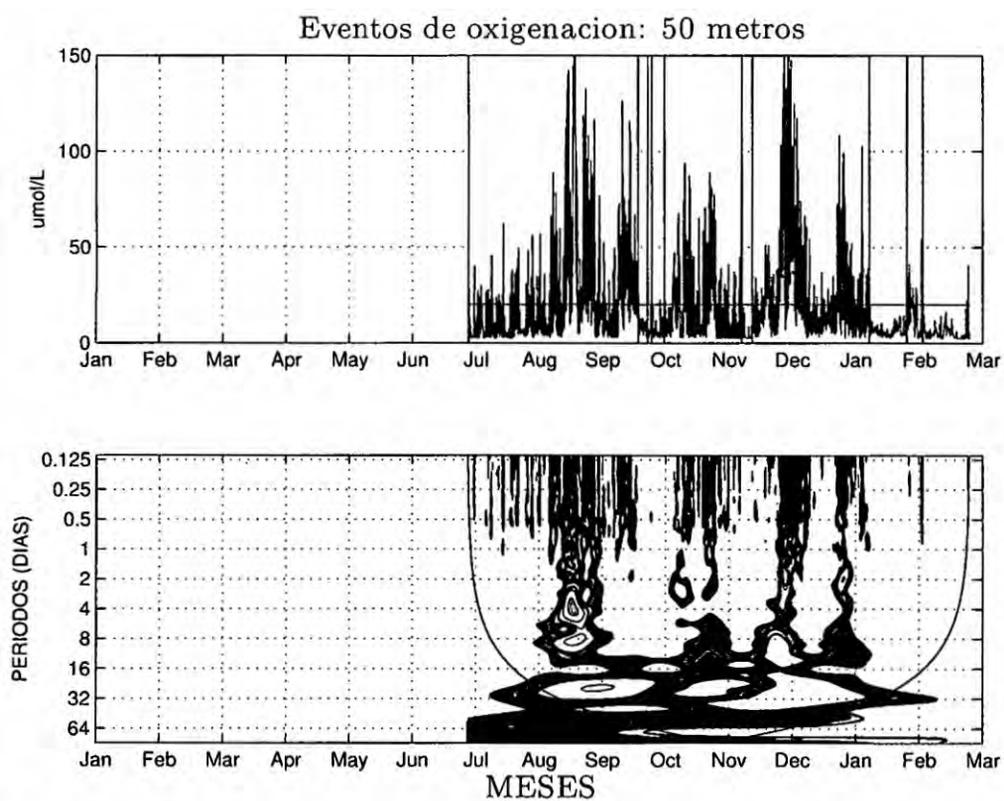


Figura D.15: Eventos de oxigenación para la profundidad de 50 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $20 \mu\text{mol/L}$.

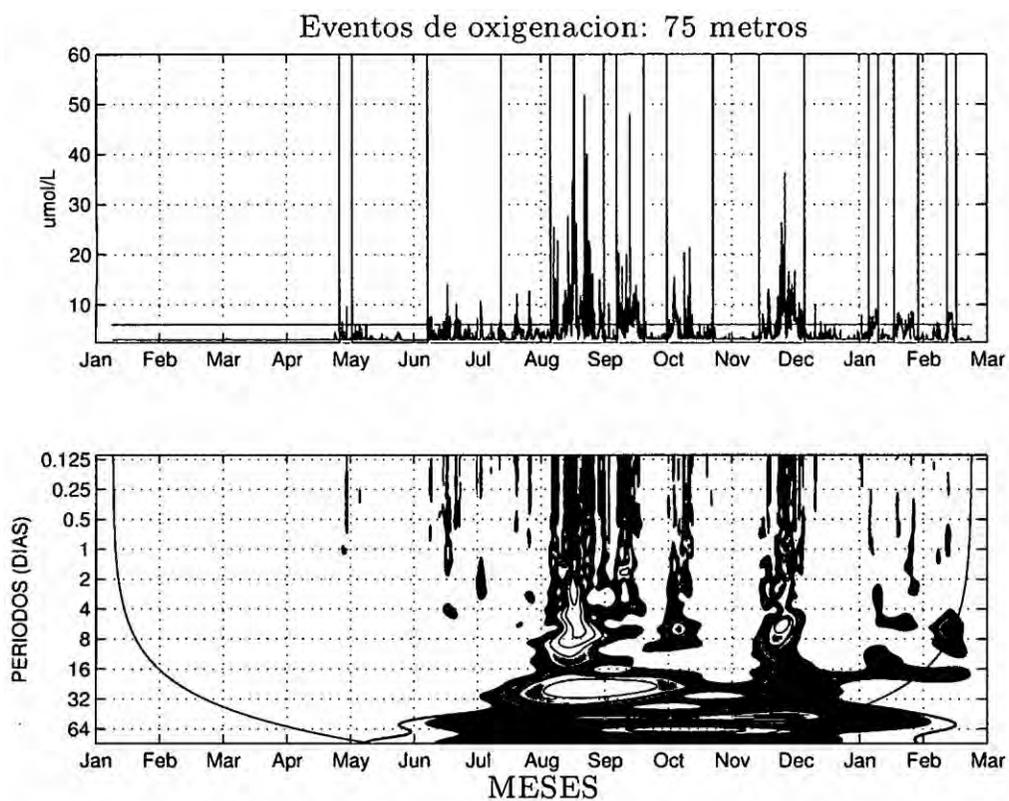


Figura D.16: Eventos de oxigenación para la profundidad de 75 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $6 \mu\text{mol/L}$.

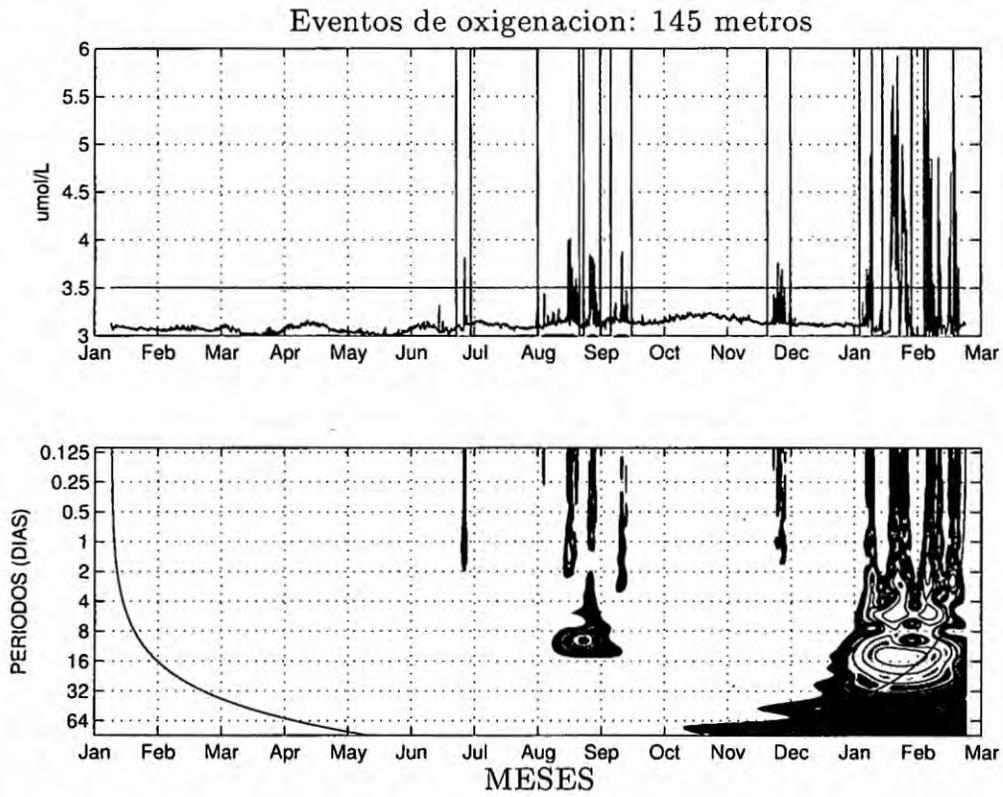


Figura D.17: Eventos de oxigenación para la profundidad de 145 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $3.5 \mu\text{mol/L}$.

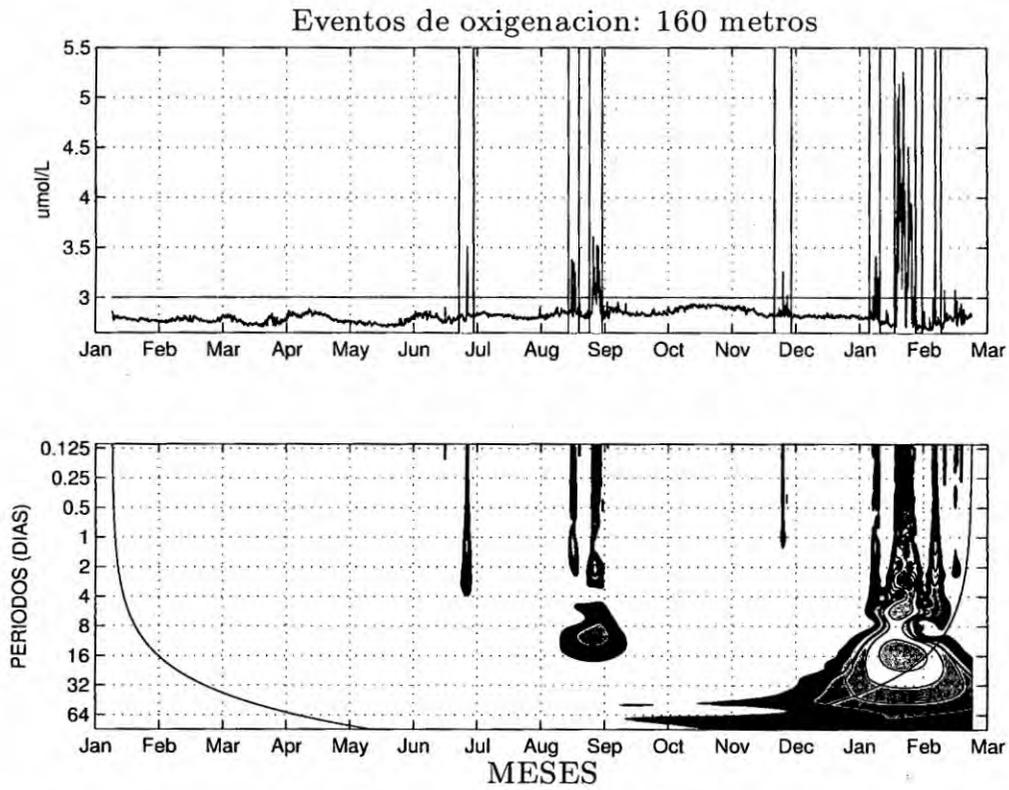


Figura D.18: Eventos de oxigenación para la profundidad de 160 metros comparando la serie de tiempo (figura superior) con el EPWN (figura inferior). La energía espectral wavelet significativa refleja los eventos de oxigenación por ondas y/o vientos en la serie temporal. El valor límite (línea horizontal negra en la serie de tiempo) para ser considerado evento de oxigenación por mecanismos físicos es de $3 \mu\text{mol/L}$.