Índice

Estructura y resumen

xi

1 Antecedentes

1.1	Introducción	1
1.2	Imágenes de satélite	4
1.3	Aplicaciones de las imágenes de satélite en oceanografía	5
1.4	Aplicaciones de las imágenes NOAA	7
1.5	Oceanografía de la zona	9
1.5.1	Introducción	9
1.5.2	Corrientes que componen la recirculación del Giro Subtropical del Atlántico Norte	10
1.5.3	El afloramiento costero	18
1.5.4	Actividad a mesoescala	21

2 Datos

2.1	Introducción	27
2.2	Características generales del sensor AVHRR	31
2.3	Tipos de datos	33
2.4	Procesado de los datos del AVHRR	33
2.5	Corrección atmosférica de los datos del sensor AVHRR	37
2.6	Otras perturbaciones de los datos del sensor AVHRR	48

2.6.1 Nubes	48
2.6.2 Dispersión por aerosoles	49
2.6.3 Reflectancia de la superficie del mar	51
2.6.4 Efectos superficiales	51
2.7 Otros datos utilizados	53
2.7.1 Introducción	53
2.7.2 Datos ECMWF	53
2.7.3 Datos COADS	54

3 Procedimiento matemático para la obtención de periodicidades en series temporales no equiespaciadas

3.1 Introducción	57
3.2 Definición y obtención de la expresión del periodograma	59
3.2.1 Análisis espectral por mínimos cuadrados	59
3.2.2 Definición del periodograma por medio del poder espectral	64
3.3 Expresión modificada del periodograma atendiendo a parámetros estadísticos	65
3.4 Normalización del periodograma	68
3.5 Definición de parámetros auxiliares	72
3.6 Ventajas e inconvenientes de la utilización del periodograma	75
3.7 Aplicaciones a simulaciones	78
3.7.1 Determinación de periodicidades en series simuladas con múltiples señales	79
3.7.2 Efecto del ruido	81
3.7.3 Efecto de la pérdida de datos	84
3.7.4 Efecto conjunto del ruido y la pérdida de datos	87
3.7.5 Efecto de la tendencia en las series	90
3.7.6 Efecto de la pérdida de intervalos temporales de datos	94
3.7.7 Principales conclusiones	97

4 Períodos dominantes de las magnitudes físicas

4.1	Introducción	99
4.2	Características generales de las series temporales	100
4.2.1	Periodograma	110
4.2.2	Ajuste de la frecuencia anual	123
4.3	Características generales de las series de residuos	138
4.3.1	Periodograma	142
4.3.2	Ajuste de la frecuencia semianual	152
4.3.3	Análisis espectral de las series temporales de parámetros atmosféricos ECMWF. Determinación de variabilidades semianuales	161
4.3.3.1	Variabilidad de las series del módulo de la tensión del viento	163
4.3.3.2	Variabilidad de las series de la componente u de la tensión del viento	168
4.3.3.3	Variabilidad de las series de la componente v de la tensión del viento	174
4.3.3.4	Variabilidad de las series de presión atmosférica	179
4.3.3.5	Variabilidad de las series de la componente z del rotacional de la tensión del viento	185
4.4	Características generales de las series de residuos de los residuos	195
4.4.1	Periodograma	198
4.4.2	Ajuste de la frecuencia de cuatro años	205
4.4.3	Análisis espectral de las series temporales de parámetros atmosféricos COADS. Determinación de variabilidades de cuatro años	208
4.4.3.1	Variabilidad de las series del módulo de la tensión del viento	210
4.4.3.2	Variabilidad de las series de la componente v de la tensión del viento	214

4.4.3.3 Variabilidad de las series de la componente u de la tensión del viento	219
4.4.3.4 Variabilidad de las series de presión atmosférica	223
4.5 Análisis de las series de residuos de tercer orden	232
4.6 Comparación de resultados con datos COADS de temperatura superficial del mar	233
Conclusiones y principales aportaciones	255
Áreas de futuras investigaciones	261
Referencias	263
Apéndice A Parámetros estadísticos y matemáticos	
A.1 Variables estadísticas	275
A.2 Polinomios de ajuste	276
A.3 Ajuste de mínimos cuadrados por regresión múltiple de tres coeficientes	277
A.4 Coeficiente de determinación r^2	278
A.5 Determinación de correlaciones	280
Apéndice B Determinación de rotacionales de la tensión del viento	
B.1 Cálculo de la tensión del viento	281
B.2 Definición del rotacional	281
B.3 Cálculo de derivadas de funciones numéricas por extrapolación al límite	282
B.4 Interpolación por splines	287

Estructura y resumen de este trabajo

El objetivo de este trabajo es el estudio de las variabilidades de las magnitudes físicas características de la superficie del mar, así como de su interacción y forzamientos con las variables atmosféricas. Para ello se han seleccionado tres bases de datos que permiten un estudio sinóptico de la superficie del océano; del sensor remoto *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), los históricos *Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set* (COADS) y los atmosféricos del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

En el primer capítulo introducimos las características principales de las imágenes de satélite, así como sus aplicaciones en oceanografía. Además, describimos los sensores utilizados con mayor frecuencia indicando bajo que condiciones y a que tipo de fenómenos son los datos que suministran.

También hacemos una descripción de las principales características oceanográficas de la región. Nos ceñimos a los fenómenos superficiales por ser los únicos de los que se puede extraer información a partir de las imágenes de satélite. La estructura de esta descripción se organiza en función de la escala espacial de los fenómenos. Esto nos lleva a analizar las corrientes, los afloramientos y los fenómenos a mesoescala. No obstante, la oceanografía de la región no la abordamos con profundidad por haber sido descrita en otros trabajos de este Departamento.

En el capítulo 2 exponemos tras una breve descripción del sensor AVHRR, el método seguido para el procesamiento de los datos suministrado por este sensor hasta la obtención de la temperatura superficial del mar. Analizamos también los

problemas que pueden aparecer una vez realizada corrección atmosférica, tales como la presencia de aerosoles en la atmósfera, la presencia de nubes o los efectos superficiales. También describimos en este capítulo segundo las principales características de otros datos utilizados en este trabajo (COADS y ECMWF).

El capítulo 3 lo dedicamos al análisis del método que permite la determinación de variabilidades en series temporales, atendiendo de forma especial el caso de las no equiespaciadas. Para establecer la eficiencia del método se propone un conjunto de aplicaciones a series de diversa índole que permiten delimitar sus prestaciones.

El capítulo 4 aborda el estudio de la variabilidad en la temperatura superficial del mar a partir de series temporales elaboradas de imágenes del sensor AVHRR. Tras una serie de pruebas y cálculos de parámetros preliminares se le aplica un primer estadístico que permite a priori determinar la presencia de variabilidades (el test de Durbin-Watson). Esto nos lleva a realizar el análisis espectral por medio del periodograma, que detecta de forma generalizada la presencia del armónico anual asociado a la estacionalidad.

El armónico anual detectado lo ajustamos por medio de una función armónica sinusoidal y lo extraemos de las series, con lo que obtenemos el conjunto de series de residuos.

Las series de residuos son tratadas con el mismo procedimiento detectando en ellas la presencia de otro armónico de período semianual. La presencia de este segundo armónico no está generalizada, puesto que sólo se presenta en la zona central de la región.

Hemos determinado la forma en la que interfieren los dos armónicos para determinar sus efectos climáticos. En toda la zona en la que coexisten los dos armónicos la inferencia es del tipo centrada en los valores medios, con máximos y mínimos casi estables pero acelerando el tránsito en una de las caras de la sinusoide

y retardando el otro. A nivel climático supone un ligero aumento de las temperaturas mínimas invernales, un tránsito desde el invierno al verano rápido y un otoño más duradero por el retardo en el tránsito verano invierno.

La presencia de este segundo armónico no es sencilla de explicar en términos físicos, en principio no existe un campo de fuerzas al que atribuir directamente el origen de esta segunda periodicidad. Tras una intensa búsqueda en la literatura llegamos a la conclusión de que este segundo armónico debe estar relacionado con efectos de propiedades atmosféricas.

Para determinar la posible correlación entre la variabilidad semianual en la temperatura superficial y las variables atmosféricas, se ha recurrido a los datos ECMWF. Realizamos el análisis espectral de series temporales de presión atmosférica, módulo de la tensión del viento y las componentes u y v de la tensión del viento. Ninguna de estas magnitudes presenta variabilidad semianual con la misma distribución que el armónico de igual frecuencia en la temperatura superficial del mar.

Existe una magnitud atmosférica derivada que puede estar tras esta variabilidad, es la componente z del rotacional de la tensión del viento con efectos asociados al bombeo de Ekman. El cálculo los valores de esta magnitud es bastante complejo pues exige, por la vía clásica, el cálculo de derivadas direccionales de funciones numéricas implícitas. Estas derivadas las realizamos por el método numérico de extrapolación al límite, auxiliado por splines bidimensionales. Con ello, se obtienen las series de esta nueva magnitud que analizamos en frecuencias. La componente semianual de esta magnitud presenta una distribución análoga al mismo armónico de la temperatura superficial, por lo que parece que estar en el origen de esta variabilidad.

Otro resultado interesante en la presencia de una periodicidad de 25-30 días en las series de la componente z del rotacional de la tensión del viento desde el sur

de Gran Canaria hasta el sur de El Hierro, asociada a fenómenos a mesoescala como el desprendimiento de remolinos al sur de las Islas Canaria.

El armónico semianual se ajusta a una función armónica sinusoidal y se extrae de los residuos, obteniendo un conjunto de series de residuos de los residuos. A estas series se les aplica el mismo procedimiento y se detecta otra señal armónica de período 4 años. Como la zona en la que se detecta esta señal no aparece bien delimitada aumentamos la resolución espacial y construimos una submalla de lado 0.5° en longitud y latitud. Con ella repetimos el proceso y obtenemos las series de residuos de los residuos hasta determinar en su análisis espectral la distribución espacial de este tercer armónico. Lo localizamos al noreste de la Isla de Lanzarote, al sur de las Islas Canarias y en torno a Cabo Verde.

La inferencia de los tres armónicos en las zonas en las que coexisten se traduce en aspectos climáticos en años con veranos más calurosos e inviernos suaves, seguidas a los dos años de veranos suaves e inviernos más fríos.

El origen de este tercer armónico es bastante complicado de explicar en términos físicos. Según la literatura, esta frecuencia no parece estar relacionada con el fenómeno de El Niño, ni con la NAO, ni con variabilidades interanuales en la circulación, tampoco con la generación de ondas de Rossby. Para determinar si alguna magnitud atmosférica está tras esta variabilidad, analizamos en frecuencia series temporales de parámetros atmosféricos COADS. Seleccionamos esta base por estar extendidas a un período temporal lo suficiente largo como para contener armónicos interanuales, lo que no ocurre con la versión que disponemos de los ECMFW.

Como resultado del análisis no encontramos correlaciones entre el armónico detectado y los de mismo período en las magnitudes atmosféricas.

El origen parece estar asociado a las variabilidades de 4 años detectadas en el Atlántico Tropical por el proyecto PIRATA.

El armónico de período 4 años lo extraemos de las series de residuos de los residuos obteniendo las series de residuos de tercer orden. A este nuevo conjunto de series le aplicamos el análisis no detectándose en ellas nuevas periodicidades.

Para finalizar este capítulo, comparamos la variabilidad de los datos de temperatura superficial del sensor AVHRR con los históricos COADS. Destaca la coincidencia en el armónico anual, la diferente distribución geográfica del armónico semianual y la presencia del armónico de 4 años en las mismas zonas salvo al noreste de Lanzarote que no aparece en los históricos y sin embargo presenta una zona con su presencia al sur de la Islas Cabo Verde.