



Anàlisi de velocitats en boies de deriva. El problema de detectar la presència de l'àncora de capa

Ignasi Berenguer Vallès Casanova

Treball Final de Màster

Màster en Canvi Ambiental: Anàlisi i Gestió
Universitat de Girona

Setembre 2014

Tutors:

José Luís Pelegrí Llopart¹
Maria Elena Roget Armengol²

1. Departament de Oceanografia Física i Tecnològica del Institut de Ciències del Mar de Barcelona (ICM-CSIC).

2. Departament de Física Ambiental de la Universitat de Girona.

ABSTRACT

Satellite tracked drifting buoys are a useful lagrangian method of studying ocean surface currents and gaining a better understanding of ocean and climate dynamics. Drifting buoys usually have drogues at 15m depth in order to minimize direct wind force. Recent studies detected anomalous trends in data pertaining to the Global Drifter Program suggesting the presence of undrogued buoys in the drifter database even though the buoys were previously believed to be drogued with submergence or tether sensor. Recently, some methods have been developed to detect drogue loss by analysing the correlation between drifter velocities and wind force using altimetry data. However, the results are not useful for weak wind regions such as subtropical gyres. This study proposes a method of analysing drifter velocity time series so as to detect possible drogue loss events in buoys deployed in the North Atlantic Subtropical Gyre zone during the SPURS campaign in 2013 without using any other external data. The results show a potential methodology to keep working with and an interesting way of describing ocean surface dynamics.

RESUM

Les boies de deriva posicionades per satèl·lit són un mètode lagrangiana útil per caracteritzar corrents oceàniques superficials i avançar en la comprensió de la dinàmica del clima i l'oceà. Les boies de deriva normalment tenen una àncora de capa a una profunditat de 15 m per minimitzar l'efecte directe del vent. Estudis recents han detectat que el conjunt de dades proporcionades per el *Global Drifter Program* contenen error acumulat fruit de boies que han estat erròniament classificades amb presència d'àncora, tot i l'ús d'un sensor de tensió. Recentment s'han desenvolupat metodologies per detectar la pèrdua d'àncora de capa que es basen en un anàlisi de correlació entre les velocitats de les boies i el vent en superfície utilitzant dades altimètriques. Tot i així, els resultats no són útils per zones de vents dèbils com el gir subtropicals. Aquest treball presenta una metodologia basada en l'anàlisi de les sèries de temps de velocitat de les boies per detectar la pèrdua d'àncora de capa en boies llançades el Gir Subtropical Nord Atlàntic durant la campanya SPURS del 2013 sense utilitzar altres fonts de dades. Els resultats mostren el potencial de la metodologia que es presenta per seguir treballant i una manera interessant de descriure la dinàmica superficial de l'oceà.

Agraïments

Agraeixo al professor Josep Lluís Pelegrí i el tècnic especialitzat en el disseny de boies Joaquín Ignacio Salvador, “Kintxo”, del Departament de Oceanografia Física del Institut de Ciències del Mar de Barcelona per idear i oferir-me l’oportunitat d’aprendre amb aquest treball en un ambient real, conèixer el institut i el món de la investigació. També la tutora Elena Roget del Departament de Física Ambiental de la Universitat de Girona per les correccions del informe final.

Índex

1.	Introducció	- 4 -
1.1.	Les boies de deriva	- 4 -
1.1.1.	Sistema de posicionament Argos	- 7 -
1.2.	La dinàmica de l'oceà a altes i baixes freqüències	- 8 -
1.3.	El problema de la pèrdua d'àncora de capa	- 12 -
2.	Objectiu	- 14 -
3.	Cas d'aplicació	- 15 -
4.	Metodologia	- 16 -
4.1.	Obtenció de les dades	- 16 -
4.1.1.	Visualització de les trajectòries	- 16 -
4.1.2.	Obtenció coordenades cartesianes	- 17 -
4.1.3.	Obtenció de les velocitats	- 17 -
4.1.4.	Interpolació	- 19 -
4.1.4.1.	Identificar valors atípics	- 19 -
4.1.4.2.	Kriging	- 19 -
4.2.	Mètodes per l'anàlisi	- 22 -
4.2.1.	Anàlisi d'ondetes	- 22 -
4.2.2.	Anàlisi de velocitats	- 24 -
5.	Resultats	- 26 -
6.	Discussió	- 46 -
7.	Conclusions	- 48 -
8.	Bibliografia	- 50 -

1. Introducció

La circulació oceànica juga un paper clau en el clima del planeta. És evident que les variacions climàtiques del passat i els pronòstics del futur no es poden explicar sense entendre la dinàmica oceànica. En un context d'escalfament global estudiar la interacció entre l'oceà i l'atmosfera és imprescindible per avançar en la comprensió del clima i en l'exactitud de les projeccions climàtiques a curt i llarg termini. Aquesta necessitat de comprendre el clima i millorar les previsions climàtiques han empès a la comunitat oceanogràfica a ampliar i desenvolupar de manera global la monitorització dels oceans. Actualment es disposa d'importantes plataformes que agrupen i administren grans volums de dades, com per exemple l'agència americana *National Data Buoy Center* (NDBC) associat a la NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*, on les seves dades es troben a disposició per a tota la comunitat oceanogràfica i meteorològica mundial. El tractament d'aquestes dades ajuden a preveure i estudiar fenòmens com el ENSO *El Niño-Southern Oscillation*, concretament per aquest cas existeix una xarxa de boies distribuïdes per l'oceà Pacífic Sud destinades expressament al seu estudi i previsió. El NDBC està més associat però a boies fixes que com a sistema eulerià les dades s'obtenen d'un punt fix a l'oceà.

Pel que fa la caracterització dels corrents oceànics existeixen doncs mètodes tant eulerians com lagrangians. El mètode lagrangian més conegut per a la caracterització de les corrents oceàniques són les boies de deriva (*drifter buoys*, en anglès).

1.1. Les boies de deriva

Les boies de deriva és un sistema de mesura de velocitats oceàniques a diferents fondàries que es començà a utilitzar a partir dels anys 70 quan naixia el món del posicionament a través dels satèl·lits tant per oceanògrafs com meteoròlegs. L'any 1982 el *World Climate Research Program* (WCRP) va considerar que seria molt útil disposar de un conjunt de boies de deriva funcionant a nivell mundial per a la investigació oceanogràfica i climàtica, a partir de llavors es quan apareix el plantejament la estandardització en el disseny i construcció de les boies de deriva Sota el projecte *Surface Velocity Program* (SVP) dins del programa *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) i el *Tropical Ocean Global Atmosphere* (TOGA) s'estudià

acuradament i es desenvoluparen els criteris necessaris per al disseny d'una boia de deriva estandarditzada de baix cost; la forma de la boia, l'estructura i dimensions de l'àncora de capa, el posicionament dels sensors de salinitat i temperatura, entre altres.

Amb el projecte SVP des de l'any 1979 fins el 1993 s'han anat desplegant boies de deriva amb l'objectiu de caracteritzar la circulació superficial tant l'oceà Pacífic Nord com l'oceà Atlàntic Nord. Més endavant el desplegament s'ha estès a l'oceà Índic i l'oceà Antàrtic fins que actualment en trobem per tots els mars i oceans. Tot plegat ha donat lloc a un gran volum de dades tant històriques com actualitzades gestionades per la plataforma *The Global Drifter Program* (GDP) subdivisió de la NOAA on es troben disponibles tota la informació de les boies que hi ha a la seva base de dades. Actualment dins d'aquest programa i figuren 1385 boies de deriva (Fig. 1.1).

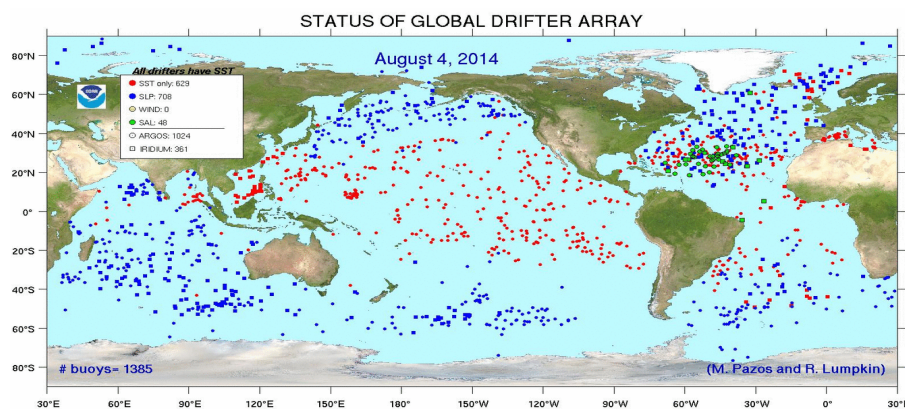


Figura 1.1. Població de boies de deriva disperses per tots els oceans, actualitzat el dia 04/08/14.
Font: <http://www.aoml.noaa.gov/>

- Estructura de les boies de deriva

Les boies SPURS estan fetes de polipropilè i fibra de vidre i s'acobla a partir de dos semiesferes amb una junta tòrica entre elles. Amb el sensor el pes de la boia és aproximadament 10kg que equival a una flotabilitat en aigua de mar de 12kg, a diferència de les boies que Pacific Gyre fabrica, no es tracta d'una estructura compacta on el sensor és irrecuperable. El fet de tenir una estructura pel sensor el cable de subjecció és més gruixut, 6 mm en comptes de 3 mm i rotatori. L'àncora de capa és de 11 m per 70 cm de diàmetre, també a diferència del disseny estàndard de 7 m per 70 cm, i es situen a una profunditat de 15 m, de manera que la velocitat de les boies

correspondrà a la dels corrents d'aquesta fondària que arrossegaran l'ànchora. El que tècnicament és més important a tenir en compte és el coeficient *Drag Area Ratio* que ha de ser igual o major a 40. Amb aquest coeficient es considera que per a vents de 10 m/s en superfície l'error de velocitat en la mesura del corrent sigui inferior a 1 cm/s (Niiler et al., 1987; Bitterman et al., 1990). El càlcul del coeficient és el següent:

$$DragAreaRatio = \frac{DrogueDragArea}{\sum DragArea(NonDrogueElements)} \geq 40$$

$$DragArea = CompleteHorizontalCrossSection \times DragCoefficient$$

Drag Coefficient corresponen a valors de 0.47 per la esfera, 1.40 per l'ànchora de capa i altres elements 1.40.

Totes les boies estan dotades d'un sensor de conductivitat i temperatura *MicroCAT C-T* model *SBE 37-SI* ubicat a 60 cm de la superfície. Recordem que a través de la conductivitat es calcula la salinitat.



Figura 1.2. Esquema del disseny original de boia de deriva SVP i il·lustració d'una boia utilitzada a la campanya SPURS.

La informació detallada està disponible en el manual que el GDP proporciona basat en els resultats del SVP-WOCE i desenvolupat per l'empresa *Pacific Gyre Inc.* Tot i que el

disseny de les boies SPURS presenten alguna variació en termes generals segueixen el protocol que aquest manual presenta.

1.1.1. Sistema de posicionament Argos

La transmissió de les dades de les boies de deriva i el seu seguiment s'obté a través del sistema Argos. Es tracta d'un sistema de posicionament satel·litzat que processa i localitza dades ambientals de plataformes fixes o mòbils. La localització geogràfica la determina mesurant l'efecte Doppler de les senyals transmises.

Cada cop que el satèl·lit rep una senyal del transmissor mesura la seva freqüència i el interval de temps en que arriba la senyal. S'analitza la diferència de les freqüències de la senyal a causa de l'efecte Doppler. Argos processa les possibles posicions del transmissor amb un con definit per el vèrtex que coincideix amb la posició del satèl·lit quan rep la senyal i per l'angle del vèrtex que és una funció entre la freqüència mesurada i la emesa pel transmissor (Fig. 1.3). El centre de processament calcula una posició inicial a partir del primer i últim missatge durant una mateixa passada del satèl·lit. La intersecció dels dos cons corresponents als dos missatges corresponents més el radi de la terra i l'alçada de l'òrbita del satèl·lit dona dos possibles posicions. Amb un anàlisi de mínims quadrats en les equacions per refinar les posicions i les freqüències del transmissor s'escull la posició amb una millor continuïtat de freqüència. Finalment la posició es valida amb quatre criteris: mínim error residual, continuïtat de la freqüència de transmissió, la distància més curta respecta la última posició processada i la velocitat entre localitzacions.

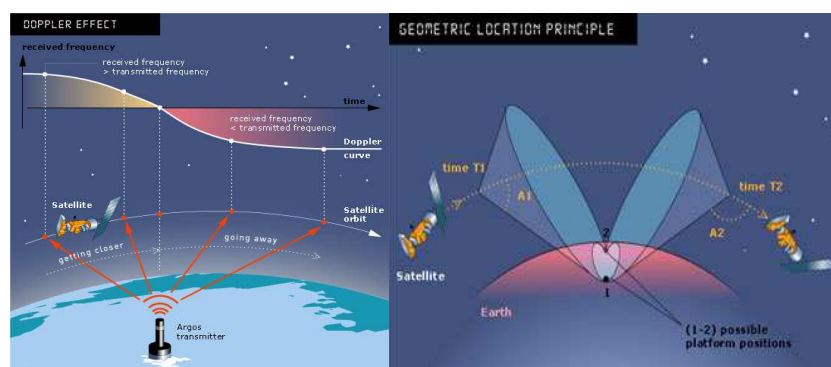


Figura 1.3. Esquema del funcionament del sistema de posicionament Argos.

Font: <http://www.argos-system.org/>

Les coordenades de posicionament es donen en latitud i longitud en el sistema de referència *World Geodetic System* (WGS 84).

Un cop processades les dades per a cada boia s'obté una matriu de valors on a cada posició i tenim la data, hora, latitud, longitud, salinitat, temperatura i conductivitat.

1.2. La dinàmica de l'oceà a altes i baixes freqüències

Les boies de la campanya SPURS es troben ancorades a 15 metres de profunditat, dins la capa de mescla, on els principals agents que forcen la circulació oceànica són el vent i la força de Coriolis.

La capa de mescla actua com un sol cos on totes les propietats es troben homogeneïtzades entre la superfície i la termoclina.

El corrent total mesurat per les boies de deriva amb àncora de capa és la suma de diferents contribucions com corrents geostrofiques, transport d'Ekman, altres corrents ageostrofiques com les corrents inercials, de marea i de Stokes. Per detectar la pèrdua d'àncora de capa cal doncs entendre la dinàmica de les corrents superficials oceàniques que interactuen entre elles i es poden classificar segons la seva freqüència.

- Corrents induïdes pel vent, transport d'Ekman:

El transport d'Ekman és un moviment induït pel vent en la capa superficial de l'oceà i la força de Coriolis. Quan el vent bufa s'acobla amb la primera capa de la superfície de l'oceà i degut a la rotació de la terra, força de Coriolis, el moviment d'aigua no segueix la direcció del vent si no que es desplaça 45° cap a la dreta en l'hemisferi nord (HN) o l'esquerra en l'hemisferi sud (HS). Per la mateixa raó la capa subsegüent també pateix un gir però la velocitat és menor i així consecutivament formant una espiral fins que la velocitat és zero, que correspon a la profunditat de l'anomenada capa d'Ekman. El resultat és un transport net perpendicular a la direcció del vent, a la dreta en HN i l'esquerra en HS. Matemàticament amb els supòsits de la teoria d'Ekman (estabilitat, linearitat, i homogeneïtat vertical) podem simplificar amb les següents equacions (Ekman, 1905):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} = -fu \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} = fv \quad (1.2)$$

On τ és el forçament del vent, u i v les velocitats est-oest i nord-sud. i $f=2\Omega\sin\varphi$, el factor de Coriolis on Ω és la rotació de la terra i φ la latitud positiva al HN i negativa al HS.

Rio (2012) demostra que aplicant el model d'Ekman $\vec{u}_e = \beta \bar{\tau} e^{i\theta}$, amb β sent una constant per l'amplitud i θ l'angle de rotació relatiu al vent (Ralph and Niiler, 1999), per al conjunt global de dades de boies de deriva corresponents al GDP entre 1993 i 2008 considerades amb àncora de capa, existeix un canvi de tendència amb un increment del paràmetre β fins a 3 vegades i disminució de θ de 60° a 20°. Proposa que aquest canvi és el resultat de que existeix un nombre important de boies sense àncora de capa no detectades contaminant el conjunt global de dades.

- Corrents geostrofiques

En baixes freqüències podem considerar que els corrents superficials són bàsicament del tipus geostrofic i responsables de la circulació global dels oceans. Els corrents geostrofics són el resultat d'un gradient horitzontal de pressió entre dos punts en una mateixa fondària que es compensa amb l'efecte de Coriolis. Per exemple en els girs subtropicals, on es troba la nostra àrea d'estudi, aquest gradient de pressió es degut a una acumulació d'aigua en el centre del gir degut al transport d'Ekman. El gir es produeix forçat per la circulació atmosfèrica que en aquest cas, ve dominada pels vents alisis del tròpic, els de l'oest en latituds mitges i per les costes dels continents. L'acumulació d'aigua al centre dels girs subtropicals pot arribar a una variació del nivell del mar l'ordre d'1m de diferència, en conseqüència existeix un gradient de pressió just sota la superfície responsable del moviment de l'aigua de la zona incentivada per aquest gradient i juntament amb la força de Coriolis gira a la dreta en HN i a l'esquerra HS creant un corrent perpendicular al gradient de pressió.

A partir d'aquest equilibri entre la força de Coriolis i el gradient de pressió podem representar de manera simple les velocitats geostrofiques de la següent manera al HN:

$$u_g = -\frac{1}{\rho_0 f} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.3)$$

$$v_g = \frac{1}{\rho_0 f} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.4)$$

On ρ_0 és la densitat inicial, f el factor de Coriolis, $\frac{\partial p}{\partial y}$ i $\frac{\partial p}{\partial x}$ els gradients de pressió en la direcció nord-sud est-oest respectivament. Estudar doncs la topografia de la superfície del mar és útil per determinar els corrents geostroficis. Rio (2012) i Lumpkin et al. (2013) utilitzen dades altimètriques per a calcular les velocitats geostrofiques i restar-les de les velocitats de boies de deriva per obtenir les velocitats residuals les quals utilitzen per correlacionar-les amb el vent. Gràcies a l'altimetria s'analitza la topografia dinàmica de l'oceà amb la mesura de diferències d'altura del nivell del mar de l'ordre de cm fins arribar al metre en distàncies horitzontals de més de 100 km, aquestes diferències ajuden a determinar la direcció i la intensitat dels corrents geostroficis.

- Remolins

La formació de remolins, (*eddy*, en anglès) són resultat d'una inestabilitat baroclínica per el xoc de dos masses de diferent densitat ja sigui per diferències de temperatura i/o salinitat, combinat amb l'efecte Coriolis. Si giren en sentit a les agulles del rellotge són anticiclònics i en contra ciclònics. Poden arribar a longituds de centenars de quilòmetres i desplaçar-se grans distàncies fins a dissoldre's, la corrent pot assolir velocitats entre els 10 cm/s i 100 cm/s depenent de les dimensions i la latitud. Són importants en processos biogeoquímics ja que poden ser responsables d'aflorent de nutrients en mar obert depenent el sentit del seu gir.

- Corrents agestròfics d'altas freqüències

En les altas freqüències podem trobar corrents induïdes per la deriva Stokes fruit de l'onatge, els corrents mareals, diürns i inercials. Així com Rio (2012) i Lumpkin et al. (2013) eliminen les velocitats de període inercial per el seu anàlisis, nosaltres posarem èmfasi a les freqüències inercials ja que una de les nostres hipòtesis és que les corrents

inercials puguin desaparèixer amb la pèrdua de l'ànchora de capa o la seva intensitat canviï de manera substancial.

El mecanisme responsable del moviment inercial és la rotació de la Terra, és a dir la força de Coriolis, les equacions es poden descriure de manera simplificada a partir del següent equilibri:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = 0 \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = 0 \quad (1.6)$$

La solució d'aquestes equacions dona un moviment circular amb un període de $T=2\pi/f$ amb freqüència inercial $\omega=f$. Per exemple a 30° latitud el període inercial equival a 24h. En la figura 1.4, corresponent a una part de la trajectòria de la boia SPURS-73262, s'aprecia perfectament les oscil·lacions inercials. La intensitat del corrent inercial també depèn de la profunditat de la capa de mescla, on recordem totes les propietats es troben homogeneïtzades actuant com un sol cos, a l'estiu la termoclina es trobarà a menys profunditat la capa de mescla serà doncs menys gruixuda propiciant oscil·lacions inercials més intenses ja que la massa d'aquest cos és inferior.

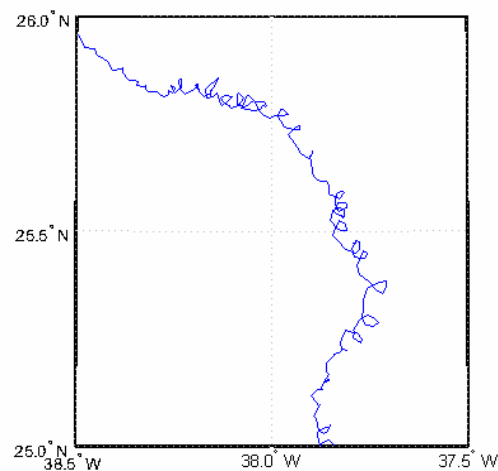


Figura 1.4. Mostra de la trajectòria SPURS 73262 amb oscil·lacions inercials ben definides.

1.3. El problema de la pèrdua d'àncora de capa

Tal i com s'ha comentat anteriorment les boies de deriva s'han dissenyat específicament amb la intenció de reduir l'efecte del vent en menys d'un 0.1% per a velocitats de vent de 10 m/s. Per a la detecció de la pèrdua d'àncora de capa inicialment s'estudiaven els canvis en immersió de la boia amb l'ús d'un sensor de submersió. Actualment però aquest mètode s'ha reemplaçat per mesurar la tensió del cable que subjecta l'àncora de capa amb la boia amb l'ús d'un sensor de tensió.

Tot i així, estudis recents han demostrat variacions atípiques en els corrents superficials derivades de les boies de deriva a partir de mitjans del 2000 (Grotsky et al., 2011; Rio et al., 2011) que figuren en la base de dades de la plataforma GDP (*Global Drifter Program*). Aquestes variacions tenen un comportament similar a la mitjana de vents superficials indicant la presència de boies sense àncora de capa no detectades. Per a minimitzar el problema es recomana considerar només les boies que tinguin un màxim de vida de 3 mesos (Grotsky et al., 2011). Aquesta mesura però elimina el ~75% de les dades de velocitat de les boies que no han perdut l'àncora de capa (Lumpkin et al., 2013).

Recentment s'han publicat diferents estudis sobre com determinar la pèrdua de l'àncora (Poulain et al., 2009; Rio, 2012; Lumpkin et al., 2013). L'objectiu base és detectar quan es trenca el 0.1% de correlació entre la velocitat residual i el vent superficial. En aquest sentit es calcula la velocitat residual dels corrents que és igual a la diferència entre la velocitat total i les velocitats geostrofiques, aplicar a la velocitat real resultant un filtre de 3 dies (Rio, 2012) o 5 dies (Lumpkin et al., 2013) per a eliminar les oscil·lacions inercials, corrents de marea i altres moviments ageostròfics d'alta freqüència, i veure com la velocitat residual resultant es correlaciona amb valors de vent superficial.

Aquestes noves metodologies presenten bons resultats per l'avenç en la detecció de la pèrdua d'àncora de capa però amb la limitació que depenen de dades de vent i corrents geostrofics adquirides a partir de l'altimetria i mapes de forçament a partir d'informació de satèl·lits altimètrics que avui en dia presenten una resolució espacial màxima de 0.25°, equivalent a ~27km; a més, en zones de vents dèbils i poc constants com els girs subtropicals el mètode és ineficient. Per a vents inferiors a 3 m/s és difícil de determinar l'angle de forçament del vent (Ralph and Niller, 1999). Aquesta limitació empeny doncs a la necessitat de seguir investigant per arribar a un mètode en que l'anàlisi només es

centri en les dades de les boies de deriva i és aquí on recau el interès inicial del nostre estudi.

2. Objectiu

El treball que aquí es presenta consta de tres parts. La primera (apartats 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3) es tracta de familiaritzar-se en com treballar amb les dades de les boies de deriva i obtenir les posicions i velocitats, així com revisar i millorar la qualitat de les dades (apartat 4.1.4) amb identificació i neteja de valors atípics fruit d'errors en la mesura i interpolació. En una segona part (apartat 4.2) ens familiaritzarem en diverses metodologies per a l'anàlisi de dades de la trajectòria de boies de deriva i les velocitats corresponents, analitzant la seva distribució i aplicar la tècnica de l'anàlisi d'ondetes. Finalment en el apartat 5 es presenten els resultats corresponents de la campanya SPURS , <http://spurs.jpl.nasa.gov/SPURS/>.

Tanmateix, l'objectiu principal de l'estudi és avançar en la recerca de la detecció de la pèrdua de l'àncora de capa de les boies, un problema que la comunitat oceanogràfica especialitzada hi busca una solució. En base als resultats obtinguts es proposa que a partir de només les sèries temporals de velocitat obtingudes a partir de les boies es podria determinar la pèrdua d'àncora de capa ja que la hipòtesi que es planteja és que el canvi de règim resultant ha de ser detectat amb un canvi en les freqüències i distribució de les velocitats corresponents.

3. Cas d'aplicació

La campanya SPURS és una contribució del Centre Expert SMOS de Barcelona, <http://www.smos-pec.icm.csic.es/>, emmarcat en el projecte MIDAS-6. (*Productes SMOS de salinitat oceànica i humitat del sol. Millores i demostració d'aplicacions*) a l'experiment internacional SPURS (*Salinity Processes in the Uper ocean Regional Study*). Es tracta d'un experiment coordinat per WHOI (*Woods Hole Oceanographic Institution*) finançat per la NASA, amb l'objectiu principal d'estudiar els processos oceanogràfics responsables de la formació i manteniment dels màxims de salinitat en la zona central del gir subtropical del Atlàntic Nord. La campanya realitzada amb el vaixell oceanogràfic *Sarmiento de Gamboa* i en coordinació amb el centre SMOS de Barcelona, es va centrar en caracteritzar l'àrea d'estudi mitjançant mesures superficials amb instruments diversos com perfils de corrent ADCP, sondes CTD i CTD ondulant (*SeaSoar*), boies perfiladores, boies de deriva, que aquí estudiem, entre altres.

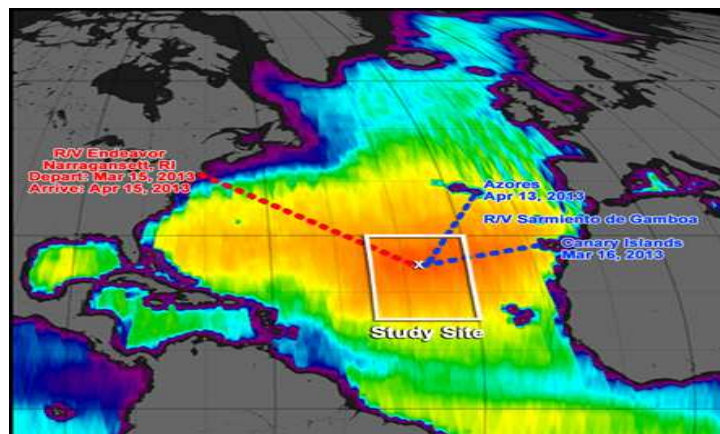


Figura 3.1. Àrea d'estudi de l'experiment SPURS. En blau el recorregut del *Sarmiento de Gamboa*.
Font: <http://spurs.jpl.nasa.gov/>.

Les deu boies aquí analitzades han estat llançades al mar entre els dies 31 de març i 4 d'abril del 2013, excepte la SPURS-30171, durant la campanya SPURS entre els 20°-30°N latitud i 35°-45°O longitud amb la finalitat d'estudiar la zona del gir subtropical Nord Atlàntic, les dades estan compreses fins al voltant de l'any i mig.

4. Metodologia

4.1. Obtenció de les dades

Entenem com a sèrie temporal una conseqüència de N observacions d'una o més variables x en el temps, $x(t)$. En el nostre cas les variables de partida en el temps són les de posicionament en latitud i longitud en graus WGS-84 obtingudes a través del sistema Argos. Els valors correlatius de latitud i longitud que s'obtenen no són però equidistants en el temps ja que el posicionament dependrà de la presència o no de satèl·lits. Es tracta per tant, de sèries temporals irregulars o no uniformitzades: $(lat_i; t=1...N)$ i $(long_i; t=1...N)$.

4.1.1. Visualització de les trajectòries

Les trajectòries a partir dels valors de latitud i longitud s'han representat amb l'ús del paquet de Matlab *Mapping Toolbox* on es faciliten diferents eines per la representació geogràfica. La següent figura (Fig. 4.1) representa el conjunt de trajectòries de les boies estudiades en aquest treball.

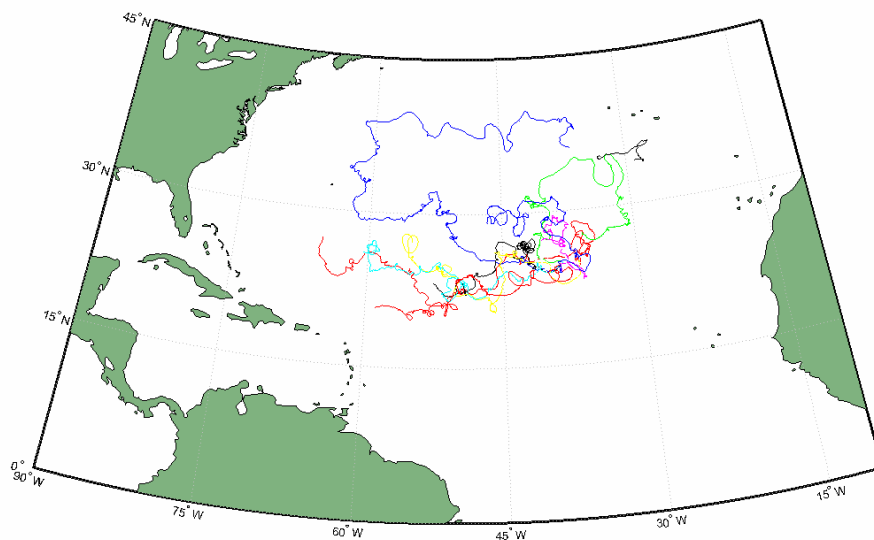


Figura 4.1. Conjunt de totes les trajectòries de les 10 boies SPURS.

4.1.2. Obtenció coordenades cartesianes

Per a l'obtenció de les velocitats és necessari obtenir punts (x,y) en coordenades cartesianes UTM per tal de satisfer les equacions (4.1) i (4.2). La projecció UTM (*Universal Transversal de Mercator*) es basa en una projecció de Mercator normal però amb la diferència que en més de fer-la tangent a l'equador es fa tangent al meridià i les unitats són en metres. La projecció divideix la Terra en 60 fusos UTM de 6° de longitud i 20 zones de 8° de latitud, cada fus te un meridià central que defineix l'origen de coordenades en el punt on es creua amb l'equador. Els fusos es numeren entre el 1 i el 60 i les zones en lletres de la C fins la X incloent I i O. Així doncs el resultat és una quadricula que es defineix per un número i una lletra. A la hora de calcular la conversió cal tenir en compte que dos punts consecutius situats a dos fusos diferents donarà un valor de velocitat erroni ja que les dos coordenades tindran orígens diferents.

La conversió de latitud i longitud en graus WGS-84 a coordenades cartesianes (x,y) UTM s'ha calculat amb la versió 2 del programa Matlab *wgs2utm* (Alexandre Schimel, 2007, 2011).

4.1.3. Obtenció de les velocitats

Amb posicions (x,y) en el temps extraiem una seqüència temporal de les velocitats en els dos eixos. Donada doncs una sèrie temporal no uniformitzada distribuïda en temps t_i amb posicions $x_i=x(t_i)$, $y_i=y(t_i)$ la velocitat entre dos punt consecutius és igual a:

$$u_{i+1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (4.1)$$

$$v_{i+1} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{(y_{i+1} - y_i)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (4.2)$$

- Resolució espacial i temporal, limitacions i font d'errors.

Les unitats de latitud i longitud són graus i es donen 3 decimals, és a dir una resolució de $\pm 0.001^\circ$, que equival a una resolució espacial en els dos eixos de ± 110 m per la latitud (y) i ± 80 m per longitud, (x).

Tal com s'ha comentat, les sèries no tenen una resolució temporal constant. En cada una de les boies estudiades podem trobar distàncies en el temps entre dos punts des de 1 minut fins a 5 hores. Gran part dels intervals de temps en que es troben valors entre dos punts consecutius estan dins les 0.5h i el 95% per sota les 2h (Fig 4.2).

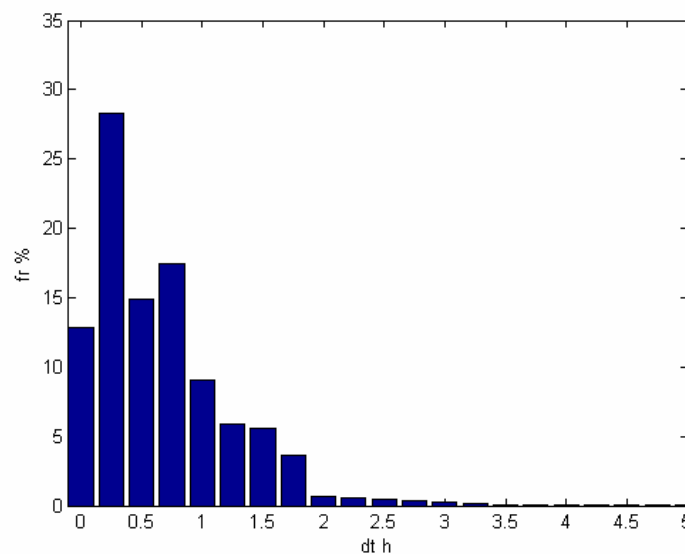


Figura 4.2. Distribució percentual de Δt (dt) en hores del conjunt de les sèries temporals de les 11 boies SPURS. El 70% dels Δt es troben per sota 1h i el 95% per sota les 2h.

És important doncs tenir en compte tant la resolució espacial i temporal per entendre possibles errors i valors atípics. Pel sistema de posicionament Argos la precisió es troba al voltant dels 100 m tot i que per a posicions donades en intervals curts de temps la precisió millora, es tracta d'un sistema que depèn molt del posicionament dels satèl·lits.

Tenint en compte la resolució espacial dels dos eixos cartesianes estimem un error en l'espai de ± 100 m i una resolució temporal mitja de 30 minuts podem considerar un error estimat en el càlcul de les velocitats de ± 5.5 cm/s per a (4.1) i (4.2).

4.1.4. Interpolació

4.1.4.1. Identificar valors atípics

Per a identificar i eliminar els valors atípics (*outliers*, en anglès) apliquem el criteri de Chauvenet. El criteri de Chauvenet es basa en trobar una interval de probabilitat centrada en la mitjana de la mostra d'observacions N d'una distribució normal amb un marge de confiança de $P=1-1/2N$ d'un conjunt de valors com és el nostre cas. Els valors que es troben fora d'aquesta banda de probabilitat es consideren atípics. Un cop eliminat aquest valors es torna a calcular una nova mitjana i desviació estàndard i es repeteix el mateix procediment.

Per aplicar el criteri de Chauvenet primer calculem la mitjana \bar{x} i la desviació estàndard σ (4.3), basant-nos amb la diferència entre el valor observat i la mitjana s'utilitza la funció de la distribució normal per determinar la probabilitat de que el valor observat sigui atípic. Un valor es pot eliminar si la probabilitat d'obtenir la desviació específica de la mitja és menor que $1/2(N)$.

Per:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}; \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.3)$$

$$, \quad d_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} \quad (4.4)$$

On d_i desviació específica per a cada valor x_i , i descartem els valors els quals $d_i \geq d_{max}$ on d_{max} és la desviació típica corresponent al marge de confiança P .

Per les sèries temporals aquí treballades hem aplicat el criteri de Chauvenet en finestres de 3 dies per evitar descartar valors que responen a canvis de règim propis de la mateixa sèrie.

4.1.4.2. Kriging

El mètode d'interpolació que s'utilitza és el mètode kriging del tipus ordinari (Hansen and Poulain; 1996). Es tracta d'un mètode útil per a interpolació de valors distribuïts de

manera irregular i que no existeix una autocorrelació entre ells, normalment aquest mètode és utilitzat per anàlisis de dos o tres dimensions en l'espai. En el nostre cas apliquem el mètode per a sèries temporals unidimensionals no uniformes de latitud i longitud de manera independent.

Els valors interpolats són resultat d'una combinació linear del nombre d'observacions veïnes en el temps. Els valors són determinats com a la millor combinació linear de n valors corresponents a les observacions veïnes.

$$x_0^* = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (4.5)$$

On x^* és el valor estimat, x_i són els valors observats, w_i és considerat com el grup amb millor pes. En el nostre cas considerem el millor pes en minimitzar l'error quadràtic mitjà entre els valors observats en les punts interpolats i els valors estimats de l'equació (4.5):

$$\sigma_k^2 = \langle (x_0 - x_0^*)^2 \rangle = \min \quad (4.6)$$

Normalment per a determinar w_i s'utilitza una funció d'autocorrelació a partir de les equacions (4.5) i (4.6) però en el nostre cas al tractar-se de valors de posició no existeix autocorrelació per la mateixa raó que no existeix per a un moviment Brownià (Hansen and Poulain, 1996).

Utilitzem doncs la variació estàndard de dos valors x_i i x_j en el temps:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \langle [x(t_i) - x(t_j)]^2 \rangle \quad (4.7)$$

Per a obtenir una expressió per a optimitzar el pes w_i considerem la següent restricció pròpia del kriging ordinari.

$$\sum_{i=1}^n w_i - 1 = 0 \quad (4.8)$$

Amb aquesta restricció la mitjana de les n observacions passa a ser el valor per defecte. Combinant l'equació (4.5) amb (4.6) i la restricció (4.8) amb un multiplicador Lagrange 2λ per assegurar la restricció obtenim:

$$\sigma_k^2 = 2 \sum_{i=1}^n w_i S_{0i} + \sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j S_{ij} - 2\lambda \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) \quad (4.9)$$

Diferenciant l'equació (4.9) respecte w_i i λ i igualant a 0, ens dona per la variància kriging la següent expressió simple:

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n w_i S_{0i} + \lambda \quad (4.10)$$

La interpolació amb el mètode kriging ha estat calculada a partir del paquet de Matlab m-GSTAT conegut en el món de la geoestadística <http://mgstat.sourceforge.net/>.

La següent figura, (Fig. 4.2) és una mostra de la boia SPURS-73393 en que es compara la trajectòria real amb la netejada i interpolada a 6h d'equidistància amb la metodologia kriging seguint els criteris de Hansen and Poulain (1996).

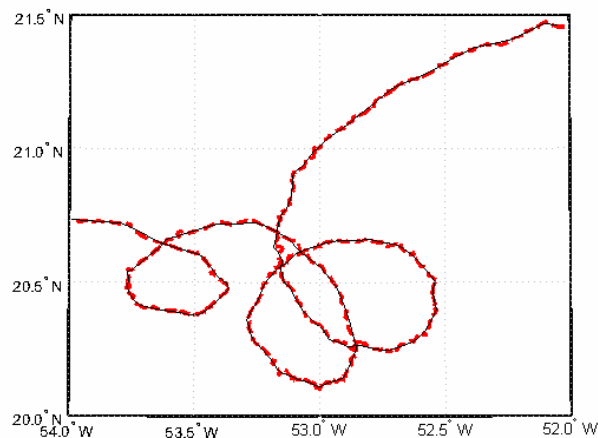


Figura 4.2. Trajectòria interpolada (negre) vers trajectòria original (vermella discontinua).

Protocol·làriament el GDP proposa uniformitzar la sèries temporals de posicionament interpolant-les en intervals de temps de 6h seguint la metodologia de Hansen and Poulain (1996), es proposa també que si la resolució espacial ho permet és interessant treballar amb interpolacions a 3h per tal d'analitzar les velocitats en altes freqüències.

4.2. Mètodes per l'anàlisi

4.2.1. Anàlisi d'ondetes

Es podria considerar que la teoria de anàlisi amb ondetes és una evolució de la teoria de l'anàlisi de Fourier la qual diu que una senyal es compon d'una sèrie de funcions sinusoidals facilitant per tant el seu estudi. Per a una sèrie temporal la transformada de Fourier és útil si la funció $x(t)$ es comporta de manera estacionària. Per a funcions en el temps no estacionàries es pot aplicar l'anàlisi de Fourier de manera segmentada, o equivalentment, fent l'anàlisi en el que s'anomena una finestra d'una longitud T que s'aplica a una sèrie temporal total. Per aquesta tècnica cal que el pas de temps δt sigui constant.

El principal inconvenient d'aquesta tècnica és que la finestra d'anàlisi és d'una longitud fixa perdent doncs informació en altes freqüències per tant no pot adaptar-se a certes característiques importants per un correcte anàlisi d'una funció $x(t)$ no estacionària.

L'anàlisi d'ondetes permet en canvi analitzar les sèries temporals que contenen energia no estacionària en el temps en diferents freqüències. Existeixen dos classes de transformades d'ondetes; continua i discreta *Continuous Wavelet Transform* (CWT) i *Discrete Wavelet Transform* (DWT). Per al nostre propòsit ens centrem amb la CWT.

Per a una transformada continua assumim una sèrie temporal uniforme ($x_n, n=1 \dots N$) amb δt equidistants, i triem una funció mare $\psi_0(\eta)$ -on η és un paràmetre de temps no dimensional- que s'ajusti el millor possible a l'estructura del nostre senyal en el temps per a diferents escales. Per a ser admissible una funció d'ondetes ha de tenir un valor mitjà de 0 (Farge 1992). Existeixen diferents famílies de funcions d'ondetes, per exemple la Morlet, Paul i la DOG com a més conegudes. En el present treball fem ús de l'ondete de Morlet (4.11) que consisteix en un pla ondulat modulat per una Gaussiana (Fig. 4.3).

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (4.11)$$

on ω_0 és un paràmetre de freqüència no dimensional. Considerem $\omega_0 = 6$ com a valor més òptim per satisfer les condicions d'admissibilitat (Farge 1992).

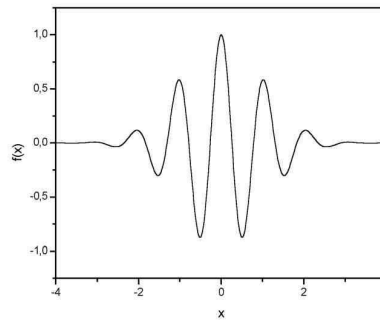


Figura 4.3. Funció de Morlet.

La idea darrera una CWT és calcular la correlació entre la funció $\psi_0(\eta)$ i la sèrie temporal considerant diferents escales per a diferents intervals. La ondeteta s'allarga en el temps variant la seva escala s , de manera que $\eta=s \cdot t$, Grinsted et al. (2004) defineix la CWT d'una sèrie temporal uniforme com la convolució x_n amb una ondeteta escalada i normalitzada:

$$W_n^X(s) = \sqrt{\frac{\delta t}{s}} \sum_{n'=1}^N x_{n'} \psi_0 \left[(n'-n) \frac{\delta t}{s} \right], \quad (4.12)$$

essent la potència de cada coeficient de la transformada igual a $|W_n^X(s)|^2$.

La CWT té però una limitació ha tenir en compte, i és que, a diferència d'un senyal periòdic les ondetes no contenen una sola freqüència i per tant no pot identificar aquestes completament localitzada en el temps, donant a lloc a una indeterminació.

D'altra banda la significació estadística de les correlacions en els marges de les sèries disminueix pel que es sol definir un con d'influència on l'àrea en que l'espectre afectat és inferior a e^{-2} vegades el valor en els marges. En les representacions gràfiques s'indica el con d'influència amb una àrea emblanquinada present sobretot als extrems inferiors de les gràfiques d'ondetes.

Com a exemple gràfic de la Teoria de Anàlisi Wavelet mostrem el resultat de la CWT de la funció wavelet de Morlet amb una sèrie temporal de velocitat absoluta uniformada en el temps amb una interpolació de 6h corresponent a la boia SPURS 73399 (Fig. 4.4) sent la única boia amb l'àncora de capa localitzada a 40m.

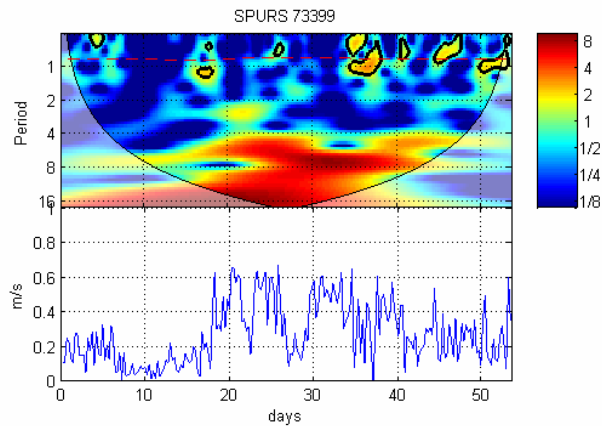


Figura 4.4. CWT de la boia SPURS 73399, juntament amb la sèrie $V(t)$ corresponent. La barra de colors correspon a la potència wavelet. La línia discontinua vermella correspon al període inercial.

Com a característiques destacades, (Fig. 4.4) es visualitza diferents pics d'energia sobretot a la segona meitat de la sèrie que coincideixen amb el període inercial $T=2\pi/f$ on f és el factor de Coriolis, ($f=2\Omega \cdot \sin \theta$, $\Omega = 2\pi/86400s$, θ =latitud). Apareixen també freqüències de període de tres dies tot i que amb un valor energètic poc destacat però es troba entre els dies 20 i 25 que és on la velocitat experimenta un canvi significatiu. Entre els dies 18-41, que és la franja de velocitats més elevades, coincideixen amb màxims de potència corresponent a períodes entre 4 i 15 dies. Allà on les velocitats oscil·len entre el 0.2 i 0.4m/s és on apareixen els pics de període inercial.

4.2.2. Anàlisi de velocitats

Tal com s'ha comentat la nostra proposta és que l'anàlisi d'ondetes de les velocitats de la boia podrien mostrar un canvi de règim quan es trenca l'àncora. En aquest cas, l'anàlisi de les distribucions de velocitats així com la seva direcció i acceleracions podria aportar informació complementària per decidir si l'àncora s'ha perdut o no.

- Distribucions de probabilitat

En aquells casos on la boia hagi perdut l'àncora de capa s'espera un canvi en la distribució de velocitats tant en magnitud com en direcció. Per tal de visualitzar aquest canvi es proposa analitzar la distribució de les variables (u,v) . En aquest supòsit es

podria esperar que el núvol de punts d'una funció $v(u)$, podria diferenciar dos possibles distribucions corresponents a abans i després de la pèrdua de l'àncora.

En la mateixa línia el canvi també es podria observar en les distribucions de probabilitat PDF (*Probability Density Function*, en anglès) abans i després del possible punt de pèrdua d'àncora, tot i que naturalment, aquests canvis no impliquen necessàriament que s'hagi produït un trencament de l'àncora de la boia.

- Acceleracions

Considerant la inèrcia dels grans corrents, complementàriament als canvis de règim que proposem analitzar, l'anàlisi de les acceleracions podrien aportar informació complementària ja que s'espera que les boies sense àncora presentarien trajectòries més variables a causa de les variacions en el vent. L'acceleració mitjana entre dos punts és la diferència de velocitat i el període de temps transcorregut (2.13) i (2.14).

$$a_{x,i+1} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{(u_{i+1} - u_i)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (2.13)$$

$$a_{y,i+1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(v_{i+1} - v_i)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad (2.14)$$

5. Resultats

En aquest apartat presentem els resultats dels anàlisis que hem proposat en els capítols anteriors per deu de les boies de la campanya SPURS (apartat 3).

Primer es presenten les gràfiques corresponents a les anàlisis d'ondetes de cada una de les sèries temporals de velocitat absoluta de les boies analitzades juntament amb la seva trajectòria individual. Les sèries estan interpolades amb la metodologia kriging en intervals de 6h (Hansen and Poulain, 1996). Les línies discontinues negres corresponen al període inercial $T=2\pi/f$. En base a la seva descripció seguidament s'aplica els mètodes d'anàlisi de velocitat per a tres de les deu boies.

Com a tendència general en totes les sèries de velocitat es comprova perfectament com existeix una franja d'energia d'ondetes corresponent al període inercial, marcat amb una línia discontinua negra per a cada boia. Recordem que el període inercial és en funció únicament de la latitud per l'efecte Coriolis. Aquesta franja d'energia no és però continua en el temps si no que pateix discontinuïtats que es poden relacionar amb l'existència d'altres mecanismes que dominen el comportament de la velocitat en el temps. Això es veu, per exemple, en la boia 73231 (Fig. 5.2) que és on hi ha majors valors de velocitat en comparació amb les altres, l'energia inercial es troba poc definida i fins hi tot arriba a desaparèixer del tot quan la velocitat assoleix els valors més alts. La boia 73238 també s'observa aquest comportament entre els dies 225 i 275 (Fig. 5.4). En velocitats molt baixes com és el cas de la boia 73395 entre els dies 60 i 90 l'energia inercial tendeix a desaparèixer (Fig. 5.10). En base a aquest anàlisi es pot concloure que les velocitats inercials en general aquesta regió del gir subtropical Nord Atlàntic es troben en un marge entre els 200 cm/s i 400 cm/s.

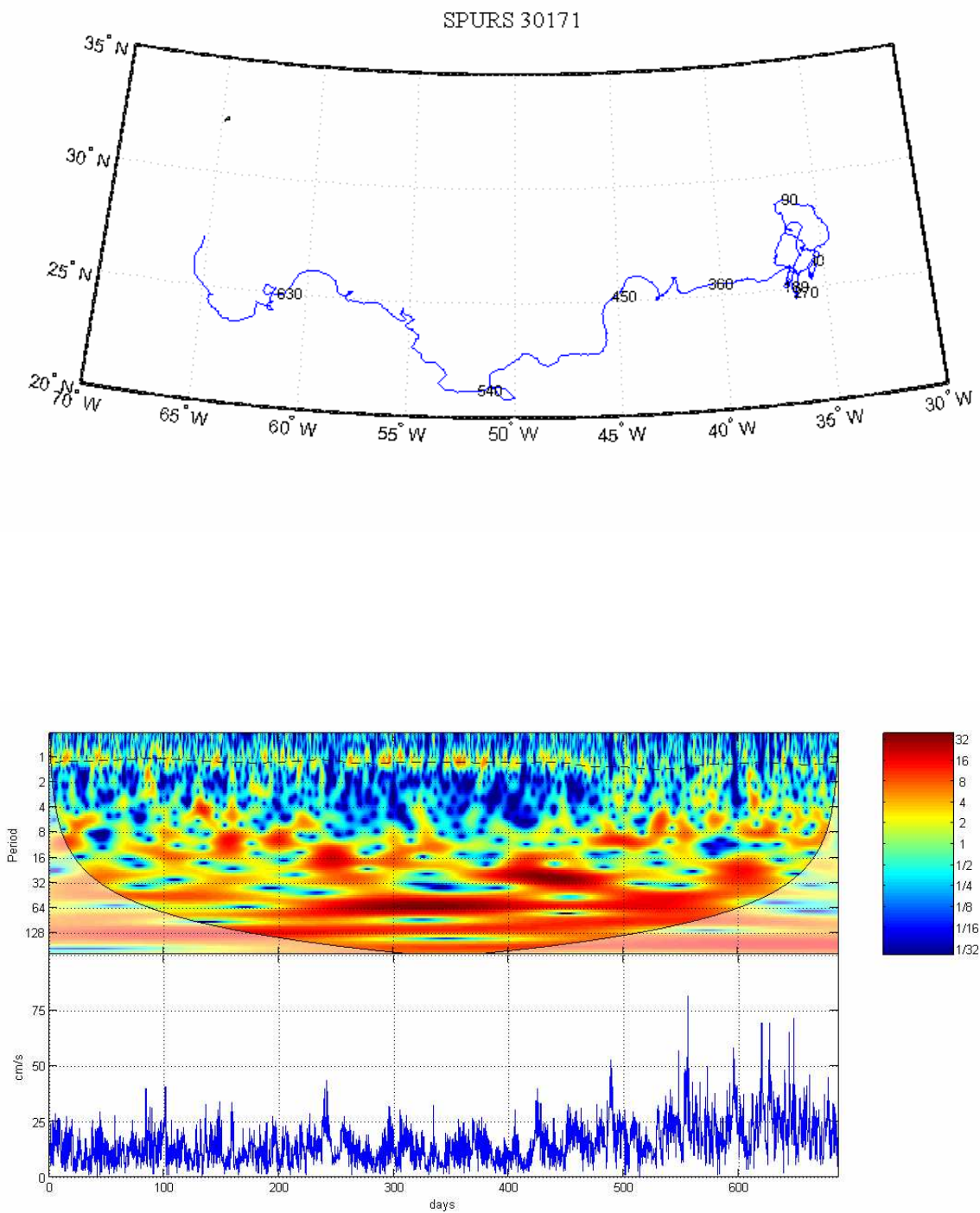


Figura 5.1. Trajectòria i anàlisi d'ondeta de la sèrie $V(t)$ per la boia SPURS-30171, la línia discontinua negra marca el període inercial. En la trajectòria es troba indicada la posició en dies, el punt i_0 és el punt inicial.

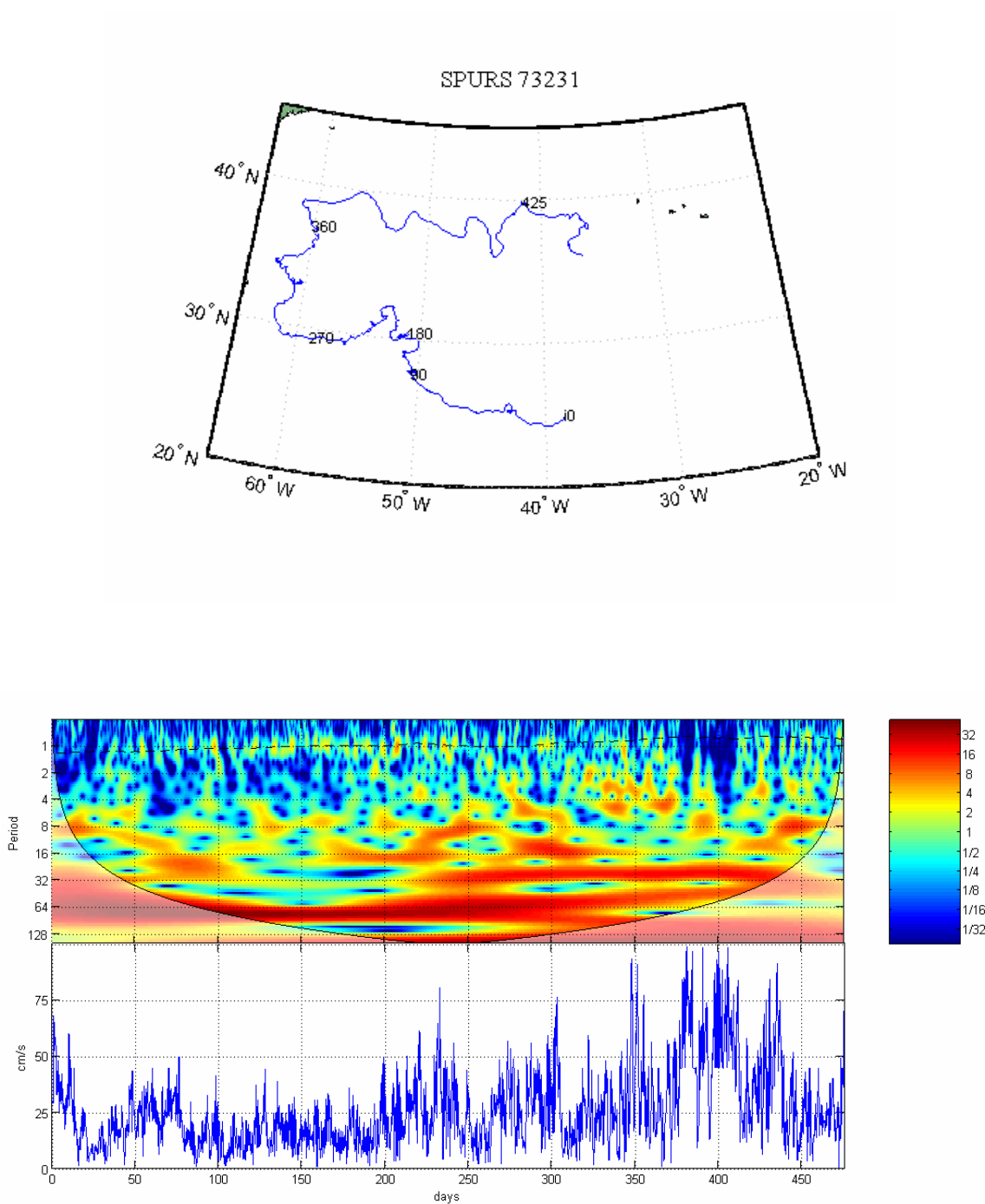


Figura 5.2. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73231.

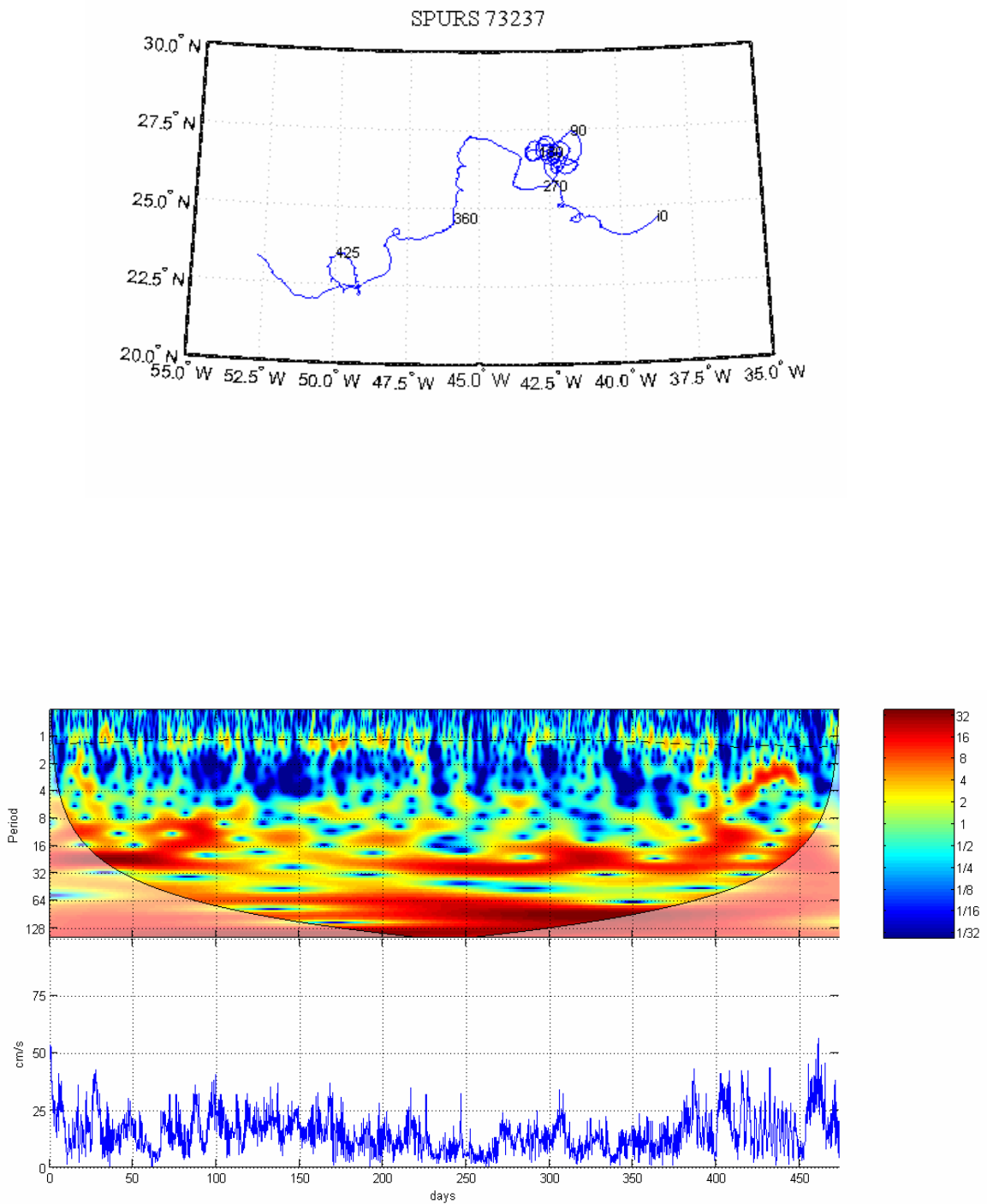


Figura 5.3. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73237.

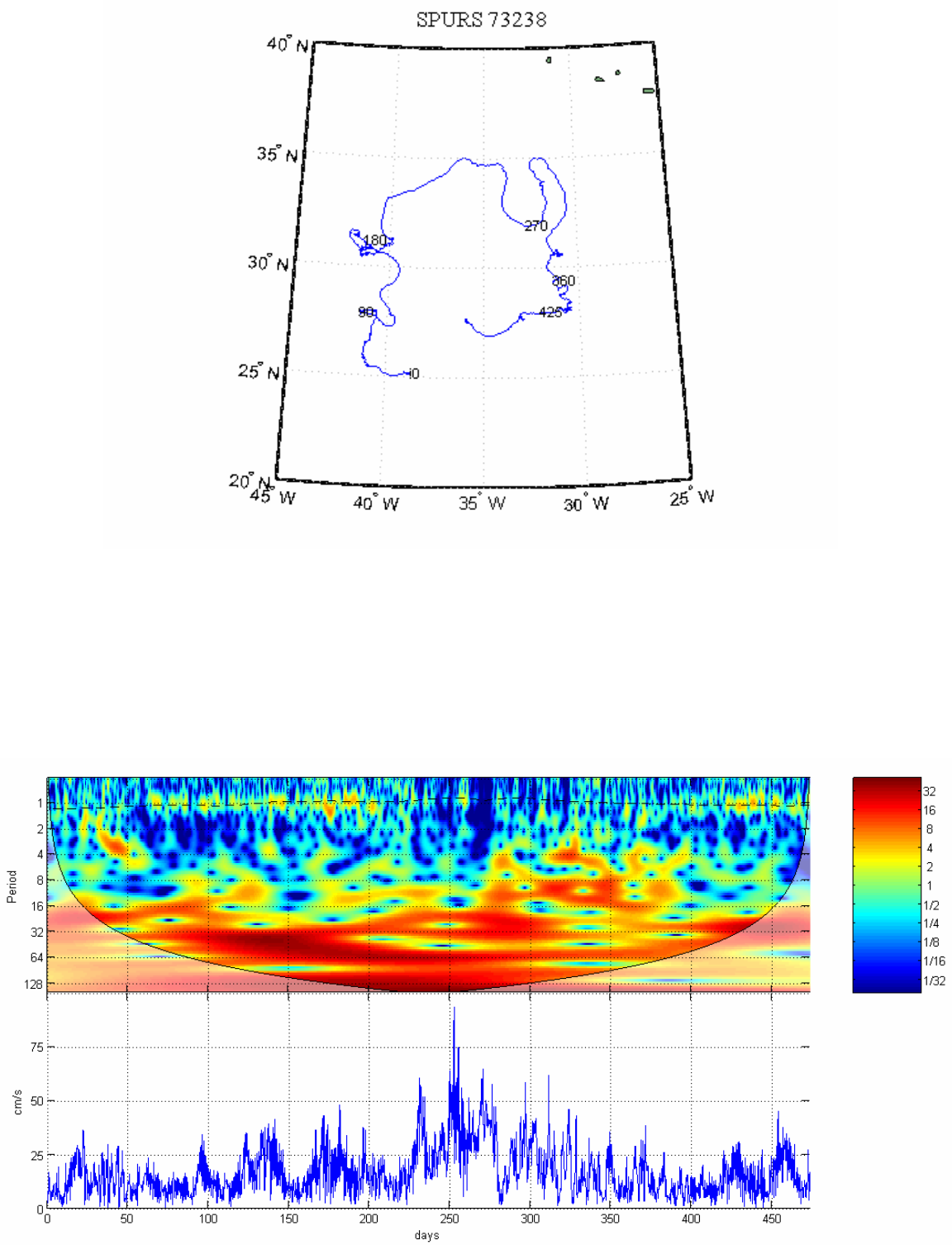


Figura 5.4. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73238.

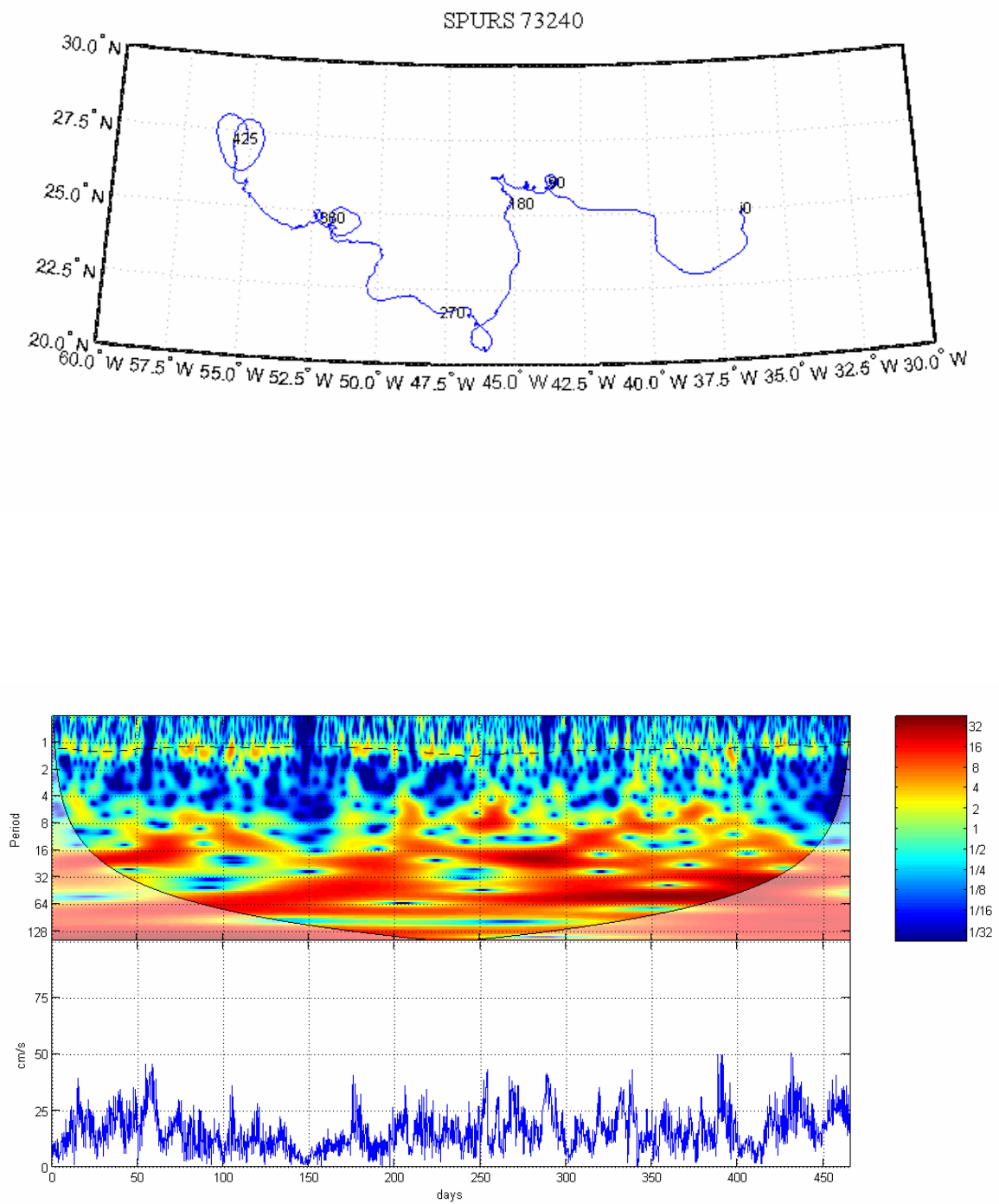


Figura 5.5. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73240.

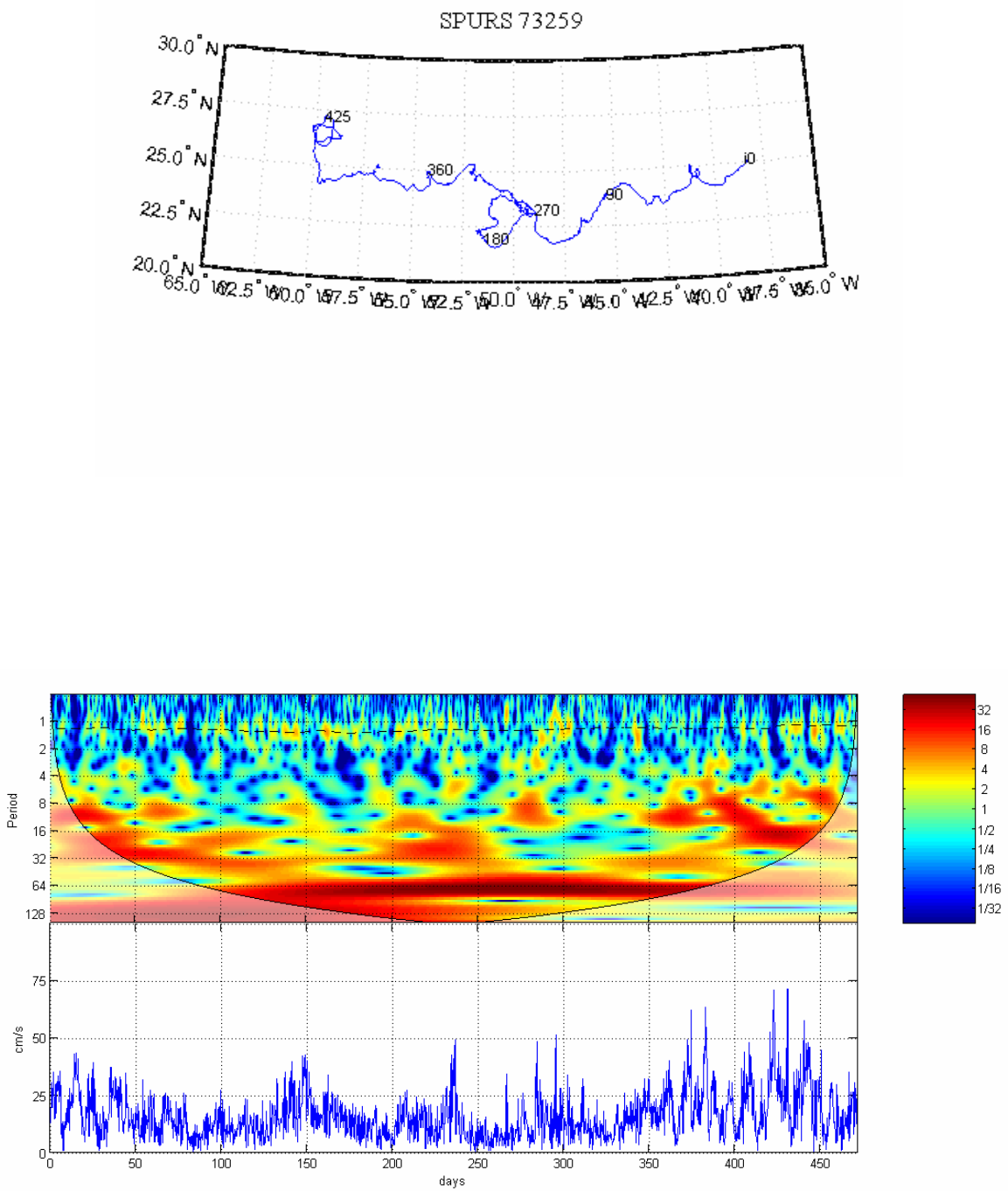


Figura 5.6. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73259

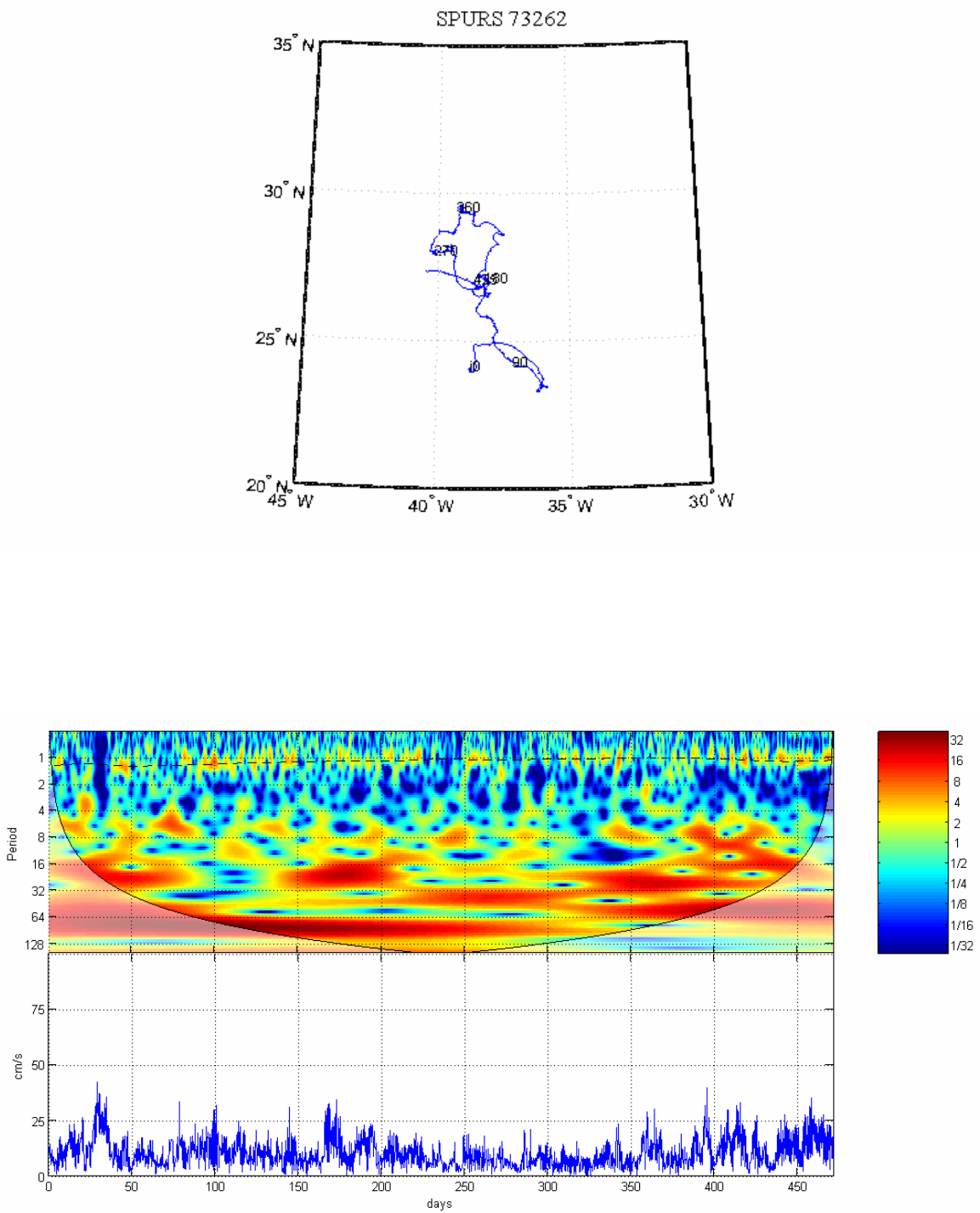


Figura 5.7. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73262.

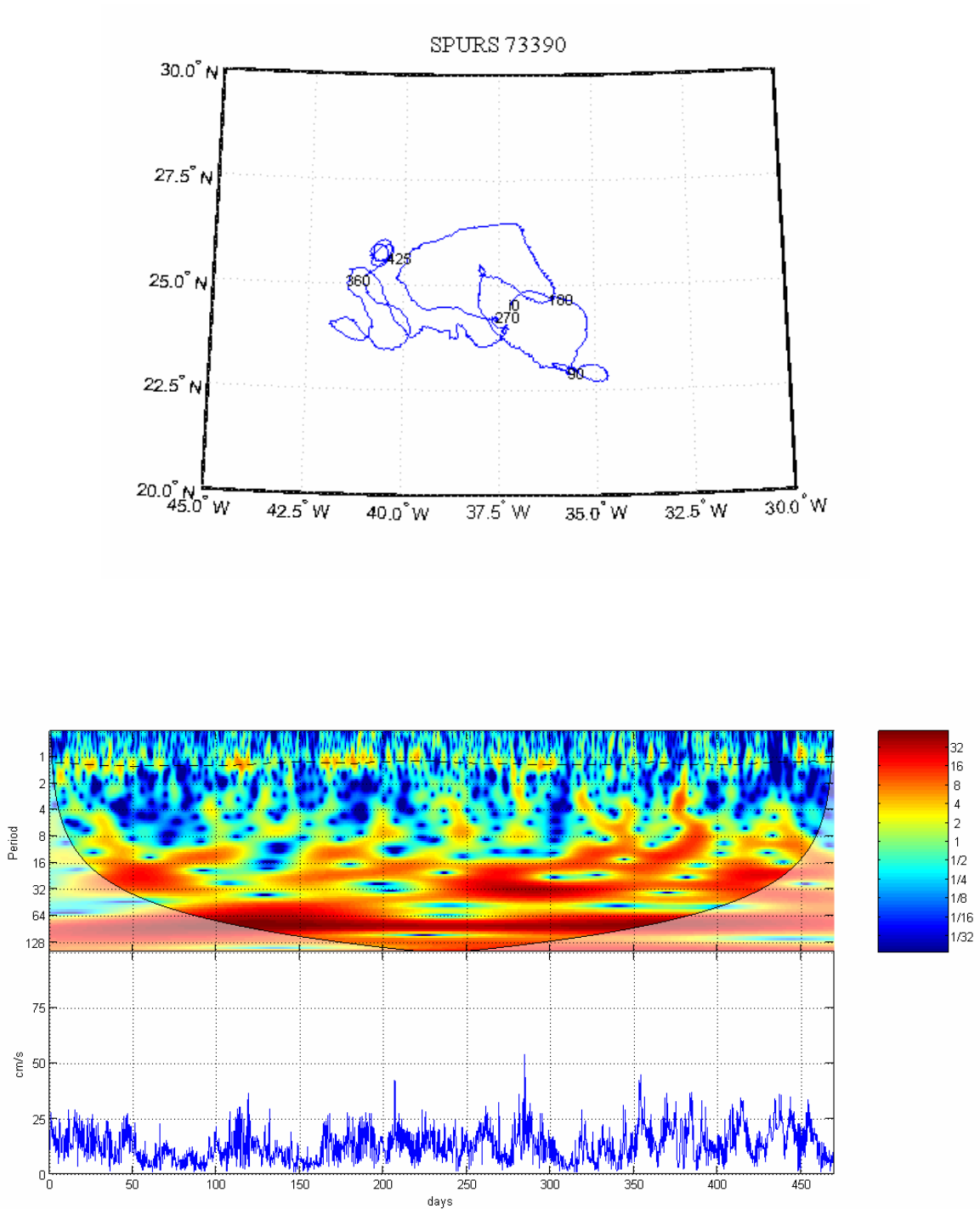


Figura 5.8. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73390.

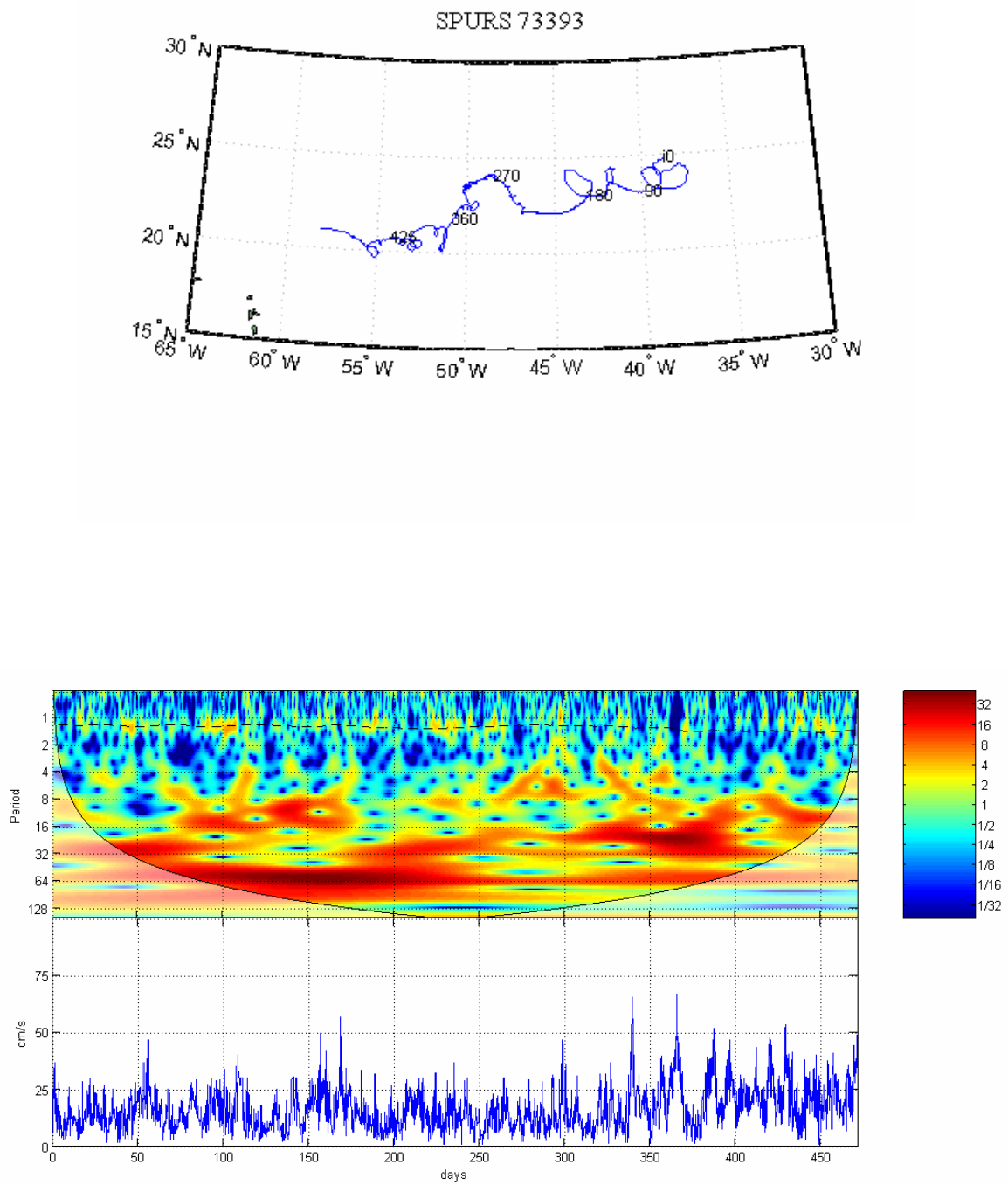


Figura 5.9. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS 73393.

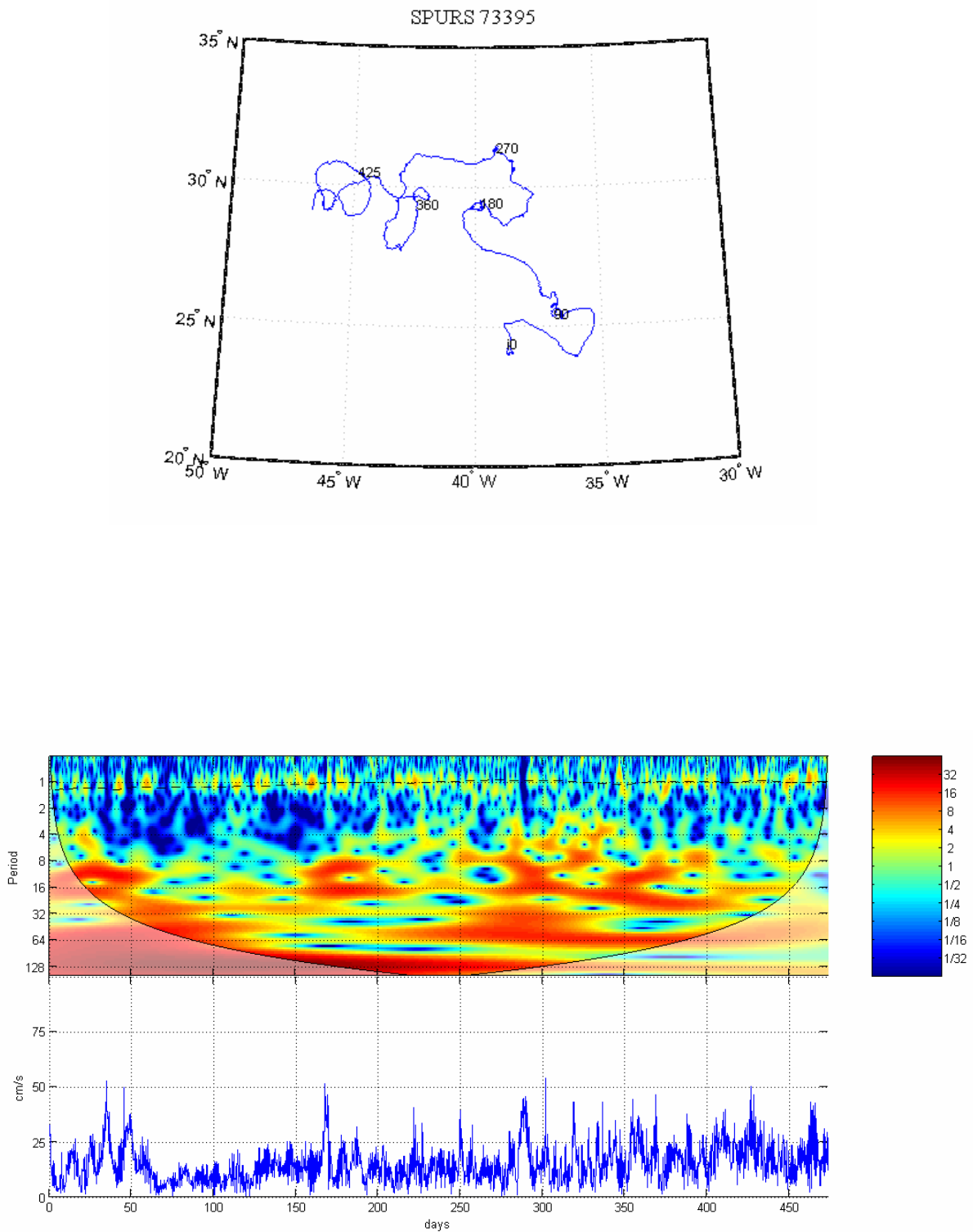


Figura 5.10. El mateix que la (Fig. 5.1) per la boia SPURS-73395.

Comparant les trajectòries amb els coeficients de l'anàlisi d'ondetes i velocitat veiem com efectivament existeix correlació. Per exemple la boia 733262 és de les que mostra més quantitat d'oscil·lacions inercials en la seva trajectòria i conseqüentment pics d'energia en l'anàlisi d'ondetes estan ben marcats en la freqüència corresponent a la inercial durant tota la seva sèrie de velocitat (Fig. 5.7)

Les boies varen ser dipositades entre els dies 31/03/2013 i el 1/04/2013, exceptuant la 30171 que va ser dipositada el 27/08/2012. Per tant els mesos corresponents a final de tardor i hivern estan compresos entre els dies 200 i 340 aproximadament. En aquest període és observable en casi totes les sèries d'ondetes una tendència a disminuir la intensitat en els períodes inercials. Aquest fet el podem atribuir al comportament anual de la capa de mescla. Durant l'estiu el grossor de la capa de mescla és menor amb una termoclina més a prop de la superfície intensificant doncs la estratificació vertical, la capa de mescla actua com un sol cos on totes les propietats es troben homogeneïtzades, per aquest motiu a l'estiu les corrents inercials són més intenses ja que la massa a desplaçar-se és menor i al hivern al augmentar la profunditat de la capa de mescla aquestes disminueixen la seva intensitat.

En baixes freqüències és difícil atribuir les energies d'ondetes a dinàmiques concretes de l'oceà ja que es mesclen corrents d'escala climàtica, meteorològica i geotròfiques de períodes variats. Però si que comparant totes les gràfiques podem comprovar característiques comunes que poden ser fruit dels mateixos processos. Per exemple en la franja entre els períodes 8 i 32 dies apareixen pics similars d'energia a la segona part de totes les sèries exceptuant la 30171. Una altre tendència observable és un augment d'energia en períodes entre els inercials i els 8 dies quan la intensitat en la franja inercial pateix un canvi, disminueix o desapareix. Aquest fet s'observa sobretot en la segona meitat de les boies 30171 i 73231 i final de la 73237 (Fig. 5.1, 5.2, 5.3).

D'aquest anàlisi inicial però es fa difícil detectar canvis que puguin ser resultat de pèrdua d'àncora de capa tot i que podríem suposar que els canvis destacats en la velocitat de les boies 30171, 73231 (Fig. 5.1, 5.2) o freqüències en la 73237 (Fig. 5.3), totes en la part final, poden ser resultat d'aquesta pèrdua. Considerarem doncs aquestes tres boies per a analitzar la distribució de velocitats juntament amb la direcció i acceleracions.

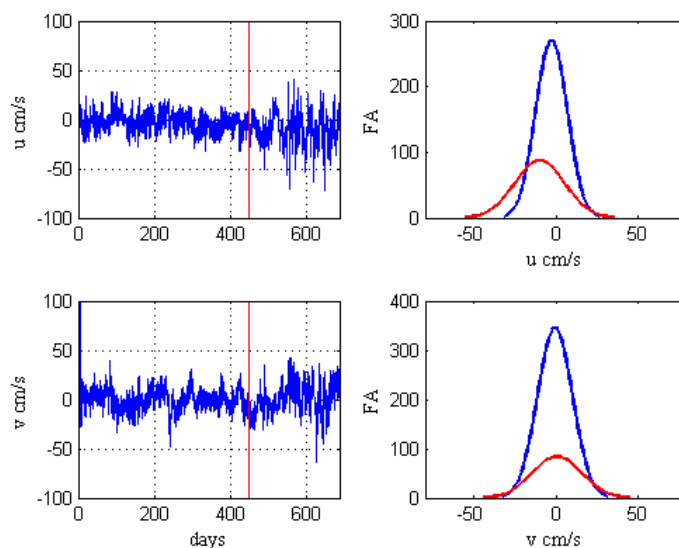


Figura 5.11. Sèries $u(t)$ i $v(t)$ de SPURS 30171 i la seva distribució normal. La línia vermella marca el punt de possible pèrdua d'àncrea, la distribució normal en vermell correspon al període suposadament sense àncrea.

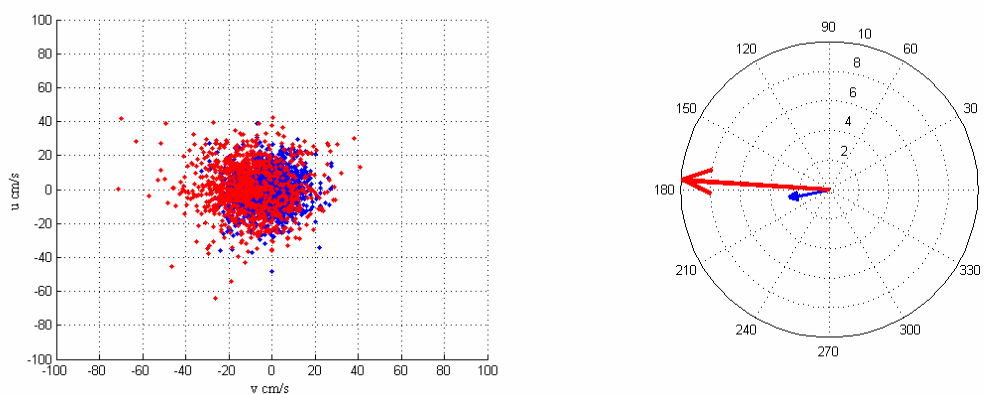


Figura 5.12. Distribució de velocitats amb $v(u)$, dreta. Magnitud i direcció de la velocitat mitjana amb àncrea (blau) i sense àncrea (vermell), esquerra, per la SPURS-30171.

En base a les diferències en les velocitats observades per a la boia SPURS-30171 es determinen dos períodes (figura 5.11) en què podríem suposar que entre mig s'ha produït la perdura de l'àncrea. En aquest cas i tal com també s'observa en les figures de la dreta de la figura 5.11 existeix una diferència en la distribució de velocitat u , el màxim de la distribució normal correspon a valors més negatius, la velocitat v hi existeix cert canvi però no significatiu i la mitjana és molt pròxima a 0, indicant un desplaçament majoritàriament horitzontal tal i com es pot veure en la seva trajectòria (Fig. 5.1). En el gràfic vectorial es determina amb claredat el canvi de magnitud però no

destaca el canvi de direcció. Anàlogament els punts $v(u)$ corresponents als dos intervals possible període sense es troben més dispersos, a la perifèria i desplaçats lleugerament a l'esquerra del conjunt de núvol de punts corresponents als períodes amb àncora (Fig. 5.12).

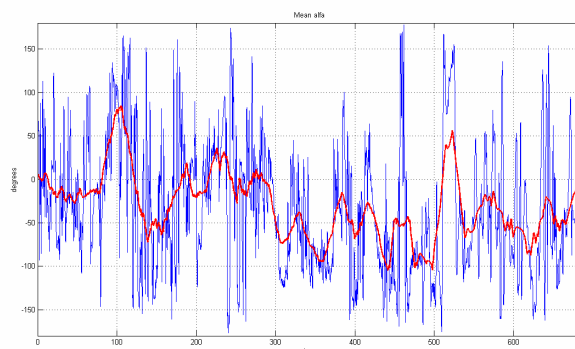


Figura 5.13. Mitjana diària de la direcció en funció del temps (blau) i mitjana cada tres mesos (vermell) per la boia SPURS-30171.

En termes de direcció la boia 30171 no mostra cap canvi destacat al llarg de tota la sèrie si no que en tot moment manté una tendència general cap als -90° indicant un desplaçament cap l'oest.

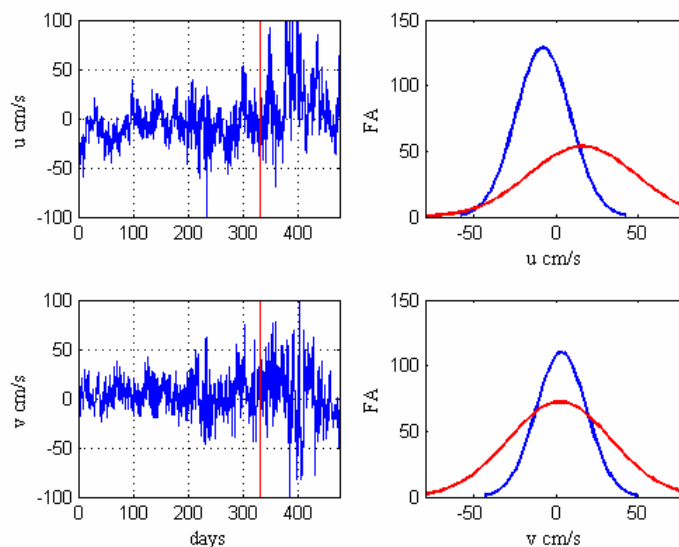


Figura 5.14. Sèries $u(t)$ i $v(t)$ per SPURS 73231 i la seva distribució normal. La línia vermella marca el punt de possible pèrdua d'àncora, la distribució normal en vermell correspon a la fase sense àncora.

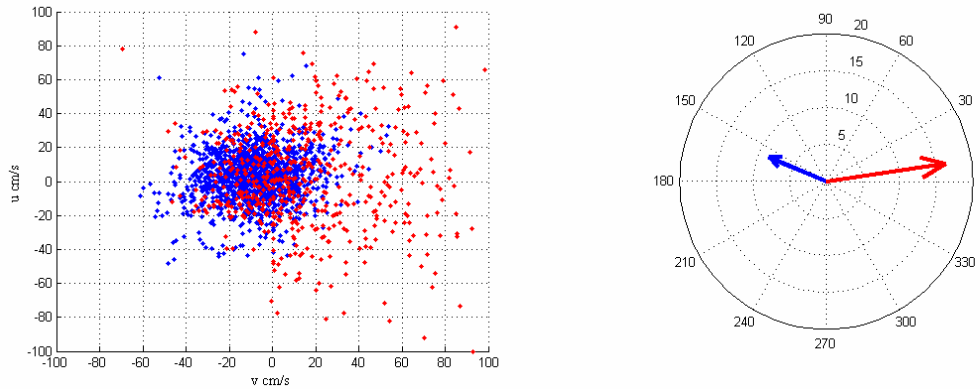


Figura 5.15. Distribució de velocitats amb $v(u)$, dreta. Magnitud i direcció de la velocitat mitjana amb àncora (blau) i sense àncora (vermell), esquerra, per la SPURS-73231.

La boia SPURS-73231 és la que mostra canvis més significatius. El canvi de direcció i magnitud és evident i es pot comprovar tant a les gràfiques corresponents com a la seva trajectòria on passat el dia 360 pateix un gir de 90° cap al est i un desplaçament molt més llarg en períodes de temps més curts (Fig. 5.2). La distribució de les seves velocitats també reflecteixen aquest canvi, amb una major dispersió en les suposades velocitats sense àncora (Fig. 5.15). Probablement amb la possible pèrdua d'àncora la boia s'ha desplaçat suficientment al nord com per ser arrastrada pels fronts atmosfèrics que van en direcció OE típic de sistemes de baixes pressions Nord Atlàntics.

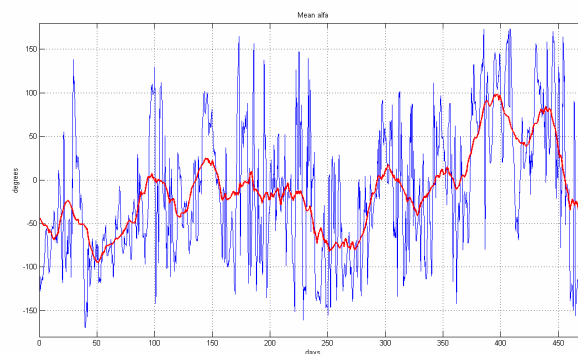


Figura 5.16. Mitjana diària de la direcció en funció del temps (blau) i mitjana cada tres mesos (vermell) per la boia SPURS-73231.

Es visualitza el canvi de direcció en l'angle en funció del temps on la mitjana canvia de signe a partir del dia 360 (Fig. 5.16), passant dels -90 als 90 indicant el canvi de sentit que mostra la seva trajectòria.

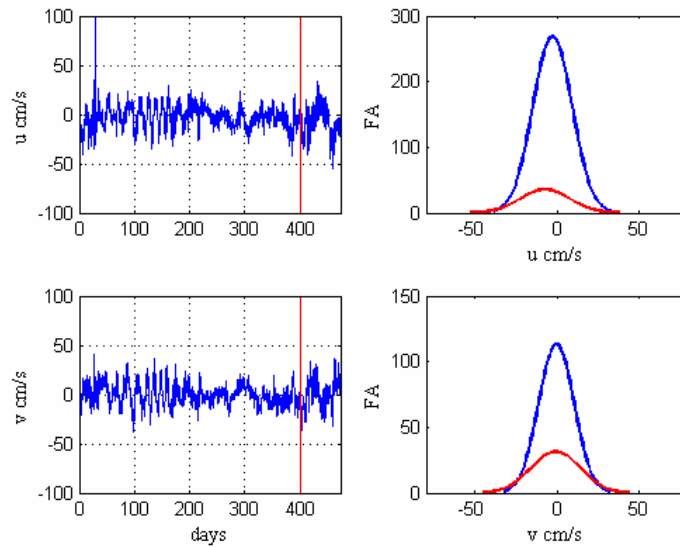


Figura 5.17. Sèries $u(t)$ i $v(t)$ per SPURS 73237 i la seva distribució normal. La línia vermella marca el punt de possible pèrdua d'àncora, la distribució normal en vermell correspon a la fase sense àncora.

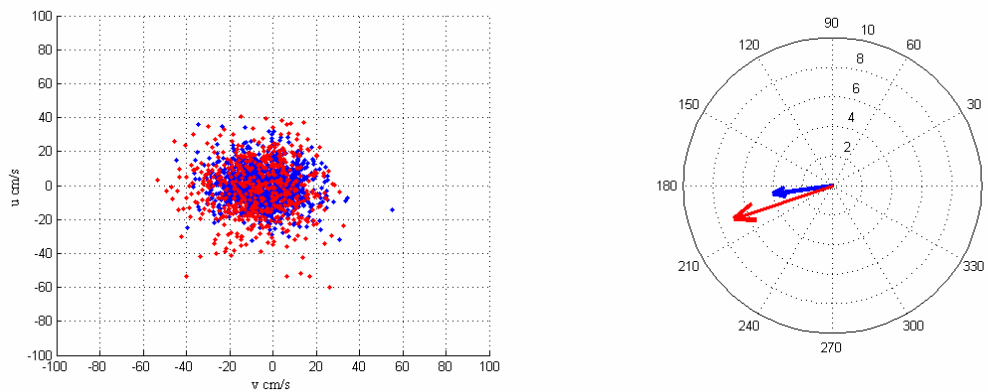


Figura 5.18. Distribució de velocitats amb $v(u)$, dreta. Magnitud i direcció de la velocitat mitjana amb àncora (blau) i sense àncora (vermell), esquerra, per la SPURS-73237.

El cas de la boia SPURS-73237 no s'aprecia un canvi de direcció destacat si en magnitud tot i que tampoc de manera marcada si es pot apreciar com els punts $v(u)$ més dispersos i perifèrics.

En la seva trajectòria destaquem com a curiositat el temps en que es troba sotmès a un remolí, (*eddy*, en anglès) entre les latitud 25-27.5°N i longituds 40-43°O amb una duració de set mesos aproximadament (Fig. 5.3).

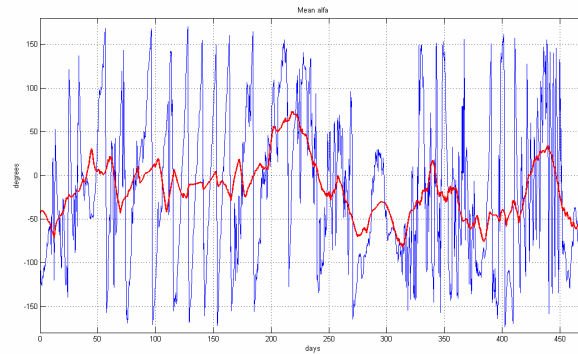


Figura 5.19. Mitjana diària de la direcció en funció del temps (blau) i mitjana cada tres mesos (vermell) per la boia SPURS-73237.

La seva gràfica de l'angle de direcció en funció del temps no es visualitza cap canvi destacat tret de les oscil·lacions corresponent al remolí casi simètriques sobretot entre els dies 25 i 200, en aquestes oscil·lacions la línia que marca la mitjana diària (blau) es reconeix perfectament però en canvi en la mitjana trimestral les obvia ja que al tractar-se moviments circulars sobre casi un mateix punt el desplaçament resultant és mínim amb una direcció resultant pròxima a 0°.

Es presenten doncs tres casos amb diferents característiques pel que fa a possibles canvis de règim. La boia 30171 no presenta un canvi en la direcció però sí en magnitud, la boia 73231 presenta canvis destacats tant en magnitud com en direcció i la boia 73237 no presenta cap canvi destacat en magnitud i encara menys en direcció però sí en freqüències en el seu anàlisi d'ondetes.

Amb les gràfiques d'acceleració comprovem que tot i mostrar tres comportaments diferents totes presenten en major o menor grau un augment de les acceleracions i la seva variabilitat .

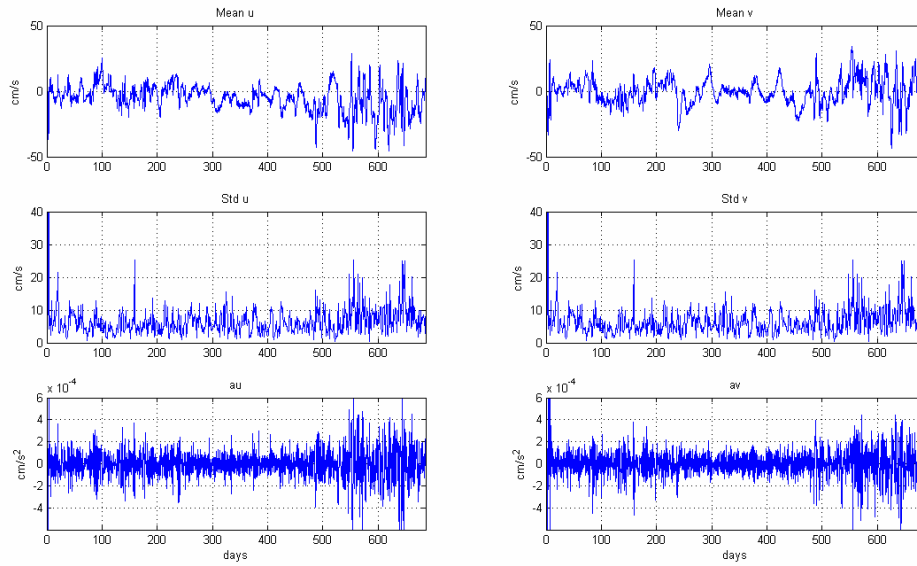


Figura 5.20. Mitjana i desviació estàndard diària per les velocitats u i v i acceleracions de la boia SPURS-30171

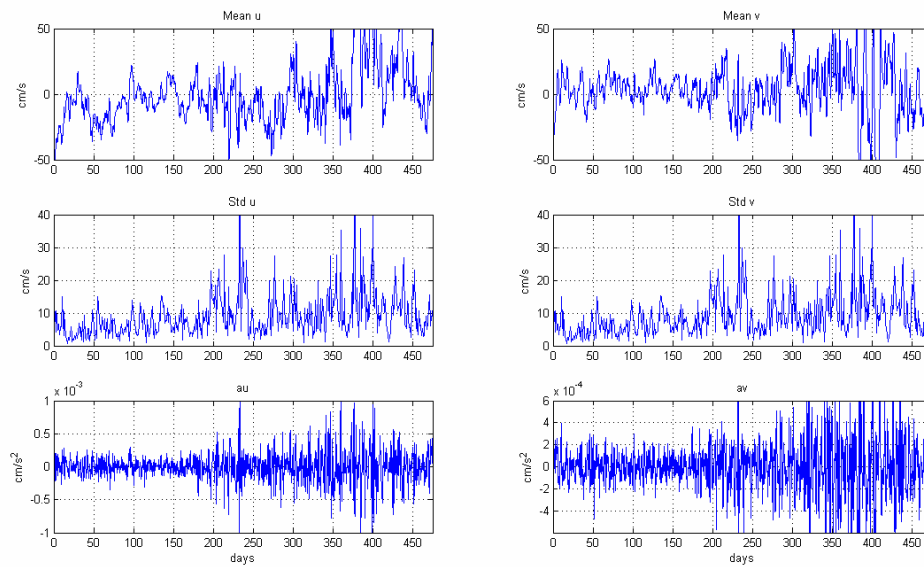


Figura 5.21. Mitjana i desviació estàndard diària per les velocitats u i v i acceleracions de la boia SPURS-73231.

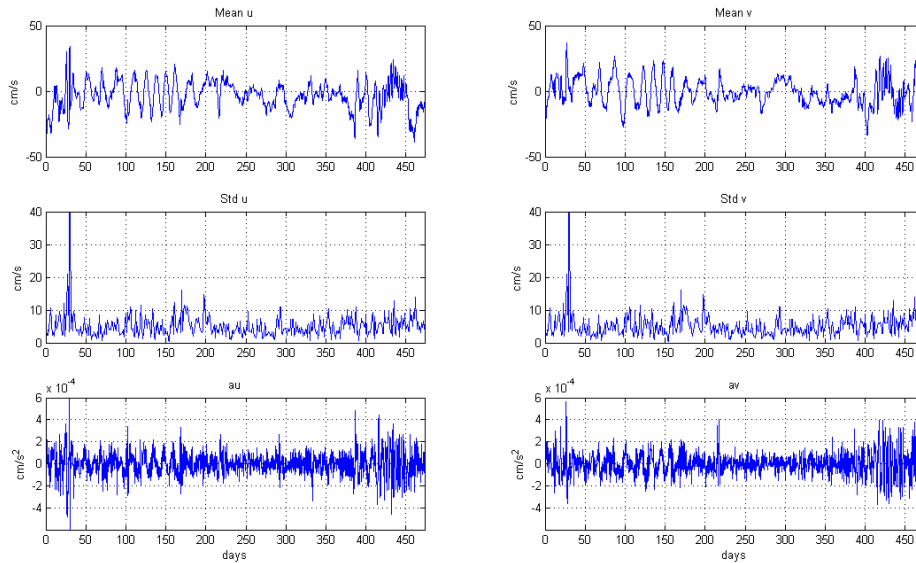


Figura 5.22. Mitjana i desviació estàndard diària per les velocitats u i v i acceleracions de la boia SPURS-73237.

La desviació estàndard diària per a les velocitats u i v mostra majors valors en el final de la segona meitat per la boia 30171 i casi tota la segona meitat de la boia 73231 però cap canvi significatiu en la boia 73237 on per contra sí mostra un augment en les acceleracions al final de la segona meitat (Fig. 5.20, 5.21 i 5.22).

- Caracterització d'un remolí aplicant anàlisi d'ondetes

Aprofitant les dades proporcionades per la boia SPURS-73237 que presenta unes oscil·lacions ben marcades en les velocitats u i v en la primera part de la sèrie, d'acord amb el remolí prèviament caracteritzat en la seva trajectòria i també visible en les acceleracions corresponents (Fig. 5.7 i 5.22) es comprova com l'anàlisi d'ondetes pot proporcionar informació sobre els remolins.

L'anàlisi d'ondetes s'ha fet amb la sèrie de velocitat en l'eix y , $v(t)$ de la boia 73237 i s'aplica un filtre de passa baixa de 2 dies per eliminar les oscil·lacions inercials (Fig. 5.23). El resultat destaca fàcilment un pic d'energia ben consolidat coincidint amb els dies en que es troba sotmès al remolí. Indicant que el període d'aquest remolí es troba per mitjana al voltant dels 16 dies.

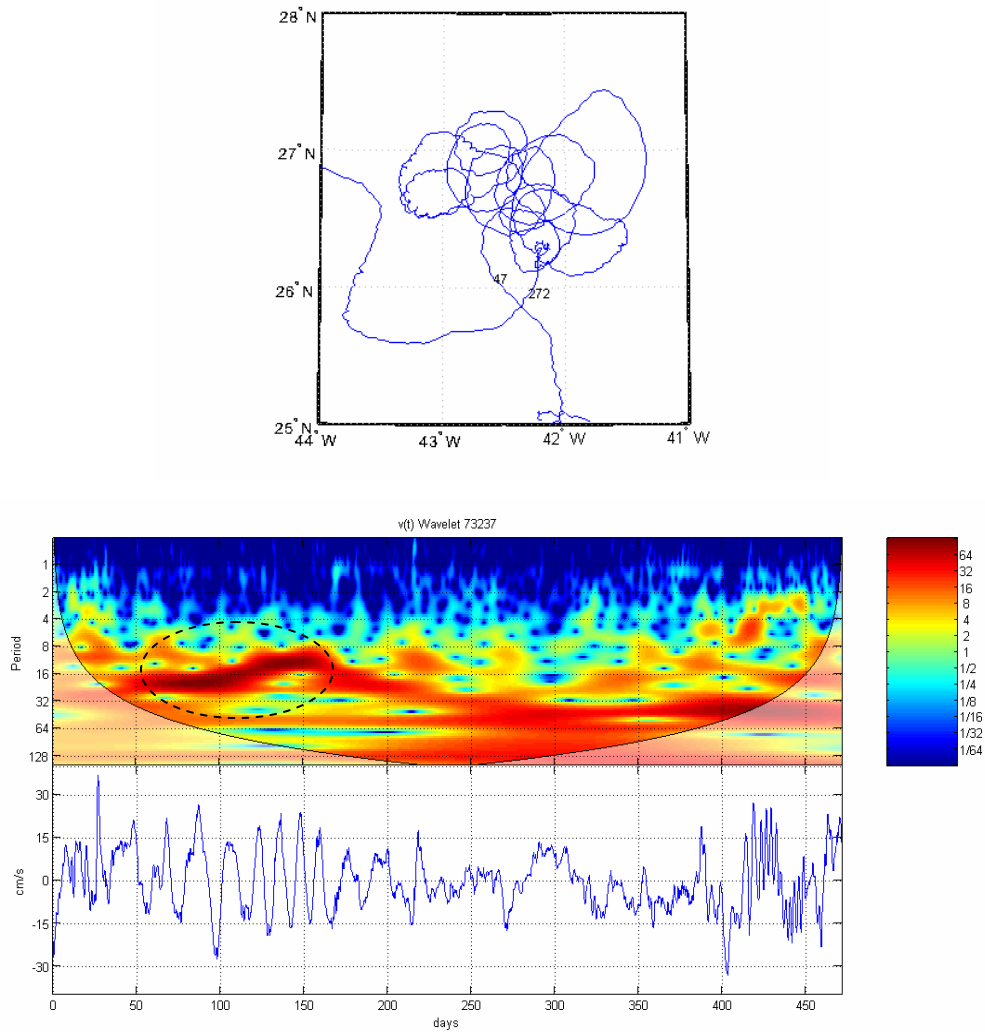


Figura 5.23. Anàlisi d'ondetes per la boia SPURS-73237 de la sèrie $v(t)$ sotmesa a un filtre de passa baixa de dos dies, juntament amb la trajectòria corresponent on s'indiquen els dies d'entrada i sortida aproximats. El cercle discontinu negre de l'anàlisi d'ondetes marca l'energia corresponent al remolí.

Es tracta doncs d'un remolí ciclònic d'un diàmetre aproximat entre 60 i 80 km de període al voltant dels 16 dies.

6. Discussió

Per a estudis amb dades de boies de deriva cal una anàlisi previ per poder determinar la seva qualitat, pel que cal disposar del mètodes adequats per a la identificació de valors atípics i interpolació així com conèixer saber la resolució espacial i temporal. Els mètodes de neteja de valors atípics i interpolació empleats en aquest treball presenten bons resultats ja que tot i tractar-se de sèries de dades no equidistants en el temps la major part dels seus valors estan mesurats en intervals de temps relativament curts el qual disminueix el marge d'error. La interpolació kriging per Hansen and Poulain (1996) proposada per el GDP, mostra resultats molt eficients sent una eina molt útil per a obtenir una sèrie equidistant en el temps facilitant el desenvolupament de futurs estudis.

L'anàlisi espectral d'ondetes amb l'equació de Morlet és una bona eina per estudiar sèries temporals amb freqüències no estacionaries, ens permet analitzar qualitativament com evolucionen les diferents freqüències en el temps ajudant-nos a interpretar millor els canvis que es poden donar amb resultats robustos. En el nostre cas ho podem comprovar amb la coincidència de diferents pics d'energia amb el període inercial corresponent a cada boia només aplicant la formula $T=2\pi/f$. Es confirma que la zona d'estudi es tracta d'una regió de vents dèbils i marcada estratificació on les oscil·lacions inercials tenen un paper important en la dinàmica de l'oceà a altes freqüències. L'anàlisi d'ondetes també és útil per caracteritzar remolins mesoescalars tal i com hem comprovat amb la boia SPURS-73237.

Per la detecció de la pèrdua d'àncora de capa no s'han obtingut encara resultats concloents però entenem que els mètodes d'anàlisi proposats poden ajudar a determinar aquesta pèrdua. La incorporació del cap rotatiu en l'estructura de la boia suggereix que la pèrdua d'àncora pot esdevenir amb més retard en comparació amb boies de disseny estrictament estàndard, així que cal tenir en compte la possibilitat que totes o algunes de les boies SPURS tot i tenir una vida superior a l'any poden encara mantenir l'àncora de capa. Tot i així per a il·lustrar les eines d'anàlisi que proposem s'han seleccionat tres boies com a possibles candidates d'haver perdut l'àncora de capa, ja que són visibles canvis en les seves freqüències en la part final de les sèries de velocitat absoluta: 1) un cert augment d'energia en períodes entre els 2 i 8 dies visible en les tres boies, 2)

desaparició per complet de les energies inercials en la boia 73231 i bona part en la boia 30171, 4) La boia 73237 les inercials es mantenen però si apareixen freqüències supra-inercials més destacades de període 4-8 dies.

L'anàlisi de distribució de velocitats amb les gràfiques PDF i núvol de punts $v(u)$ serveix per determinar si existeixen dinàmiques diferents que mostrin canvis en magnitud i direcció que poden ser resultat de la pèrdua d'àncora. Per les boies analitzades separatament es mostra que la velocitat varia un 27% la velocitat per la boia 30171, un 38% la 73231 i un 17% la 73237, (Taula 6.1).

<i>SPURS</i>	<i>Deployment</i>	<i>Day off</i>	<i> Vt on (cm/s)</i>	σ_{on} (cm/s)	<i> Vt off (cm/s)</i>	σ_{off} (cm/s)
30171	27/08/2012	450	12,04	8,07	20,98	10,6
73231	31/03/2013	330	20,84	12,53	39,45	26,88
73237	01/04/2013	400	13,82	8,5	19,78	10,56

Taula 6.1. Valors de velocitats mitjanes i desviació estàndard durant la fase amb àncora (*on*) i sense àncora (*off*) per a cada una de les boies seleccionades.

Les tres boies tenen un comportament diferent però totes mostren un canvi en l'acceleració en els dos eixos cartesianes suggerint que l'anàlisi d'acceleracions també pot ser útil per donar-nos informació que altres variables no ens donen

Tot i no poder demostrar del tot que aquestes característiques són resultat de la pèrdua d'àncora o simplement de la dinàmica oceànica en que les boies s'hi troben, si suggereixen que l'anàlisi d'ondetes pot ser una bona eina per detectar canvis de règim que complementat amb l'anàlisi d'acceleracions, i la distribució de les seves velocitats podria ajudar a determinar aquesta pèrdua.

7. Conclusions

L'ús de boies de deriva per la caracterització dels oceans és imprescindible per seguir avançant en entendre la complexa dinàmica de l'oceà. Esforços en la millora del disseny i control de qualitat de les boies de deriva seran benvinguts en aquest avenç. La incorporació d'un cap rotatiu en el cable de subjecció entre la boia i l'àncora en els models estandarditzats tal i com s'ha fet en les boies SPURS pot contribuir en allargar la vida de les boies i no prescindir de dades de boies amb una vida superior a 3 mesos tal com remarca Grodsky et al. (2011). Altres mesures com un sensor de vent en la part superior de l'esfera de la boia poden ser útils a la hora de correlacionar dades de vent i corrent de manera molt més detallada que ajudarien en la detecció de la pèrdua d'àncora de capa.

En resum, és necessari encara avançar en la recerca per tal de desenvolupar una metodologia que no faci falta l'ús de dades externes com l'altimetria i útil per a qualsevol zona dels oceans, en aquest sentit es presenten les següents conclusions:

- a) L'anàlisi d'ondetes és un anàlisi potent a la hora de descriure la dinàmica oceànica en diferents freqüències i detectar possibles canvis de règim.
- b) Complementar l'anàlisi d'ondetes amb altres tècniques com un estudi de la distribució de velocitats i les acceleracions per corroborar els resultats fan que aquests siguin més robustos i concloents..
- c) Per a verificar la metodologia proposada caldria poder treballar amb boies en què es sàpiga en certesa que han perdut l'àncora i contrastar resultats aplicats amb altres metodologies com les presentades per Rio (2012), Lumpkin et al. (2013) amb boies de zones influenciades pel vent.
- d) Avançar en la recerca de la dinàmica oceànica de la capa superficial a altes i baixes freqüències per a desenvolupar metodologies més acurades que ajudarien a determinar la pèrdua d'àncora de manera més eficient.
- e) Introduir metodologies per la detecció de canvis de règim a nivell de estadístic.

- f) Avançar en la recerca del comportament en les acceleracions en les boies de deriva ja que queda demostrat que poden aportar informació valuosa que pot ser correlacionada amb dinàmiques pròpies de boies amb i sense àncora de capa.

Amb una metodologia correctament desenvolupada es proposa establir uns llimars de valors de velocitats o derivats, així com l'acceleració i desviació, adequats segons la zona d'estudi per tal de facilitar la detecció de la pèrdua d'àncora de capa de manera estandarditzada.

Tot i així a part de l'objectiu principal, la metodologia aquí presentada també ha servit per descriure la dinàmica de la superfície oceànica amb l'anàlisi de velocitats de les boies de deriva, mètodes de filtratge per estudiar baixes i altes freqüències així com interpolacions en intervals de temps més petits pot ser una nova proposta per ajudar a descriure corrents i classificar-les segons les seves velocitats i freqüències de manera més detallada.

8. Bibliografia

Crhistopher T., and P. C. Gilbert, 1998: A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61-78.

Farge, M., 1992: Wavelet transform and their applications to turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 24, 395-457.

Gasser, M., J. Salvador, P. Sangrà., and J. L. Pelegrí, 2001: Field validation of a semi-spherical Lagrangian drifter. *Sci. Mar.*, 65 (Suppl. 1): 139-143.

Grinsted, A., J.-C. Moore, and S. Jevrejeva, 2004: Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566.

Grodsky, S. A., R. Lumpkin, and J. A. Carton, 2011: Spurious trends in global surface drifter currents. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10606, doi:10.1029/2011GL047393.

Hansen, D. V., and P.-M. Poulain, 1996: Quality control and interpolations of WOCE-TOGA drifter data, *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, 13, 900-909.

Nicolas, B., C. Christophe, D. Julie, and T. Anne-Marie, 2014: Response of North Atlantic Ocean Circulation to Atmospheric Weather Regimes. *American Meteorological Society*, 44, doi: 10.1175/JPO-D-12-0217.1.

Poulain, P.-M., 2001: Adriatic Sea surface circulation as derived from drifer data between 1990 and 1999. *J. Marine Syst.*, 29, 3-32.

Poulain, P.-M., R. Gerin, E. Mauri, and R. Pennel, 2009: Wind effects on drogued and undrogued drifters in the eastern Mediterranean. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1144–1156.

Ralph, E. A., and P. P. Niiler, 1999: Wind-driven currents in the tropical Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2121–2129.

Rio, M.-H. 2012: Use of altimeter and wind data to detect the anomalous loss of SVP-type drifter's drogue. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 1663–1674.

Rio, M.-H., and F. Hernandez, 2003: High-frequency response of wind-driven currents measured by drifting buoys and altimetry over the world ocean. *J. Geophys. Res.*, 108(C8), 3283, doi:10.1029/2002JC001655.

Uotila, J., J. Launiainen, and Vihma, T. 1997. An analysis of buoy drift in the northern North Atlantic with detection of drogue loss events. *Atmosphere-Ocean* 35, 471-494.