



# **CIRCOLAZIONE SUPERFICIALE NEL MAR NERO MEDIANTE GALLEGGIANTI DAL 1999 AL 2003**

## **PARTE I : STUDIO DESCRITTIVO E STATISTICHE EULERIANE**

R. BARBANTI & P.-M. POULAIN

Per comunicato approvato da: .....

Dr. Renzo Mosetti

Direttore, Dipartimento di Oceanografia

## SOMMARIO:

1. Introduzione.....	Pagina 3
2. Dati e metodi.....	Pagina 7
2.1 <i>Strumenti e trattamento dei dati</i> .....	Pagina 7
2.2 <i>Distribuzione temporale dei dati</i> .....	Pagina 10
2.3 <i>Distribuzione spaziale dei dati</i> .....	Pagina 13
3. Statistiche euleriane.....	Pagina 17
3.1 <i>Scala spaziale</i> .....	Pagina 17
3.2 <i>Campi di velocità media e variabilità</i> .....	Pagina 22
3.3 <i>Stagionalità</i> .....	Pagina 24
3.4 <i>Tempo di residenza</i> .....	Pagina 37
3.5 <i>Relazione tra corrente e batimetria</i> .....	Pagina 39
4. Conclusioni.....	Pagina 48
5. Referenze.....	Pagina 50

## 1. Introduzione

Il Mar Nero è situato ad una latitudine compresa tra  $40^{\circ} 3.42' N$  e  $46^{\circ} 1.98' N$  (figura 1) ed è profondo circa 2200 metri con larghezza massima in longitudine di 1148 km. E' un mare semichiuso, povero di vita, risultato dello scarso scambio di acqua con il Mediterraneo, al quale è collegato attraverso lo Stretto del Bosforo. La penisola di Crimea e parte della costa della Turchia dividono il mare in due sotto-bacini (est ed ovest); vi è inoltre, un'ampia piattaforma a nord ovest denominata (North West Shelf, NWS) con estensione variabile rispetto alla costa da 2 a 12 km.

Il Mar Nero è caratterizzato da un elevato apporto di acque dolci del quale l'80% è concentrato nella NWS ove è presente il delta del Danubio; è fortemente influenzato da contaminazione dovuta allo scarico di fiumi e corsi d'acqua, città e di da parte di navi. Poiché l'inquinamento avviene dalla zona costiera o più prossima la costa, allora, studi di mescolamento orizzontale, dovuto a trasporti mediante strutture a mesoscala tra zone costiere e mare aperto sono particolarmente importanti.

La circolazione generale negli strati superficiali di questo bacino secondo le più recenti descrizioni [Oguz et al.,1993; Korotoev et al., 2003; Zatsepin et al., 2003] è caratterizzata dalle seguenti strutture: 1) una corrente ciclonica lungo costa a scala di bacino denominata Rim Current, 2) una cella interna composta da due o più vortici ciclonici , 3) una serie di vortici quasi stabili o ricorrenti posti tra costa e la Rim Current denominati rispettivamente : Bosforo, Batumi, Sukhumi, Caucasus, Kerch, Crimea, Sevastopol, Danube, Constantsa, e Kaliakra (NAE) (figura 1).

Sovrapposti a queste strutture avvengono attività transitorie a mesoscala sotto forma di meandri, biforcazioni della Rim Current vicino alla punta sud della penisola di Crimea; qui una branchia segue verso sud ovest la linea topografica della scarpata continentale e un'altra fluisce internamente, in zona di piattaforma, in direzione nord ovest, per convergere successivamente all'altra lungo la costa della Bulgaria e Turchia. [Korotoev et al., 2003]. Inoltre si è notata la presenza di vortici anticiclonici estesi nella parte nord/nord-ovest della piattaforma continentale (Danubio). Analisi mostrano che l'energia delle strutture a mesoscala è principalmente

confinata lungo la Rim Current. La scala temporale tipica dei meandri della Rim Current è tra 50 e 150 giorni.

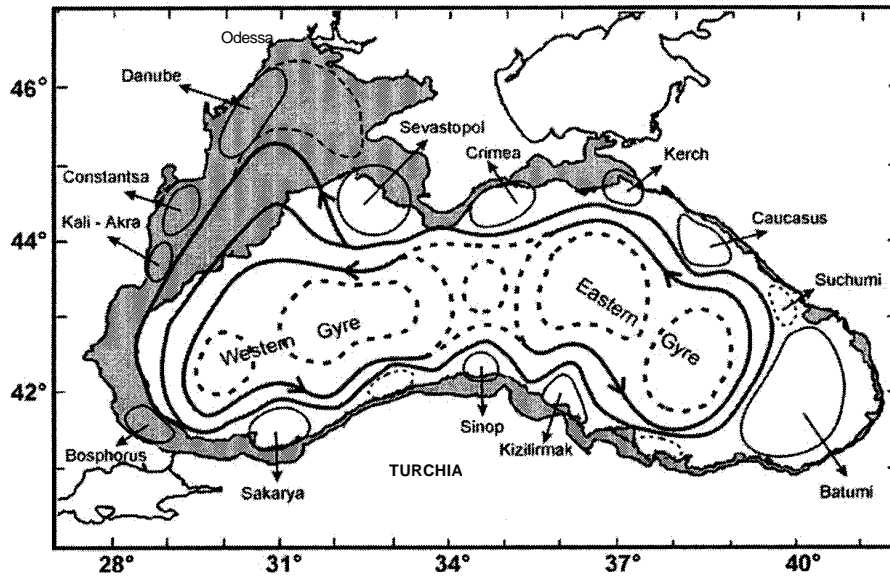


Figura 1. Mappa schematica delle principali strutture riguardanti la circolazione negli strati superficiali (da Korotaev et al., 2003).

Il vortice Bosphorus ha vita media di 85 giorni ed è stato osservato in media 260 giorni per anno. Una catena di vortici sulla costa turca ha un carattere più intermittente e viaggia lentamente verso est. I vortici Samara, Sinop e Kizilirmak tendono ad essere più stabili per il controllo esercitato dalla topografia della zona. Il Batumi oltre ad essere il più esteso è anche il più intenso e persistente tra i vortici costieri del Mar Nero, si forma regolarmente ai primi di marzo e vive fino a fine di ottobre con una vita media per anno di 210 giorni. Il Suckumi si manifesta per circa 120 giorni per anno e vive circa un mese dopo la sua formazione che è tipicamente autunnale o dei primi mesi dell'inverno quando il Batumi non è presente. Il Cucasus appare per 160 giorni per anno prevalentemente nei giorni primaverili, la sua vita media è di circa 2 mesi, ma può durare anche per più di 9 mesi, interagisce con Suckumi e Kerch ed è accompagnato da un grande meandro della Rim Current verso la parte centrale del bacino est. Il Kerch ha una persistenza di 240 giorni ed una vita media di 80 giorni, si trova con più probabilità in primavera ed autunno. Il vortice di Crimea si verifica prevalentemente in agosto - settembre e si osserva per circa 115 giorni l'anno, il periodo medio di ogni evento è di circa un mese. Inverno ed estate sono le stagioni preferite dal vortice di Sevastopol, durante tali stagioni è stato osservato per circa 150 giorni per anno, con una vita media di 50 giorni; esso si



forma come un doppio prodotto di un intenso meandro della Rim Current o come una parte di biforcazione della stessa, lungo la costa ovest di Crimea.

La zona di piattaforma (NWS) è governata permanentemente da una vorticità anticiclonica determinata dal vento. Per il 55% del tempo la vorticità è confinata all'interno di una stretta banda lungo la costa fra Odessa e Constantza (vortice Danube) e qualche volta si espande e occupa un'ampia porzione di piattaforma. I vortici Constantza e Kaliakra si sono osservati per circa 190 giorni per anno una vita media di 50 giorni.

Durante alcuni periodi vortici anticiclonici si osservano, non solo tra la costa e la Rim Current ma essi occupano anche la parte centrale del bacino. Questi anticicloni hanno diametri di 80-100 km e penetrano in profondità nel pycnoclino (fino a 300-400 m), la loro velocità orbitale tipica è di 0.15-0.50 m/s, che è dello stesso ordine di grandezza della Rim Current. Essi giocano un ruolo importante nel mescolamento orizzontale delle acque superficiali del Mar Nero [Zatsepin et al., 2003].

Il mescolamento maggiore si verifica qualora una coppia di vortici, di cui uno è ciclonico e l'altro anticiclonico, vengono a contatto, oppure, attraverso l'interazione tra un vortice e la Rim Current, in quest'ultimo caso la Rim Current può allontanarsi di molto dalla costa e dividersi in molti filoni. E' possibile che la variabilità inter-annuale e intra-stagionale, e la variabilità sinottica/locale del vento siano i fattori determinanti per la formazione di tali strutture a mesoscala [Zatsepin et al., 2003].

Nel 1987 si ebbe il primo tentativo di utilizzare delle boe galleggianti (in seguito verranno anche chiamati "drifter") in Mar Nero. Furono utilizzati 14 boe superficiali denominate LOBAN ed utilizzate dal 1987 al 1997 al fine di monitorare in prevalenza la Rim Current attorno al perimetro del bacino utilizzando anche immagini di temperatura superficiale (SST) da radiometro infrarosso (AVHRR) su satelliti NOAA [Motyzhev et al., 2000]. Questo studio mise in luce una dinamica estiva significativamente differente da una invernale, la prima presenta una più intensa attività nella variabilità di mesoscala ed un carattere intermittente nella Rim Current; la seconda caratterizzata da una circolazione ciclonica chiusa attorno al bacino ed una minor attività nella mesoscala. Le stagioni con prevalente attività nella mesoscala sono estate e autunno, non solo vicino alla Rim Current ma anche in centro bacino [Motyzhev et al., 2000].

Un ulteriore studio lo svolse nel 1992 Eremeev, il quale attraverso l'implementazione di alcuni dati di drifter in un modello matematico e considerando anche dati climatici, cercò di ricostruire le caratteristiche del moto delle particelle nella circolazione superficiale in Mar Nero [Eremeev et al., 1992].

Nel 1991, Sybrandy e Niiler [1991] svilupparono un nuovo tipo di galleggiante chiamato SVP; la caratteristica principale era nell'avere un'ancora "holey-sock" a circa 15 m. Questo tipo di galleggiante segue meglio la corrente sottosuperficiale rispetto al LOBAN che risulta più influenzato da onde e vento. Questo nuovo dispositivo lagrangiano fu utilizzato durante la campagna "Black Sea 99", che si tenne durante l'estate e l'autunno del 1999 nel nord-est del Mar Nero, che coinvolse scienziati russi, turchi, ucraini e per la prima volta, adottò una strategia che comprendeva: 1) misure lagrangiane, 2) misure satellitari di temperatura superficiale, e 3) misure idrografiche. Questo studio rivelò una inusuale circolazione anticiclonica nella zona centro est del bacino costituita da un vortice di 150 km di estensione (in sezione) con velocità orbitale di 15-20 cm/s e un secondo vortice ciclonico a nord di esso vicino alla Rim Current con velocità orbitale di 25-30 cm/s [Motyzhev et al., 2000; Afanasyev et al., 2002] e tra questa struttura a dipolo e la costa russa è presente un "jet" della Rim Current con velocità 2 o 3 volte minore. Le zone centrali, sia del bacino ovest sia del bacino est sono zone a forte attività nella mesoscala con predominanza di strutture anticicloniche.

Dal mese di settembre del 1999 fino al mese di ottobre 2003 in Mar Nero hanno operato un totale di 53 boe galleggianti. Parte di questi dati, dal 1999 al 2002, sono già stati analizzati da Zhurbas et al. [2002] i quali descrivono la circolazione superficiale e alcune strutture su diverse scale spaziali. Questo nostro studio vuole analizzare i dati, dell'intero database dal 1999-2003, ottenuti nell'ambito del programma internazionale di drifter in Mar Nero, per descriverne la circolazione superficiale. A causa della differente metodologia adottata, riguardante il trattamento dei dati ("editing", interpolazione e filtraggio), le analisi euleriane ed anche per l'aggiunta nell'analisi di dati dell'anno 2003, i risultati ottenuti differiscono in parte rispetto a quelli di Zhurbas et al. [2002].

Nel capitolo 2 si possono avere informazioni sul tipo di drifter utilizzati e circa il trattamento dei dati, la loro distribuzione temporale e spaziale dei drifter mediante grafici delle statistiche e delle traiettorie. Nel capitolo 3 saranno presentati i risultati dell'analisi dal punto di vista euleriano, le modalità di determinazione della scala spaziale con la quale i dati sono stati

mediati, i campi di velocità e la variabilità attorno al campo medio, l'energia del campo medio e quella delle relative fluttuazioni, la posizione del cuore della Rim Current rispetto alla batimetria ed il tempo di residenza medio. Nel capitolo 4 saranno discussi i risultati ottenuti e le conclusioni a cui tali risultati ci hanno portato.

## 2. Dati e metodi

### 2.1 Strumenti e trattamento dei dati

Fra il 1999 e 2003 sono stati impiegati un totale di 53 drifter nel Mar Nero che hanno fornito 54 traiettorie con un totale di 24238 misure di velocità mediate ogni 6 ore. I drifter utilizzati appartengono al tipo XAN-3 (n°6) con catena di 10 termistori fin a 50 m della MetOcean, Canada, n° 37 del tipo SVP-B con una ancora di tipo "holey-sock" centrata ad una profondità nominale di 15 m, con sensore di pressione atmosferica e temperatura dell'aria, di cui n°4 americani della Naval Oceanographic Office (NAVO), e n°10 del tipo SVP con una ancora di tipo "holey-sock" centrata ad una profondità nominale di 15 m, di cui n°3 ucraini costruiti dalla Marlin di Sevastopol e n°7 americani costruiti dalla MetOcean. Tutti i galleggianti adottano il sistema satellitare ARGOS per la telemetria dei dati e la loro localizzazione, mediante il quale sono forniti i dati relativi a ciascuno di essi. Questo sistema calcola la posizione attraverso la misura dello spostamento Doppler del segnale a frequenza fissa mandato dal drifter.

Le posizioni di messa in mare sono rappresentate in figura 2, la scelta era dovuta al caso specifico, in particolare per monitorare particolari strutture in due modalità: a) mediante campagne oceanografiche volte a studi del mescolamento tra zona costiera e mare profondo, per opera di scienziati russi [Zatsepin et al., 2003; Motyzhev et al., 2000; Afanasyev et al., 2002], b) mediante "ship of opportunity", cioè sfruttando l'opportunità di lanciare a mare i galleggianti da navi di linea (figura 2).

Tutti i dati, compresi quelli della linea di costa e della batimetria, sono stati trasformati da gradi di longitudine e latitudine in distanze in chilometri rispetto ad un punto di coordinate 34.5° di longitudine e 43.5° di latitudine, situato circa nel baricentro del bacino.

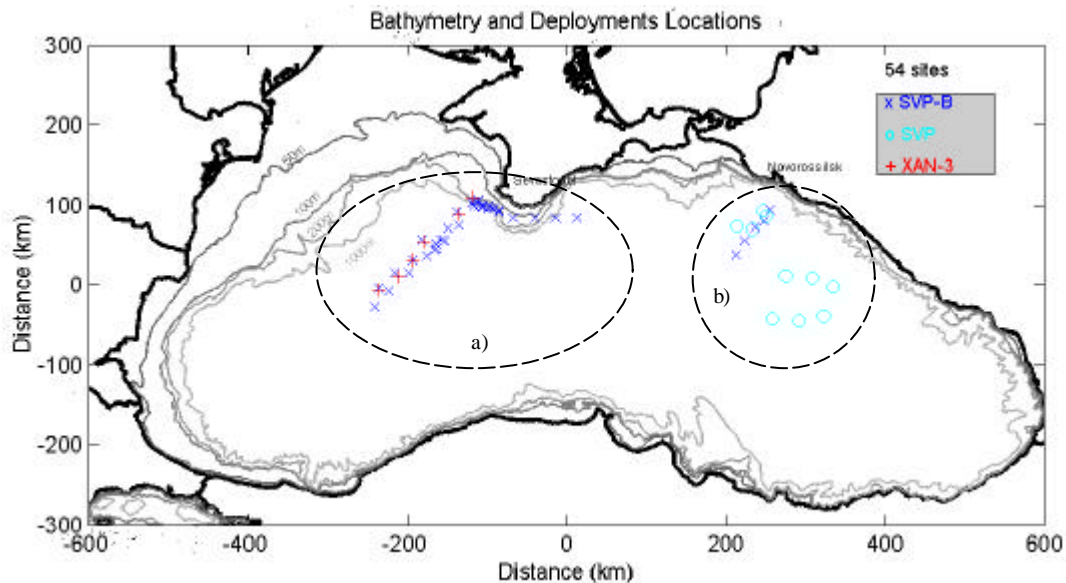


Figura 2. Posizioni di messa a mare dei drifter, differenti colori per tipo. a) rilasciati mediante “ship-of-opportunity”, b) rilasciati durante campagne oceanografiche.

I dati di posizione e temperatura sono stati editati dagli “spike” sia mediante metodo automatico sia manualmente [Poulain, 2001], interpolati ogni 6 ore utilizzando il metodo di Krigging utilizzando un variogramma ricavato dai dati stessi [Hansen e Poulain, 1996], filtrati con un filtro passa basso a 36 ore per eliminare l’effetto delle correnti di marea, sesse e correnti inerziali, ed infine sono stati sotto campionati ogni 6 ore. Le velocità sono state calcolate mediante metodo delle differenze finite centrate dei valori di latitudine e di longitudine sotto campionati [Poulain, 2001]. Precedentemente al Krigging i dati, a livello “raw” (non ancora interpolati) sono stati tagliati alla fine e all’inizio, quando necessario, ed individuata la causa di fine operatività del drifter (recupero o vandalismi di pescatori, spiaggiamento, esaurimento batteria). Si è registrata la data, ora, posizione geografica di inizio dei primi dati buoni e fine di operatività del drifter ed i limiti di latitudine e longitudine di ciascuno. Tutte queste informazioni, assieme all’origine, al tipo e numero dei drifter utilizzati in questo studio, sono riassunti nelle tabella 1.

id	FILE NAME	DEPLOYMENT	lat	lon	LRST HK	lat	lon	IRBLAT	MAX LAT	IRBLON	MAX LON	TYPE DEATH	DRIFTER TYPE	ARGOS PROGRAM	COMMENTS
11342	b11544.08	20/12/01 5.10	44.473	33.007	29/03/02 29.52	44.584	31.588	44.061	45.119	31.004	33.432	battery	KAAN-3	9800-NAVO	lost term chain on 25/01/2002
11343	b11545.08	20/12/01 5.10	43.980	32.259	29/03/02 14.52	42.705	29.341	42.705	44.132	29.301	32.304	battery	KAAN-3	9800-NAVO	lost term chain on 16/02/2002
11402	b11402.08	20/12/01 8.04	44.291	32.799	59/02/01 4.10	43.261	31.041	44.741	44.741	29.627	32.799	unknown	KAAN-3	9800-NAVO	lost term chain on 04/01/2002
11410	b11410.08	20/12/01 8.03	43.748	33.002	60/02/01 23.01	43.038	33.850	41.378	44.124	20.011	30.061	unknown	KAAN-3	9800-NAVO	lost term chain on 15/02/2002
11412	b11412.08	20/12/01 8.03	43.667	31.860	20/02/02 17.16	43.225	29.162	42.589	43.500	20.182	31.860	picked-up	KAAN-3	9800-NAVO	lost term chain on 28-Jan-2002
11438	b11438.08	20/12/01 15.47	43.402	31.994	30/03/02 22.36	42.942	35.098	42.365	44.852	20.215	35.098	battery	KAAN-3	9800-NAVO	lost term chain on 24/02/2002
16330	b16330.08	20/12/01 14.48	44.320	33.440	29/03/02 0.15	41.397	33.733	41.012	44.852	20.855	41.344	sliding	SVP-B	9800-NAVO	
16331	b16331.08	20/12/01 10.38	43.603	31.828	60/02/02 20.38	41.547	40.000	40.801	43.633	20.077	41.177	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	lost # 0306
16332	b16332.08	20/12/01 0.55	43.986	32.234	7/02/02 16.33	42.044	31.251	41.595	44.269	20.032	32.234	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
16333	b16333.08	20/12/01 5.11	44.313	32.775	15/02/02 4.25	41.589	34.818	41.485	44.700	20.645	34.845	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	
16334	b16334.08	20/12/01 5.11	44.126	32.839	13/02/02 3.49	41.949	35.079	40.941	45.046	20.762	41.538	unknown	SVP-B	9800-NAVO	lost drogue
16335	b16335.08	20/12/01 1.11	44.419	33.016	7/02/02 9.26	45.301	32.840	44.419	45.301	32.405	33.324	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
16336	b16336.08	20/12/01 17.41	43.219	31.529	60/02/01 3.35	42.274	28.937	41.331	44.461	28.531	41.454	unknown	SVP-B	9800-NAVO	
16337	b16337.08	20/12/01 6.04	43.749	32.062	27/02/02 3.50	41.114	40.737	41.041	44.028	20.872	40.826	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
16338	b16338.08	20/12/01 15.47	43.423	31.577	22/02/02 17.00	43.033	31.006	41.203	44.630	20.035	40.070	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
17430	b17430.08	20/03/01 15.25	43.071	37.852	10/03/01 11.37	41.583	37.336	41.583	43.303	36.968	36.357	unknown	SVP	1827-005	lost drogue
17431	b17431.08	20/03/01 11.32	43.081	38.483	31/02/01 15.47	42.012	31.853	42.813	44.009	31.334	30.386	unknown	SVP	1827-005	no sensors
17432	b17432.08	20/03/01 2.50	43.420	36.330	11/03/01 0.09	43.000	36.004	42.505	44.000	31.772	36.308	unknown	SVP	1827-005	no sensors
17463	b17463.08	20/03/01 1.12	43.039	36.102	30/03/01 27.42	42.502	37.691	42.602	43.038	37.691	36.113	unknown	SVP	1827-005	
17484	b17484.08	20/12/01 15.17	44.239	37.859	10/02/02 3.38	44.407	28.028	43.882	44.888	38.807	37.859	grounded	SVP	1827-005	
17485	b17485.08	20/12/01 4.48	44.268	37.825	20/02/02 16.45	40.943	36.167	40.942	44.778	29.126	41.845	grounded	SVP	1827-005	
17486	b17486.08	20/03/01 1.12	43.404	36.544	30/03/01 11.53	43.529	36.816	43.404	43.528	36.804	36.691	unknown	SVP	1827-005	incise da 231 307 15598
17487	b17487.08	20/12/01 3.31	44.088	37.410	31/03/01 10.41	44.208	31.286	44.088	45.077	30.808	37.499	unknown	SVP	1827-005	time a 731185 19779
17488	b17488.08	20/12/01 4.48	44.126	37.156	11/01/01 21.22	44.528	33.495	44.846	44.846	33.370	37.156	unknown	SVP	1827-005	
17489	b17489.08	20/03/01 2.58	43.557	37.927	14/02/01 4.30	43.022	36.816	42.478	44.603	31.684	38.307	unknown	SVP	1827-005	time a 730475 06007
28378	b28378.08	01/03/01 19.25	44.250	34.867	30/10/02 7.27	45.161	30.828	43.744	45.161	30.819	34.867	sliding	SVP-B	1828-005	few positions - time a 730718 75103
28379	b28379.08	01/03/01 0.45	44.250	34.900	15/02/01 13.51	43.106	28.530	42.986	45.168	28.143	33.971	sliding	SVP-B	1828-005	
28379	b28379.08	01/03/01 0.45	44.250	34.900	15/02/01 15.28	41.546	29.916	41.546	44.738	28.807	34.000	unknown	SVP-B	1828-005	few positions - time a 730718 75103
28379	b28379.08	01/03/01 22.32	44.250	34.333	15/01/01 5.20	41.532	30.863	41.158	44.751	27.571	34.333	sliding	SVP-B	1828-005	time a 730616 71014
33349	b33349.08	20/12/01 15.18	44.182	37.811	24/12/01 8.26	41.686	28.840	41.682	44.821	28.347	37.714	picked-up	SVP-B	1827-005	
33349	b33349.08	20/12/01 22.34	44.116	37.470	30/12/01 15.32	42.672	30.100	42.017	44.735	29.805	37.638	picked-up	SVP-B	1827-005	lost drogue
33350	b33350.08	20/12/01 22.34	43.970	37.265	16/12/01 15.57	42.933	32.252	42.789	44.867	31.577	37.452	picked-up	SVP-B	1827-005	
33351	b33351.08	20/12/01 15.18	44.302	37.712	14/11/01 5.06	43.963	33.736	43.945	44.870	33.786	37.712	unknown	SVP-B	1827-005	
33352	b33352.08	20/12/01 2.00	43.608	37.100	20/02/02 22.40	42.267	37.491	42.421	44.343	32.237	37.491	picked-up	SVP-B	1827-005	
34629	b34629.08	31/03/01 9.35	44.379	33.053	60/02/01 5.23	44.530	37.850	41.009	44.830	27.985	40.427	unknown	SVP-B	9800-NAVO	lost drogue
34630	b34630.08	31/03/01 14.21	44.157	32.807	17/03/01 16.53	41.400	28.515	41.400	44.583	27.264	41.515	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
34631	b34631.08	31/03/01 14.21	43.870	32.903	24/02/02 23.08	41.084	20.165	41.090	44.280	20.165	32.903	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	
34632	b34632.08	31/03/01 14.22	43.806	32.328	19/02/02 23.28	44.538	31.690	41.197	44.694	20.690	40.956	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	time 23003328 battery 730107330 time 23003328 battery 730107330
34633	b34633.08	31/03/01 14.21	43.810	32.053	5/11/02 4.11	44.780	37.379	41.208	45.080	28.301	38.819	unknown	SVP-B	9800-NAVO	lost temp
34634	b34634.08	31/03/01 14.21	43.996	32.460	24/02/02 10.28	42.133	30.847	40.886	44.971	28.485	41.178	unknown	SVP-B	9800-NAVO	spring
34639	b34639.08	6/03/01 14.00	43.880	33.440	18/03/01 16.29	42.200	31.005	41.887	44.000	28.707	32.444	unknown	SVP-B	1827-005	time 7318003 50777
35001	b35001.08	6/03/01 14.16	43.805	32.465	28/02/02 11.22	41.077	30.809	41.077	44.387	28.386	32.465	unknown	SVP-B	1827-005	64 13002003 4 48 00 battery low - lost temp
35002	b35002.08	6/03/01 14.16	43.897	32.543	4/03/02 10.44	42.507	41.478	41.186	44.692	29.607	41.956	picked-up	SVP-B	1827-005	
40419	b40419.08	14/03/01 11.20	44.327	33.441	24/02/01 11.07	41.636	28.515	41.636	44.836	28.410	33.441	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	
40420	b40420.08	15/03/01 11.20	44.443	33.108	28/02/01 16.01	42.172	28.652	42.172	45.257	20.946	33.254	sliding	SVP-B	9800-NAVO	
40421	b40421.08	14/03/01 9.41	44.374	33.178	1/03/02 23.34	41.421	28.629	41.421	44.726	28.402	33.433	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
40422	b40422.08	14/03/01 11.20	44.353	33.265	25/02/02 10.26	44.016	30.146	43.625	44.936	30.146	33.265	unknown	SVP-B	9800-NAVO	
40423	b40423.08	14/03/01 11.20	44.349	33.340	20/02/01 11.43	42.108	34.065	41.276	45.000	28.422	36.030	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
40424	b40424.08	14/03/01 15.13	44.300	33.207	20/03/01 0.06	45.310	32.690	44.307	45.443	28.289	33.289	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
40425	b40425.08	14/03/01 9.40	44.383	33.123	24/03/02 9.40	41.269	36.925	41.250	44.911	28.254	36.863	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	
40426	b40426.08	14/03/01 11.21	44.384	33.181	5/03/02 12.34	42.146	34.377	41.182	44.867	28.389	34.494	picked-up	SVP-B	9800-NAVO	
40427	b40427.08	14/03/01 15.13	44.434	33.000	19/03/01 16.20	41.176	30.079	41.176	44.069	29.239	33.000	grounded	SVP-B	9800-NAVO	
40428	b40428.08	14/03/01 15.12	44.361	33.328	14/03/02 17.31	41.265	29.495	41.257	45.014	28.359	33.352	unknown	SVP-B	9800-NAVO	

Tabella 1.



## 2.2 Distribuzione temporale dei dati

Prendendo in considerazione l'intera popolazione di drifter con dati che vanno dal 28 settembre 1999 al 29 agosto del 2003, si ha per questi, una "mean half-life" di 92 giorni, cioè più del doppio rispetto al Mar Adriatico e circa 4 volte meno rispetto a zone oceaniche (più di 400 giorni) [Poulain, 2001]. Il tempo di vita massimo è di circa 600 giorni. Per "mean half-life" si intende quanti giorni dopo la messa in acqua si hanno il 50% di drifter ancora operativi. E' importante notare che circa la metà dei drifter hanno smesso di trasmettere perché sono stati recuperati o sono finiti sulla costa.

In figura 3a è mostrata la distribuzione temporale della popolazione con un totale di 16 drifter per anno; pochi sono i dati nel 1999, 2000 e 2001 rispetto a 2002 e 2003 in cui abbiamo un massimo di 18 drifter nei mesi di dicembre e gennaio 2002. Considerando i differenti tipi di drifter SVP, SVP-B e XAN-3 si ha che questi hanno una mean half-life rispettivamente di 95, 84, 91 giorni. Le distribuzioni di ciascuno sono illustrate in figura 4a,b,c.

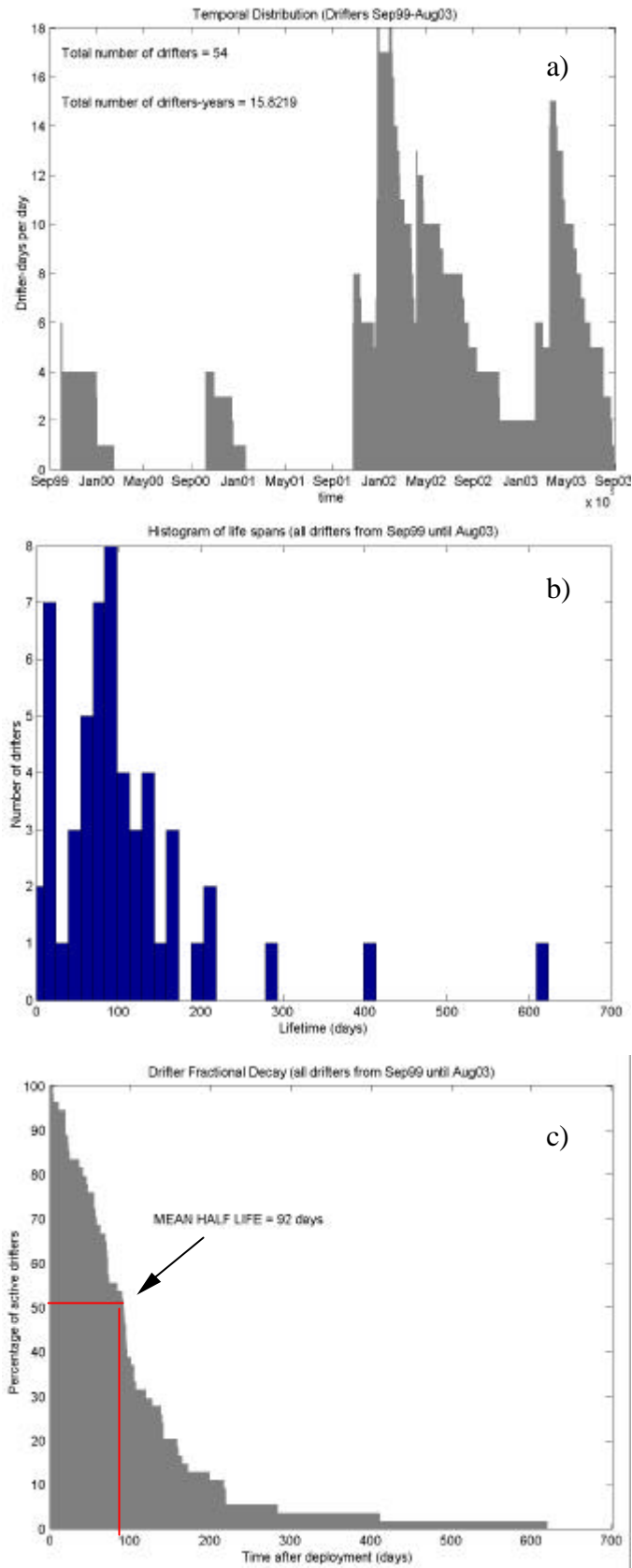


Figura 3. a) Distribuzione temporale dei dati dei drifter; b) Istogramma numero di drifter per tempo di vita; c) Percentuale di drifter attivi dopo la messa in acqua.

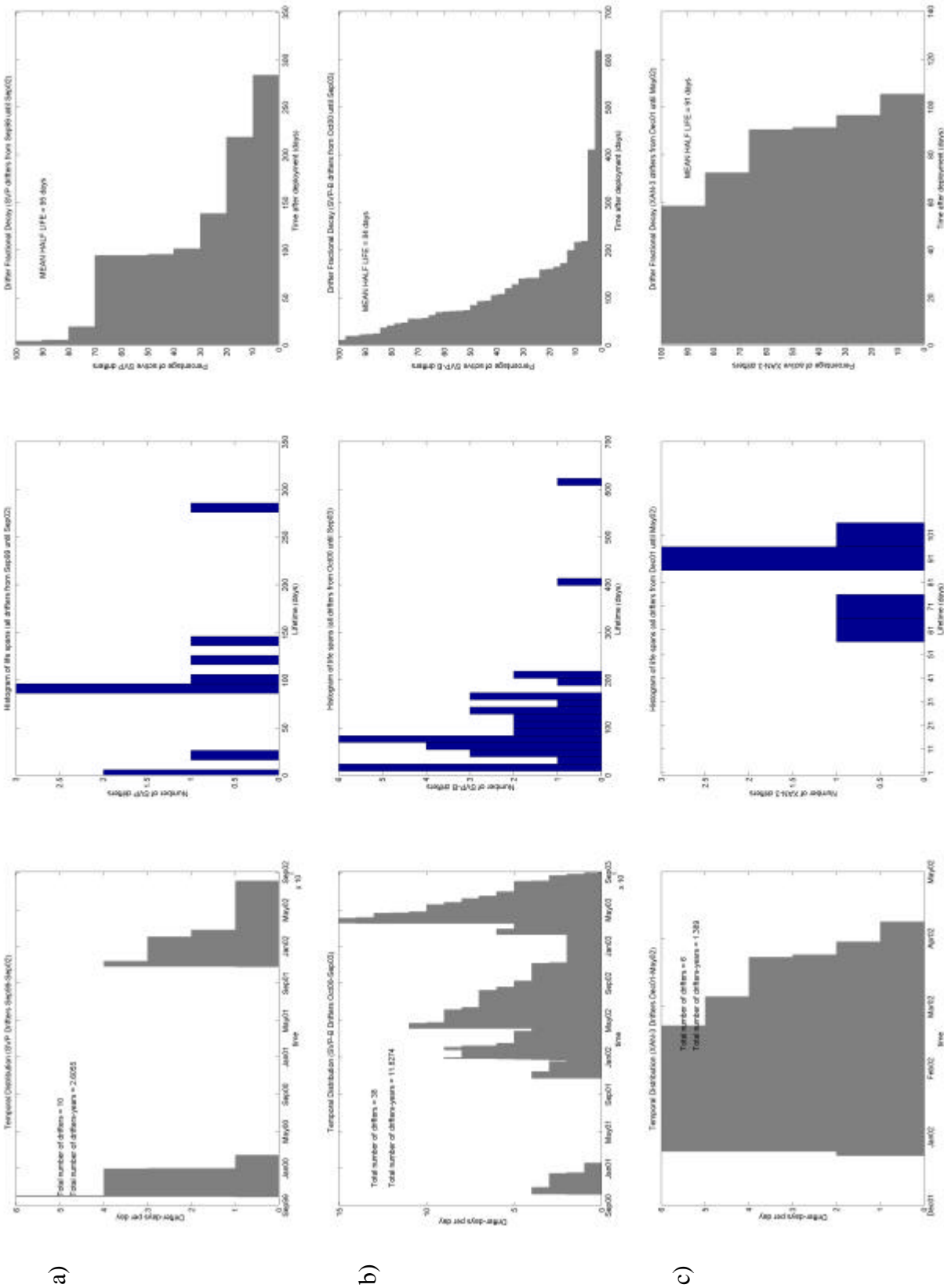


Figura 4. Distribuzione temporale dei dati, Istogramma numero di drifter per tempo di vita, Percentuale di drifter attivi dopo la messa in acqua, mean half life: a)SVP b)SVP-B c) XAN-3.



### 2.3 Distribuzione spaziale dei dati

Nel grafico seguente (figura 5) sono mostrate l'insieme di traiettorie di tutti i drifter, colorate per tipo, evidenzianti una buona copertura spaziale dell'intero bacino, tranne che per una zona a nord ovest, a centro e centro/est bacino. Nella figura 6 sono rappresentate le stesse traiettorie ma interpolate e filtrate, mentre nelle figure 7-11 abbiamo le traiettorie per ogni anno; la quantità di drifter attivi in ciascuno è rappresentato nel diagramma di figura 12.

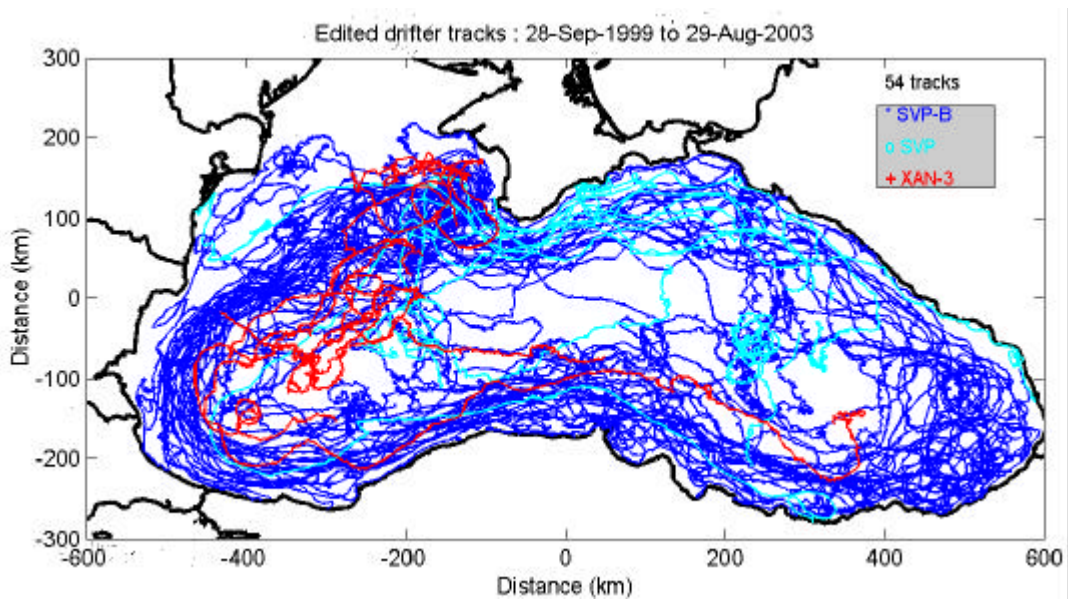


Figura 5. Grafico di tutte le traiettorie dei drifter considerate nel presente studio dal 1999 al 2003.

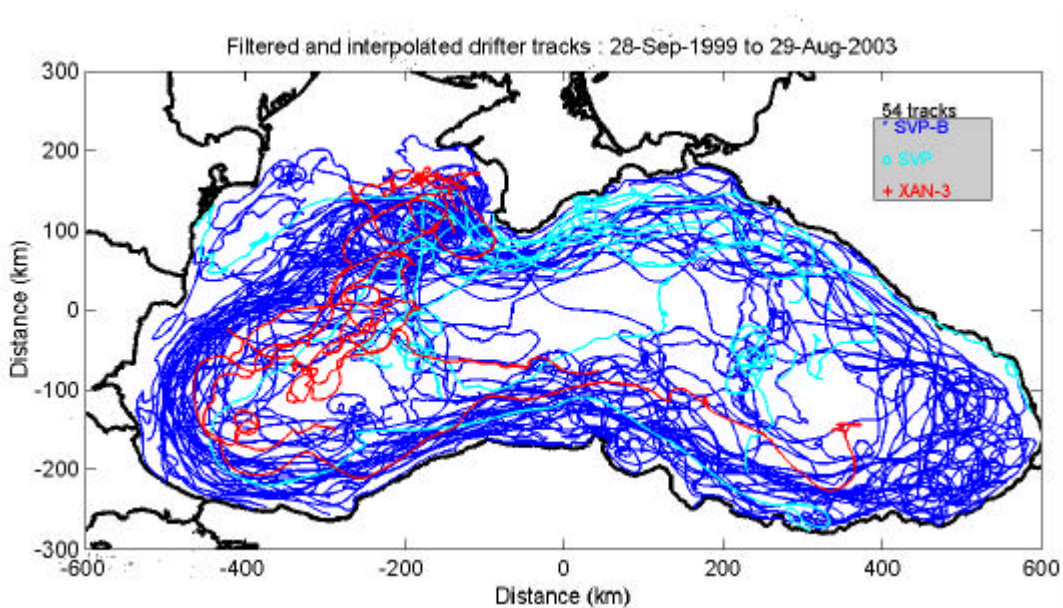


Figura 6. Grafico di tutte le traiettorie filtrate ed interpolate.

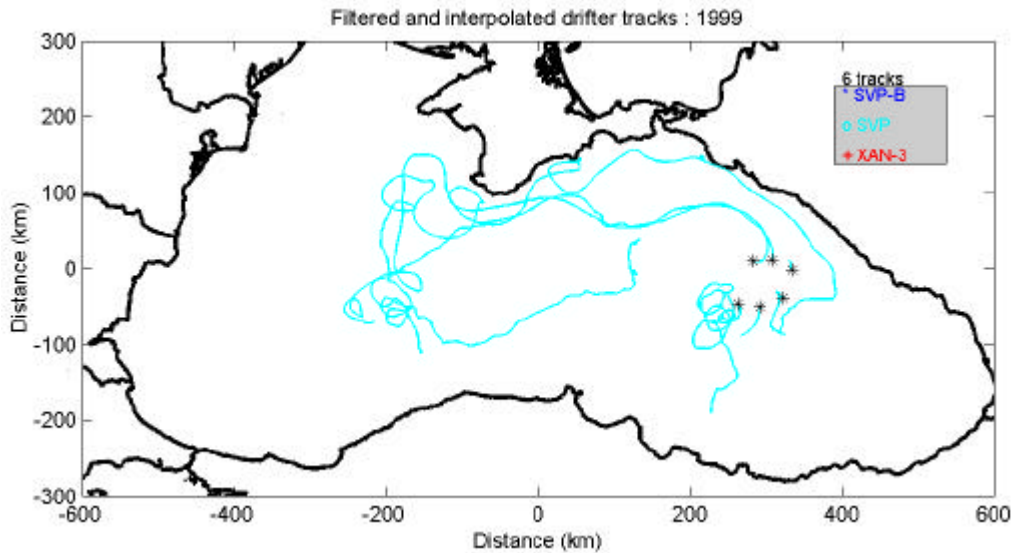


Figura 7. Grafico di tutte le traiettorie filtrate ed interpolate nell'anno 1999 (\* prima posizione dopo il rilascio).

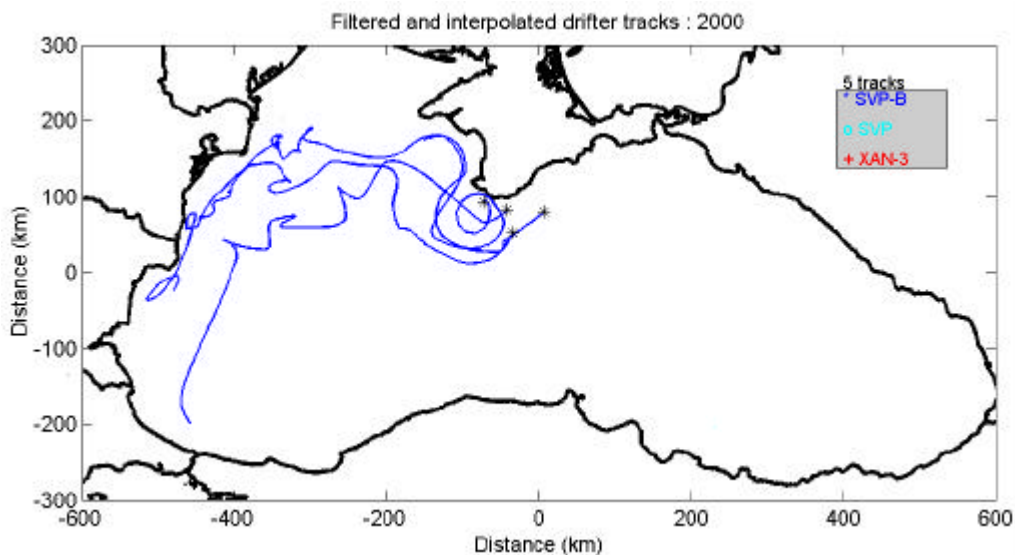


Figura 8. Grafico di tutte le traiettorie filtrate ed interpolate nell'anno 2000 (\* prima posizione dopo il rilascio).

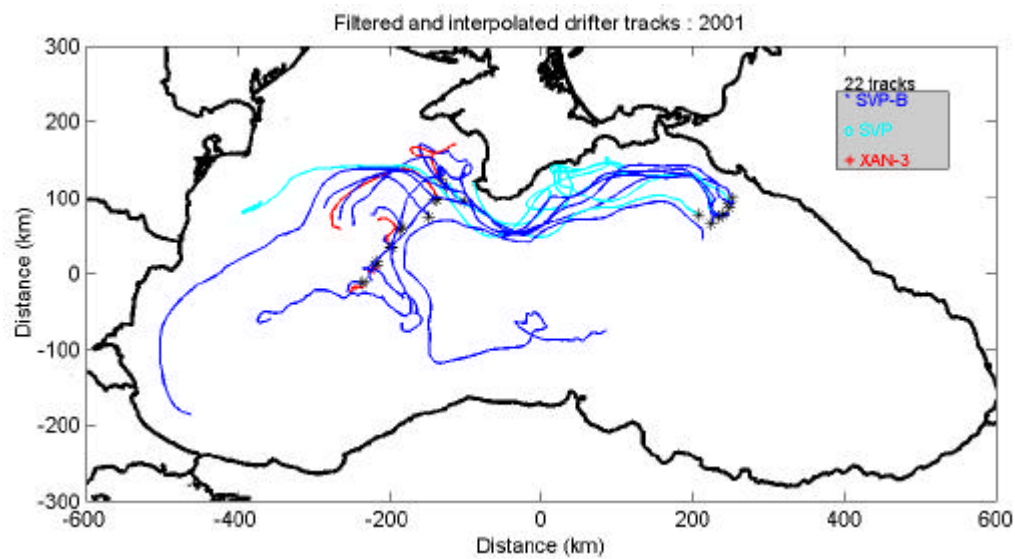


Figura 9. Grafico di tutte le traiettorie filtrate ed interpolate nell'anno 2001 (\* prima posizione dopo il rilascio).

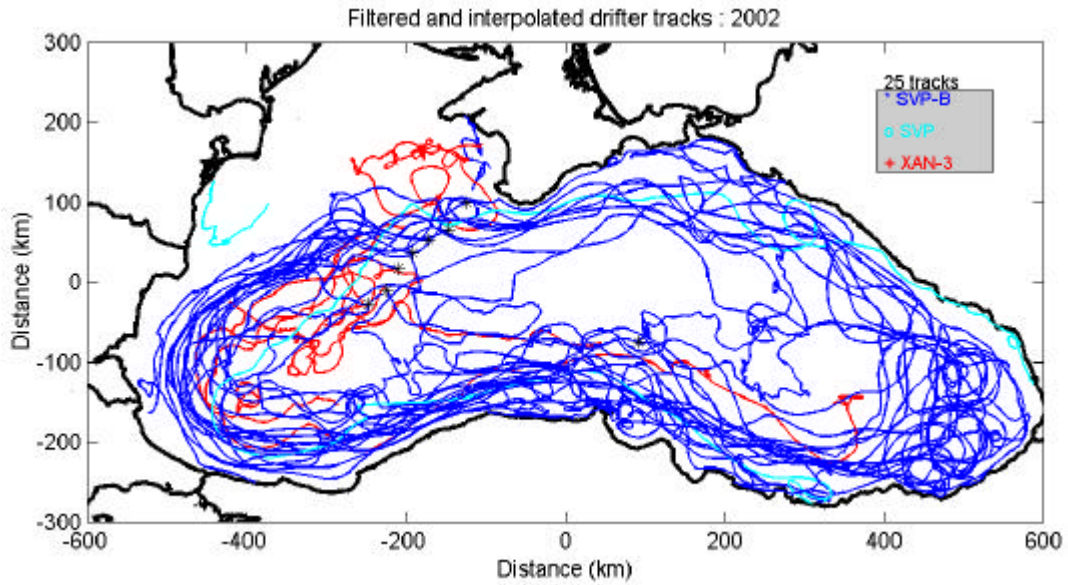


Figura 10. Grafico di tutte le traiettorie filtrate ed interpolate nell'anno 2002 (\* prima posizione dopo il rilascio).

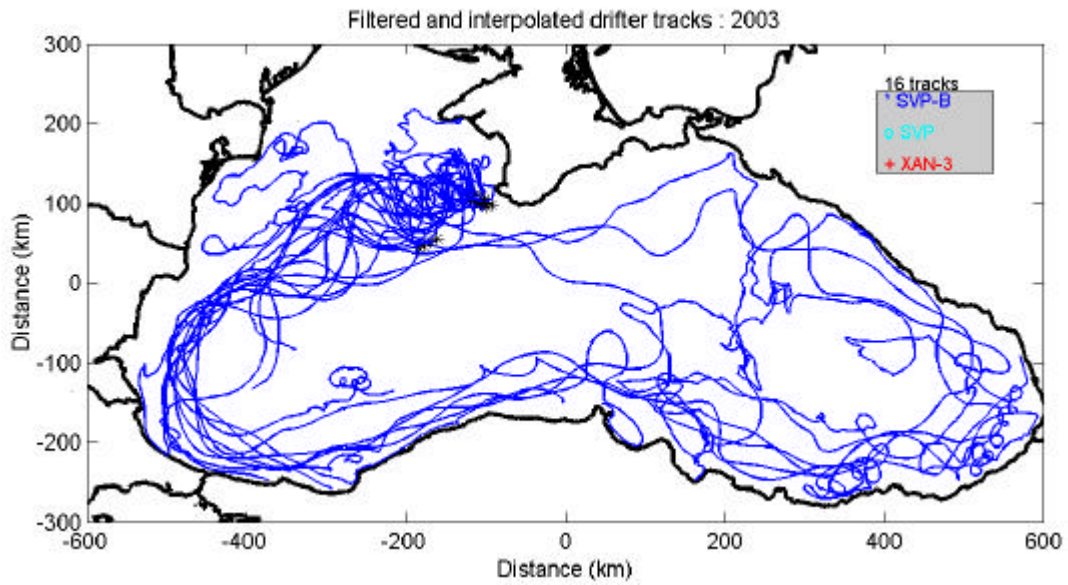


Figura 11. Grafico di tutte le traiettorie filtrate ed interpolate nell'anno 2003 (\* prima posizione dopo il rilascio).

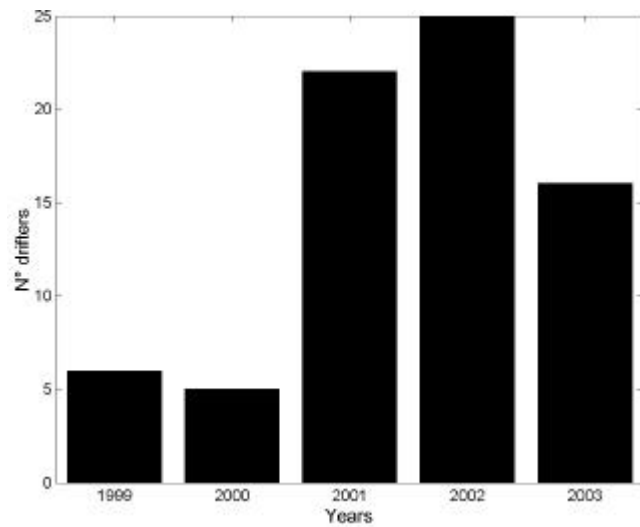


Figura 12. Diagramma della quantità di drifter attivi per ciascun anno.



Le traiettorie confermano la presenza di una circolazione ciclonica attorno al bacino. Tuttavia i drifter non stazionano sempre all'interno della Rim Current, ma sono spesso catturati da vortici (mesoscale eddies) che li trasferiscono in zone di mare aperto, più centrali rispetto al bacino, trattenendoli anche per molto tempo. In figura 13 mostriamo alcuni vortici e, per ciascuno, la data in cui il drifter viene catturato in esso, in blu; la data di uscita, in arancione, se il drifter successivamente ha proseguito nel suo cammino e in rosso se quella è stata la sua ultima posizione.

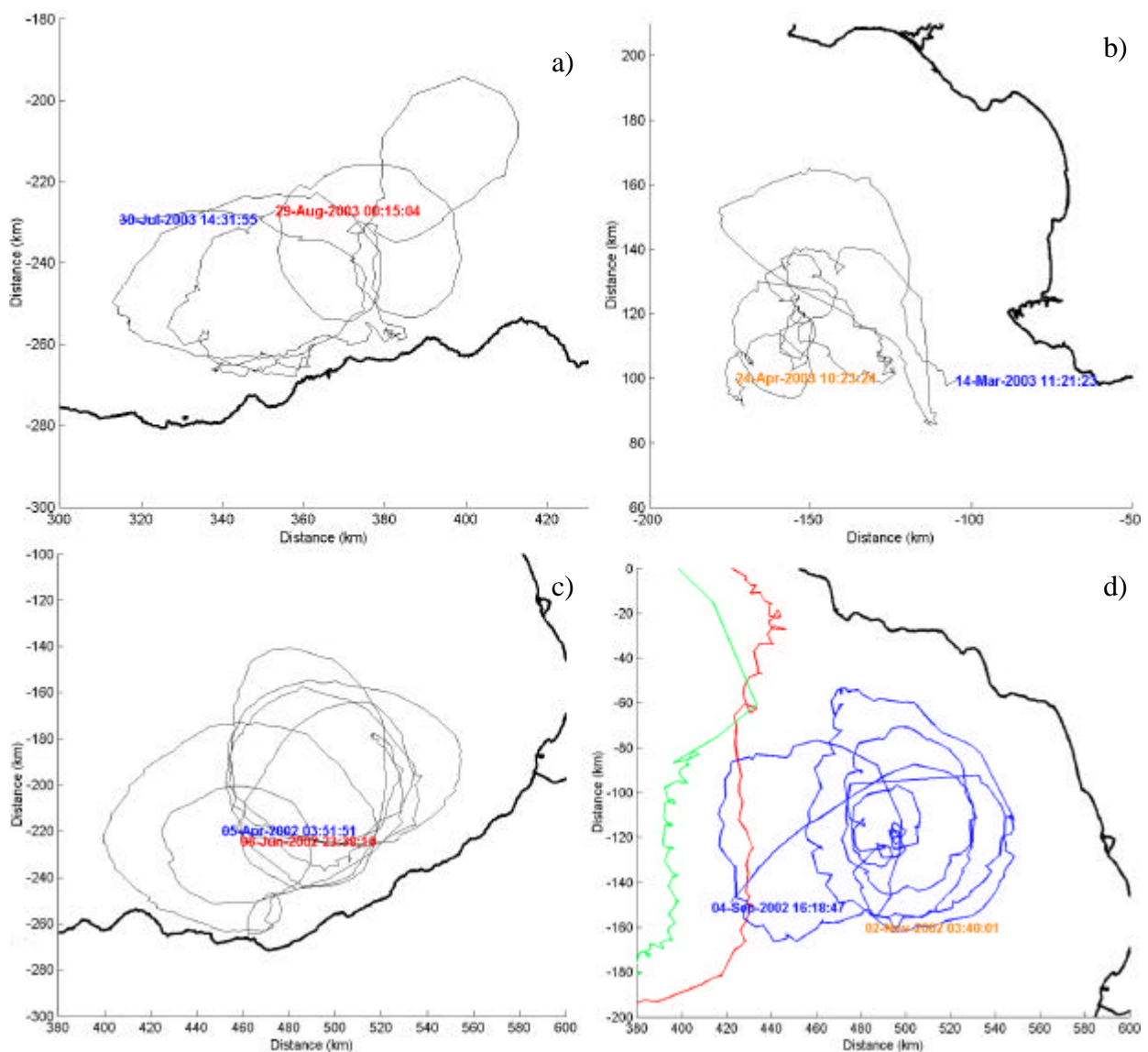


Figura 13. Tracce editate di alcuni vortici: a) Sud,est b) Sevastopol, c) Batumi, d) Batumi (traiettorie verde e rossa della Rim Current, traiettoria blu del vortice nel medesimo periodo).

La distribuzione geografica delle correnti superficiali lente, medie e veloci può essere individuata ordinando le velocità ricavate dai dati interpolati in tre intervalli: minori di 10 cm/s, comprese tra 10 e 40 cm/s e maggiori di 40 cm/s e creando grafici che illustrano tali segmenti corrispondenti a questi intervalli di velocità (figure 14 e 15).

I segmenti con velocità più basse (<10 cm/s) presentano una maggior densità nelle zone centrali rispetto ai bacini est e ovest, appena fuori Sevastopol e in zona di piattaforma fuori la foce del Danubio. Le velocità intermedie fanno parte della maggior parte delle strutture, facenti parte la circolazione superficiale, che si possono individuare dai dati. I tratti più veloci (>40 cm/s) sono situati prevalentemente lungo la zona della "Rim Current", si può notare che anche alcune strutture di mesoscala sono interessate da tali velocità, ad est di fronte alla costa della Georgia, nel vortice Batumi, a sud della penisola di Crimea e fuori Sevastopol, vortice Sevastopol (figure 14-15). La velocità massima si osserva in un punto a sud del bacino (vedere in figura 14) e corrispondente a 95.3 cm/s.

### 3. Statistiche euleriane

#### 3.1 Scala spaziale

Per rappresentare la corrente superficiale del bacino che è somma di una corrente media costante ed un termine che ne rappresenta le fluttuazioni nel tempo e nello spazio (a piccola scala), occorre scegliere un'adeguata scala spaziale; si è adottato il criterio definito da Poulain [2001]. Essendo la velocità massima osservata di 95.3 cm/s, il corrispondente spostamento in 6 ore è dato da:  $0.00095 \times 6 \times 3600 = 20.5 \text{ km}$ . Pertanto si pensa ragionevole considerare un cerchio di diametro di circa 40 km, in modo tale da avere almeno 1 o 2 osservazioni dei drifter più veloci al suo interno. Successivamente abbiamo calcolato l'energia cinetica delle fluttuazioni per unità di massa delle fluttuazioni (EKE) e l'energia cinetica della corrente media per unità di massa (MKE) in cerchi di raggio decrescente, da un unico disco di 600 km di raggio che include l'intero Mar Nero a diversi di 10 km (figura 16).

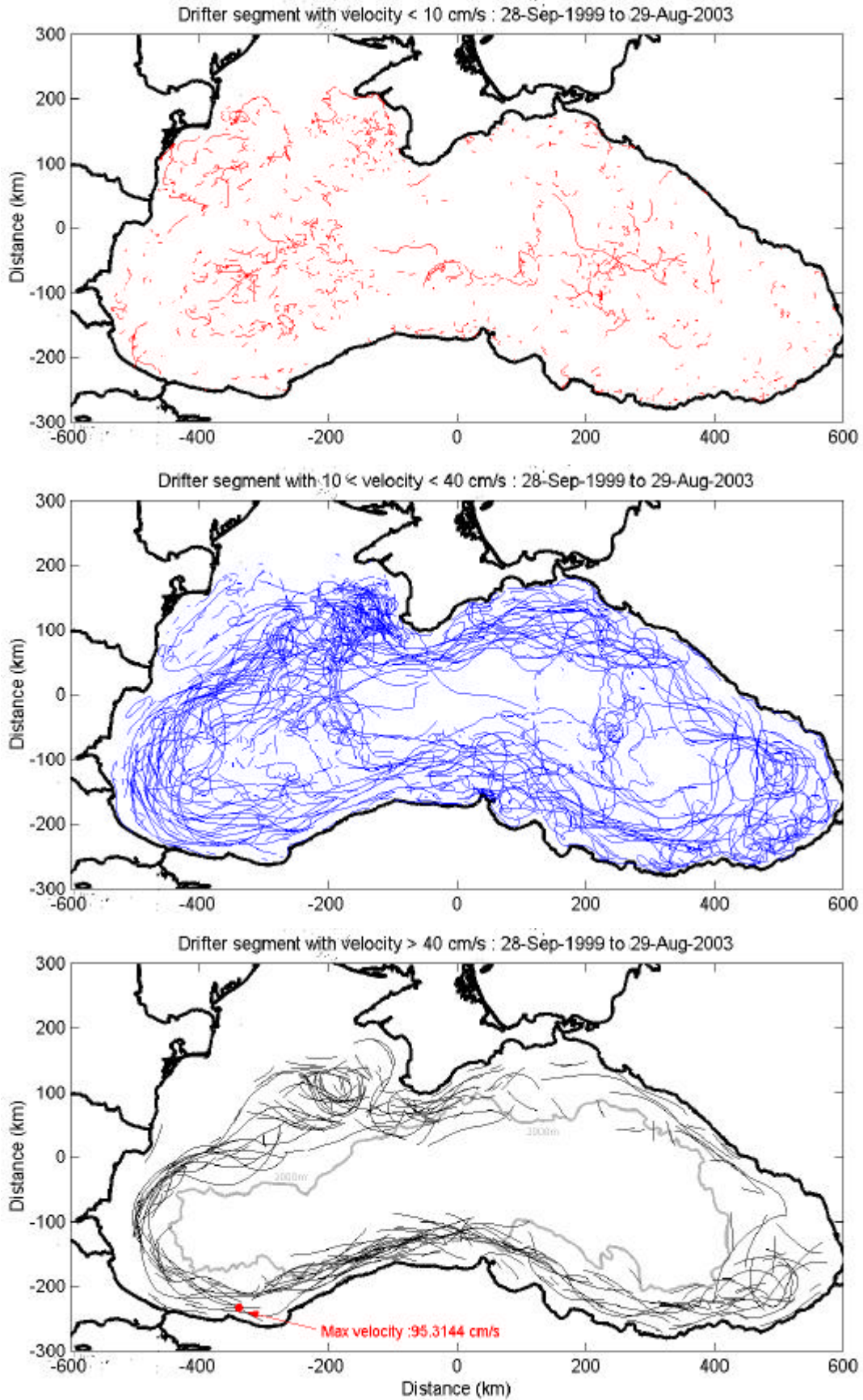


Figura 14. Segmenti di traiettorie corrispondenti a: rosso) velocità < 10 cm/s, b: blu) velocità comprese tra 10 e 40 cm/s, c: nero) velocità > 40 cm/s, in grigio è rappresentata la batimetria di 2000 m.

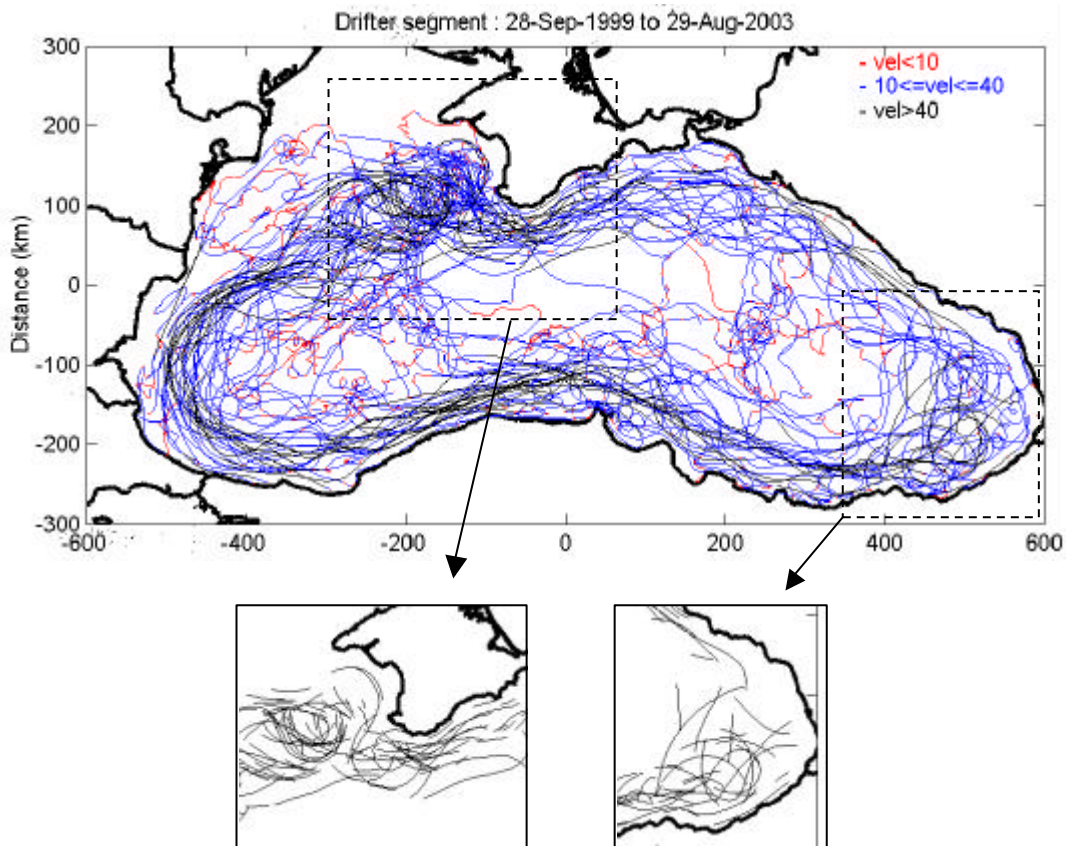


Figura 15. Distribuzione spaziale di segmenti di differenti velocità (nero, velocità maggiori di 40 cm/s; blu, comprese tra 10 e 40 cm/s; e rosso, minori di 10 cm/s). Nelle due figure sotto sono evidenziati particolari strutture a vortici con velocità >40 cm/sec

Queste grandezze sono definite dalle seguenti equazioni [Poulain, 2001]:

$$MKE = \frac{1}{2} \left( \langle u_1 \rangle_E^2 + \langle u_2 \rangle_E^2 \right) \quad (1)$$

$$EKE = \frac{1}{2} \left( \langle u_1' u_1' \rangle_E + \langle u_2' u_2' \rangle_E \right) \quad (2)$$

dove  $\langle u_i \rangle_E$  è la corrente media euleriana della componente  $u_i$ , con  $i = 1$  (componente est-ovest) e  $i = 2$  (componente nord-sud);  $\langle u_i' u_i' \rangle_E$  è la matrice di covarianza e  $u_i' = u_i - \langle u_i \rangle_E$ , è la componente residua di  $u_i$  della velocità. In figura 16 le barre di errore, corrispondenti alla deviazione standard, danno indicazione circa la variabilità nei dati di energia calcolata, che aumenta al diminuire del raggio.

Abbiamo scelto di calcolare le statistiche euleriane in cerchi di raggio 25 km perché questo rappresenta un buon compromesso tra quantità di punti all'interno dei cerchi e risoluzione spaziale. La media su tutti i cerchi della MKE è circa uguale al valore medio della EKE e



corrispondente a  $170 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ . Il valore di tali statistiche, calcolate in questo studio, è quindi specifico e solo per una scala spaziale di 50 km. Dopo aver definito la scala spaziale, nel computo del campo medio e della sua variabilità, non sono stati considerati i cerchi che avevano meno di 5 osservazioni (figura 18b).

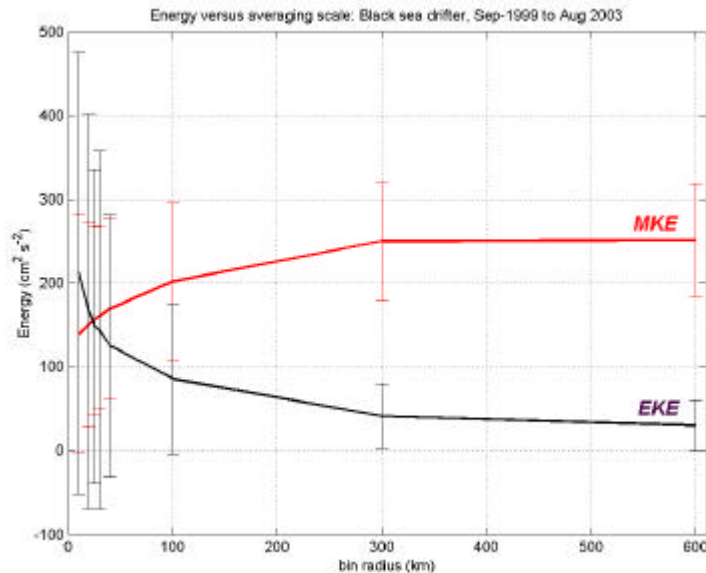


Figura 16. Energia cinetica della corrente media (MKE) e Eddy kinetic energy (EKE) mediate su tutti i cerchi del intero bacino, per ogni taglia di disco da 600 a 10 km.

La quantità di osservazioni per cerchio di 25 km di raggio tende a crescere fino ad un massimo del 4.7% circa a 115 osservazioni, significa che il 4.7% di cerchi ha 115 osservazioni; per maggiori quantità di osservazioni le percentuali diminuiscono notevolmente, meno del 1% per 190 osservazioni (figura 17). La maggior informazione si riscontra nella zona di mare presso Sevastopol e procedendo verso sud ovest (figura 18); ciò è in parte dovuto al fatto che molti drifter sono stati messi a mare in questa zona, ma anche per la presenza appunto del vortice di Sevastopol, il quale tende a intrappolare i drifter (si notano infatti basse velocità in figura 7a). Vi sono molte osservazioni (circa 250) anche in centro est bacino ove è presente un'intensa attività di mesoscala (Vortice Est; figura 18).

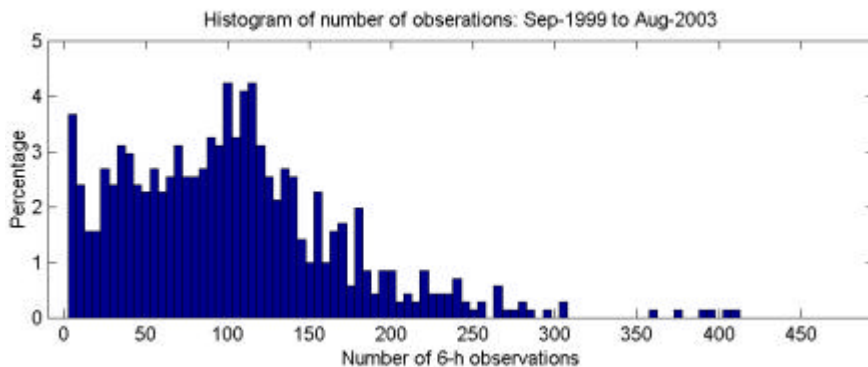


Figura 17. Istogramma della quantità di osservazioni per cerchio.



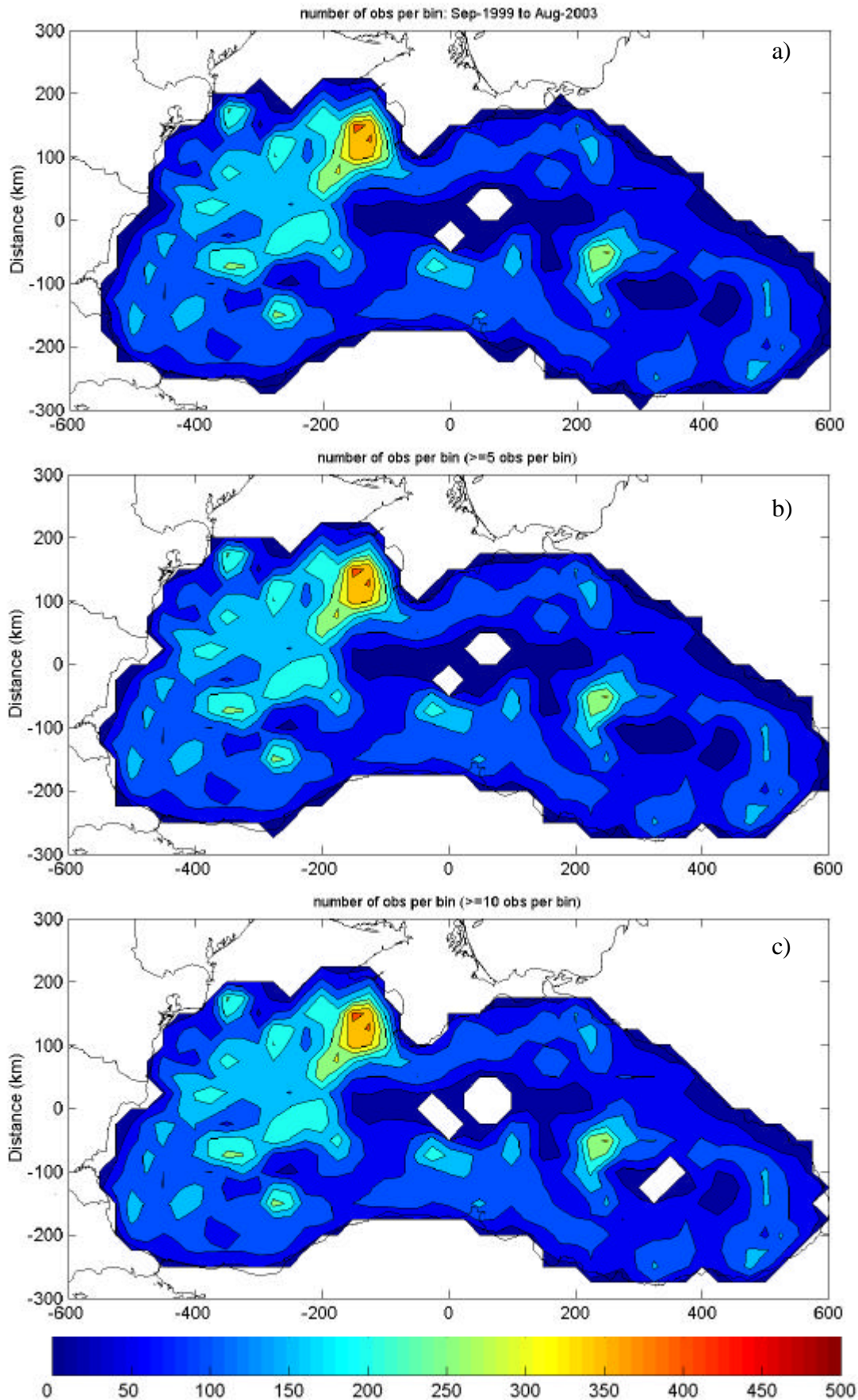


Figura18. Distribuzione della quantità totale di osservazioni per cerchio(a), con più di 5 osservazioni per cerchio (b), e con più di 10 osservazioni per cerchio (c).

### 3.2 Campi di velocità media e variabilità

La mappa del campo di velocità media ci rivela alcune delle principali caratteristiche della circolazione superficiale del Mar Nero: circolazione ciclonica che segue il perimetro del bacino e vortici sia a centro est sia ovest del bacino, e le diramazioni della Rim Current a nord-ovest passata la punta di Crimea. I valori più elevati d'energia cinetica del campo di velocità media li troviamo lungo la costa della Turchia, (valore massimo  $1000 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ ), in generale lungo la costa in zone in cui è presente la Rim Current, sotto Crimea (figura 19) e nella parte occidentale del vortice Batumi. Interessante è notare che la MKE è elevata lungo la costa turca ad ovest di Sinop, poi procedendo verso est diminuisce in valore per lasciar posto ad un aumento di variabilità riscontrabile per alti valori in EKE, dovuta ad una decelerazione del campo di velocità media. Basse energie medie le individuiamo in zone centrali dei bacini est e ovest, lungo costa della Georgia, di fronte e a nord ovest nella zona di piattaforma e fuori Sevastopol.

Dall'osservazione del grafico delle ellissi di varianza [Emery and Thomson, 2001], le quali indicano le direzioni principali della variabilità attorno al campo medio di corrente, e i cui rispettivi assi indicano gli errori dei valori medi (figura 20a), possiamo individuare due zone ad elevata varianza: una ad est e una di fronte Sevastopol, in cui le ellissi tendono ad essere simili a cerchi, indicando una variabilità non preferenziale in direzione, vi sono anche zone a bassa velocità media e osservando il contour dell'energia cinetica della varianza vediamo che queste sono zone, corrispondenti ai vortici Batumi e Sevastopol, hanno elevata EKE ( $451\text{-}501 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ ) (figura 20b). Un'elevata energia la troviamo anche lungo la costa turca di fronte a Samsun e tra Suchumi e Novorosilsk dove però, diversamente dalle zone precedentemente descritte, le ellissi sono allungate ed hanno un orientamento parallelo alla costa, quindi con una variabilità preferenziale in direzione; entrambe queste zone sono zone di decelerazione del campo di corrente medio.

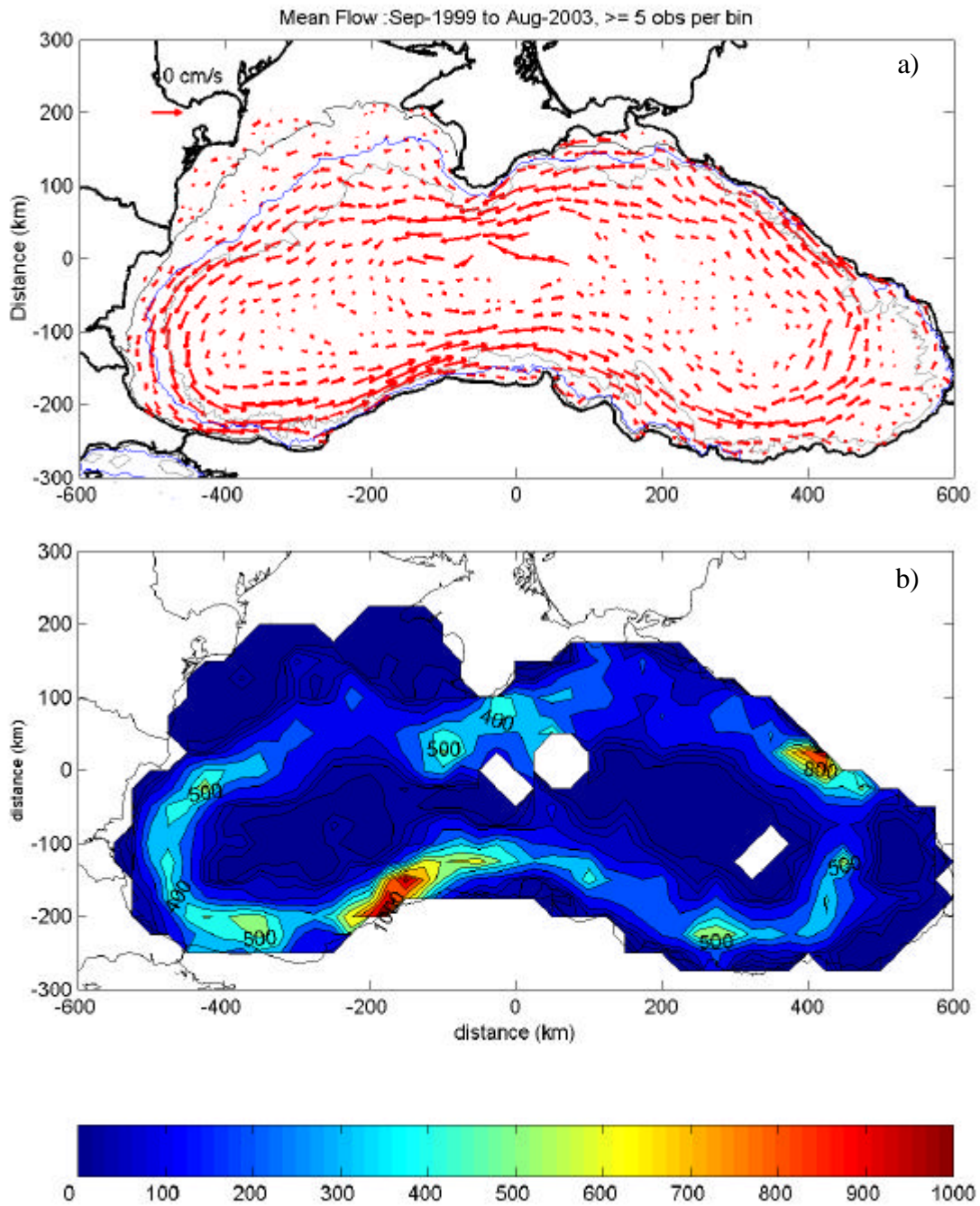


Figura 19. a) Mappa del campo di velocità media, escludendo cerchi con meno di 5 osservazioni indipendenti; b) Energia cinetica del campo di velocità media per unità di massa.



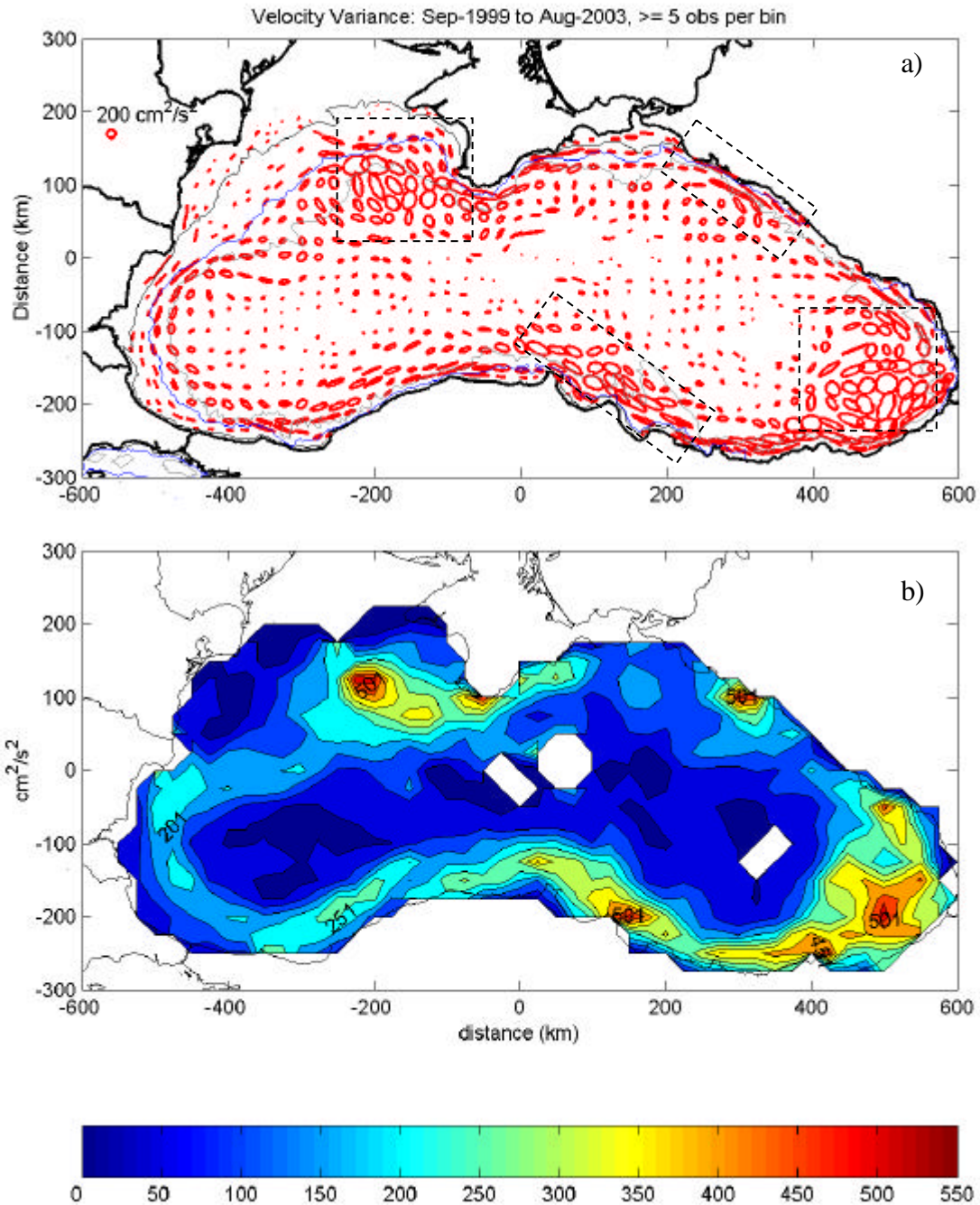


Figura 20. a) Mappa delle ellissi di varianza del campo di velocità escludendo cerchi con meno di 5 osservazioni;  
 b) Eddy Kinetic energy per unità di massa.

### 3.3 Stagionalità

Al fine di indagare circa l'eventuale stagionalità si è inizialmente analizzato l'andamento mensile dell'energia cinetica su tutto il bacino (figura 21). Minimi in energia cinetica si riscontrano in dicembre; l'energia va aumentando durante l'inverno e parte della primavera, fino ad un massimo in aprile, in seguito si ha una diminuzione durante parte della primavera, fino

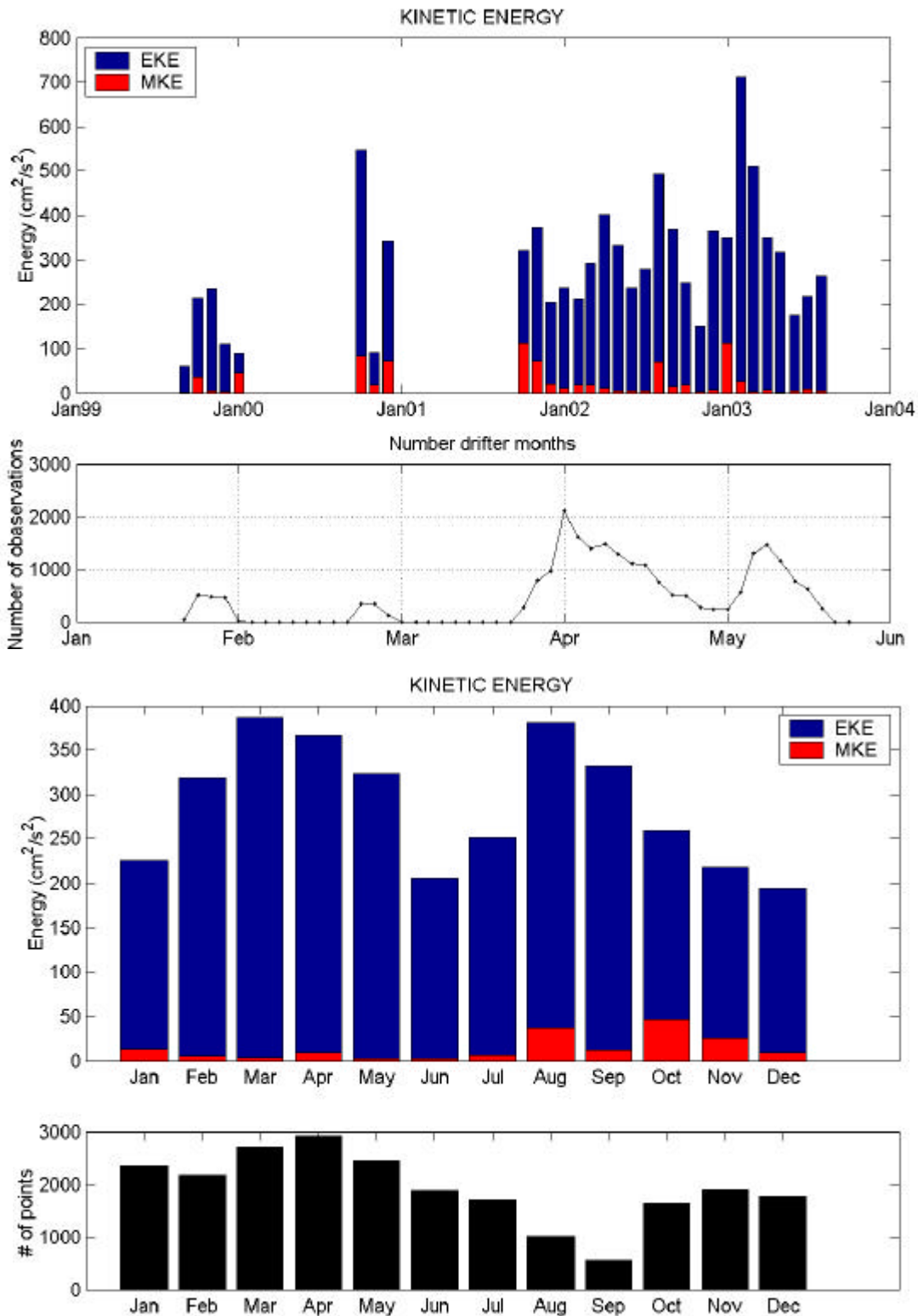


Figura 21. a) Diagramma a barre di MKE & EKE per mese; b) Diagramma a barre di MKE & EKE per mese dell'anno.

ad un minimo in giugno, dopodiché l'energia torna ad aumentare in estate fino ad un massimo in agosto, per poi ridiscendere nei valori durante l'autunno (Figura 21b). L'elevata energia in estate non è un risultato significativo poiché essa è una stagione sottocampionata, e per questo

abbiamo, inoltre, una troppo elevata MKE, che ci aspettiamo bassa, per ragioni insite nella sua definizione, a causa della forma quasi chiusa del Mar Nero e della prevalenza di una circolazione media ciclonica superficiale nel bacino intero. Le stagioni sono così definite: estate (giugno-luglio-agosto), autunno (settembre-ottobre-novembre), inverno (dicembre-gennaio-febbraio) e primavera (marzo-aprile-maggio), per ognuna è stata calcolata l'energia e la quantità d'osservazioni che l'intera base di dati comprende per ciascuna (Figura 22).

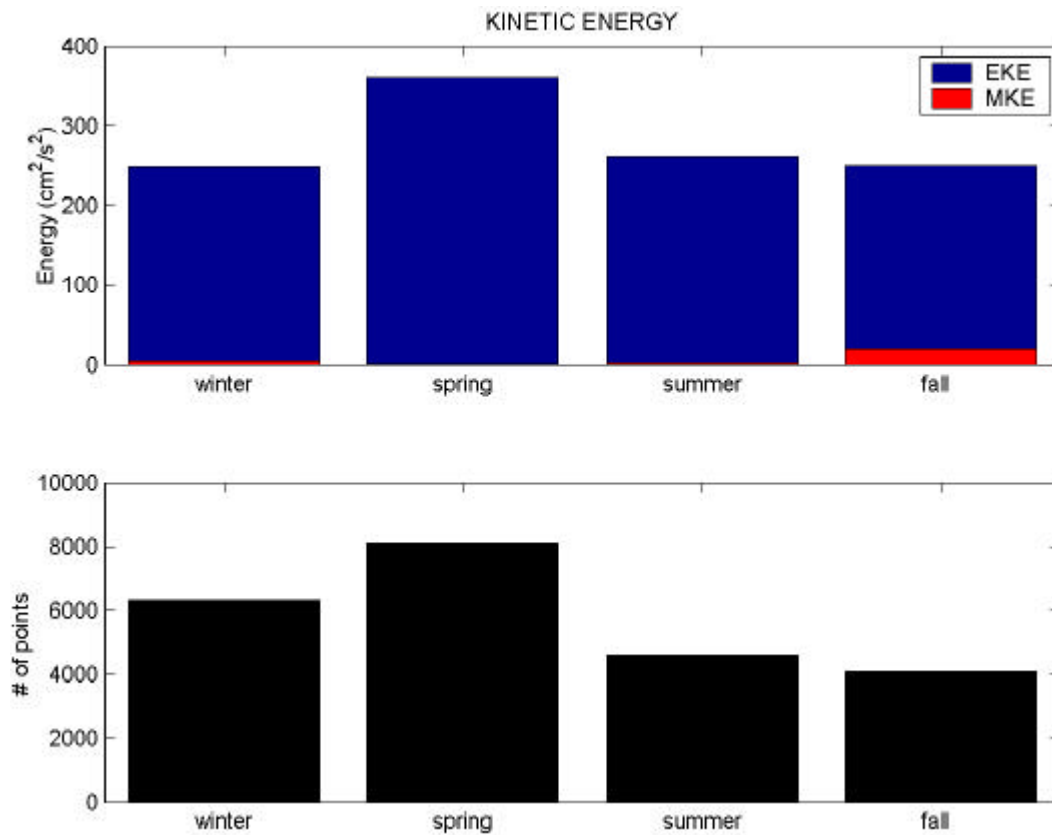


Figura 22. Diagramma a barre di MKE & EKE per stagione e diagramma della quantità di dati per stagione

In primavera si ha abbondanza d'osservazioni, molte meno se ne riscontrano in estate ed autunno; dall'istogramma dell'energia si nota maggior energia in primavera minore in autunno e inverno.

Le traiettorie sono state quindi separate per le differenti stagioni e calcolate in ognuna le statistiche euleriane (figure 23-27). Durante la primavera, lungo la costa turca, di fronte alla Crimea e più ad ovest a circa  $-200\text{km}$  di longitudine e circa  $100\text{ km}$  di latitudine (in distanza relativa rispetto al centro del bacino), si ha il valore più elevato di MKE, circa  $1000\text{ cm}^2/\text{s}^2$  (figura 26), questa zona non è rappresentata in autunno dove in questa stagione è ben visibile il vortice Batumi ad est (figura 24). Lungo la costa turca, anche nei mesi estivi, si ha un valore

MKE piuttosto elevato paragonabile a quelli riscontrati nella zona in inverno e in primavera. L'EKE mostra valori massimi primaverili di fronte a Sevastopol, alla costa della Georgia e della Turchia. Dal grafico delle ellissi di varianza e dell'EKE si nota un'elevata variabilità, univoca in direzione, a sud-ovest (Stretto del Bosforo); così come si nota un cambiamento, nell'orientazione e nella forma delle ellissi, nel passare dalla primavera all'estate (vedere riquadri in figura 25).

A questo punto l'analisi è stata ristretta scegliendo i cerchi che hanno almeno 5 osservazioni al loro interno e che rappresentano dati per tutte 4 le stagioni (figura 23), in modo da poter evidenziare risultati delle relative statistiche euleriane, dove si ha rispettivamente per quelle zone, il campo di velocità media (figura 28), la varianza del campo di velocità media rappresentata dal grafico ad ellissi (figura 29), la MKE e infine l'EKE di fronte a Sevastopol (figura 30-31). Proprio in questa zona sembra che la varianza nel campo di velocità media evolva attraverso un accrescimento invernale, con un massimo in primavera, un cambiamento in orientazione in estate ed un aumento, un po' più a sud rispetto a Sevastopol, durante i mesi autunnali (figura 29). Infatti, i valori più elevati MKE si registrano in inverno ma soprattutto in primavera ( $900-1000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ ), minori in estate ed autunno. In primavera anche l'EKE è più forte, ma in estate essa è più intensa rispetto ai valori dei mesi invernali (figure 30 e 31).





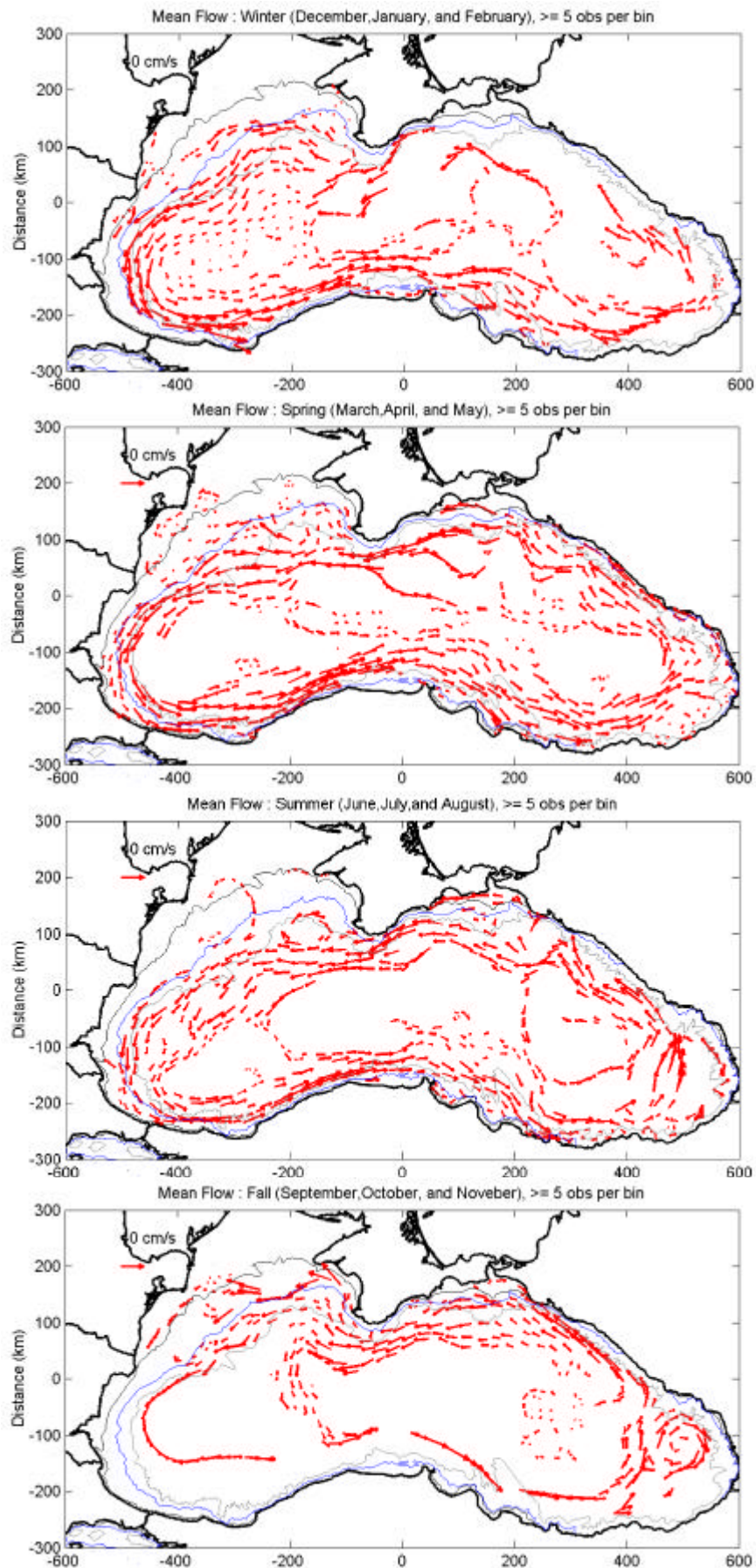


Figura 24. Mappe stagionali del campo medio in cerchi di 25 km di raggio su grigliato con risoluzione 25km, sono stati omessi dati in cerchi con meno di 5 osservazioni.

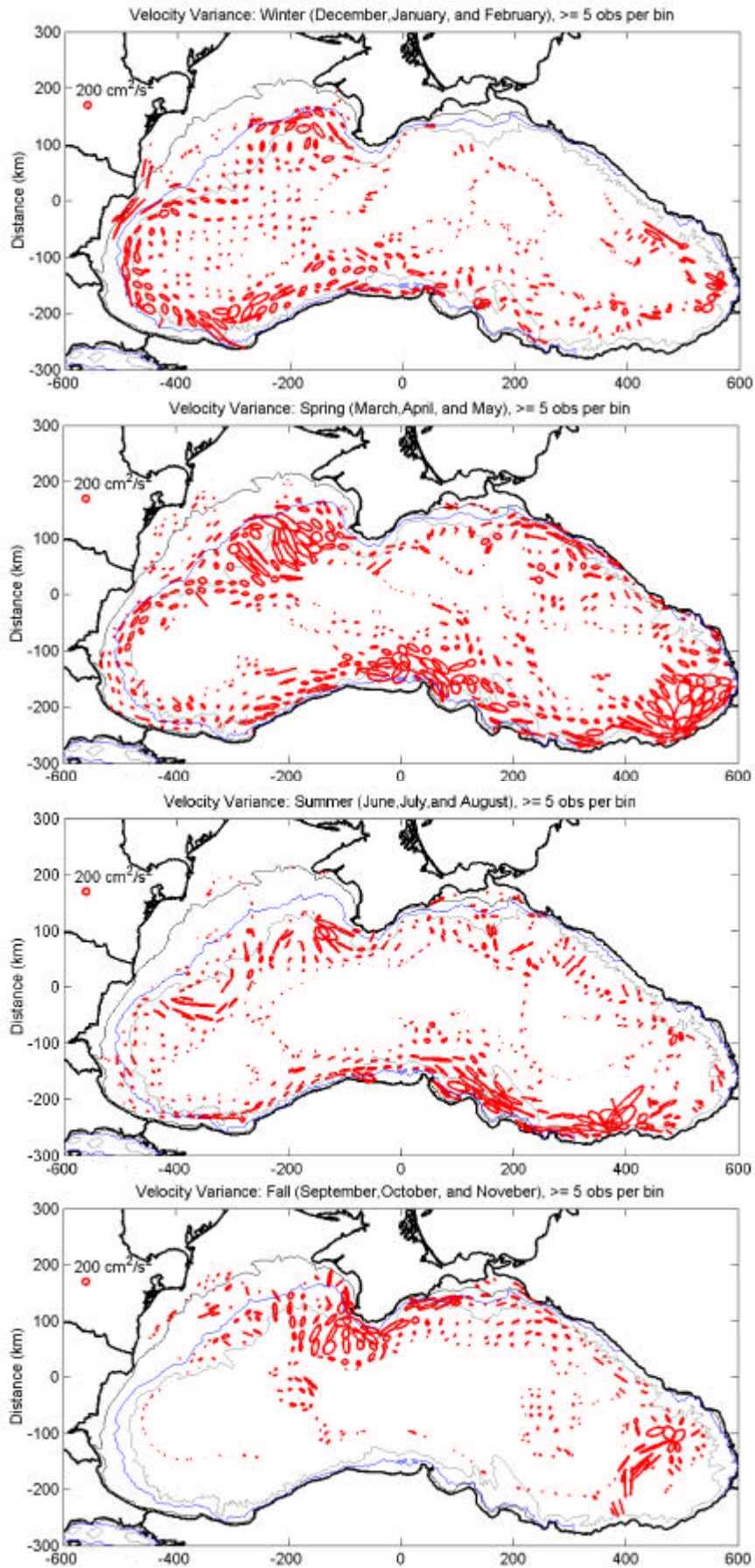


Figura 25. Mappe stagionali delle ellissi di varianza del campo medio in cerchi di 25 km di diametro su grigliato con risoluzione 25km, sono stati omissi dati in cerchi con meno di 5 osservazioni.



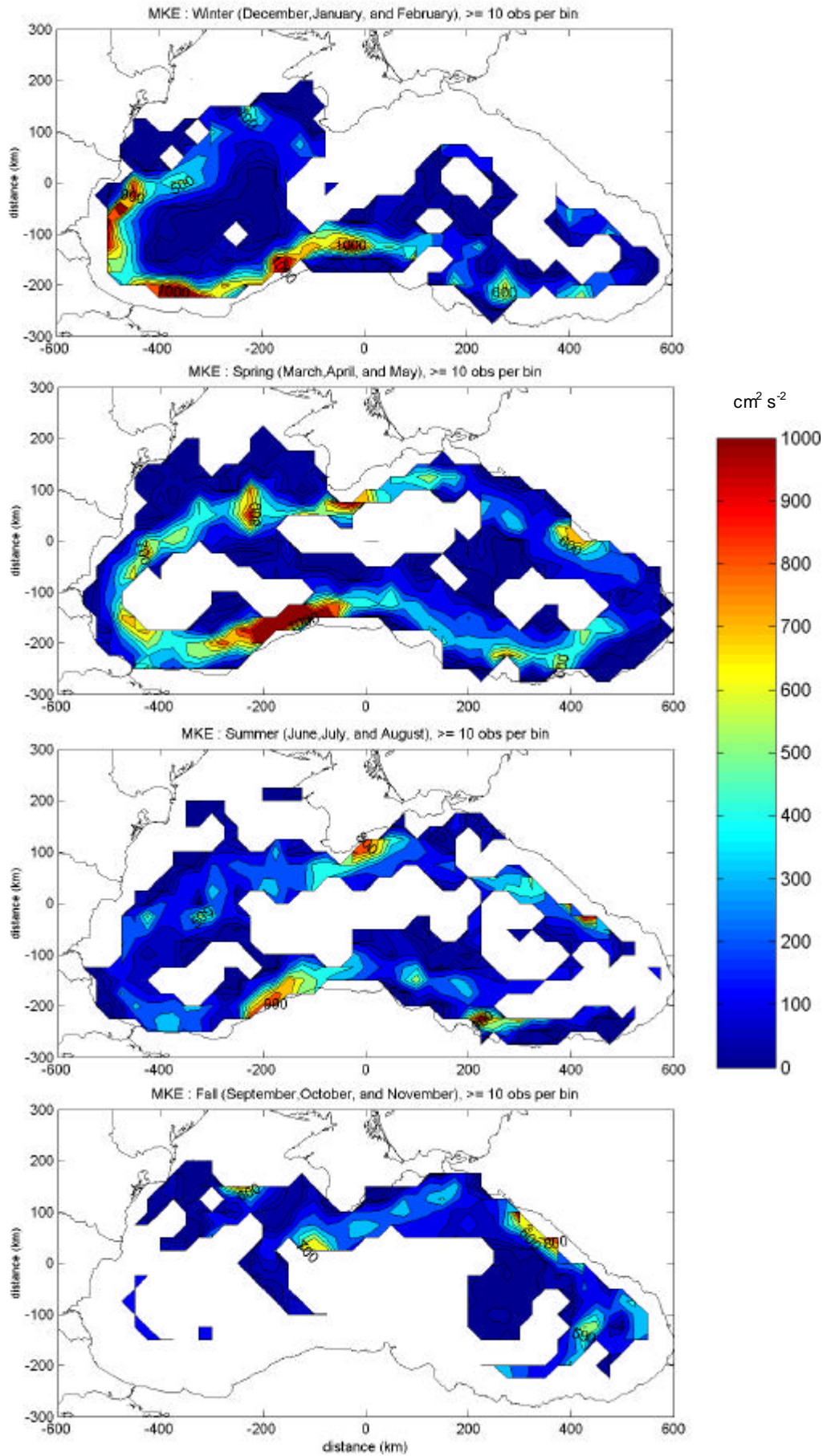


Figura 26. Energia cinetica del campo di velocità media (MKE) per stagioni.

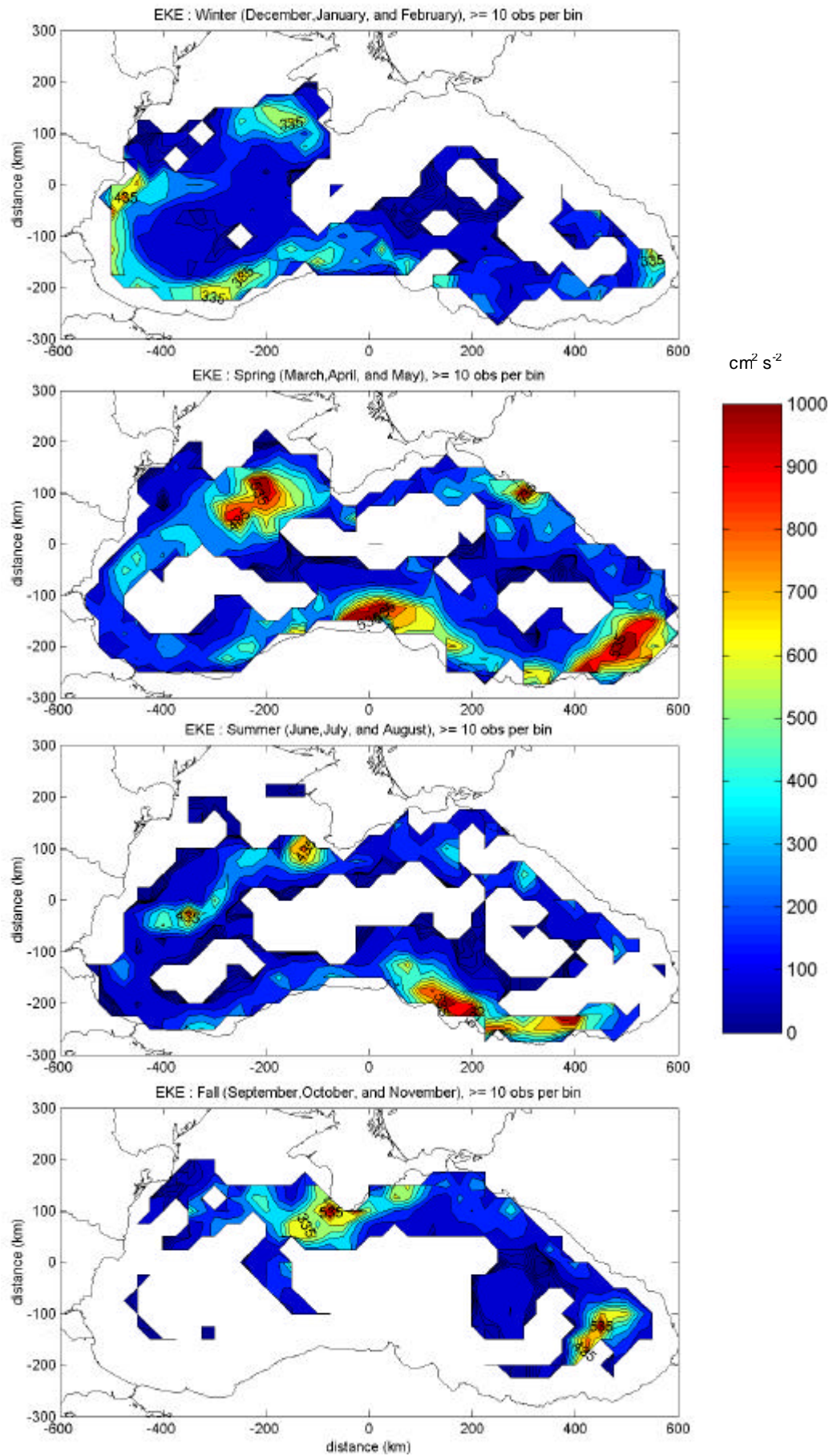


Figura 27. Eddy Kinetic energy (EKE) per stagioni



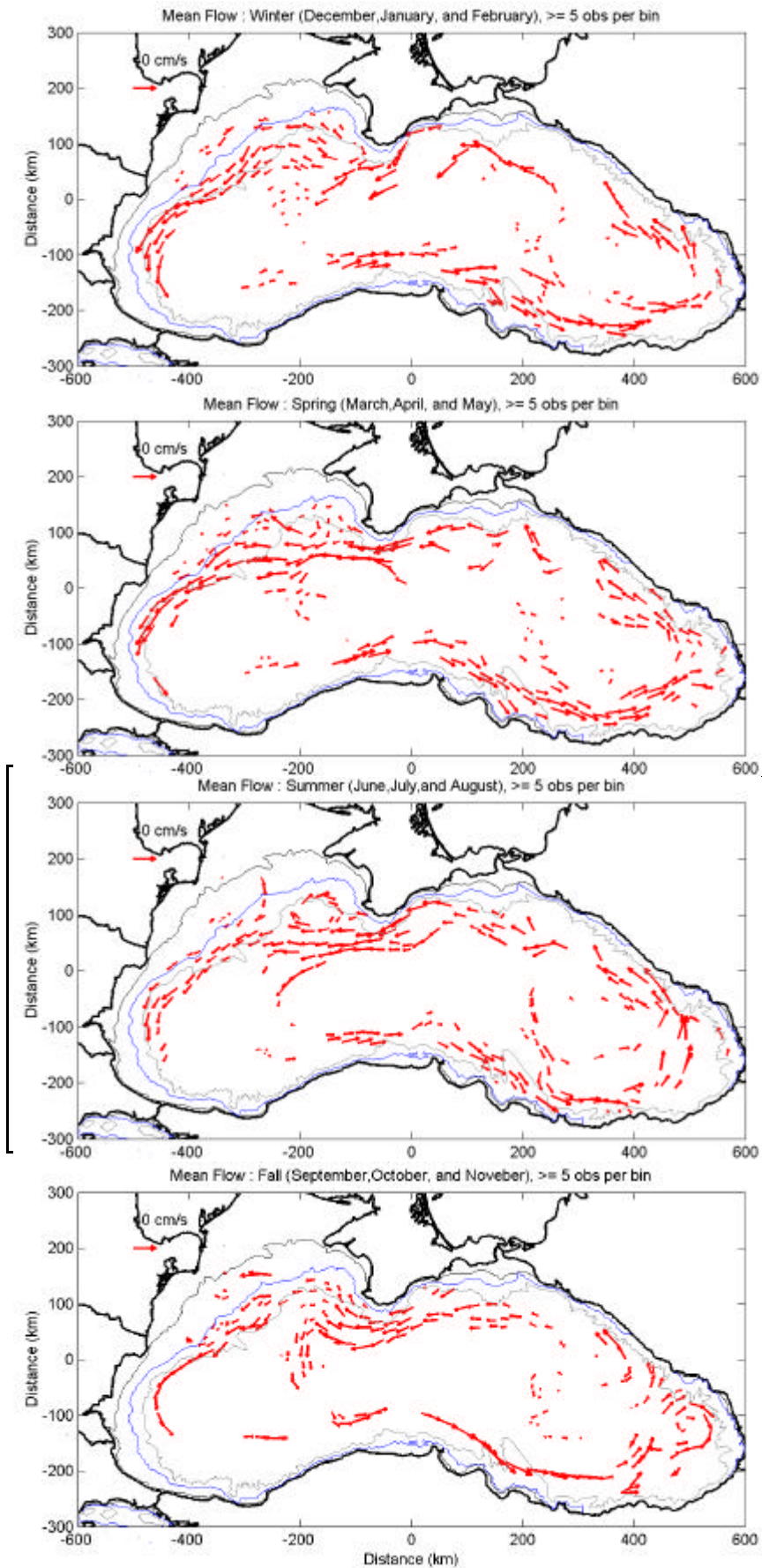


Figura 28. Mappe stagionali del campo medio in cerchi contenenti osservazioni per tutte le stagioni, non sono stati considerati cerchi con meno di 5 osservazioni

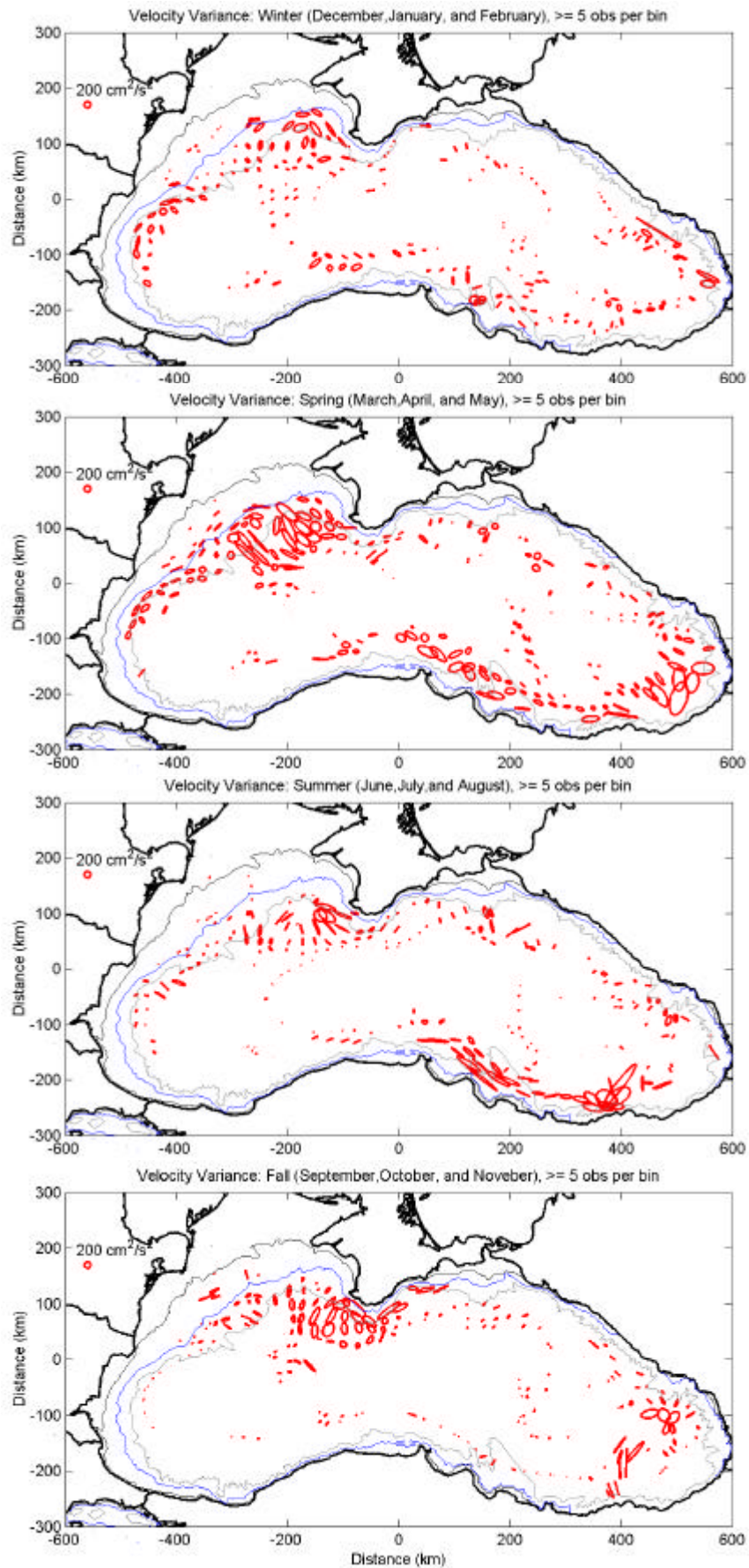


Figura 29. Mappe stagionali della varianza del campo medio in cerchi di 25 km di raggio su grigliato con risoluzione 25 km, sono stati omessi dati in cerchi con meno di 5 osservazioni.

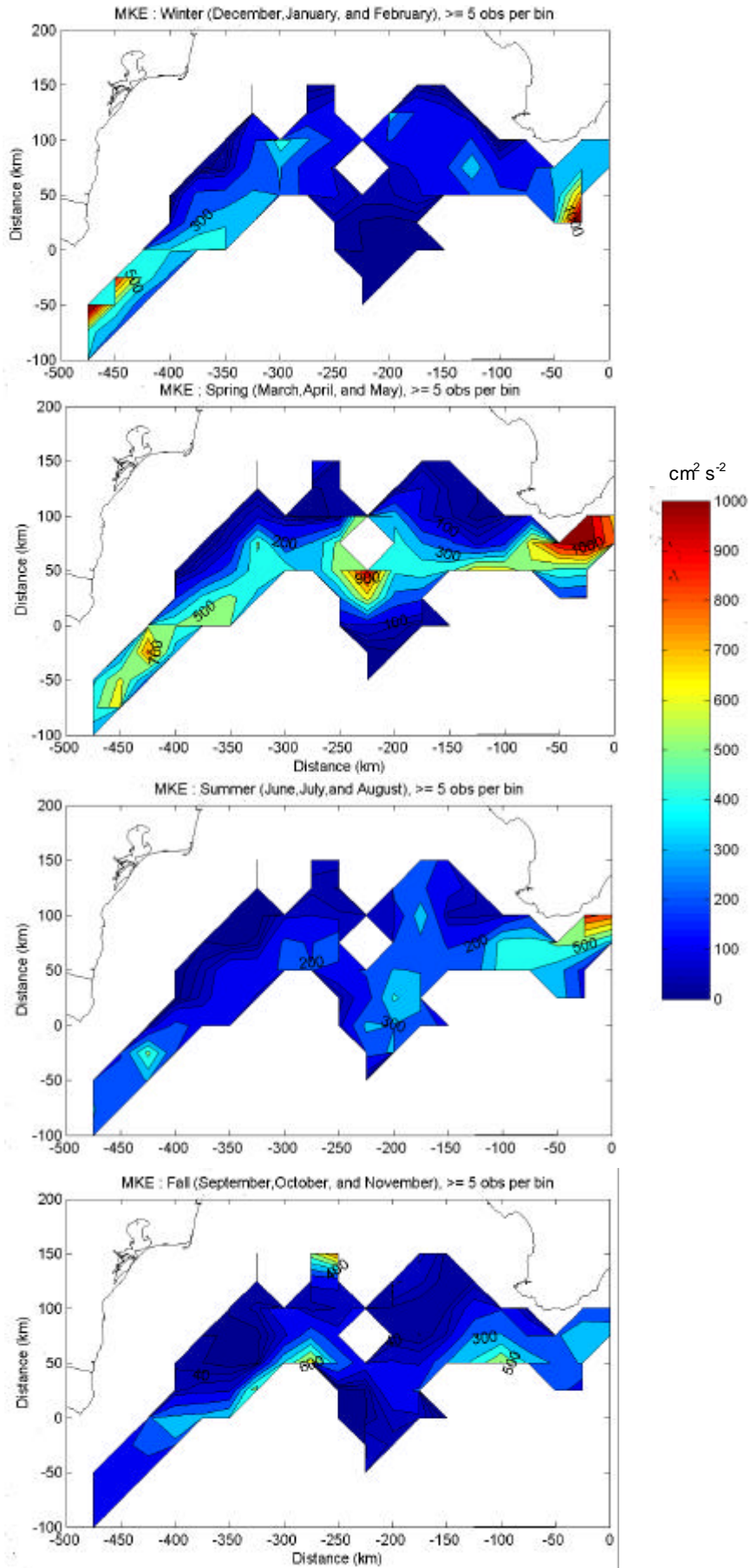


Figura 30. Energia cinetica del campo di velocità media (MKE) per stagioni nel nord ovest del Mar Nero.



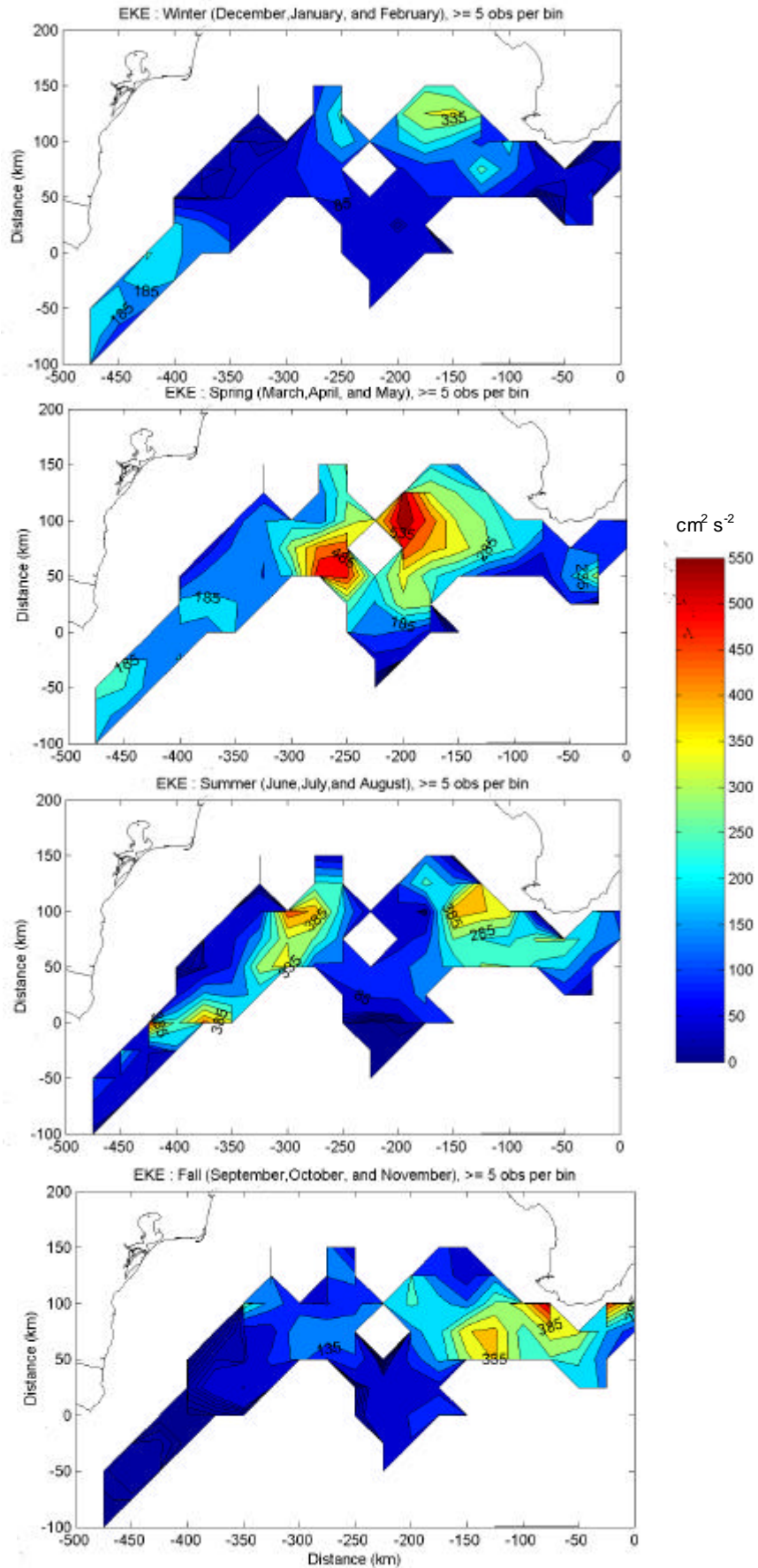


Figura 31. Eddy Kinetic energy (EKE) per stagioni nel nord ovest del Mar Nero.



### 3.4 Tempo di residenza

Un parametro di utilità pratica nella quantificazione della velocità di dispersione di un possibile inquinante immesso in un bacino, di indicazione riguardo al grado di mescolamento delle acque superficiali, utile nello studio dell'avvezione e dispersione di traccianti biogeochimici e specie animali, è il tempo di residenza medio. Il tempo di residenza è definito in Poulain et al. [1996] come l'arco temporale in cui un drifter sosta in un'area a partire da quando esso entra in essa. Calcolato per ogni galleggiante, in un'area specifica, si ha il tempo di residenza medio nella regione  $i,j$ :

$$TR(i, j) = \frac{\sum^n (t_f - t_i)}{n(i, j)}$$

dove,  $t_f$  è il tempo dell'ultima posizione in cui il drifter si trova ancora nell'area  $i,j$  prima di uscirne,  $t_i$  è il tempo della prima posizione del drifter all'interno dell'area  $i,j$  dopo esservi entrato e  $n(i,j)$  è il numero di segmenti di traiettorie nella superficie considerata. Il tempo medio di residenza è inversamente proporzionale alla corrente media ed anche ai tassi di diffusione [Poulain et al., 1996]. I massimi tempi di residenza per cerchio di 25 km di raggio (figura 32c) si trovano nelle regioni centrali dei due sotto bacini: 22.75, 27 gg. a ovest e 13.75 gg. ad est, a centro bacino risulta essere di 28.75 gg., inoltre a nord, in un canyon presso la zona di foce del Danubio è di 38.25 gg.. In generale, nella zona di piattaforma, le medie dei tempi di residenza variano attorno ai 5-6 gg. (figura 32a) con massimi di 22 gg. e 14.5 gg. di fronte a Sevastopol; si hanno tempi di residenza elevati anche nella zona dove si verifica il vortice Bathumi, a est (9-10.5 gg).

In media, all'interno dell'anello che circonda il perimetro del bacino di dominio della Rim Current, il tempo di residenza per cerchio è 1-2 gg. con deboli variazioni di meno di 1 giorno (figura 32b). Questa cintura di norma coinvolge la superficie marina sovrastante la scarpata continentale.



### 3.5 Relazione tra corrente e batimetria

Il Mar Nero ha una scarpata continentale che generalmente inizia alla batimetria dei 150-200 m e finisce a circa 1900-2000 m di profondità. In figura 33a mostriamo proprio l'istogramma della batimetria del Mar Nero in intervalli di 100 m, utilizzando dati con una risoluzione di  $2' \times 2'$ , in cui si nota per abbondanza di punti, una piattaforma variabile da 0 a 100-200 m, una scarpata continentale, per riduzione decisa della quantità di dati, da 100-200 m a 1800-1900 m ed una piana abissale a circa 1900-2200 m di profondità; pochi punti a profondità  $>2200$  m. Abbiamo considerato il modulo delle velocità dei drifter rispetto alla batimetria sottostante la loro posizione geografica, la media di tali velocità e la quantità di osservazioni per ciascuna profondità, anche normalizzando rispetto all'area di superficie marina che ogni isobata occupa in sezione (figura 33b, c, d). In media le velocità sono più elevate a profondità maggiori di 200 m e minori di circa 1800 m; oltre a ciò si rileva, nelle regioni sovrastanti, per la minor estensione di tali aree, una esigua quantità di osservazioni a queste profondità. Limitata informazione si ha per profondità inferiori a 100 m, pochi infatti sono i drifter che hanno attraversato la zona a ridotta profondità che è la piattaforma continentale a nord (NWS). A riprova di quanto si è affermato circa la velocità media, anche l'energia, sia la EKE, sia la MKE, hanno un andamento a "campana" (figura 33e) con massimi livelli energetici per profondità comprese tra i 400-1800 m. La MKE, vicina a 0, per quanto già affermato, a causa della forma quasi chiusa del Mar Nero e della prevalenza di una circolazione media ciclonica superficiale in tutto il bacino. Sotto i 2200 m si ha un aumento di energia, ma non è significativo, è dovuto alla esigua quantità di punti, corrispondenti a fosse presenti nel bacino, alcune situate in corrispondenza di settori ad elevata energia.

Si è calcolata la distribuzione delle profondità relative alle posizioni di messa in acqua dei drifter anche normalizzando le osservazioni rispetto all'area che ciascuna profondità occupa nel bacino, (figura 34a, b); quasi tutti i galleggianti sono stati messi in zone di scarpata continentale o di piana abissale. Dopo il rilascio, la disposizione delle profondità relative alle traiettorie che i drifter compiono, divisa in intervalli di 10 giorni e calcolata fino a 100 giorni dopo la messa a mare, varia (figure 35), e dai grafici delle osservazioni normalizzate (figure 36), si evince che la distribuzione propende a farsi abbastanza uniforme lungo più o meno l'intera batimetria, cioè i drifter non seguono generalmente le isobate.

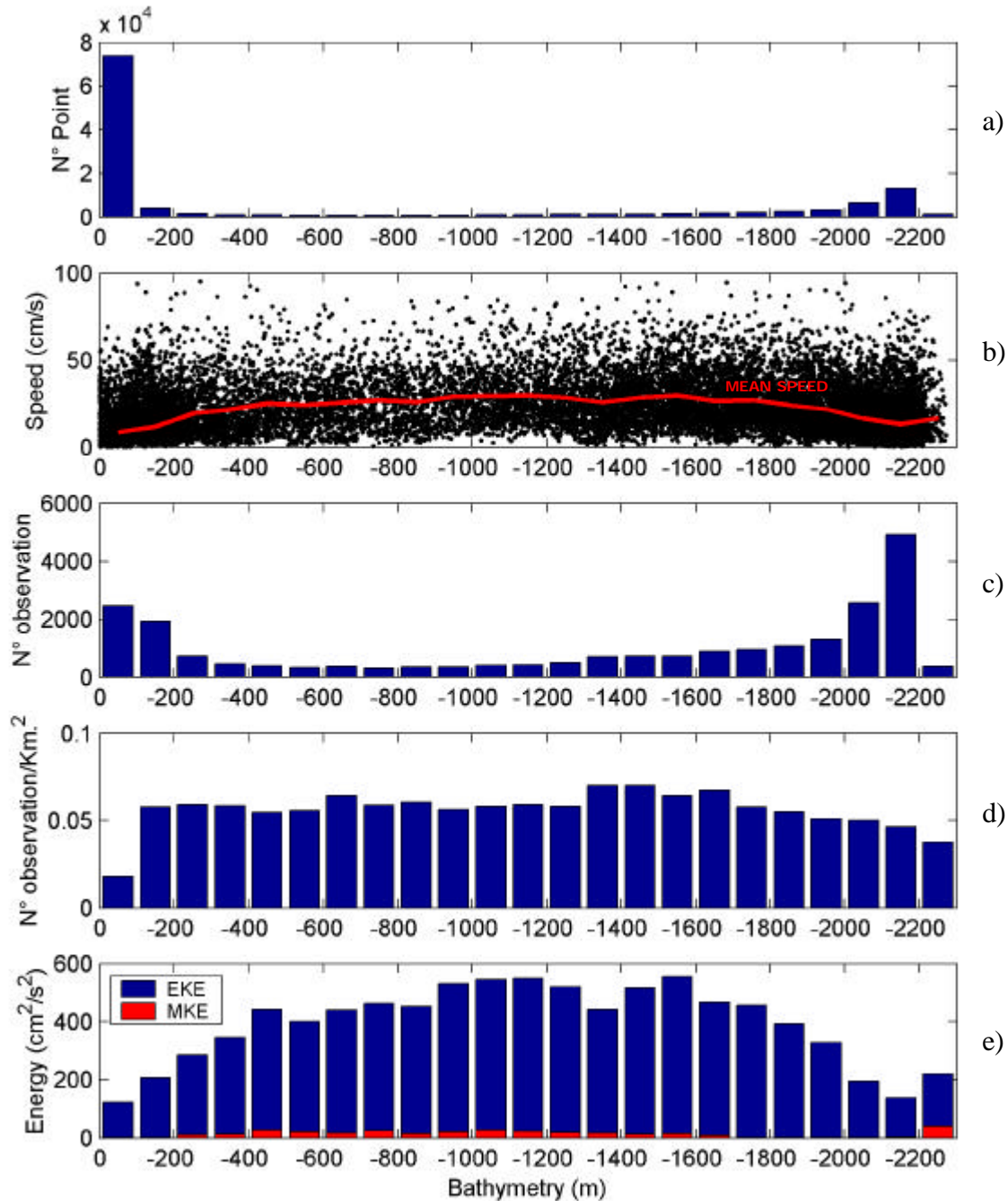


Figura 33. a) Distribuzione in quantità di punti della batimetria del Mar Nero con una risoluzione di  $2' \times 2'$ , b) Distribuzione del modulo della velocità rispetto alla batimetria sottostante alla posizione del drifter e velocità media, c) numero di osservazioni sovrastanti a ciascuna batimetria, d) numero di osservazioni sovrastanti a ciascuna batimetria normalizzate rispetto alla superficie di sezione occupata da ogni isobata, e) Mean Kinetic Energy (MKE) e Eddy Kinetic Energy (EKE) mediate su traiettorie passanti sopra batimetrie, comprese tra 0 e 2300m, considerando intervalli di 100m.

A questo punto si è calcolata la distanza tipica di alcune profondità nelle regioni a ovest, tra 41.7 °N - 43.1 °N, a sud-ovest tra 32.1°E - 33.4 °E, a sud-est tra 35 °E – 37.7 °E ed infine a nord-est tra 43.2 °N – 44.4°N, per capire a quale distanza dalla costa è possibile comunemente individuare la Rim Current (figure 37, 38, 39, 40). Questa corrente si trova ad una distanza tipica dalla costa corrispondente alla porzione di fondale marino che coincide con la scarpata continentale. In alcune regioni questa fascia è più ampia, in particolare a sud-est, (circa 40 km di estensione) con due massimi, uno a 35 km, l'altro a 45 km circa dalla costa, e la si può individuare partendo da costa a circa 30 km (figura 38); questa è una zona dove la corrente è meno intensa. A nord-est invece, lungo la costa russa, si ha maggior variabilità rispetto alla costa turca, la Rim Current si denota a circa di 15 km da costa ed in una banda di circa 30 km di estensione (figura 37). A sud ovest, su una porzione di mare antistante la costa della Turchia, si individua già ad una distanza media di 10 km, con larghezza 20 km in cui distinguiamo due massimi, uno a 17 km e uno a 28 km (figura 39). A ovest, considerando l'area prospiciente alla costa bulgara, la fascia è ancor più evidente, di fatto, si passa piuttosto rapidamente da 10 a 40-50 cm/s a partire da 35-40 km circa da costa con una ampiezza di circa 40 km (figura 40).

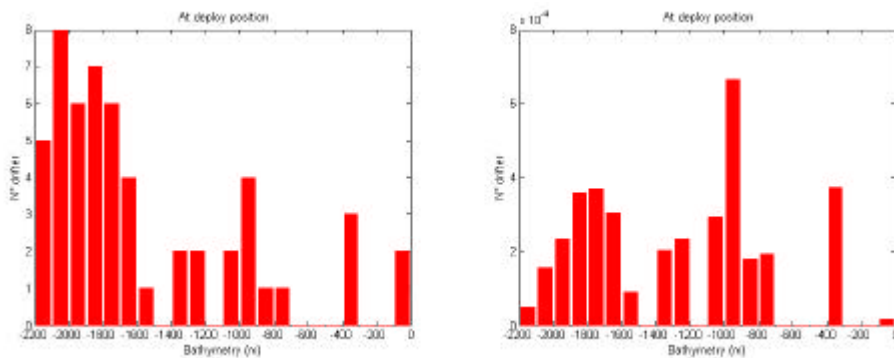


Figura 34. a) Distribuzione dei drifter rispetto alla profondità sottostante al punto di rilascio: a) senza normalizzazione, b) normalizzata rispetto alla superficie di bacino occupata da tale profondità.



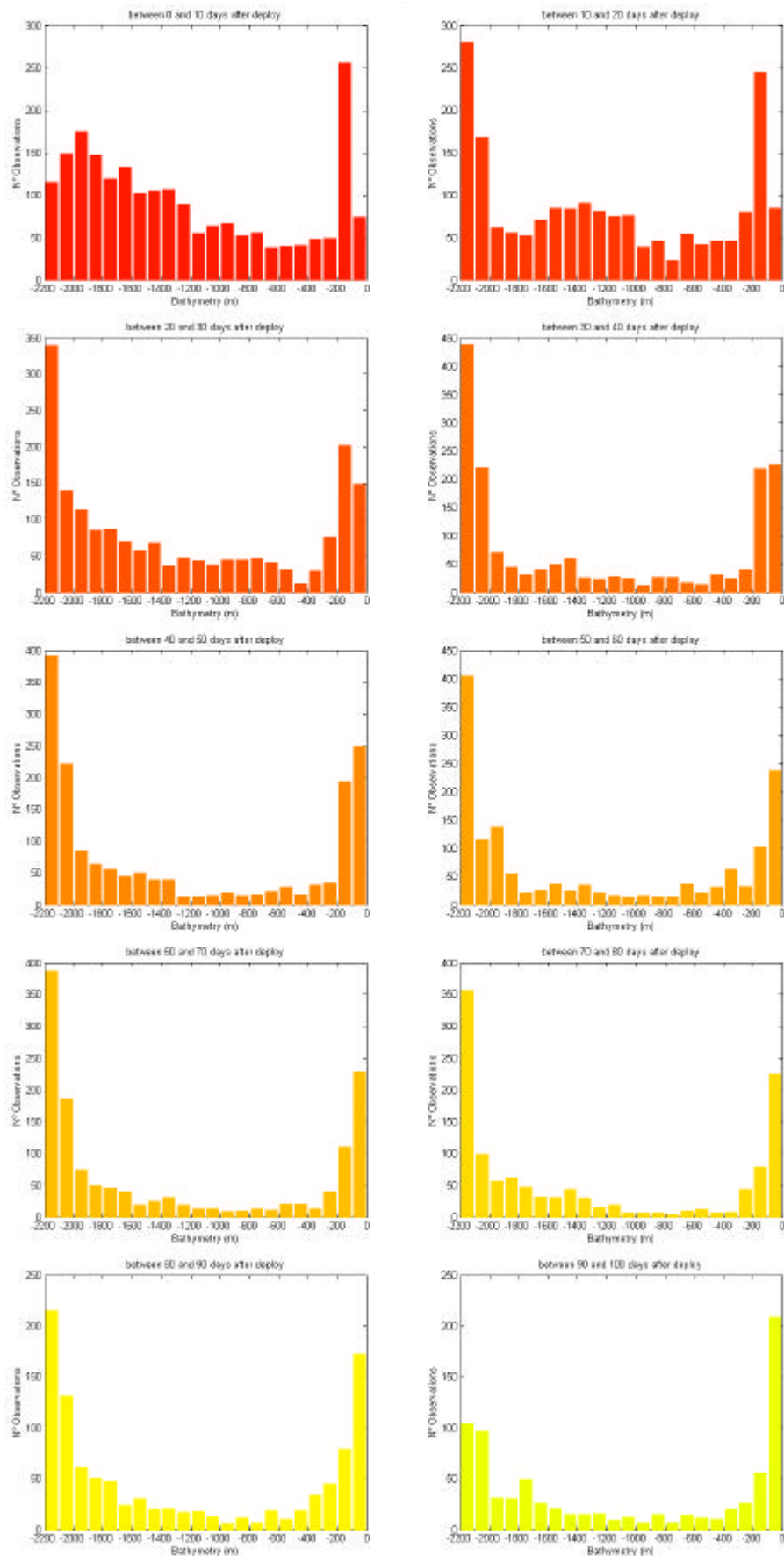


Figura 35. Evoluzione della distribuzione delle posizioni dei drifter rispetto alla batimetria a partire dal loro rilascio.



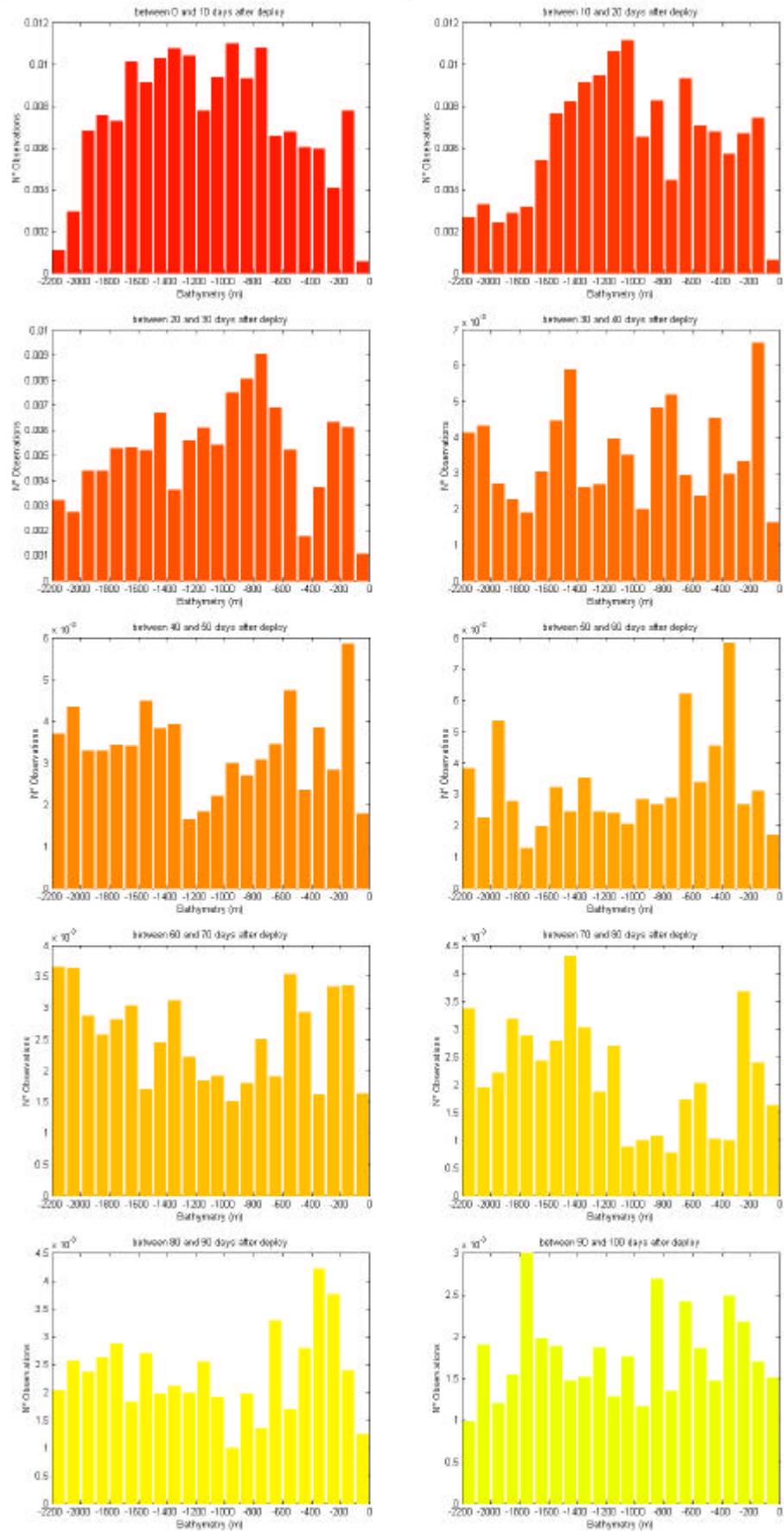


Figura 36. Evoluzione della distribuzione delle posizioni dei drifter rispetto alla batimetria a partire dal loro rilascio, normalizzando rispetto alla superficie di bacino occupata da ogni intervallo di batimetria.

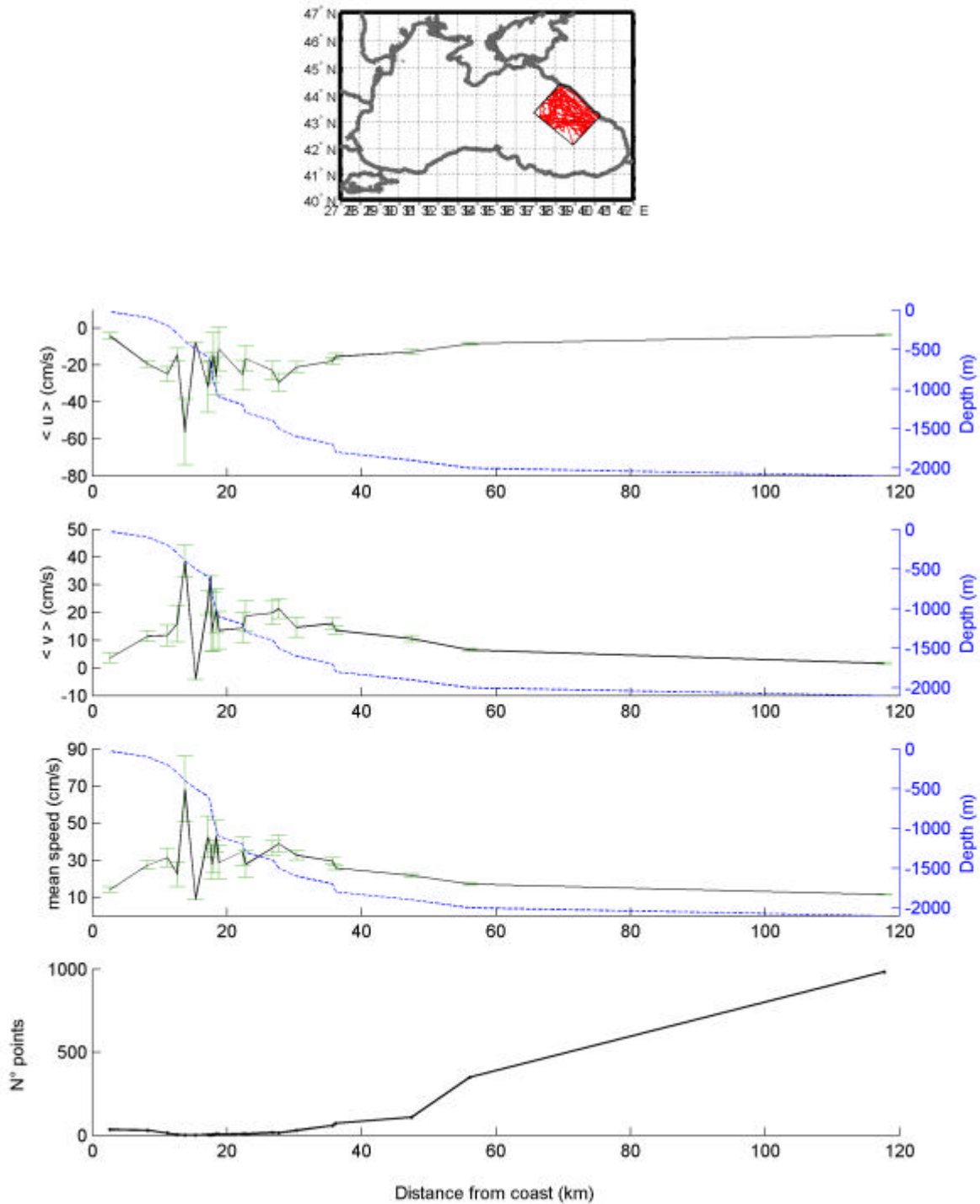


Figura 37. Modulo delle velocità medie e relative componenti, errore standard (verde), quantità di osservazioni rispetto alla distanza da costa ed andamento del fondale (blu). Le velocità e le distanze tipiche delle batimetrie sono state calcolate impiegando le traiettorie interne alla regione considerata (in rosso nella mappa).

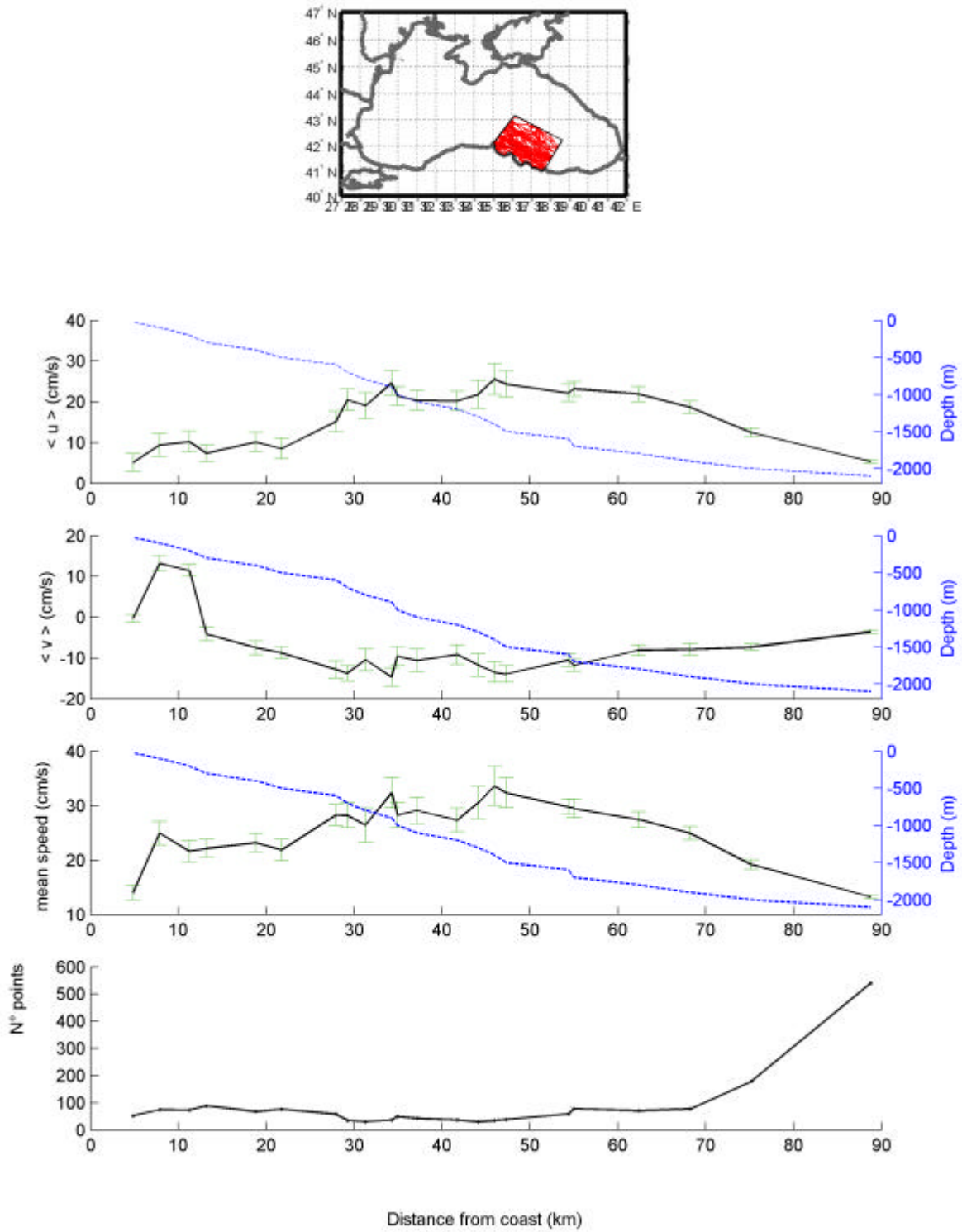


Figura 38. Come figura 37 ma per la regione lungo la costa turca (in rosso nella mappa).

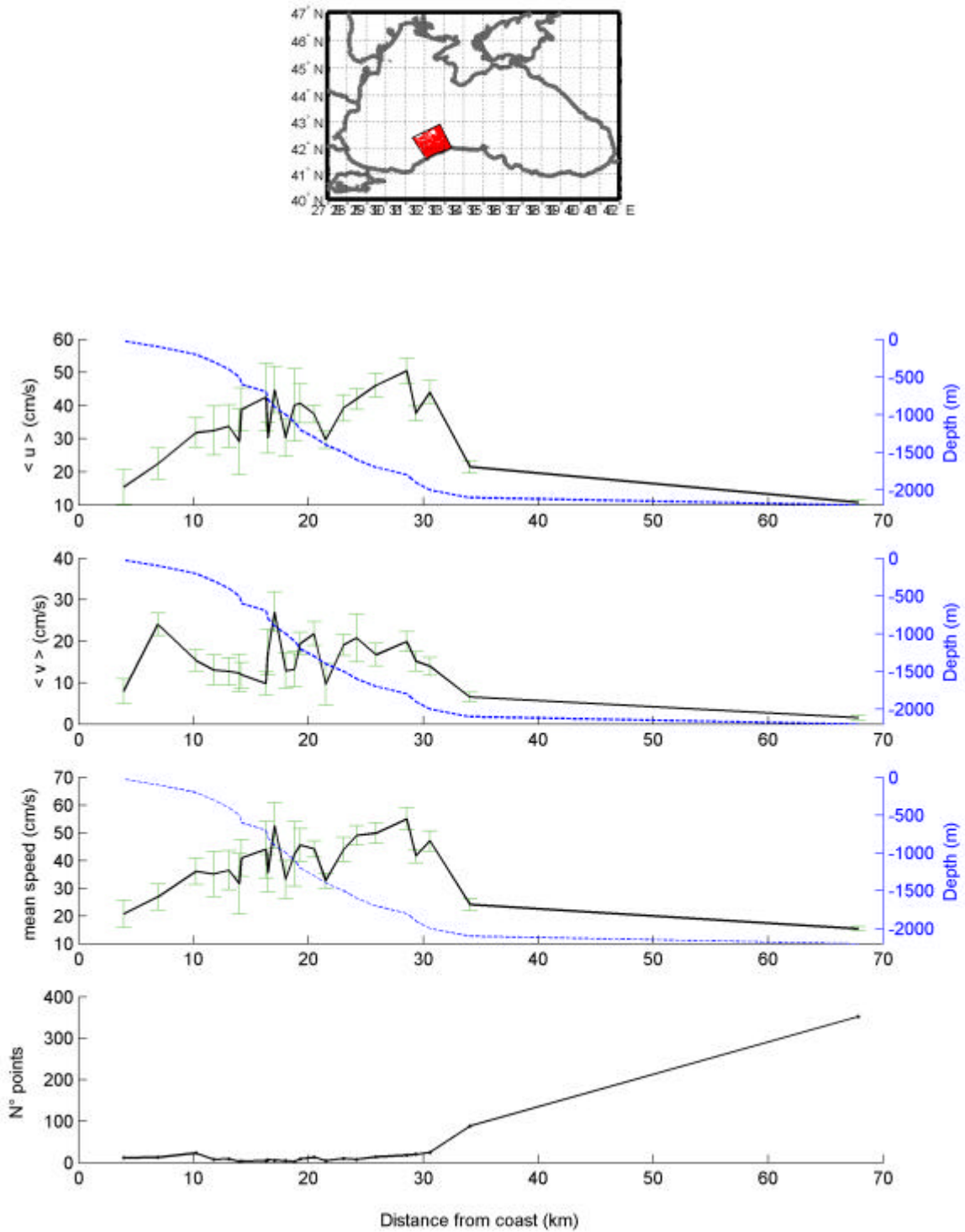


Figura 39. Come figura 37 ma per la regione lungo la costa turca a sud-ovest (in rosso nella mappa).

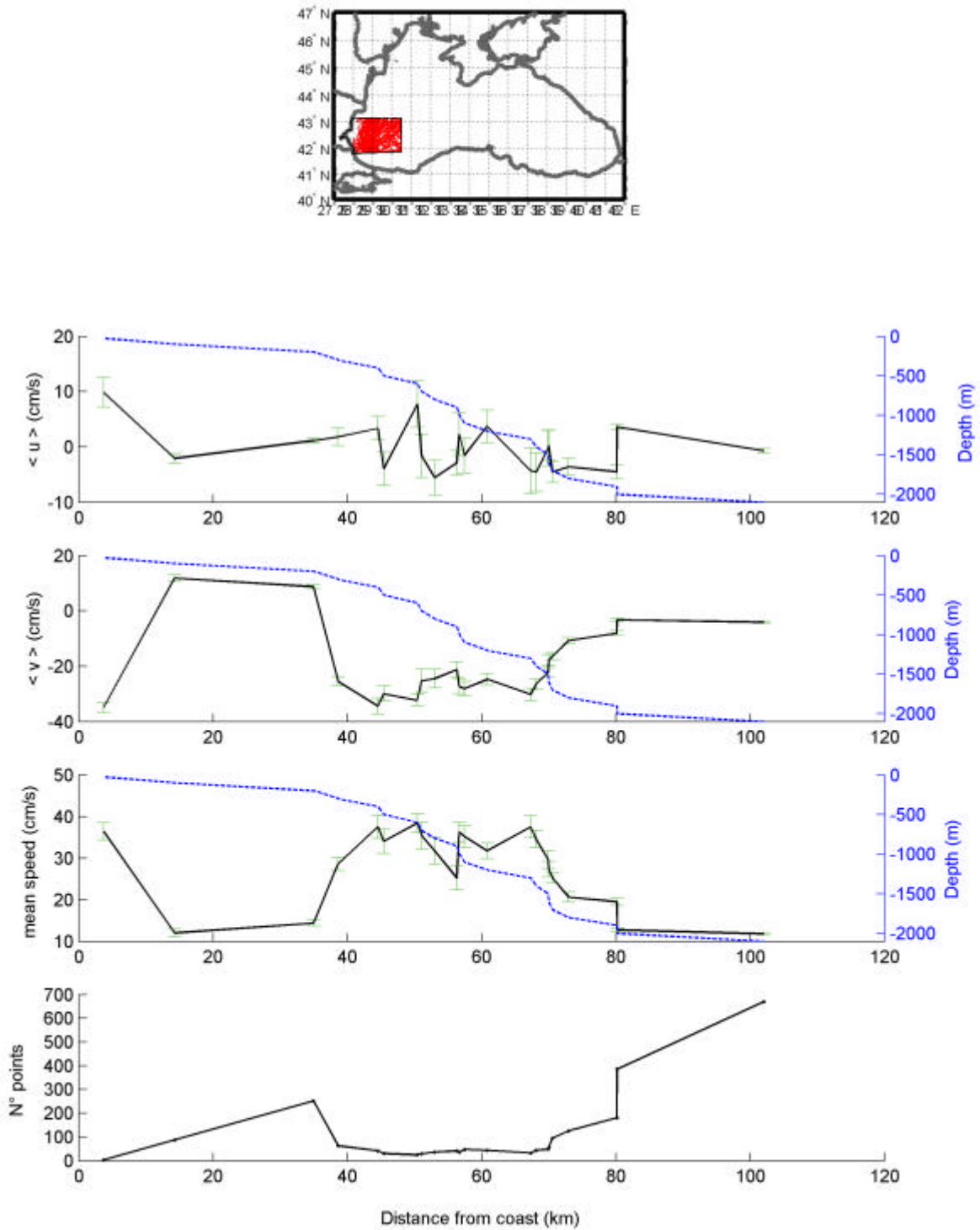


Figura 40. Come figura 37 ma per la regione lungo la costa bulgara (in rosso nella mappa).



## 4. Conclusioni

In questo nostro studio descriviamo le caratteristiche della circolazione superficiale nel Mar Nero, così come emerge dalle traiettorie descritte da 54 drifter rilasciati in un intervallo temporale di circa 5 anni, dal 28 settembre 1999 al 29 agosto 2003.

A livello “raw” (non ancora interpolati) i dati sono stati tagliati alla fine e all’inizio, quando necessario, ed individuata la causa di fine operatività del drifter. Si è registrata la data, ora, posizione geografica di inizio dei primi dati buoni e fine di operatività dei drifter ed i limiti di latitudine e longitudine di ciascuno. Successivamente dalle posizioni editate ed interpolate ogni 6 ore con il metodo di krigging mediante variogramma calcolato dai dati stessi, sono state calcolate le velocità con il procedimento delle differenze finite centrate. Prima di tutto si è fatta una analisi circa la copertura temporale delle traiettorie e calcolata la “mean half life”, anche facendo una distinzione tra le tre tipologie di galleggianti impiegati. Poi abbiamo osservato la distribuzione spaziale, attraverso la mappatura delle traiettorie, creato mappe di segmenti per intervalli di velocità e distinto le traiettorie complessive per ognuno dei 5 anni. Successivamente si è definita la scala spaziale su cui mediare i dati, che ci è servita per calcolare le statistiche euleriane e ricavare mappe del campo medio di velocità, di ellissi di varianza, di energie cinetiche del campo di velocità media (MKE, EKE) e di tempo di residenza medio anche per stagioni. Queste statistiche sono anche state calcolate separando i dati per stagioni. Infine si è studiata la relazione tra batimetria e corrente e individuata per alcune zone la distanza tipica della Rim Current dalla costa.

I drifter hanno una “mean half life” di 92 giorni senza troppo evidenti differenze a seconda del modello, la “mean half life” più bassa paragonata agli XAN-3 (91 giorni) e agli SVP (95 giorni) è degli SVP-B con 84 giorni. La maggior quantità di dati si ha nell’anno 2002 nel quale sono presenti 25 drifter ed una buona copertura spaziale. Dall’analisi delle traiettorie si nota come i drifter seguano la Rim Current con andamento ciclonico attorno al perimetro del bacino con velocità media di circa 30 cm/s e velocità massima di 93.5 cm/s, poco a est dello stretto del Bosforo. I tempi di residenza medi, rispetto a dischi di raggio 25 km sono di 1-2 giorni con variabilità di 1-3 giorni. Questo anello ha una larghezza variabile da 20 km a 60 km e lo si può individuare, in media e rispetto a differenti zone, a partire da 15 km fino a circa 38 km dalla costa in ambiente di scarpata continentale come messo in risalto dallo studio della relazione tra batimetria e corrente. I drifter non tendono a seguire le isobate, in quanto circa 100 giorni dopo

il loro rilascio si distribuiscono piuttosto equamente su tutta la batimetria del bacino, però si rileva un maggior energia per profondità comprese tra 400 e 1800 m.

Le traiettorie ed anche le mappe del campo medio mettono in luce i vortici Batumi e Sevastopol, con velocità anche maggiori di 40 cm/s ed altri vortici con velocità inferiori presenti, sia nelle zone tra la Rim Current e la costa, sia nelle zone interne dei due sotto-bacini. Le traiettorie mostrano altresì la presenza di diramazioni della Rim Current che, assieme ai vortici contribuiscono anche a deviare i drifter nelle zone interne dei due sottobacini, qui le velocità diminuiscono, fino a meno di 10 cm/s con tempi di residenza medi per cerchi di 25 km di raggio, di 5-6 giorni e un tempo massimo di quasi 23 giorni.

Globalmente l'energia cresce in inverno ed è massima in primavera; l'elevata energia in estate non è un risultato significativo perché stagione sotto campionata. Localmente la MKE è elevata lungo l'anello dominato dalla Rim Current, come si vede anche dalle mappe del campo medio di corrente, con valori più grandi in inverno e primavera lungo la costa turca ( $>1000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ ), mentre l'EKE è elevata di fronte a Sevastopol e nella zona più ad est del bacino visibile anche dai grafici d'ellissi di varianza, con valori massimi sempre in primavera  $450\text{-}550 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ . L'EKE è ancora dello stesso ordine di grandezza lungo la costa sud orientale, sia durante i mesi primaverili sia estivi. Nella zona di fronte a Sevastopol, in cui abbiamo dati sufficienti per tutte le stagioni, possiamo affermare che MKE ed EKE sono massime in primavera.

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano quanti hanno contribuito a questo progetto nel Mar Nero in particolare: Elisabeth Horton, Peter Niiler, Sergey Motyzhev e Andrey Zatsepin. Inoltre un doveroso ringraziamento va a Laura Ursella per la realizzazione di programmi Matlab, per l'elaborazione dei dati ed il calcolo delle statistiche euleriane.

## Referenze

- Afanasyev, Y. D., Kostianoy, A. G., Zatsepin, A. G. e Poulain, P. M. "Analysis of Velocity Field in the Eastern Black Sea from Satellite Data During the Black Sea '99 Experiment", *Journal of Geophysical Research*, 107.C8, 13/1-7, 2002.
- Eremeev, V. N., Ivanov, L. M., Kirwan, A. D, Jr., Melnichenko, O. V., Kochergin, S. V., e Stanichnaya . "Reconstruction of Oceanic Flow Characteristics From Quasi-Lagrangian Data 2. Characteristics of the Large-Scale Circulation in the Black Sea", *Journal of Geophysical Research*, 97.C6, 9743-9753, 1992.
- Emery, W. J. e Thomson, R. E, "Data Analysis Methods in Physical Oceanography", edited by- Elsevier Science B.V., 319-328, Amsterdam, The Netherlands 2001.
- Davis, R. E., "Observing the General Circulation with Floats", *Deep-Sea Research* 38.Suppl. 1, 531-571, 1991.
- Hansen, D. V., e Poulain, P. M., "Quality Control and Interpolations of WOCE-TOGA Drifter Data", *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*, 13.4,900-909, 1996.
- Korotaev, G., Oguz, T., Nikiforov, A., e Koblinsky, C. "Seasonal, Interannual, and Mesoscale Variability of the Black Sea Upper Layer Circulation Derived from Altimeter Data", *Journal of Geophysical Research*, 108.C4, 19,1-19,15, 2003.
- Motyzhev, S.V., Poulain, P. M., Zatsepin, A. G., Fayos, C., Kostianoy, A. G., Maximenko, N. A., Poyarkov, S. G., Soloviev, D. M., e Stanichny, S. V. "New Phase of Drifter Experiment in the Black Sea", *In Global Drifting Buoy Observation-2000: A DBCP Implementation Strategy, DBCP Tech. Doc., Ser. 16, World Meteorol. Org., Geneva - 2000.*
- Oguz, T. V., Latun, V.S., Latif, M. A., Vladimirov, V. V., Sur, H. I. Markov A. A., Ozsoy, E., Kotovshchikov, V. V., Eremeev, V. V., e Unluata U., "Circulation in the surface and intermediate layer of the Black Sea", *Deep-Sea Research, part I*, 40, 1597-1612, 1993.

Poulain, P. M. "Adriatic Sea Surface Circulation as Derived from Drifter Data Between 1990 and 1999", *Journal of Marine Systems* 29, 3-32, 2001.

Poulain, P. M., e Varnas, A.W., e Niiler, P. P.. "Near-Surface Circulation of the Nordic Seas as Measured by Lagrangian Drifters", *Journal of Geophysical Research*, 101.C8, 18,237-18,258, 1996.

Sybrandy, A.L., Niiler, "WOCE/TOGA Lagrangian Drifter Construction Manual" , Scripps Inst. Of Oceanogr., Univ. of Calif., San Diego, La Jolla, Calif., 1991.

Zhurbas, V. M., Zatsepin, A. G., e Poulain, P.-M. "Statistical Analysis of Current's Velocity in the Black Sea Based on Drifter Data", In *Multidisciplinary Investigations of the North-East Part of the Black Sea (in Russian)*, edited by- Zatsepin, A.G., e Flint, M.V., 105-118, Nauka, Moscow, 2002.

Zatsepin, A G., Ginzburg, A. I., Kostianoy, A. G., Kremenetskiy, V., Krivosheya, V.G., Stanichny, S. V., e Poulain, P. M. "Observations of Black Sea Mesoscale Eddies and Associated Horizontal Mixing", *Journal of Geophysical Research* 108.C8 2/1-2/27, 2003.