

**Produzione di immagini telerilevate di temperatura superficiale nel
mare Adriatico nord-orientale e studio statistico per
l'ottimizzazione dei prodotti**

di

G. Notarstefano, E. Mauri e P.-M. Poulain

Work Package 3 del progetto ADRIANE (Sistema di controllo idrodinamico e ambientale del Golfo di Trieste a fini previsionali e gestionali) finanziato dal Fondo Trieste.

Approvato per la stampa da:

Dott. Alessandro Crise

Direttore, Dipartimento di Oceanografia

1. Introduzione

Lo scopo principale del progetto ADRIANE è quello di fornire un monitoraggio continuo del mare Adriatico nord-orientale e più in particolare del Golfo di Trieste, sia a fini diagnostici che previsionali. Il progetto si rivolge al settore pubblico e privato e mira a fronteggiare i rischi ambientali. In particolare, ADRIANE è un sistema di servizi a cui si può accedere tramite la rete internet. Sulla pagina dedicata vengono resi disponibili ogni tre ore i principali parametri meteo-marini quali il moto ondoso, le correnti e la temperatura superficiale dell'acqua.

Il Work Package (WP) 3 del progetto ADRIANE, affidato al gruppo SIRE (Sistemi REmoti) dell'OGS (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale), prevede di fornire mappe climatologiche di temperatura superficiale del mare (SST), un'analisi statistica dei prodotti e, quotidianamente, mappe affidabili di SST. La tecnologia satellitare, di cui dispone il gruppo SIRE, permette di avere in tempo quasi reale misure sinottiche di SST, su ampia scala, ad intervalli di tempo regolari (1-2 ore) e molto frequenti (10-15 al giorno). I continui passaggi dei satelliti ci garantiscono quindi una copertura globale e ci consentono di disporre di un monitoraggio remoto, continuo nel tempo, che contribuisce a valutare e conoscere, istante per istante, le condizioni meteo-marine, la dispersione degli apporti fluviali e la dinamica delle correnti superficiali. Tale risorsa risulta pertanto fondamentale nella gestione e salvaguardia dell'ambiente costiero e dell'ecosistema marino, consentendo di rilevarne eventuali alterazioni e quindi di poter intervenire tempestivamente. Un ulteriore vantaggio, derivante dall'utilizzo dei prodotti satellitari, è quello di poterli utilizzare all'interno di modelli previsionali.

L'obiettivo principale del WP3 è quello di fornire mappe di temperatura con copertura completa di dati, anche laddove le immagini risultino affette dalla copertura nuvolosa che oscura la rilevazione della misura satellitare. A questo scopo utilizziamo una tecnica statistica di

interpolazione oggettiva e ci avvaliamo di 6 anni di dati satellitari di SST raccolti dal 2000 al 2005.

2. Dati satellitari

Le misure di SST vengono effettuate da radiometri del tipo AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo della costellazione di satelliti meteorologici americani NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – Figura 1). Questi satelliti percorrono orbite eliosincrone, con un periodo di circa 102 minuti ed un'inclinazione di circa 98° per mantenere quasi costante l'ora di passaggio sopra una stessa area.



Figura 1. riproduzione di un satellite NOAA.

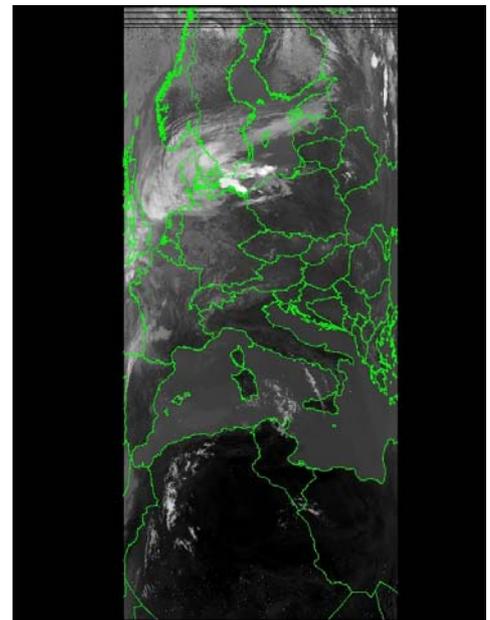


Figura 2. Esempio di registrazione radiometrica satellitare

I radiometri effettuano registrazioni in due bande nell'infrarosso (10,3-11,3 μm ; 11,5-12,5 μm) da cui si ricavano misure di radianza e successivamente le stime di SST (Kidder et al., 1995). L'angolo esplorato dai radiometri è di circa 112° e la risoluzione è di circa 1 km al nadir. Un esempio di un'immagine ottenuta da un passo satellitare è presentato nella figura 2. I dati AVHRR dei satelliti NOAA 12, 14, 15, 16, 17 e 18 vengono trasmessi a terra via etere ed automaticamente registrati tramite il sistema di ricezione TeraScan (Figura 3) fornito dalla SeaSpace. Il sistema di acquisizione TeraScan, operante all'OGS presso il gruppo SIRE, è stato aggiornato sia nella parte software (versione 3.3) che hardware grazie ai fondi stanziati per il progetto ADRIANE. In particolare si è passati ad un sistema di acquisizione e gestione su PC Linux, più affidabile e veloce.

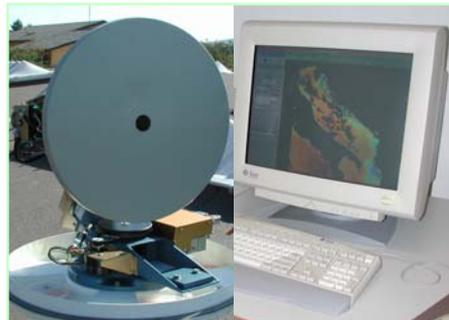


Figura 3. Antenna di ricezione (a sinistra) e stazione di processamento (a destra) dei dati satellitari AVHRR.

I dati AVHRR vengono processati usando delle *routine* TeraScan e degli *script* Unix implementati dal gruppo SIRE che prevedono la loro calibrazione, georeferenziazione e mappatura secondo il sistema di proiezione Mercatore sull'area scelta per il progetto ($45,37^\circ$ - $45,81^\circ$ N e $12,96^\circ$ - $13,81^\circ$ E – Figura 4).

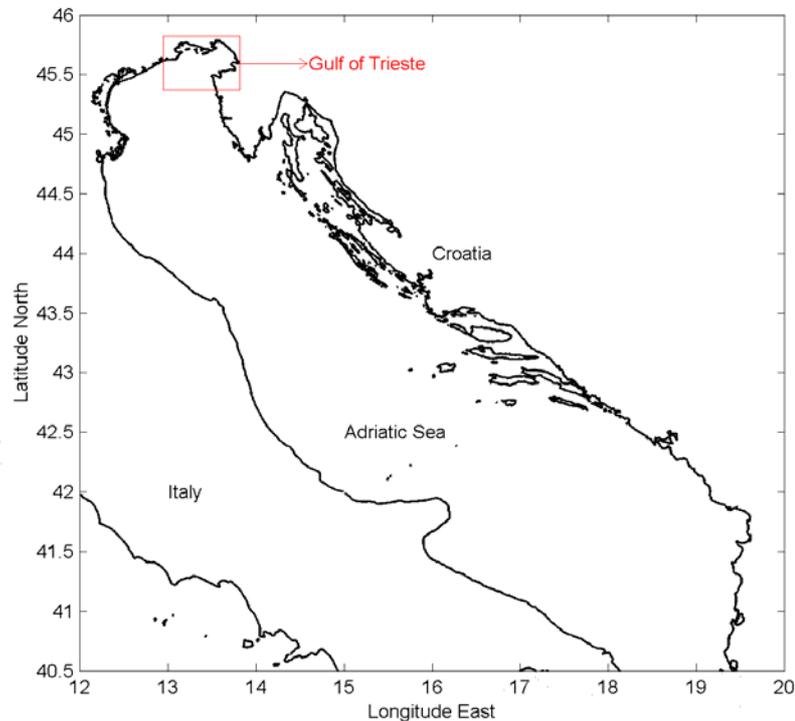


Figura 4. Area scelta per il progetto ADRIANE, comprendente il Golfo di Trieste.

La stima della SST prevede l'utilizzo dell'algoritmo Multi-Channel Sea Surface Temperature (MCSST) introdotto da McClain et al. (1985). Il sistema di mascheramento della copertura nuvolosa adottato per questo studio è quello descritto in Notarstefano et al. (2003a). In tale procedura si usano una sequenza di test che adoperano valori di albedo (solo di giorno) e valori di radianza nella banda dell'infrarosso. Maggiori dettagli sui test utilizzati sono riportati nel rapporto di Notarstefano et al., 2003a. Uno studio mirato è stato svolto per valutare il valore di soglia di ogni test in modo da ottimizzare i prodotti nell'area del nord Adriatico. Tale operazione si è resa necessaria per cercare di avere delle immagini prive di qualsiasi contaminazione nuvolosa anche rischiando di mascherare forti gradienti orizzontali di SST. La buona qualità dei dati è infatti essenziale per ottenere delle immagini interpolate in modo ottimale.

3. Metodi

3.1 Creazione del set di dati

La creazione del set di dati è stata fatta utilizzando dei programmi, in ambiente MatLab, ideati ed implementati dal gruppo di ricerca SIRE. Per poter procedere alla ricostruzione delle immagini è essenziale disporre di un set di dati che non includa contaminazioni di alcun genere; il raggiungimento di questo scopo risulta piuttosto complesso dal momento che bisogna fronteggiare diversi problemi, tra cui:

1. la navigazione automatica delle immagini che, avendo una precisione di circa 2 pixel (> 2 km), può produrre degli errori di localizzazione geografica dei dati. Il problema risulta particolarmente delicato in quanto l'immagine di SST prodotta non combacia perfettamente con la linea di costa se la navigazione è errata. La copertura di dati lungo la fascia costiera è pertanto sensibile a questo problema ed è minore rispetto al resto del bacino;
2. la copertura nuvolosa che, se non propriamente eliminata, contamina il prodotto finale di SST;
3. il riscaldamento diurno della superficie del mare che tende a mascherare le strutture termiche presenti;
4. i disturbi di trasmissione dei dati, legati all'inclinazione dell'orbita del satellite rispetto alla stazione ricevente;
5. una minore risoluzione spaziale dei dati al margine del passo satellitare rispetto a quelli più centrali.

Si è deciso fin da subito di considerare solamente i passi notturni prossimi all'alba in modo da eliminare l'effetto indotto dal riscaldamento diurno. Sono stati quindi applicati vari metodi per selezionare le immagini migliori e sono stati poi confrontati i diversi risultati statistici

ottenuti e la qualità delle immagini ricostruite. Infine è stata scelta la tecnica che produceva i migliori risultati. La prima metodologia usata consiste nel selezionare le immagini in base alla percentuale di copertura nuvolosa: le immagini al di sopra di una certa soglia preimpostata di nuvolosità sono state scartate e le altre accettate. La seconda e terza metodologia consistono rispettivamente in una selezione casuale di 10 immagini e delle 10 migliori per mese. Questi metodi sono stati però scartati perché era difficile eliminare anche le immagini affette da disturbi di trasmissione e da errata navigazione. Si è deciso quindi di procedere ad una prima grossolana rimozione delle immagini che visivamente presentavano dei campi di temperatura erronei, causati da registrazioni effettuate da satelliti con una bassa elevazione (altezza del satellite sull'orizzonte) o da segnali disturbati. Successivamente sono state tolte le immagini affette da copertura nuvolosa in una percentuale superiore al 30%. Ulteriori riduzioni dei dati hanno riguardato l'eliminazione dei pixel la cui presenza temporale era inferiore al 13%. Quest'ultima condizione è servita principalmente per togliere certi pixel lungo la fascia costiera ed in particolare quelli relativi alle insenature del Golfo di Trieste ed alle zone interne della laguna di Grado che sono affetti da problemi di navigazione. Un'altra selezione è stata quella di filtrare i valori di temperatura esterni ad un intervallo fisicamente accettabile (3°-35° C). Alla fine sono state selezionate le 10 migliori immagini per ogni mese (se necessario, dal momento che alcuni mesi avevano meno di 10 immagini), cioè quelle con il numero maggiore di dati, con la condizione di avere un solo passo per giorno. Il set di dati finale è risultato così composto da 561 immagini giornaliere, sparse su un arco di tempo di 6 anni (gennaio 2000-dicembre 2005).

3.2. Costruzione di mappe climatologiche

Un modo per poter studiare la variabilità spazio-temporale della SST è quello di costruire delle mappe climatologiche. A tal fine, sono state create delle immagini composite della media,

della mediana e della deviazione standard di SST e del numero di pixel usati. Per questo lavoro abbiamo utilizzato il set di dati di 561 immagini, non interpolato, producendo delle composite mensili, annuali ed interannuali (6 anni). Diverse metodologie sono state adoperate per calcolare le statistiche; si sono confrontati i risultati ottenuti ed alla fine è stato scelto il metodo che meglio spiegava la variabilità della SST nel Golfo di Trieste. La prima tecnica adoperata consisteva nel calcolare le statistiche verso il tempo, senza dare alcun peso alle misure. In questo modo la media e soprattutto la mediana erano sbilanciate, nelle statistiche annuali e di 6 anni, verso valori di temperatura maggiori di quanto in realtà avrebbero dovuto essere. Ciò era determinato dal fatto che nel corso dei mesi estivi c'è una maggiore densità nella copertura dei dati rispetto ai mesi invernali a causa della più probabile e persistente nuvolosità. Nelle statistiche mensili invece, l'assenza di pesi influisce in modo minore dal momento che nei calcoli rientra il medesimo mese dei diversi anni. Si è pensato quindi di passare ad un metodo che prevedesse di bilanciare le misure di tendenza centrale: abbiamo prodotto delle statistiche mensili (per 72 mesi) verso il tempo e successivamente calcolato le statistiche annuali, interannuali e intermensili in due modi:

1. la sommatoria delle medie (mediane) temporali mensili viene moltiplicata per il corrispettivo numero di pixel e poi divisa per la sommatoria del numero di pixel;
2. vengono prodotte le medie delle medie (mediane) mensili.

Le due tecniche danno risultati simili ma si è preferito optare per la seconda, i cui prodotti descrivono meglio la variabilità spazio-temporale della SST all'interno del bacino in esame.

3.3 Metodologia di interpolazione

In questo lavoro applichiamo il metodo descritto da Beckers e Rixen (2003), chiamato Data INterpolating Empirical Orthogonal Function (DINEOF), già applicato con successo ad

immagini di concentrazione di clorofilla (Mauri et al., 2007) e di SST in Adriatico (Alvera-Azcarate et al., 2005). Questa tecnica prevede l'utilizzo dei modi EOF (Empirical Orthogonal Function) e delle loro rispettive ampiezze temporali, calcolate dai dati incompleti, per ricostruire il set di dati. La metodologia DINEOF consente di ricostruire solamente le immagini incomplete, anche non in sequenza cronologica, presenti nel set di dati mentre non è possibile ottenere un'interpolazione temporale creando immagini nuove. Siccome il nostro obiettivo è quello di fornire quotidianamente un'immagine di SST interpolata del Golfo di Trieste, il set di dati viene aggiornato automaticamente sostituendo ogni giorno l'ultima immagine (la 562esima). La matrice di dati iniziale viene normalizzata, sottraendo la media temporale e dividendo per la deviazione standard temporale, e i valori mancanti sono sostituiti da degli "zeri". A questa matrice viene applicata la tecnica della Singular Value Decomposition (SVD) per calcolare i modi spaziali e le ampiezze temporali. Il metodo consta di un processo iterativo che rimpiazza gli zeri con una stima migliore. La stima di un determinato valore mancante si ottiene moltiplicando il corrispondente valore del primo modo spaziale per la rispettiva ampiezza. L'iterazione prosegue, usando le stime ottenute al posto degli "zeri", fino a che il valore assoluto della differenza tra la somma dei valori singolari ottenuti dalla SVD dell'iterazione corrente e di quella precedente è inferiore ad una certa soglia (1° C). La procedura prosegue con un nuovo ciclo iterativo usando sia il primo che il secondo modo EOF. Il numero di modi ottimo da usare (nel nostro caso 10) viene definito attraverso il test di cross-validazione (Wilks, 1995). Alla fine la matrice, completamente ricostruita, viene moltiplicata per la deviazione standard e viene addizionata alla media per ottenere il set di dati interpolato (Figura 5).

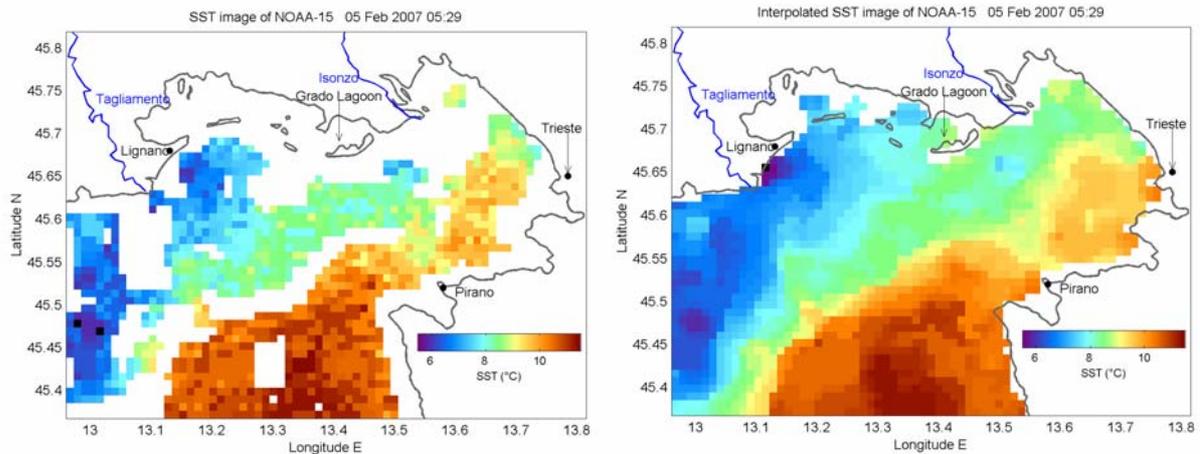


Figura 5. Esempio di immagine grezza (a sinistra) ed interpolata (a destra) di SST.

4. Risultati

4.1. Immagini composite

Le immagini composite della mediana della SST sono molto simili a quelle della media e, pertanto, non verranno descritte nei paragrafi che seguono. Le immagini riguardanti il numero di pixel usati per calcolare le statistiche sono riportate in appendice nelle figure 13, 14 e 15, mentre quelle relative alla deviazione standard della media nelle figure 16, 17 e 18. Le 72 immagini relative alle medie mensili usate per i calcoli statistici sono rappresentate nelle figure da 19 a 30 (medie calcolate da dati non interpolati) e da 31 a 42 (medie calcolate da dati interpolati).

4.1.1. Immagini composite mensili

L'analisi delle immagini composite mensili della media della SST (Figura 6) permette di osservare vari campi e strutture termiche che si formano in questo bacino e si sviluppano nel corso dei mesi. La fascia costiera settentrionale che comprende la zona lagunare e si estende per qualche chilometro al largo, è caratterizzata da una temperatura superficiale che si mantiene di circa 2°-3° C più fredda (la deviazione standard è tra 0,5° e 2,5° C – Figura 16), rispetto al resto

del bacino, da ottobre a febbraio. Durante la primavera e l'estate i gradienti orizzontali di SST sfumano e la temperatura diventa più omogenea. In marzo è evidente la plume di acqua fredda (circa $8^{\circ}\text{-}9^{\circ}\pm 1,5^{\circ}\text{ C}$) del fiume Isonzo e si nota, sebbene in maniera meno marcata, anche il segnale termico del Tagliamento (circa $8^{\circ}\pm 1,5^{\circ}\text{ C}$). Da maggio a settembre il Golfo di Trieste è caratterizzato da una temperatura più fredda rispetto a quella del bacino di acqua più profonda. In particolare l'area costiera della provincia di Trieste è contrassegnata da una sottile lingua termica più fredda di circa 1° C (la deviazione standard è tra 1° e $1,5^{\circ}\text{ C}$) nei mesi di luglio, agosto e settembre.

Dall'analisi delle immagini composite del numero di pixel (Figura 13) si può subito notare la maggiore disponibilità di dati durante i mesi estivi (da maggio ad ottobre) rispetto a quelli invernali (da novembre ad aprile). I mesi di luglio e agosto risultano quelli meglio campionati con circa 60 immagini disponibili su un'ampia area del bacino; il mese di novembre è quello con meno dati a disposizione, avendo circa 30 immagini nella zona più centrale del Golfo di Trieste. Le aree prossime alla costa ed all'interno della laguna di Grado sono caratterizzate invece da una costante scarsità di dati se confrontate alle zone centrali del bacino.

4.1.2. Immagini composite annuali

Le immagini composite delle medie annuali di SST (Figura 7) mostrano una progressiva diminuzione della temperatura media nel corso di 5 anni, dal 2001 al 2005. Il 2001 risulta l'anno mediamente più caldo con una temperatura superficiale del bacino di circa 18° C (la deviazione standard è tra 5° e $6,5^{\circ}\text{ C}$ – Figura 17). Negli anni successivi si assiste ad un abbassamento quasi costante della SST media di circa $0,3^{\circ}\text{-}0,4^{\circ}\text{ C/anno}$ che porta ad un raffreddamento dell'intero bacino. Nel 2005 la SST media è approssimativamente di $16,5^{\circ}\pm(6^{\circ}\text{-}7^{\circ})\text{ C}$.

Il maggior numero di dati a disposizione si riscontra nel 2003 (Figura 14) con più di 100 immagini in gran parte del bacino. In prossimità della costa tale valore decresce fino a poche decine di immagini

4.1.3. Immagini composite interannuali (6 anni)

La SST media su 6 anni (Figura 8) rivela un gradiente meridionale del campo di temperatura con valori compresi tra 16° e $17,5^{\circ}$ C (la deviazione standard è tra $5,5^{\circ}$ e $6,5^{\circ}$ C – Figura 18). La porzione settentrionale del bacino è in media più fredda di quella meridionale di circa 1° C. Le aree costiere ed in particolare la laguna di grado sono più calde di circa 1° - $1,5^{\circ}$ C rispetto alle zone del bacino di acqua più profonda.

Nella figura 15 è riportata l'immagine composta del numero di pixel usati per calcolare le statistiche.

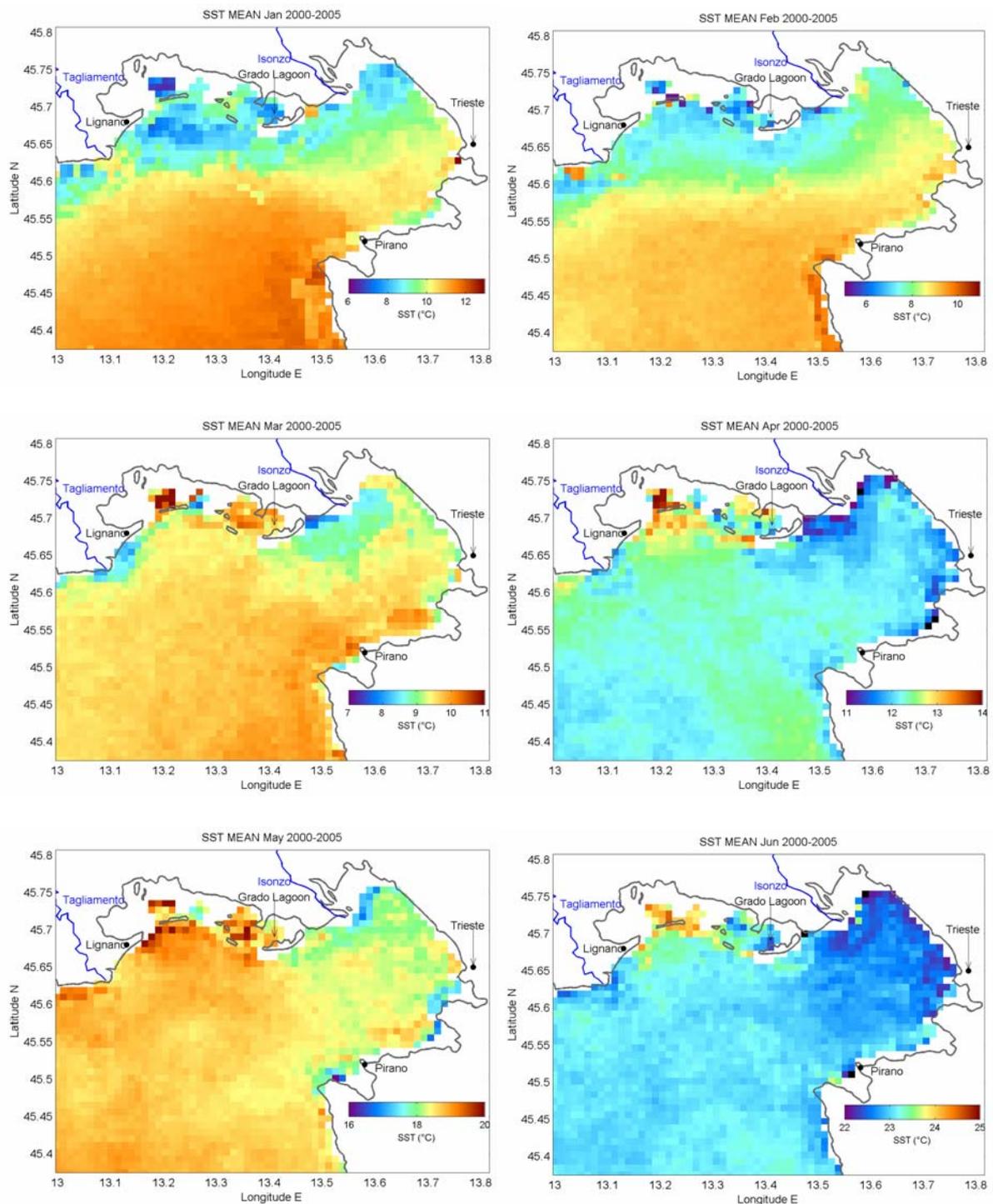


Figura 6. (Segue)

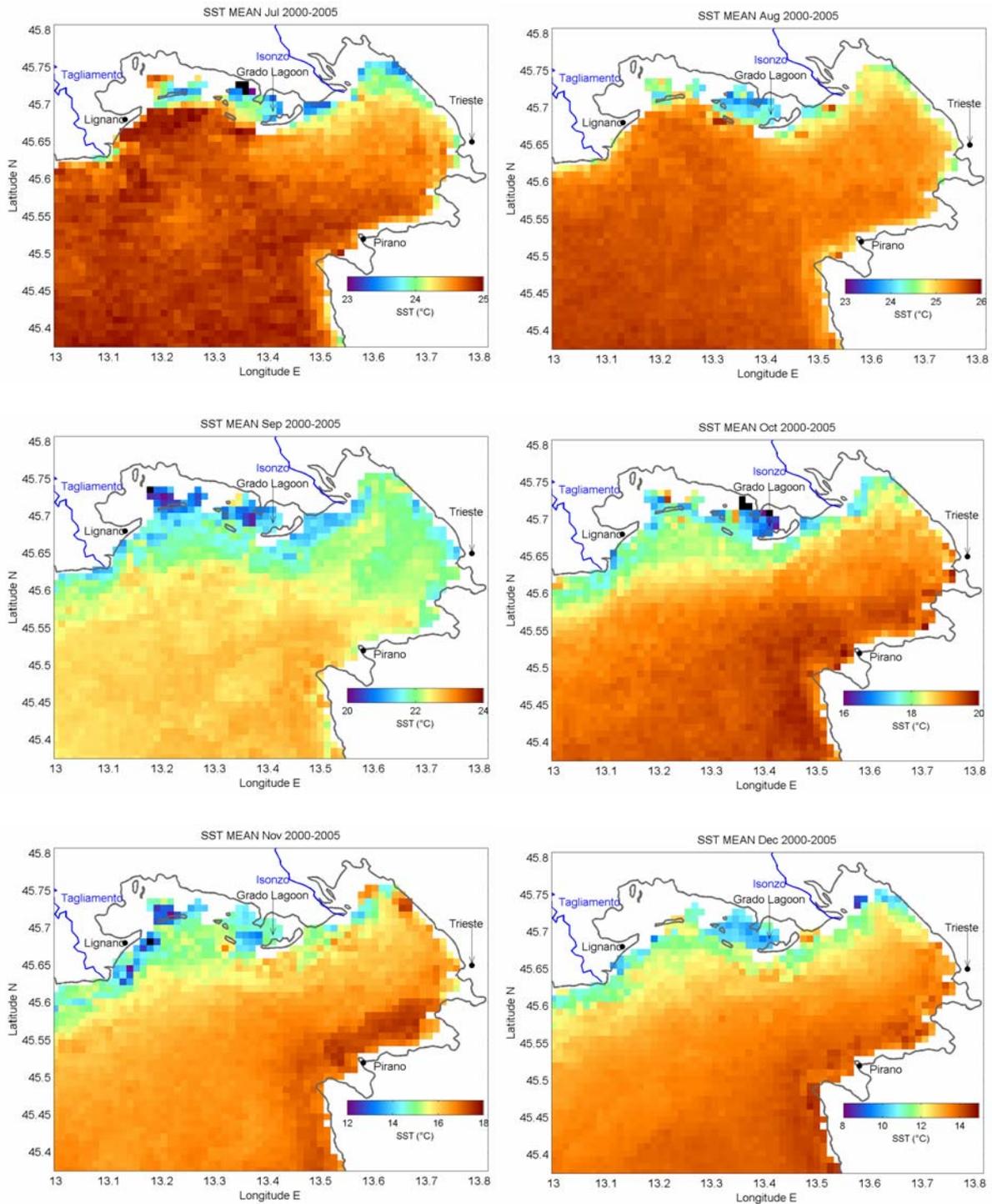


Figura 6. Immagini composite mensili della media di SST per gli anni 2000-2005. Le mappe sono state ottenute calcolando le medie delle medie mensili. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore di colore della SST è in gradi centigradi ed è diversa per ciascun mese, in modo da evidenziare le strutture termiche presenti.

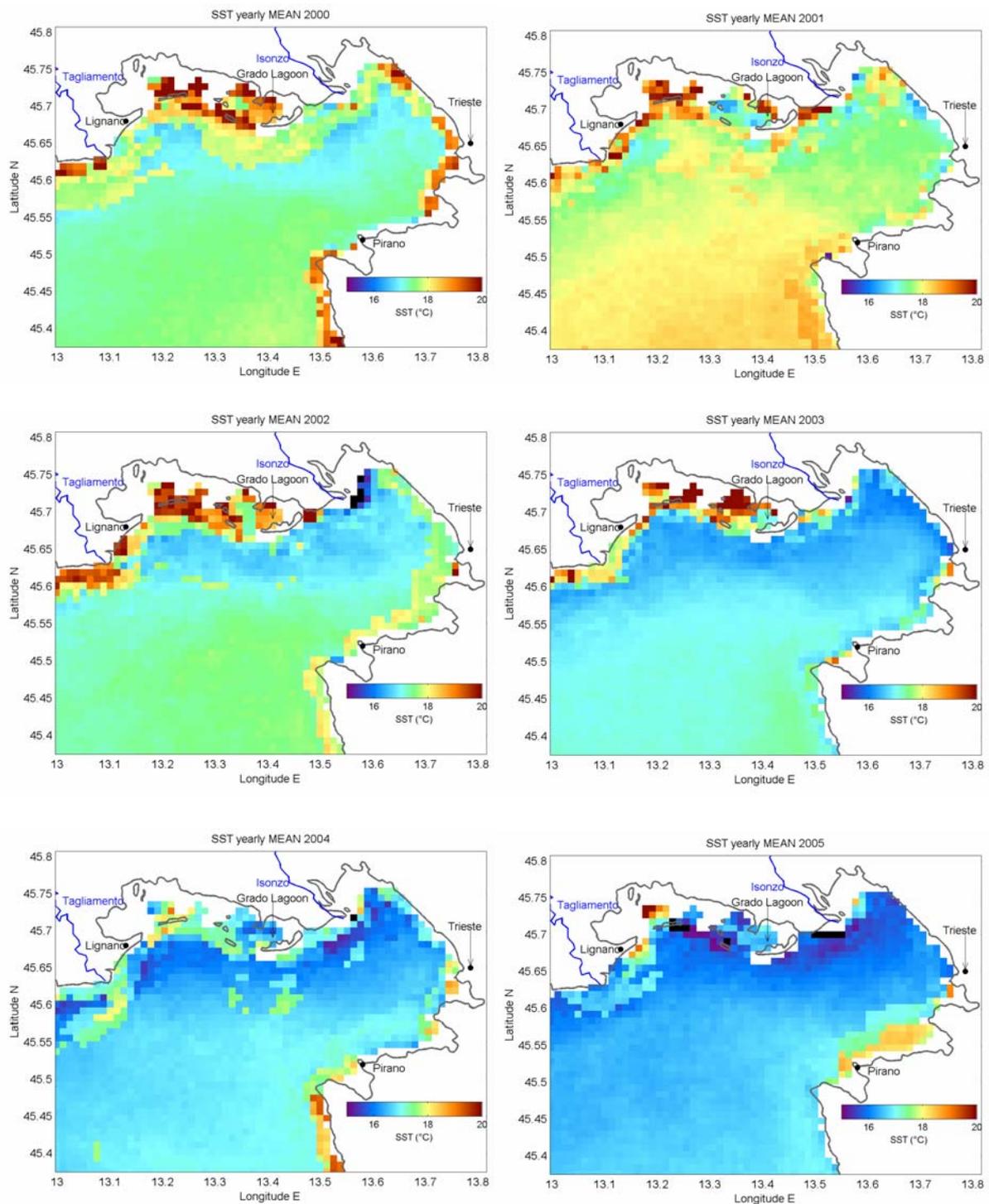


Figura 7. Immagini composite annuali della media di SST. Le mappe sono state ottenute calcolando le medie delle medie mensili. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore di colore della SST è in gradi centigradi ed è uguale per ciascun anno.

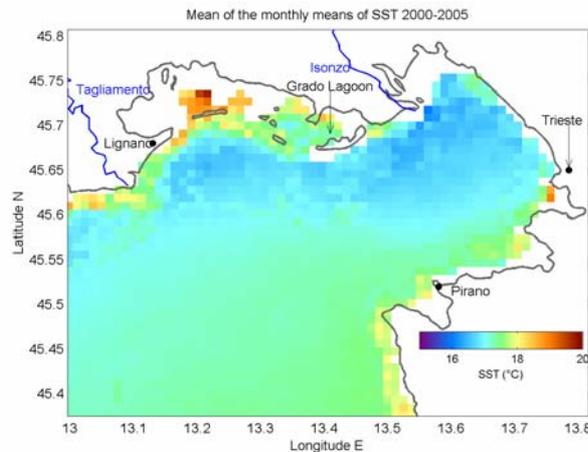


Figura 8. Immagine composta di 6 anni (2000-2005) della media di SST. La mappa è stata ottenuta calcolando le medie delle medie mensili. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore di colore della SST è in gradi centigradi.

4.2. Decomposizione del set di dati tramite EOF

Il metodo EOF è stata applicato sia al set di dati incompleto che a quello ricostruito. Per una migliore descrizione della variabilità spatio-temporale della SST ci siamo avvalsi del metodo applicato al set di dati ricostruito. La quasi totalità della varianza (99%) viene spiegata nel 1° modo (Figura 9), senza zero-crossing. La variazione è massima nel mezzo del bacino mentre diminuisce avvicinandosi alla costa. L'ampiezza temporale delinea chiaramente il ciclo stagionale della SST con un picco più negativo nell'estate 2003, collegato probabilmente ad un periodo particolarmente caldo e secco rispetto agli altri anni presi in considerazione. Nel 2005 si può invece osservare il picco positivo invernale più accentuato. Il 2° modo (Figura 10) spiega lo 0,5% della varianza totale e divide il Golfo di Trieste in due parti: una, nord-occidentale, influenzata dagli apporti fluviali dell'Isonzo e del Tagliamento e caratterizzata dalla zona lagunare di acqua bassa e l'altra, sud-orientale, comprendente la porzione più profonda del bacino. L'area nord-occidentale, che varia in fase con l'andamento dell'ampiezza temporale, registra i massimi valori positivi di SST all'interno della laguna. La porzione sud-orientale varia

invece in opposizione di fase rispetto al resto del bacino e presenta i valori negativi massimi in prossimità della costa istriana occidentale. Elevati valori positivi si evidenziano, nel modo temporale, in primavera (aprile-maggio) mentre quelli negativi sono presenti durante l'autunno e parte dell'inverno. Il 3° modo (Figura 11) spiega lo 0,1% della varianza. La linea dello “zero-crossing” divide l'area nord-orientale, comprendente il Golfo di Trieste in senso stretto, dal resto del bacino. Osservando l'ampiezza temporale del 3° modo si possono notare dei picchi positivi durante i mesi invernali, in corrispondenza dei quali la SST del Golfo di Trieste, che varia in opposizione di fase rispetto all'evoluzione temporale, diminuisce. Questa divisione areale dovrebbe essere collegata ai differenti effetti del vento sul bacino. Nel 4° modo (Figura 12) risiede lo 0,1% della varianza totale e il bacino viene diviso in tre parti: l'area costiera con la laguna di Grado e la porzione meridionale variano in fase e nello stesso modo, mentre la zona centrale è fuori fase. L'evoluzione dell'ampiezza temporale risulta piuttosto complessa con numerose oscillazioni e picchi che saranno oggetto di ulteriore studio per verificare il loro collegamento con le portate dei fiumi (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nell'area in esame.

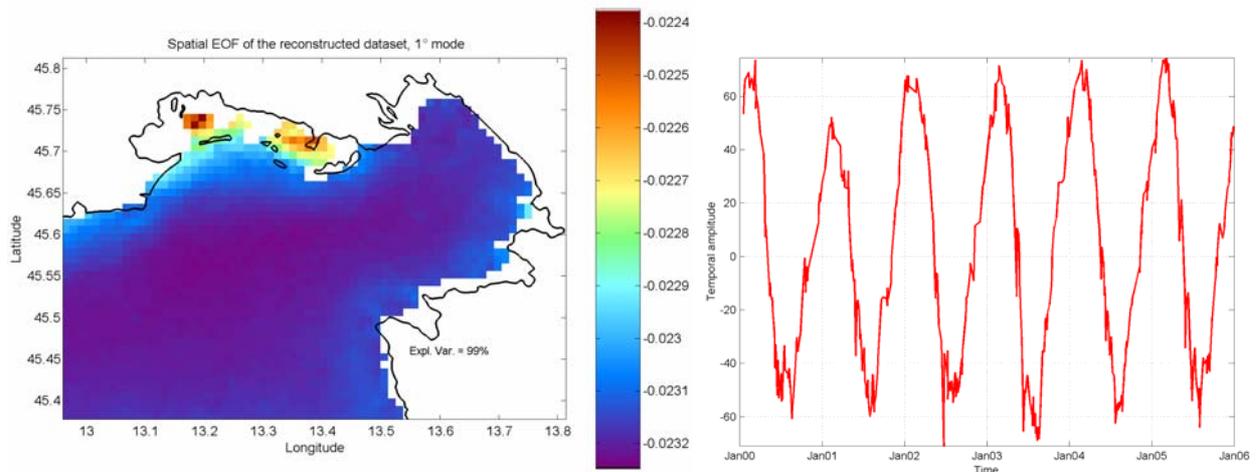


Figura 9. 1° modo spaziale calcolato con il set di dati ricostruito e relativa ampiezza temporale.

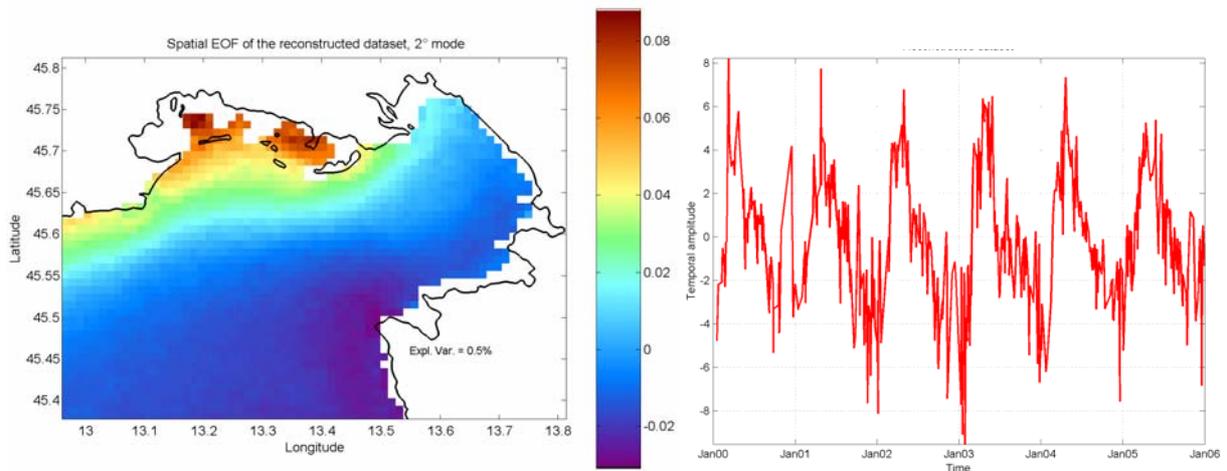


Figura 10. 2° modo spaziale calcolato con il set di dati ricostruito e relativa ampiezza temporale.

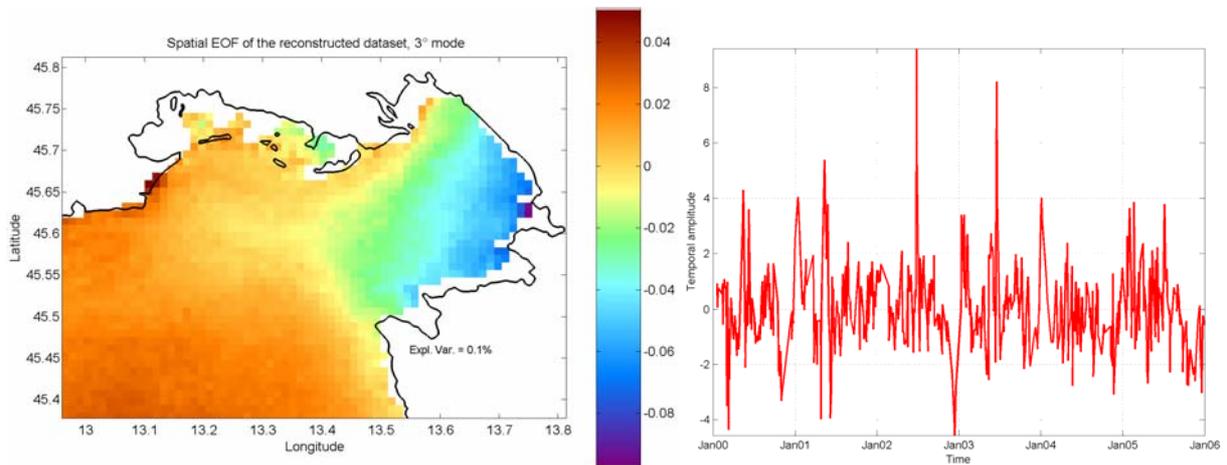


Figura 11. 3° modo spaziale calcolato con il set di dati ricostruito e relativa ampiezza temporale.

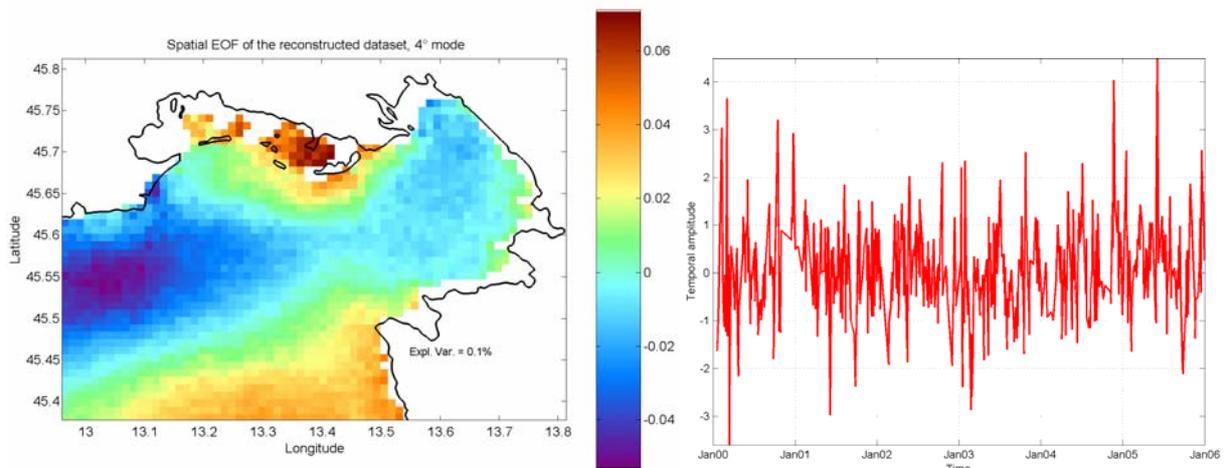


Figura 12. 4° modo spaziale calcolato con il set di dati ricostruito e relativa ampiezza temporale.

5. Accessibilità dei prodotti

Il progetto ADRIANE prevede, nella fase TOP (Target Operational Period), di poter accedere ai dati aggiornati ed ai prodotti. Va precisato che la disponibilità quotidiana dei dati è subordinata alla copertura nuvolosa presente nell'area che ostacola la rilevazione satellitare. È stato messo a punto un procedimento automatico che prevede giornalmente una serie di passaggi:

- 1) salvataggio in un file di testo dei dati notturni di SST relativi al Golfo di Trieste,
- 2) scelta del miglior passo satellitare (è indipendente dal tipo di satellite dal momento che l'utilizzo di diversi sensori non influisce in modo significativo sul calcolo della SST, come riportato in Notarstefano et al. (2003b) e Tomazic et al., (2005)).
- 3) aggiornamento del set di dati con il nuovo file,
- 4) avvio del processo di interpolazione,
- 5) creazione delle immagini di SST (reale ed interpolata),
- 6) trasferimento, tramite FTP, dei dati grezzi ed interpolati sul sito scelto per la condivisione degli stessi,
- 7) trasferimento delle immagini di SST sulla pagina web dedicata.

Ogni giorno quindi, alle ore 6:45 locali, sono disponibili e scaricabili da <ftp://ftp.inogs.it/SIRE/>, tramite *password*, i dati grezzi e quelli interpolati di SST relativi al migliore passo satellitare della notte. Le immagini di SST ricavate da questi dati possono essere viste accedendo al sito web <http://poseidon.ogs.trieste.it/sire/satellite/adriane.html>, dove è anche possibile visionare le immagini delle composite mensili, annuali ed interannuali di SST. Questi dati vengono anche quotidianamente usati dal gruppo ECHO dell'OGS all'interno del loro modello previsionale. In particolare, sono utilizzati per far convergere i dati forniti dal modello a

quelli “veri” ottenuti dalle registrazioni satellitari: tale processo, chiamato *merging*, si svolge nell’arco di 12 ore (dalle 18 alle 06).

6. Conclusioni

Nell’ambito del progetto ADRIANE, il gruppo SIRE dell’OGS ha avuto l’incarico di sviluppare il WP3, che prevede di fornire giornalmente mappe affidabili di SST con copertura completa di dati.

A tale scopo, si è dapprima provveduto all’aggiornamento del sistema di ricezione satellitare TeraScan (fornito dalla SeaSpace) passando ad una gestione su PC Linux, più veloce ed affidabile. I dati satellitari AVHRR sono stati processati in ambiente TeraScan utilizzando degli script Unix all’uopo modificati ed implementati.

Successivamente si è provveduto alla creazione di un set di dati pulito ed affidabile per poter procedere alla ricostruzione delle immagini con la tecnica di interpolazione DINEOF. Questa parte del lavoro si è svolta in ambiente MatLab utilizzando dei programmi ideati dal nostro gruppo. Sono state selezionate 561 immagini, corrispondenti a 6 anni di dati (2000-2005), per applicare la metodologia di interpolazione.

Usando il set di dati ridotto, sono state create delle immagini composite della media, della mediana e della deviazione standard di SST e del numero di pixel usati. Dallo studio delle immagini composite mensili della media della SST è emerso che la fascia costiera settentrionale dell’area in esame è più fredda, da ottobre a febbraio, di circa 2°-3° C (la deviazione standard è tra 0,5° e 2,5° C) rispetto al resto del bacino. In marzo si notano i segnali termici delle plume di

acqua fredda dei fiumi Isonzo (circa 8° - $9^{\circ}\pm 1,5^{\circ}$ C) e Tagliamento (circa $8^{\circ}\pm 1,5^{\circ}$ C). Da maggio a settembre la SST del Golfo di Trieste è più fredda rispetto a quella del bacino di acqua più profonda. Infine, nei mesi di luglio, agosto e settembre si sviluppa una sottile lingua termica di acqua più fredda (circa 1° C in meno rispetto al resto del Golfo) che si protende lungo l'area costiera della provincia di Trieste. Le immagini composite delle medie annuali di SST mostrano un progressivo raffreddamento dell'intero bacino dal 2001 al 2005 con un tasso di circa $0,3^{\circ}$ - $0,4^{\circ}$ C/anno. La temperatura si abbassa da circa 18° C nel 2001 a $16,5^{\circ}$ C nel 2005. La SST media su 6 anni rivela un gradiente meridionale del campo di temperatura con valori compresi tra 16° (porzione settentrionale del bacino) e $17,5^{\circ}$ C (porzione meridionale del bacino). Le aree costiere ed in particolare la laguna di Grado sono più calde di circa 1° - $1,5^{\circ}$ C rispetto alle zone del bacino di acqua più profonda.

Il set di dati ricostruito è stato scomposto tramite la tecnica EOF e si è trovato che il 99% della varianza risiede nel 1° modo. La rispettiva ampiezza temporale descrive l'andamento stagionale della temperatura, con un picco positivo nell'estate 2003 ed uno negativo nell'inverno 2005. Il 2° modo, con varianza di 0,5%, separa l'area costiera, influenzata principalmente dagli apporti fluviali dell'Isonzo e del Tagliamento e caratterizzata dalla zona lagunare di Grado, dalla porzione del bacino di acqua più profonda. Le due aree reagiscono in opposizione di fase seguendo comunque un andamento stagionale. Nel 3° modo risiede lo 0,1% della varianza totale e la linea dello "zero-crossing" divide l'area nord-orientale con il Golfo di Trieste dal resto del bacino, zone in cui gli effetti del vento si fanno sentire probabilmente in modo diverso. Il 4° (0,1% della varianza totale) divide il bacino in tre parti: l'area costiera con la laguna di Grado e la porzione meridionale variano in fase e nello stesso modo, mentre la zona centrale è fuori fase. L'evoluzione dell'ampiezza temporale risulta piuttosto complessa con numerose oscillazioni ad

alta frequenza che potrebbero essere relazionate alle portate dell'Isonzo e del Tagliamento. Sarà comunque necessario un approfondimento per poter interpretare in modo più chiaro le relazioni tra i modi ed i forzanti.

È stato sviluppato un processo automatico per rendere disponibili i dati grezzi e quelli interpolati di SST relativi al migliore passo satellitare della notte. Tali dati possono essere scaricati dal sito <ftp://ftp.inogs.it/SIRE/>. Le immagini giornaliere e quelle composite possono essere consultate visitando il sito web <http://poseidon.ogs.trieste.it/sire/satellite/adriane.html>.

Bibliografia

- Alvera-Azcarate, A., A. Barth, M. Rixen, e J. M. Beckers (2005). Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: Application to the Adriatic Sea surface temperature. *Ocean Modell.*, 9, 325-346.
- Beckers, J., e M. Rixen (2003). EOF calculation and data filling from incomplete oceanographic data sets. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20, 1839-1856.
- Kidder, Stanley Q., e Thomas H. Vonder Haar (1995). *Satellite Meteorology an introduction*, 466 pp., Accademic press.
- Mauri, E., P.-M. Poulain, e Z. Juznic-Zonta (2007). MODIS chlorophyll variabilità in the northern Adriatic Sea and relationship with forcing parameters. *J. Geophys. Res.*, 112, C03S11, doi:10.1029/2006JC003545.
- McClain, E. P., W. Pichel, e C. Walton (1985). Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 90, 11587-11601.
- Notarstefano, G., E. Mauri, e P.-M. Poulain (2003a). Trattamento dei dati AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) e produzione di immagini di SST (Sea Surface Temperature) con applicazione nel mare Adriatico. *Rapporto Tecnico*, 17/2003/OGA/09, OGS, Trieste, Italy, 9 pp.
- Notarstefano, G., E. Mauri, e P.-M. Poulain (2003b). Comparison analysis between bulk sea water temperature, as measured by drifters, and sea surface temperature derived by satellite measurements. *Rapporto Tecnico*, 22/2003/OGA/1, OGS, Trieste, Italy, 24 pp.
- Tomazic, I., M. Kuzmic, G. Notarstefano, E. Mauri and P.-M. Poulain (2005). Improving the AVHRR estimates of the Adriatic Sea surface temperature. *2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik, Croatia: 19-23 September 2005*, abstract.
- Wilks, D. (1995). *Statistical Methods in the Atmospheric Science*, 467 pp., Elsevier, New York.

Appendice

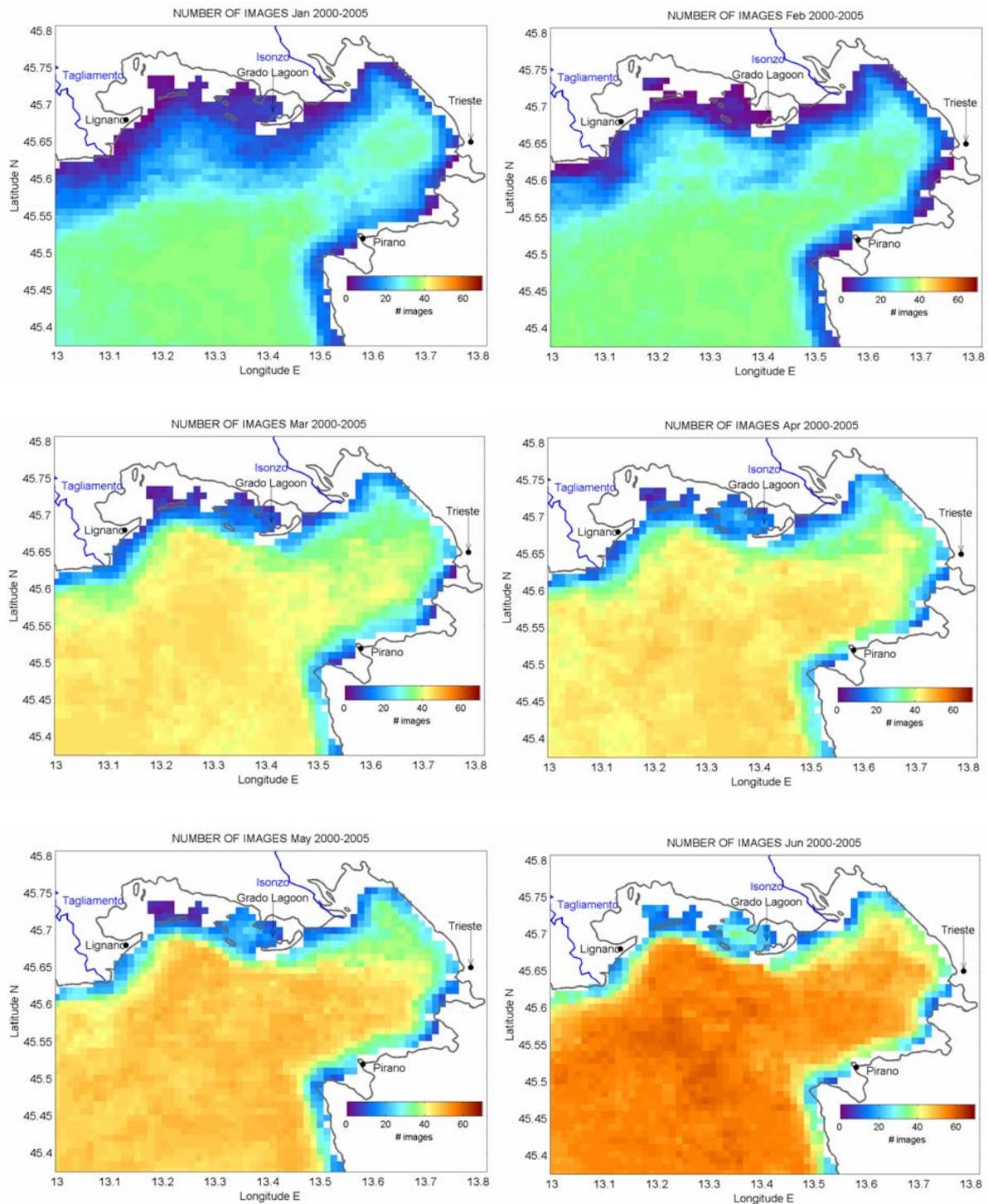


Figura 13. (Segue)

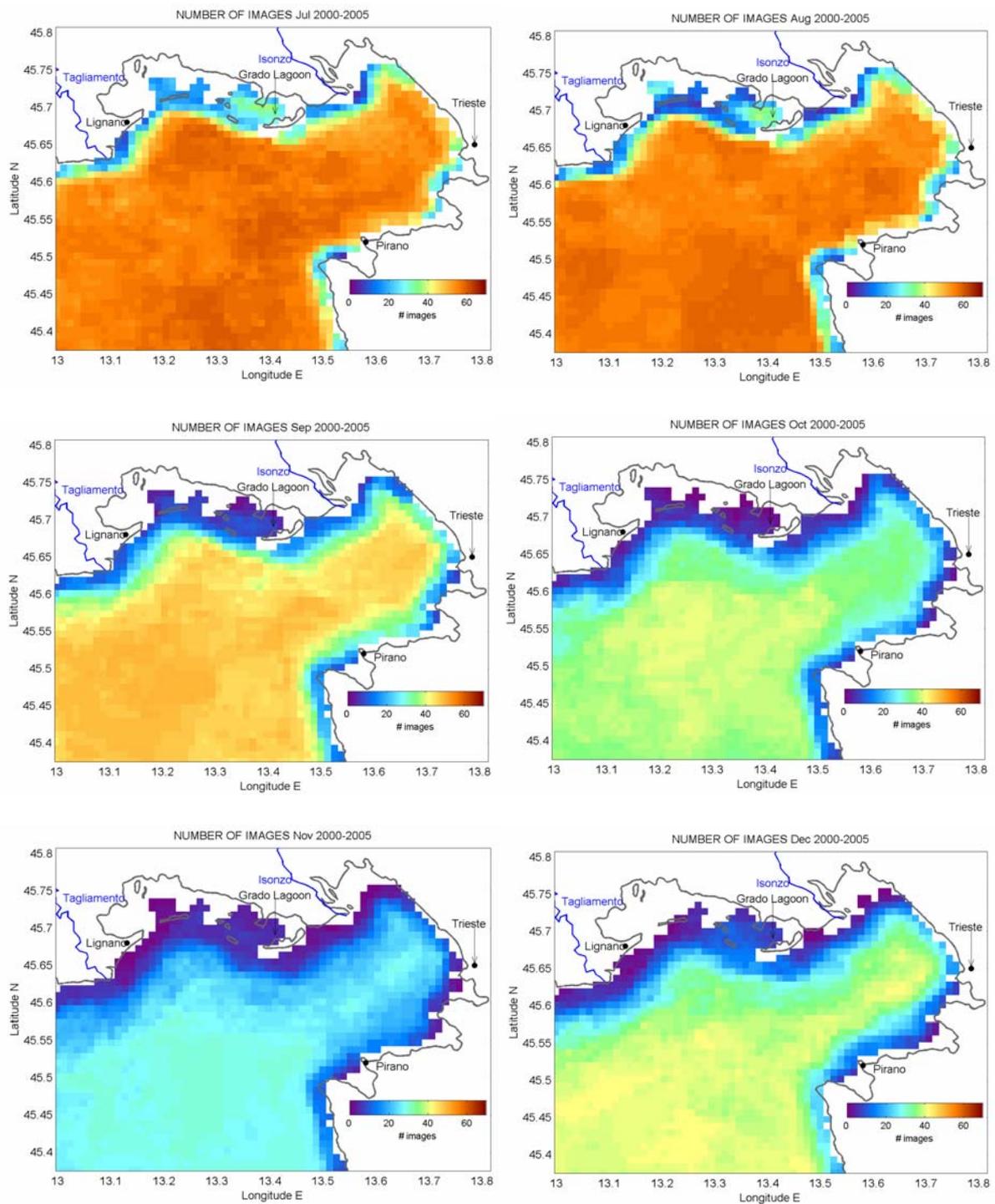


Figura 13. Immagini composite mensili del numero di pixel usati per calcolare le statistiche. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore di colore, indicante il numero di immagini, è uguale per ciascun mese.

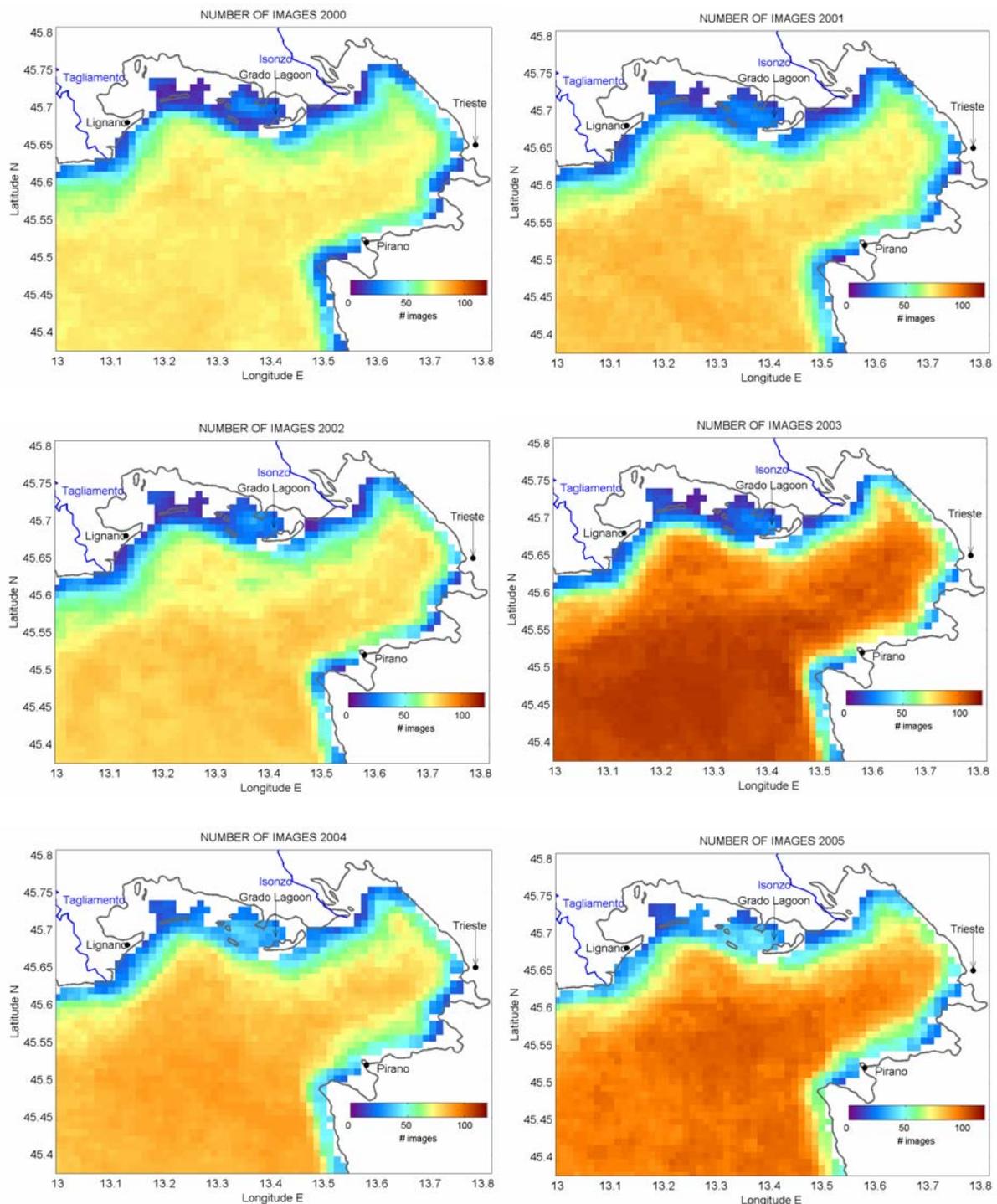


Figura 14. Immagini composite annuali del numero di pixel usati per calcolare le statistiche. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore di colore, indicante il numero di immagini, è uguale per ciascun mese.

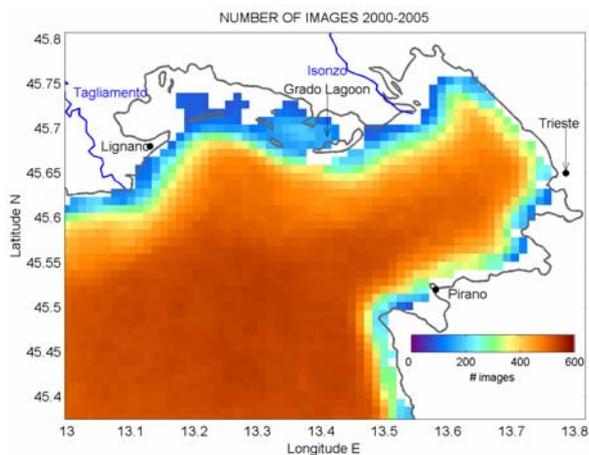


Figura 15. immagine composta di 6 anni (2000-2005) del numero di pixel usati per calcolare le statistiche. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi.

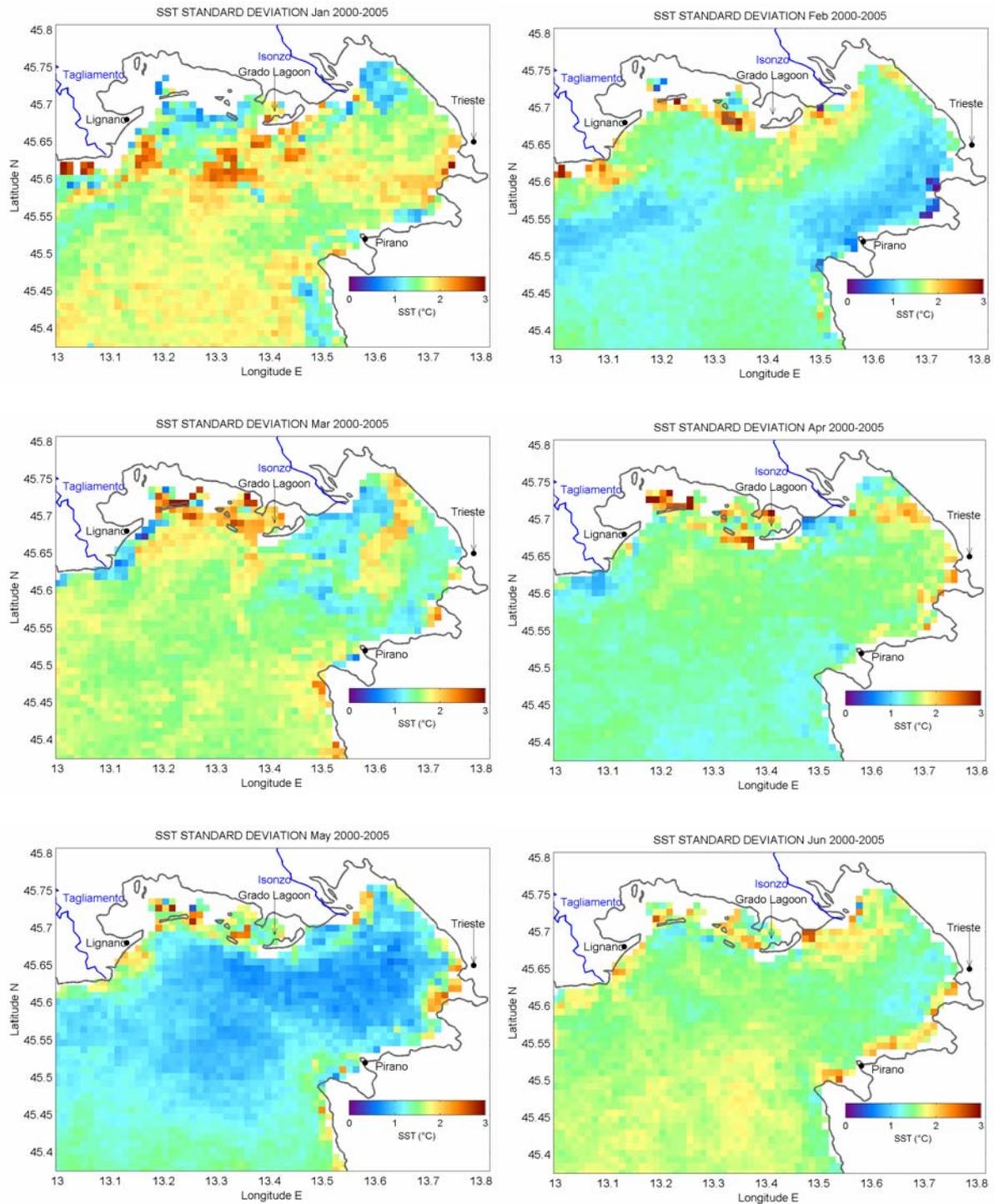


Figura 16. (Segue)

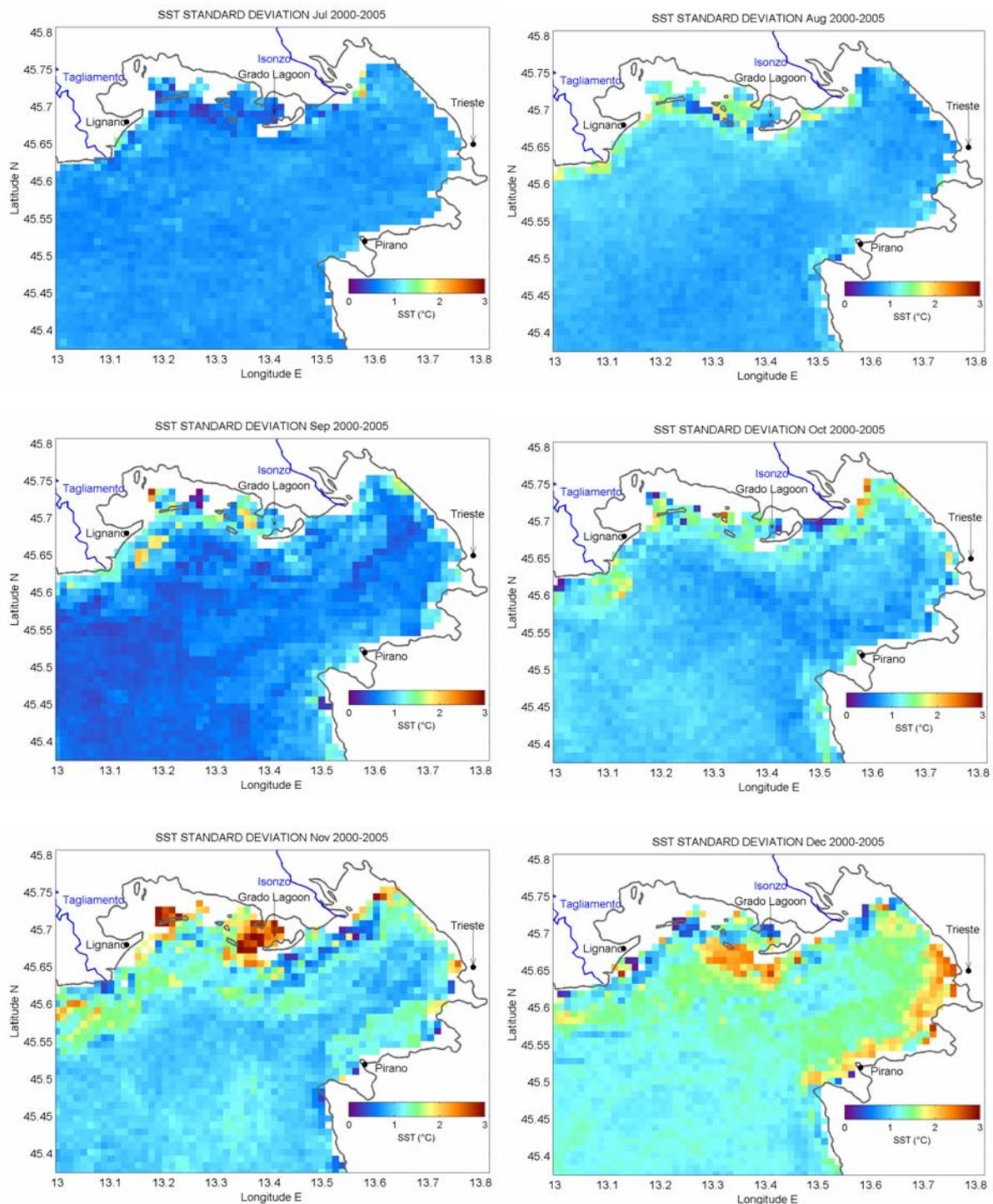


Figura 16. Immagini composite mensili della deviazione standard di SST. Le mappe sono state ottenute calcolando la deviazione standard delle medie mensili di SST. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore della SST è in gradi centigradi ed è uguale per ciascun anno.

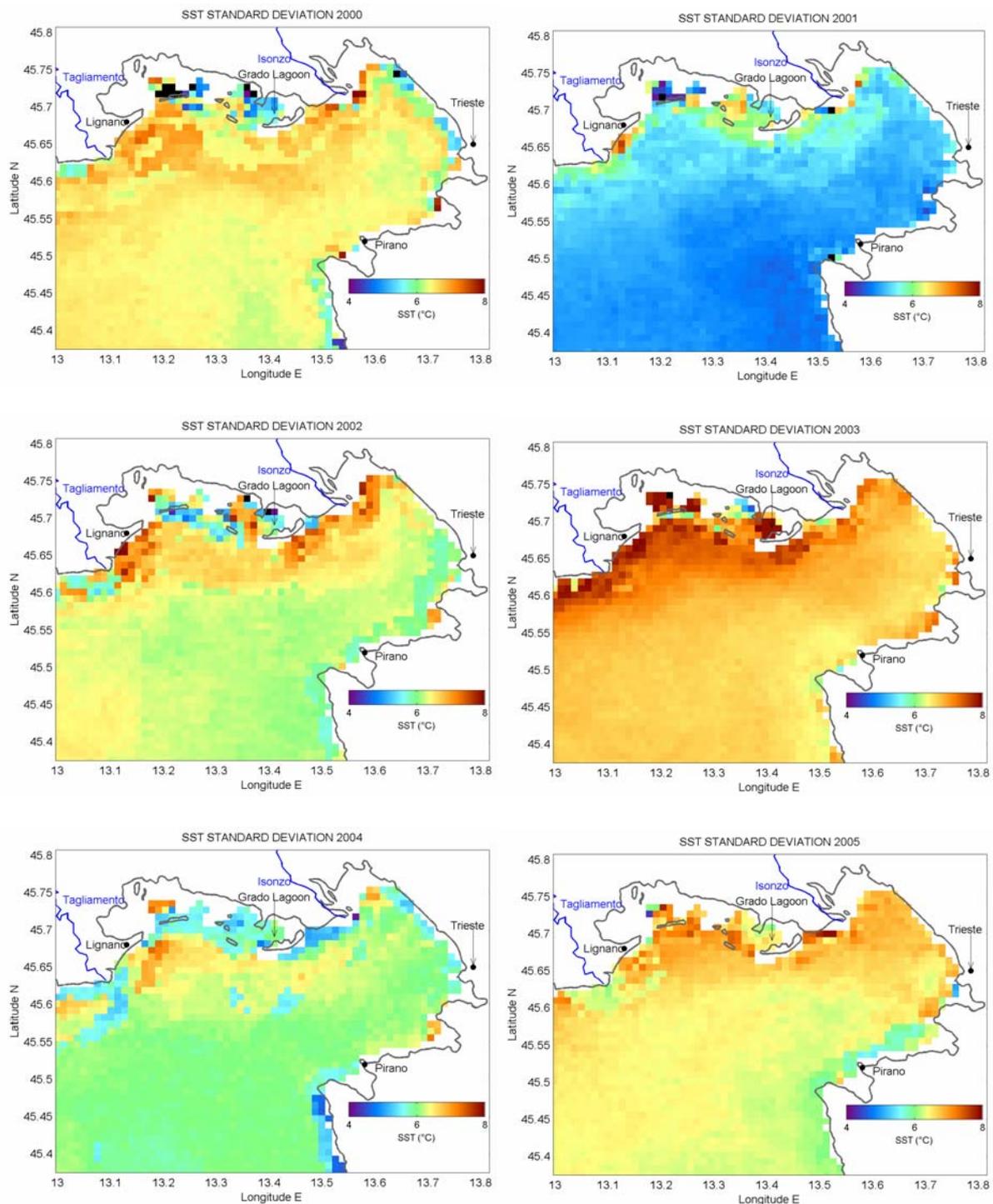


Figura 17. Immagini composite annuali della deviazione standard di SST. Le mappe sono state ottenute calcolando la deviazione standard delle medie mensili di SST. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore di colore della SST è in gradi centigradi ed è uguale per ciascun anno.

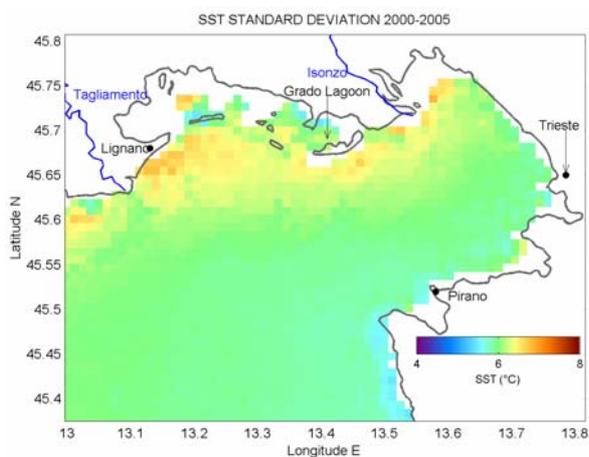


Figura 18. Immagine composita di 6 anni della deviazione standard di SST. La mappa è stata ottenuta calcolando la deviazione standard delle medie mensili di SST. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi.

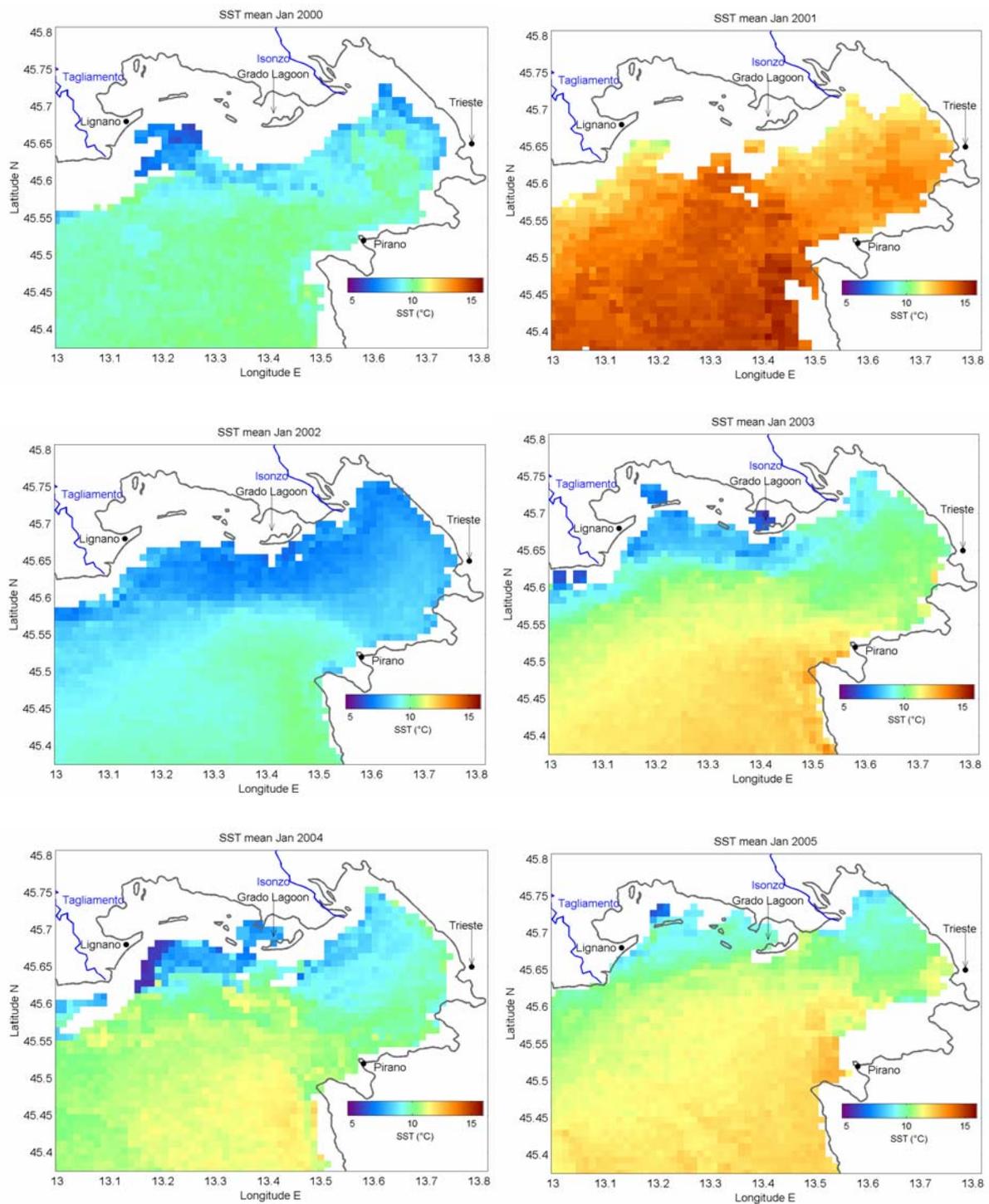


Figura 19. Immagini della media mensile di SST per gennaio (anni 2000-2005). Le mappe sono state ottenute calcolando la media mensile da dati non interpolati. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore della SST è in gradi centigradi ed è mantenuta costante per ciascun mese.

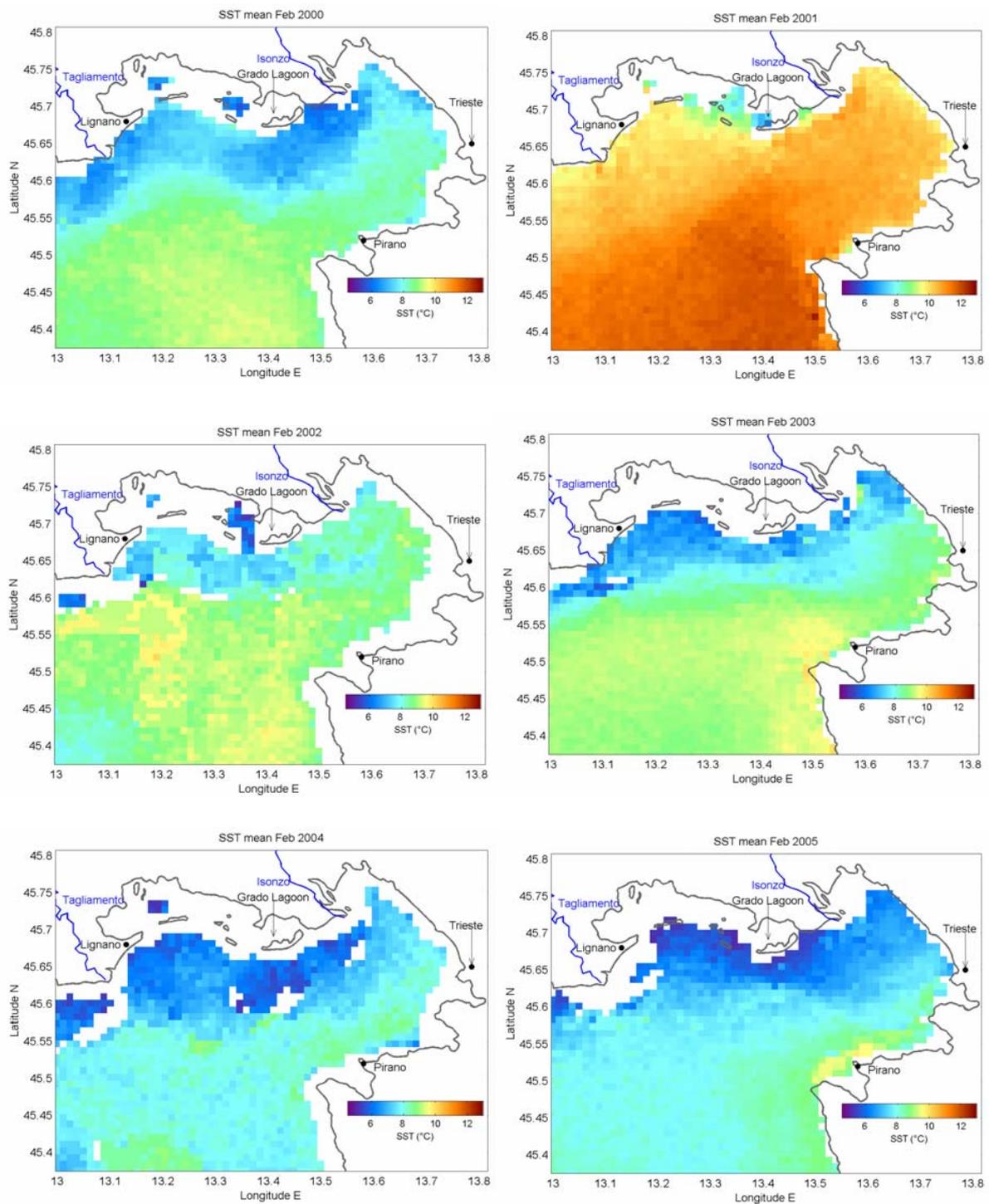


Figura 20. Come la figura 19 ma per febbraio.

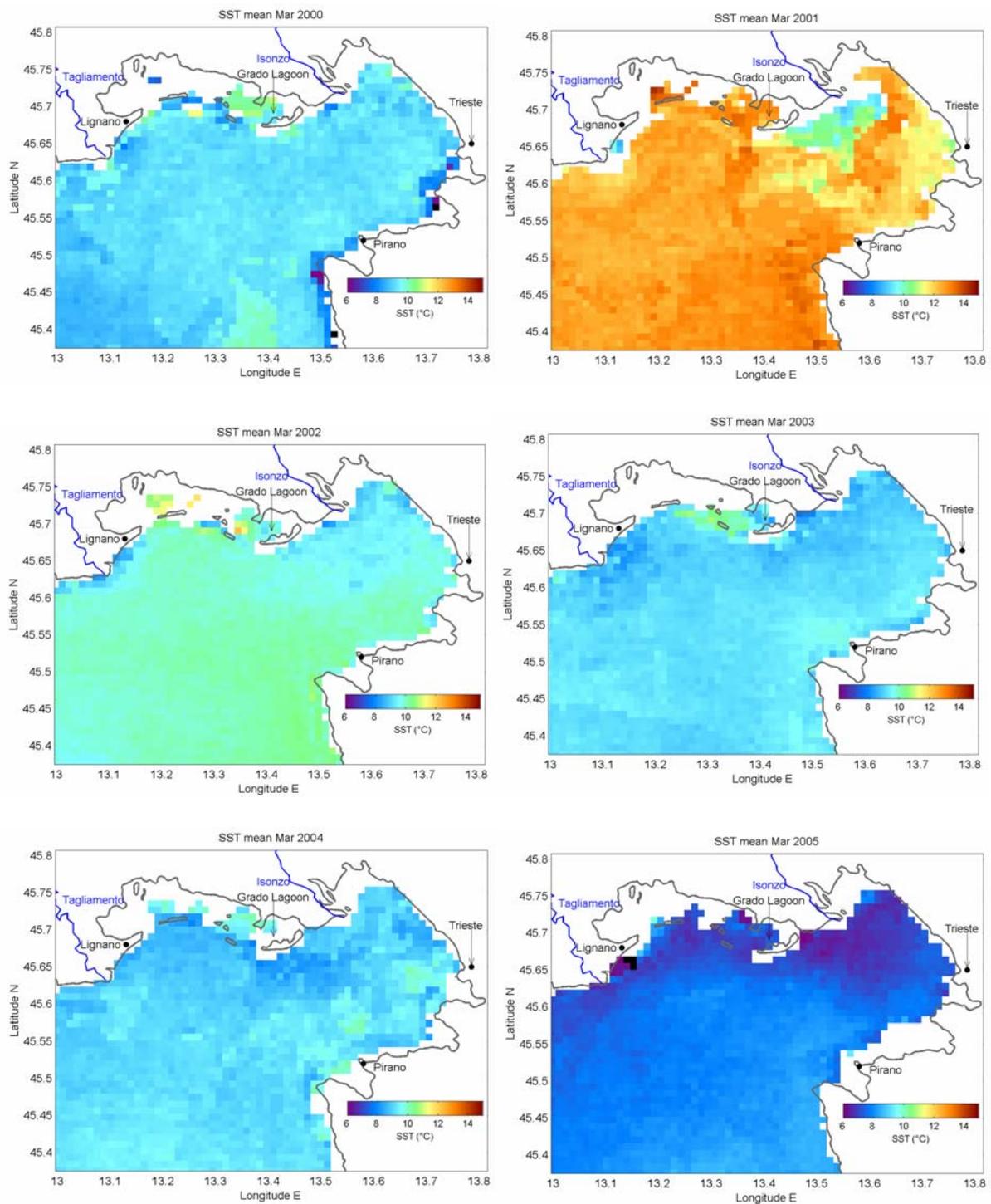


Figura 21. Come la figura 19 ma per marzo.

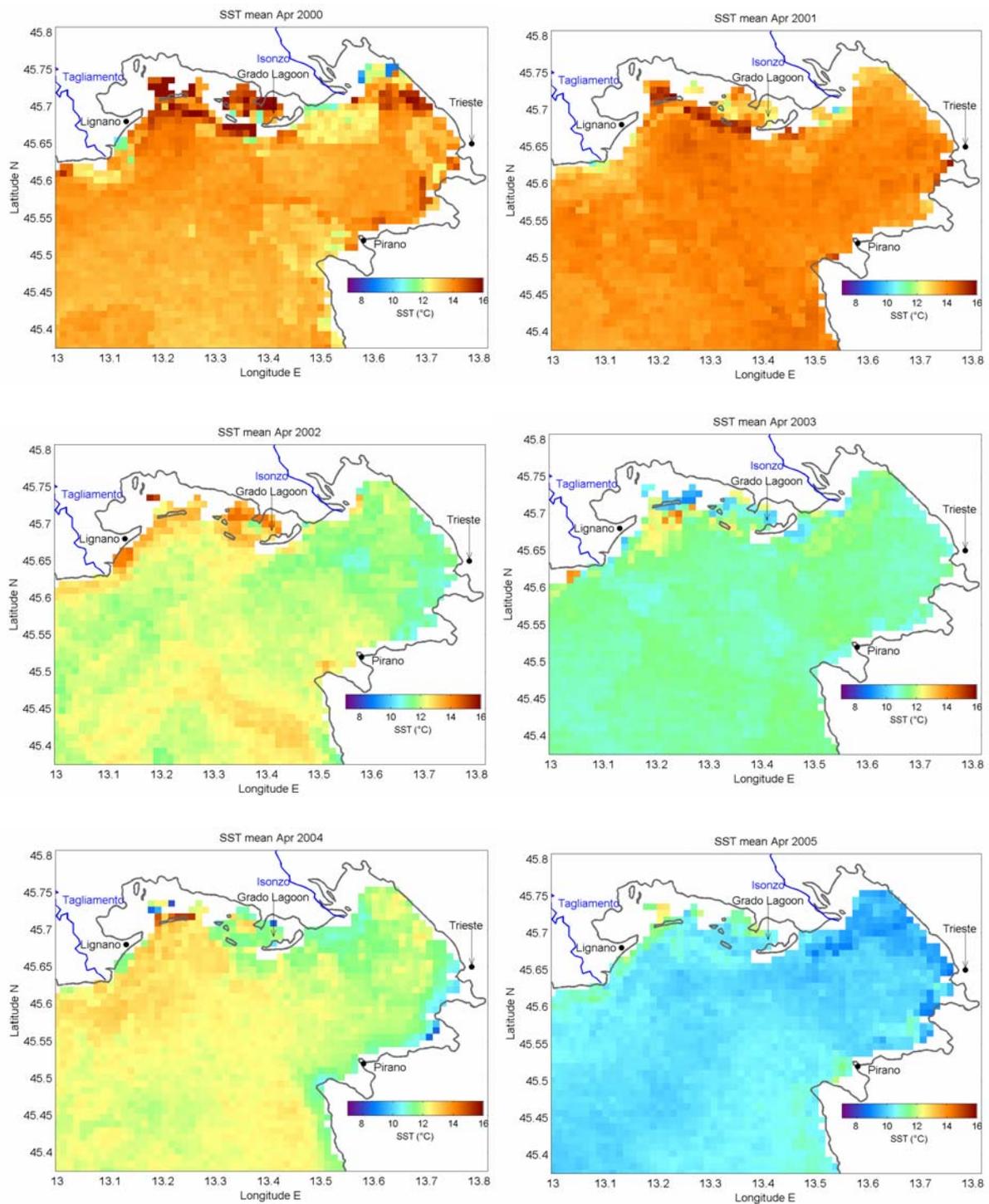


Figura 22. Come la figura 19 ma per aprile.

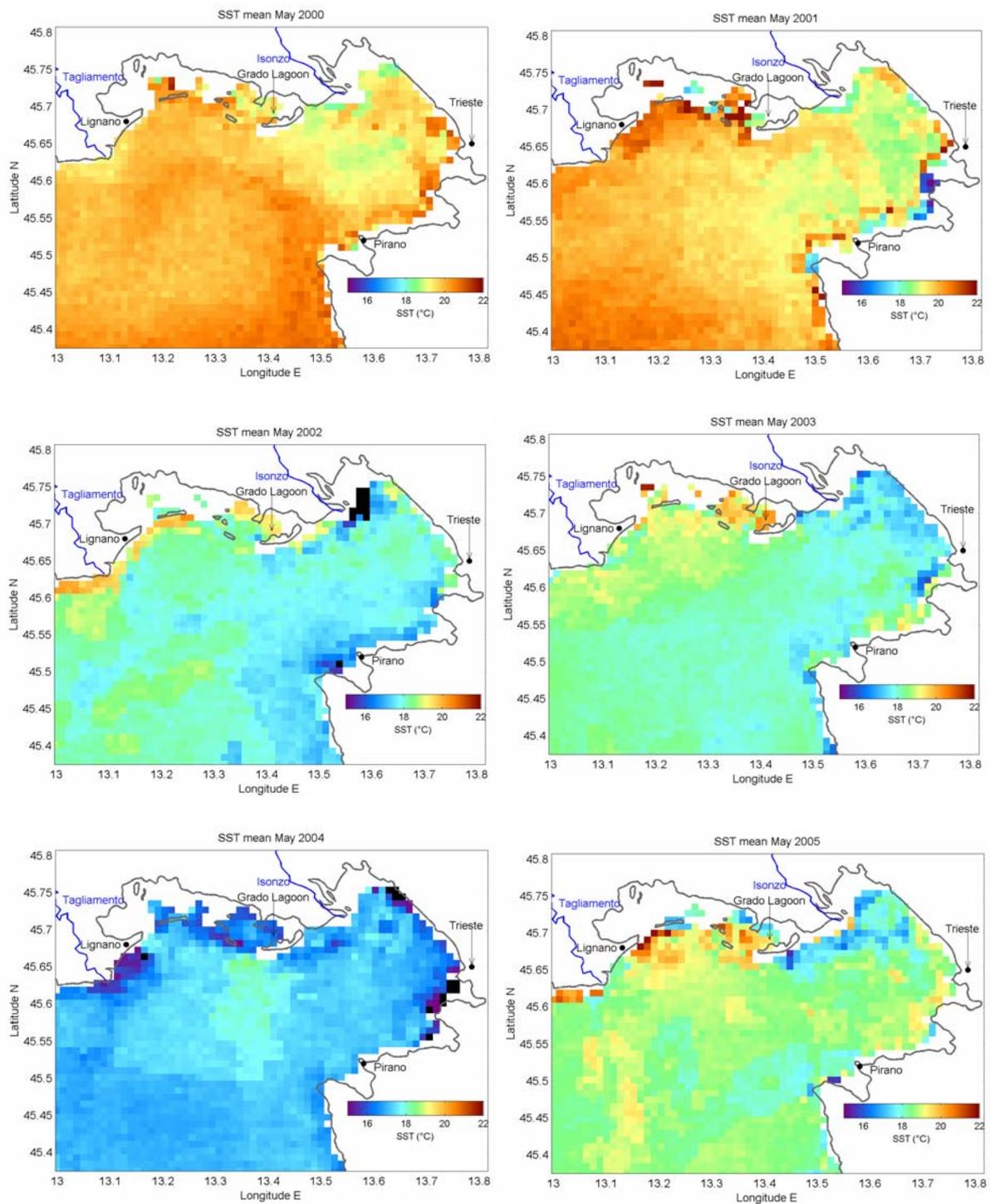


Figura 23. Come la figura 19 ma per maggio.

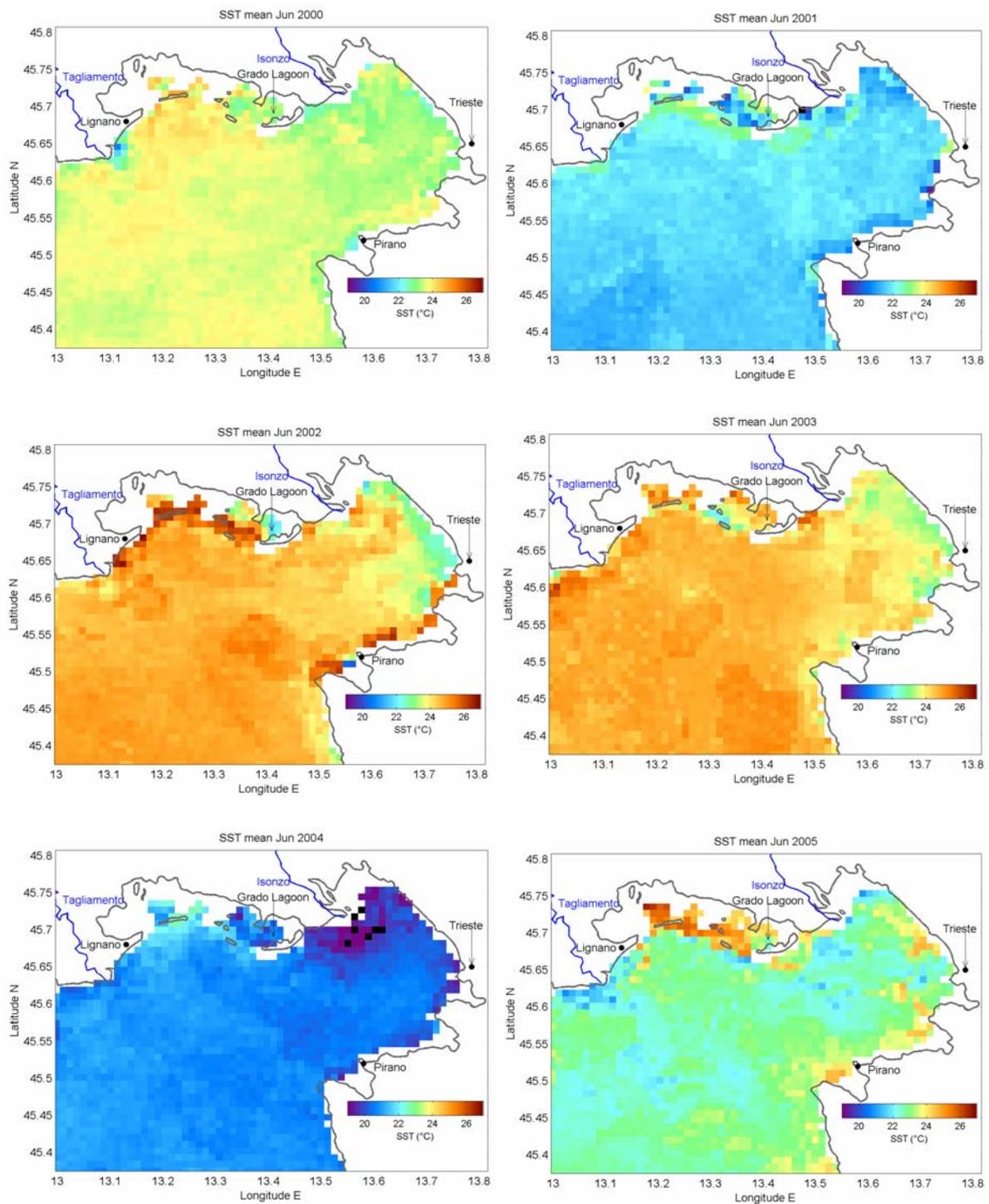


Figura 24. Come la figura 19 ma per giugno.

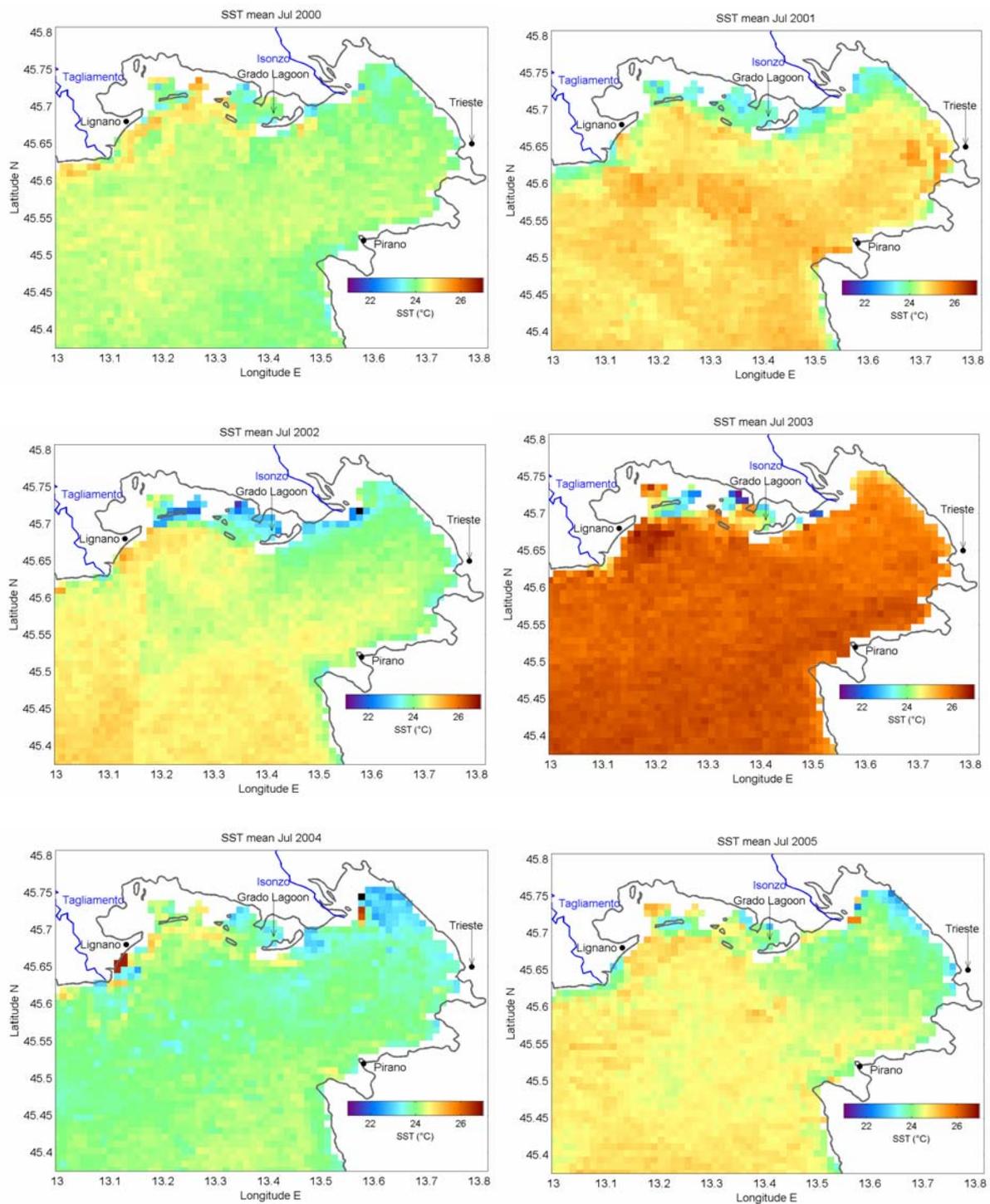


Figura 25. Come la figura 19 ma per luglio.

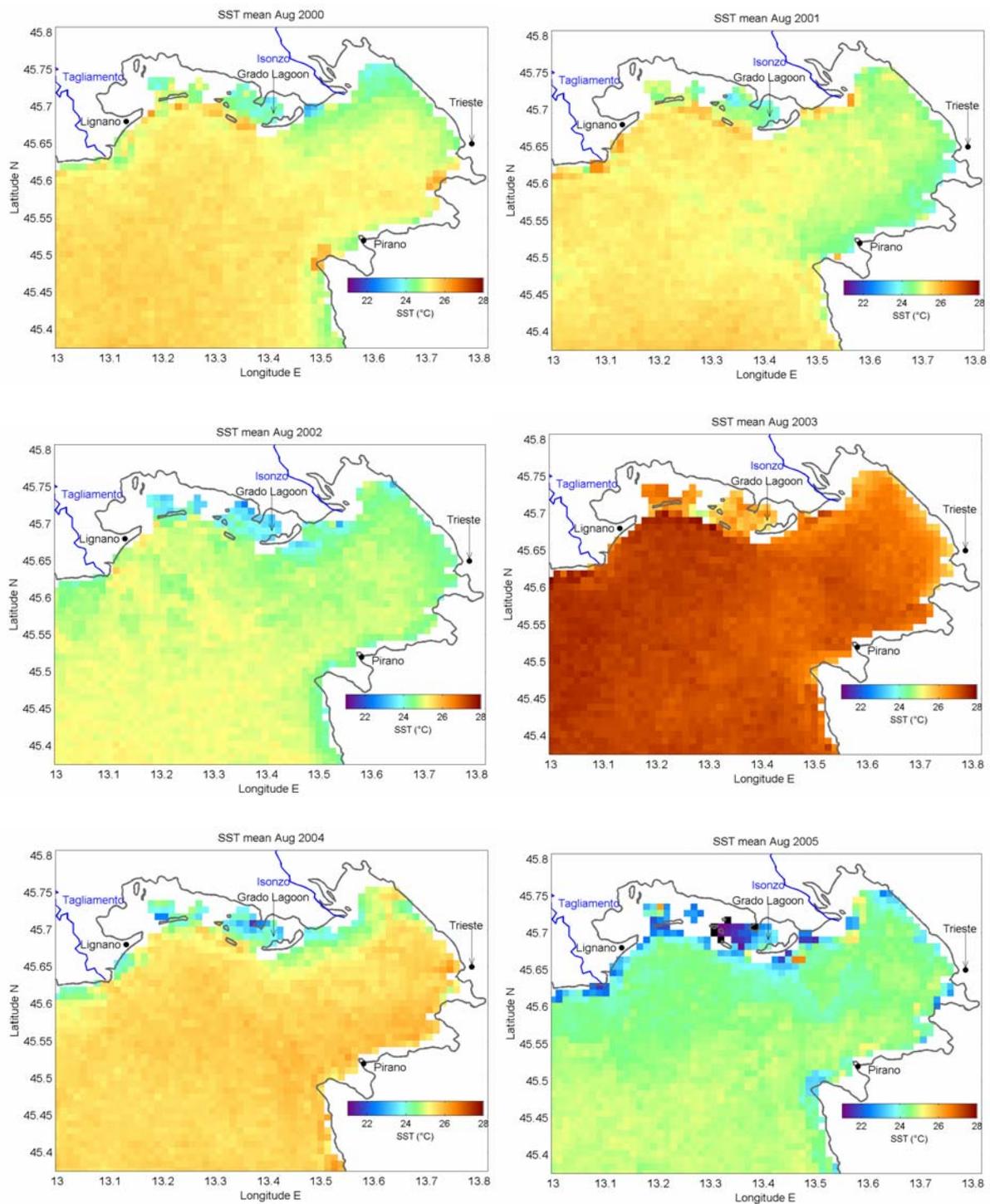


Figura 26. Come la figura 19 ma per agosto.

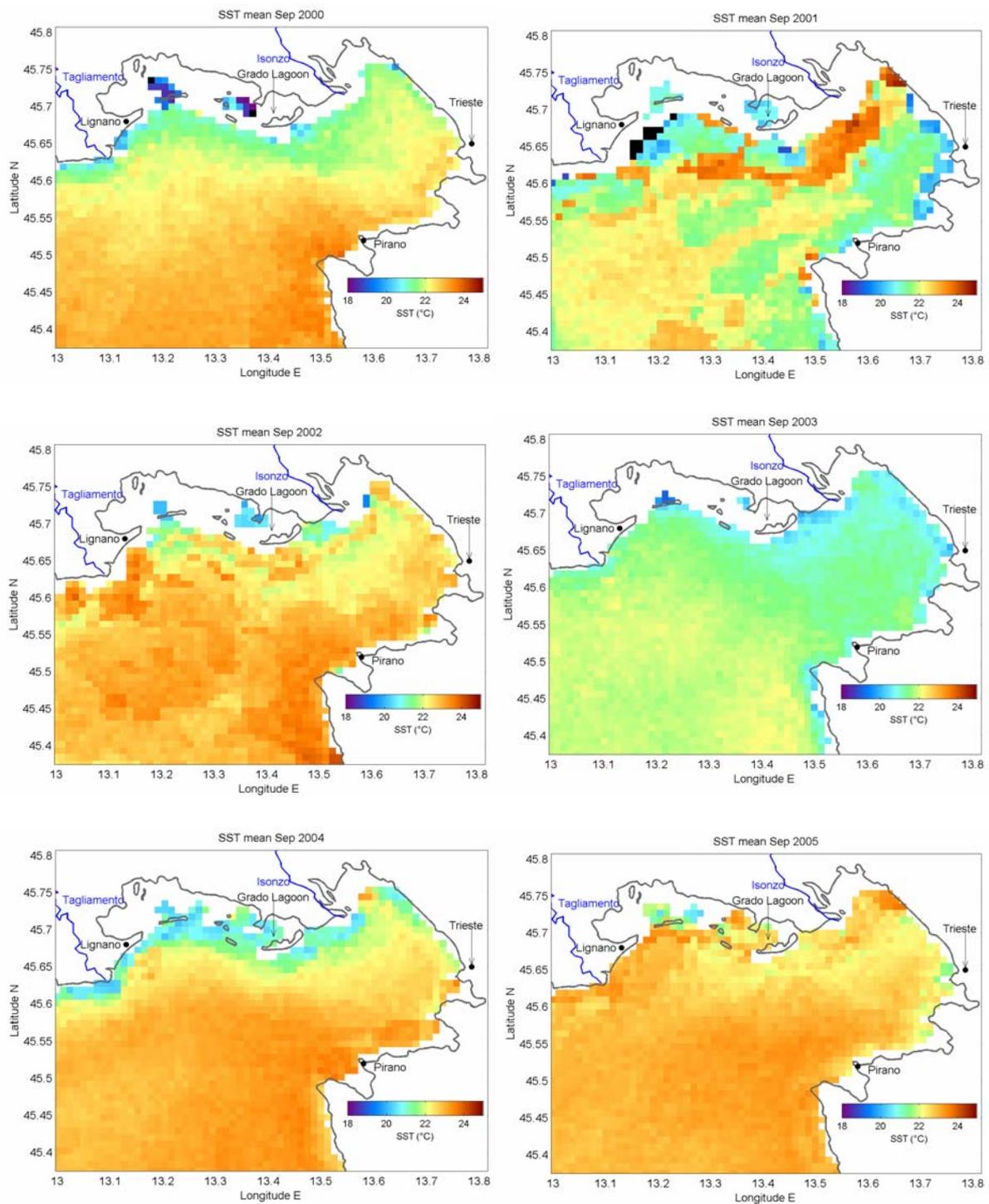


Figura 27. Come la figura 19 ma per settembre.

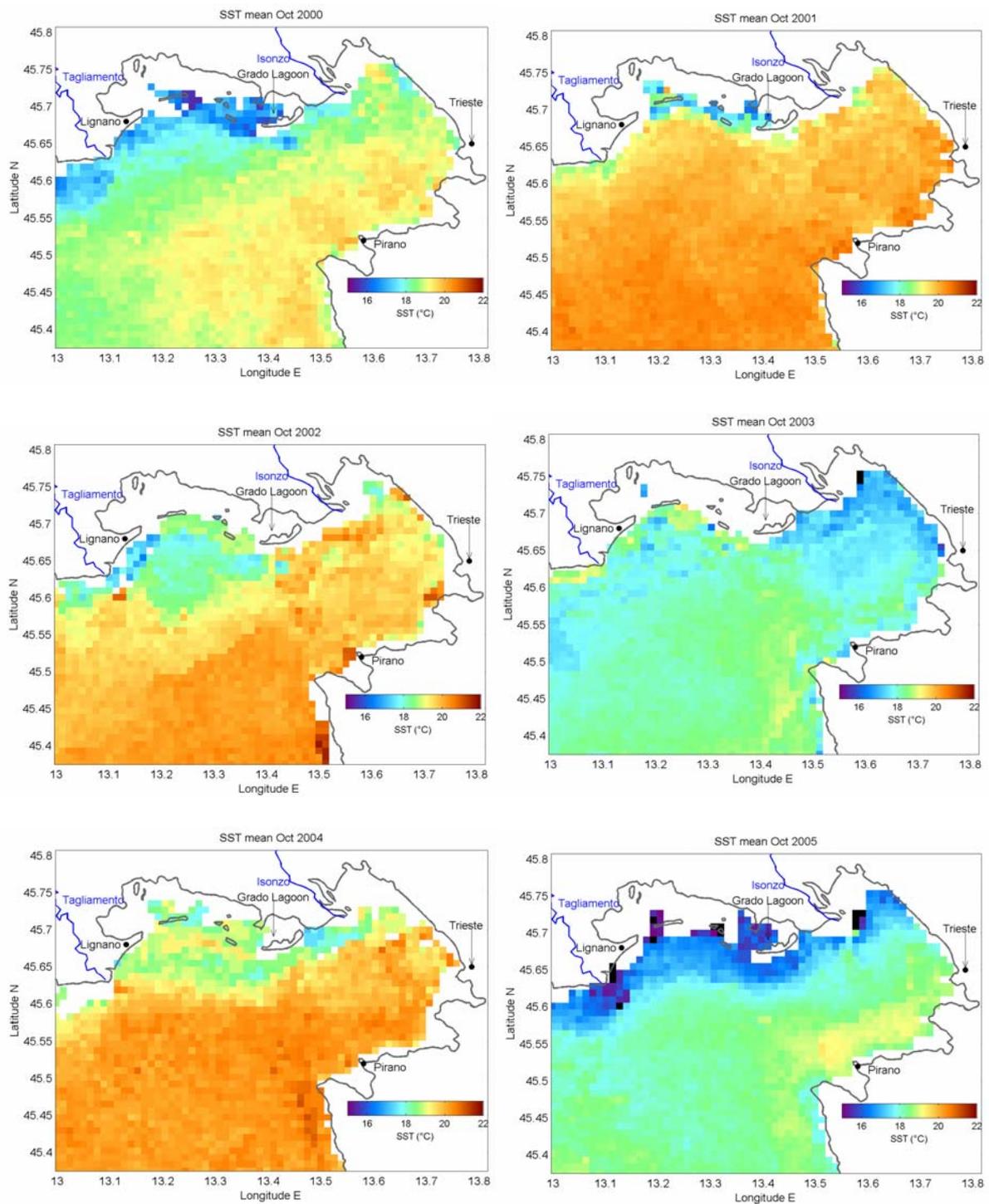


Figura 28. Come la figura 19 ma per ottobre.

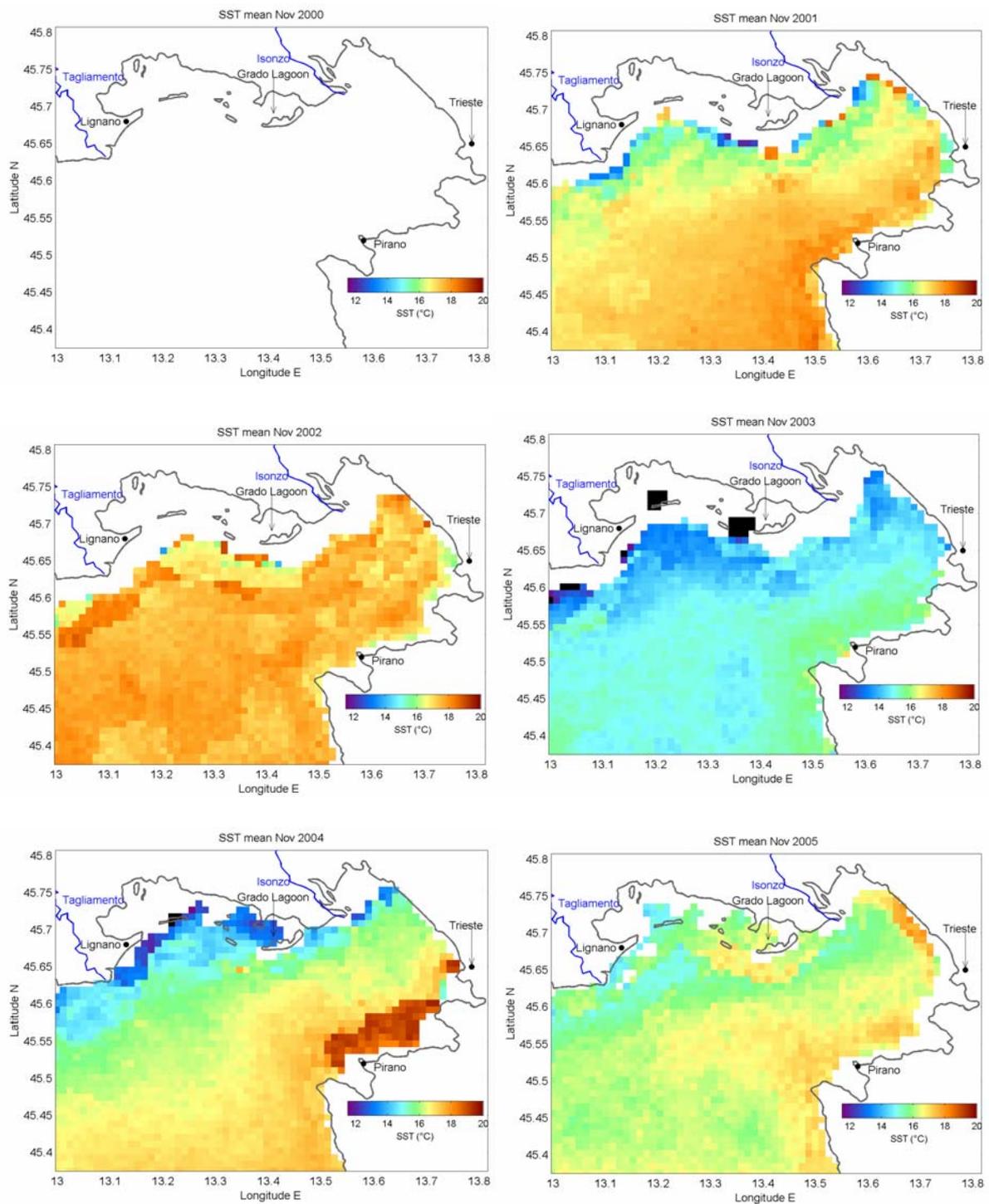


Figura 29. Come la figura 19 ma per novembre.

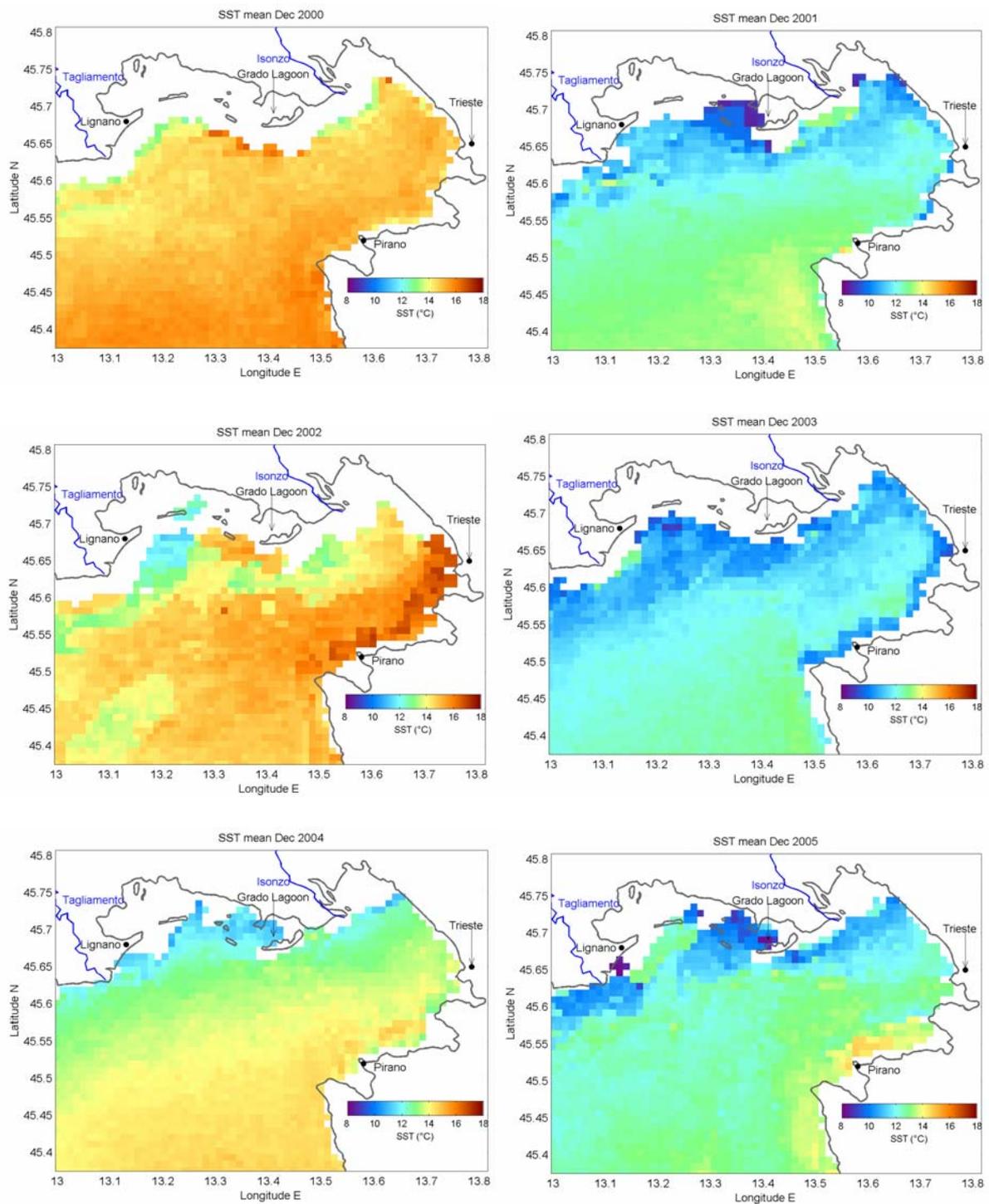


Figura 30. Come la figura 19 ma per dicembre.

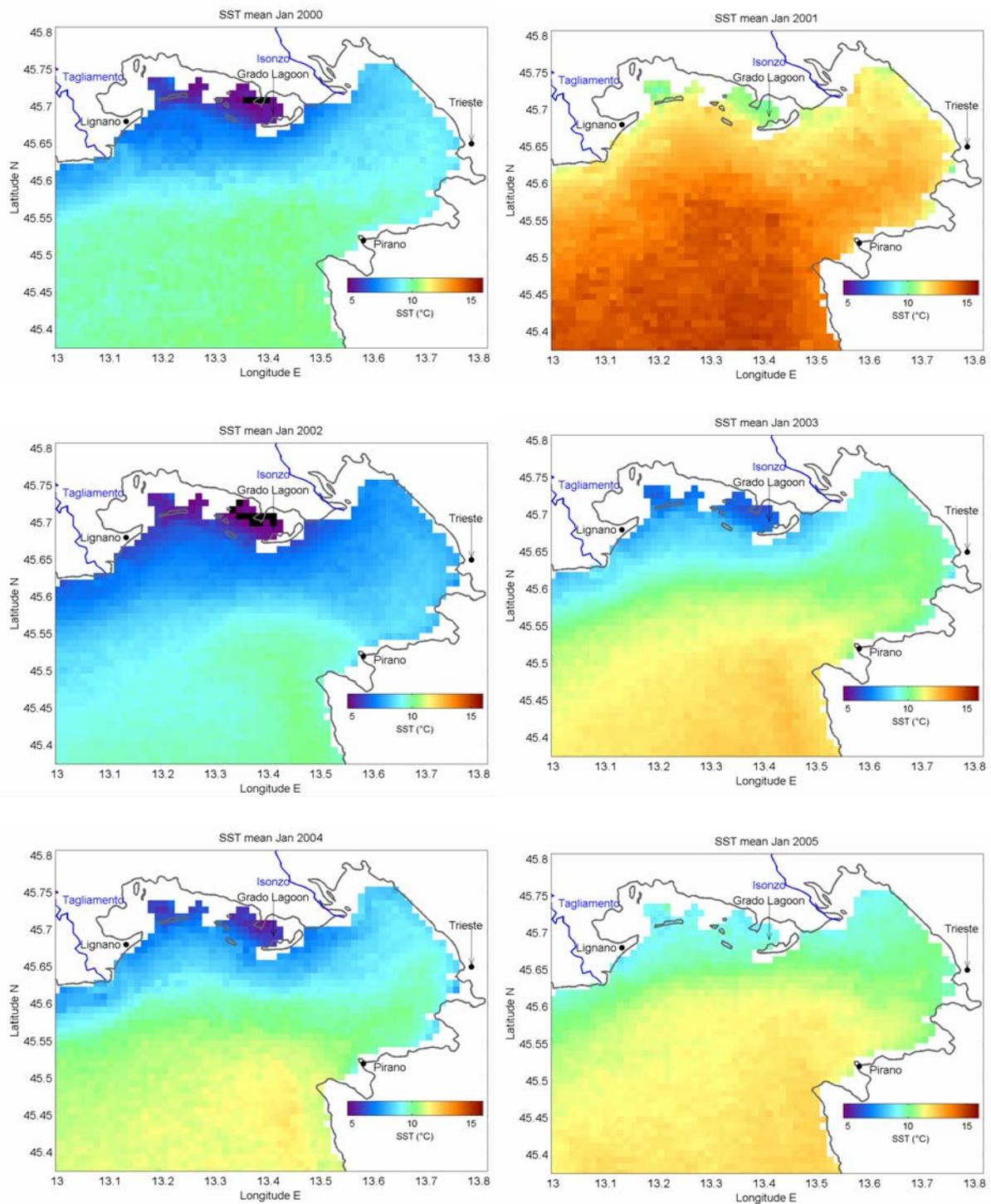


Figura 31. Immagini della media mensile di SST per gennaio (anni 2000-2005). Le mappe sono state ottenute calcolando la media mensile da dati interpolati. In blu sono rappresentati i due fiumi principali (Isonzo e Tagliamento) che sfociano nel bacino e in nero sono indicate le città ed i luoghi. La scala di colore della SST è in gradi centigradi ed è mantenuta costante per ciascun mese.

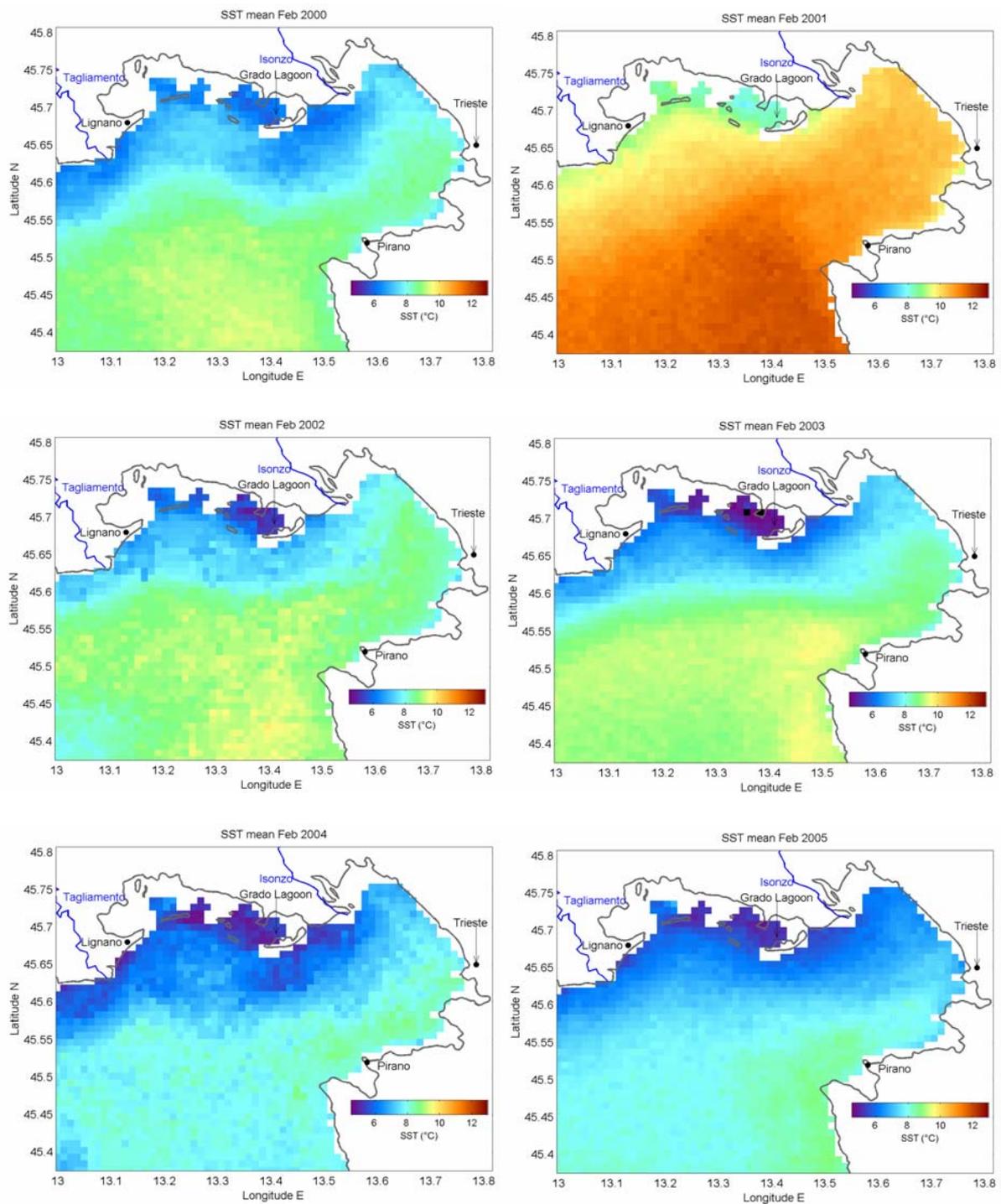


Figura 32. Come la figura 31 ma per febbraio.

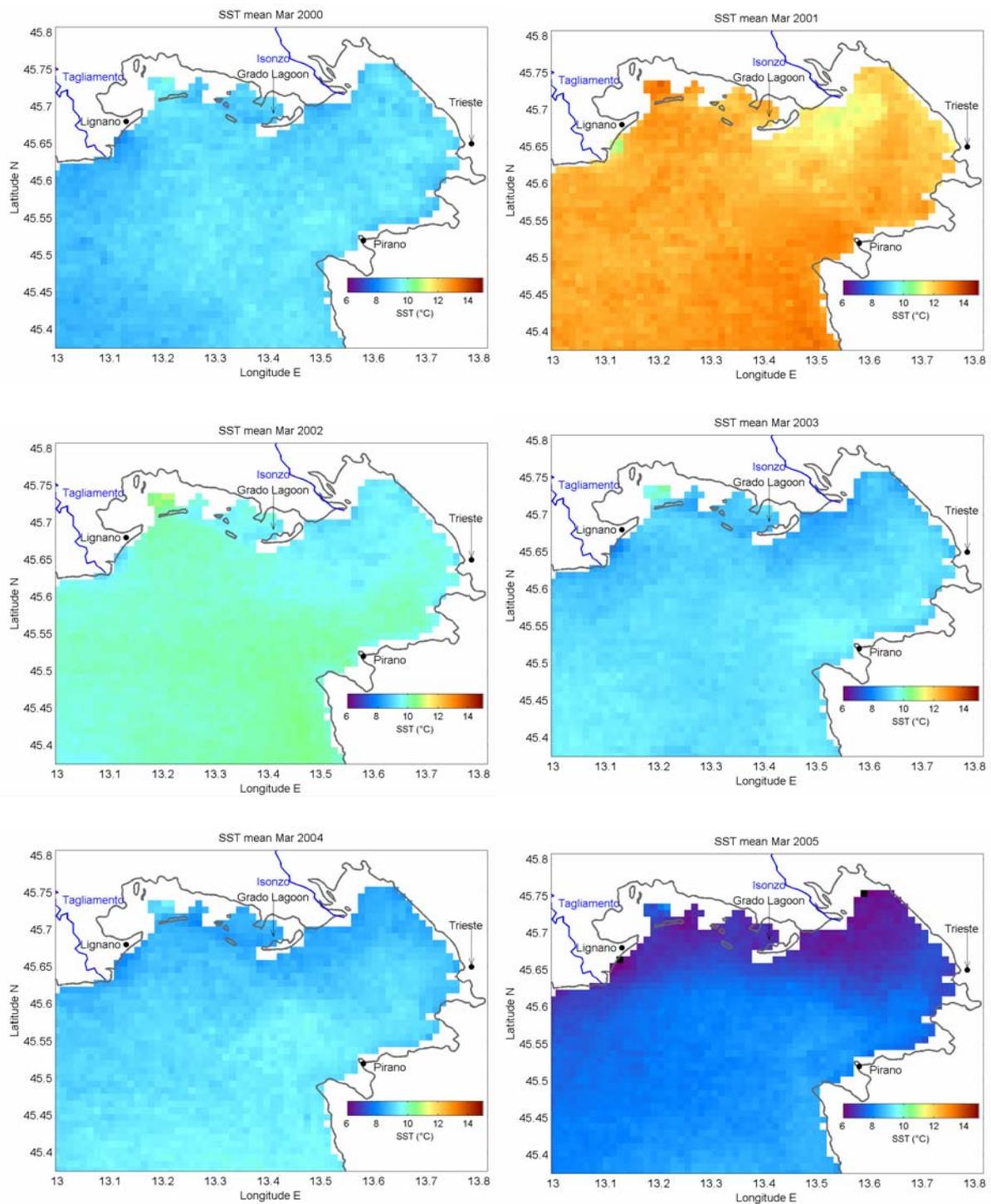


Figura 33. Come la figura 19 ma per marzo.

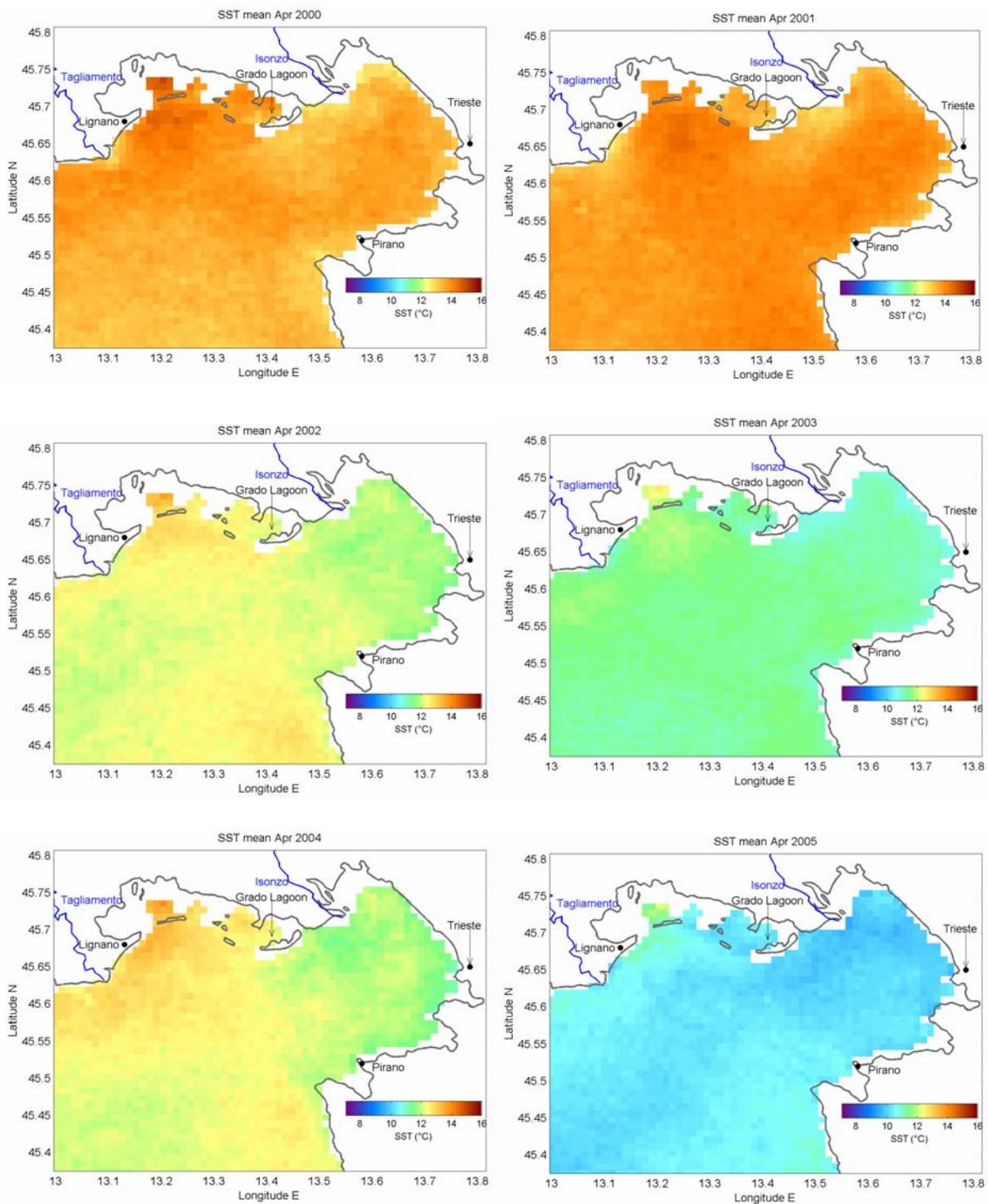


Figura 34. Come la figura 19 ma per aprile.

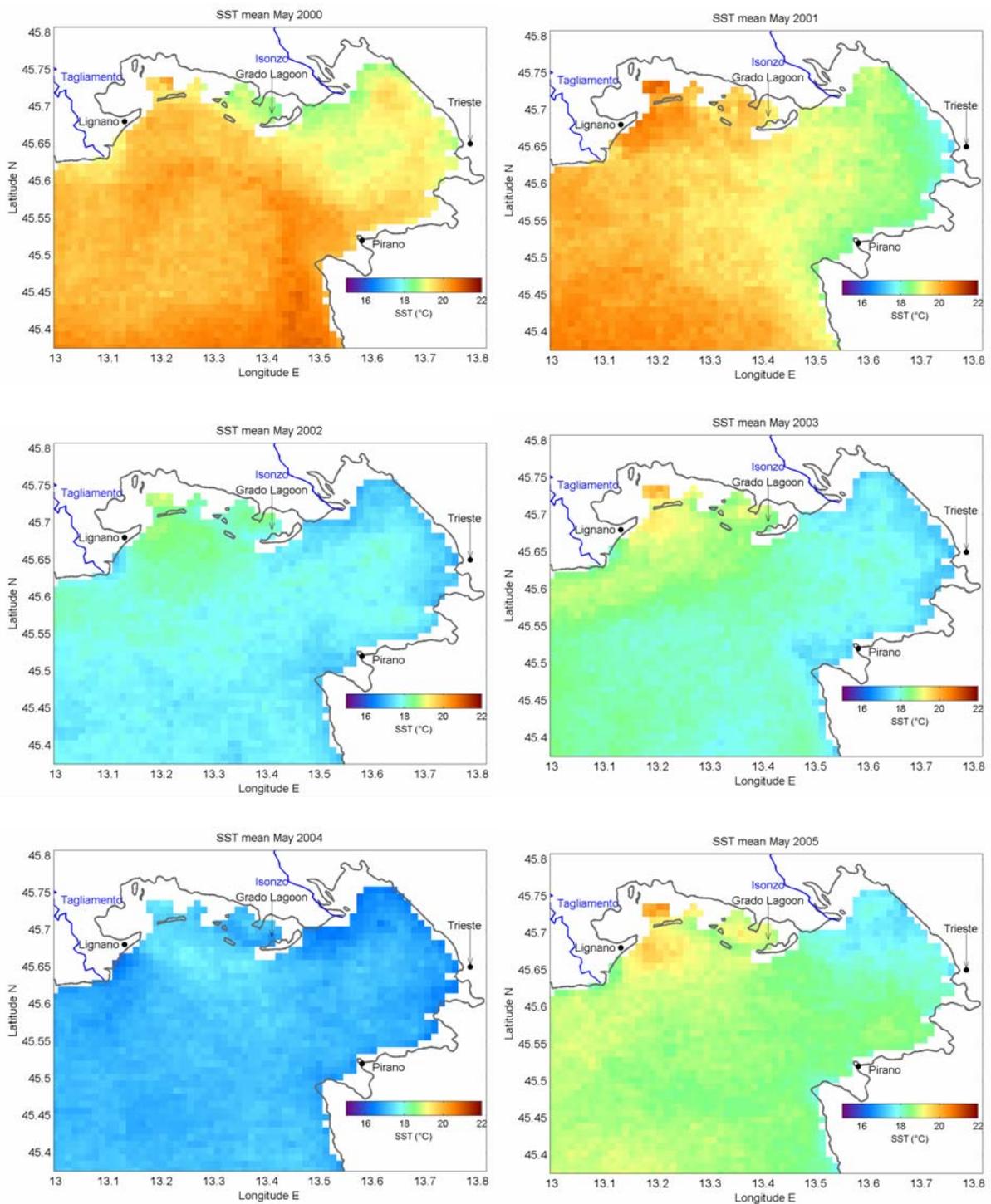


Figura 35. Come la figura 19 ma per maggio.

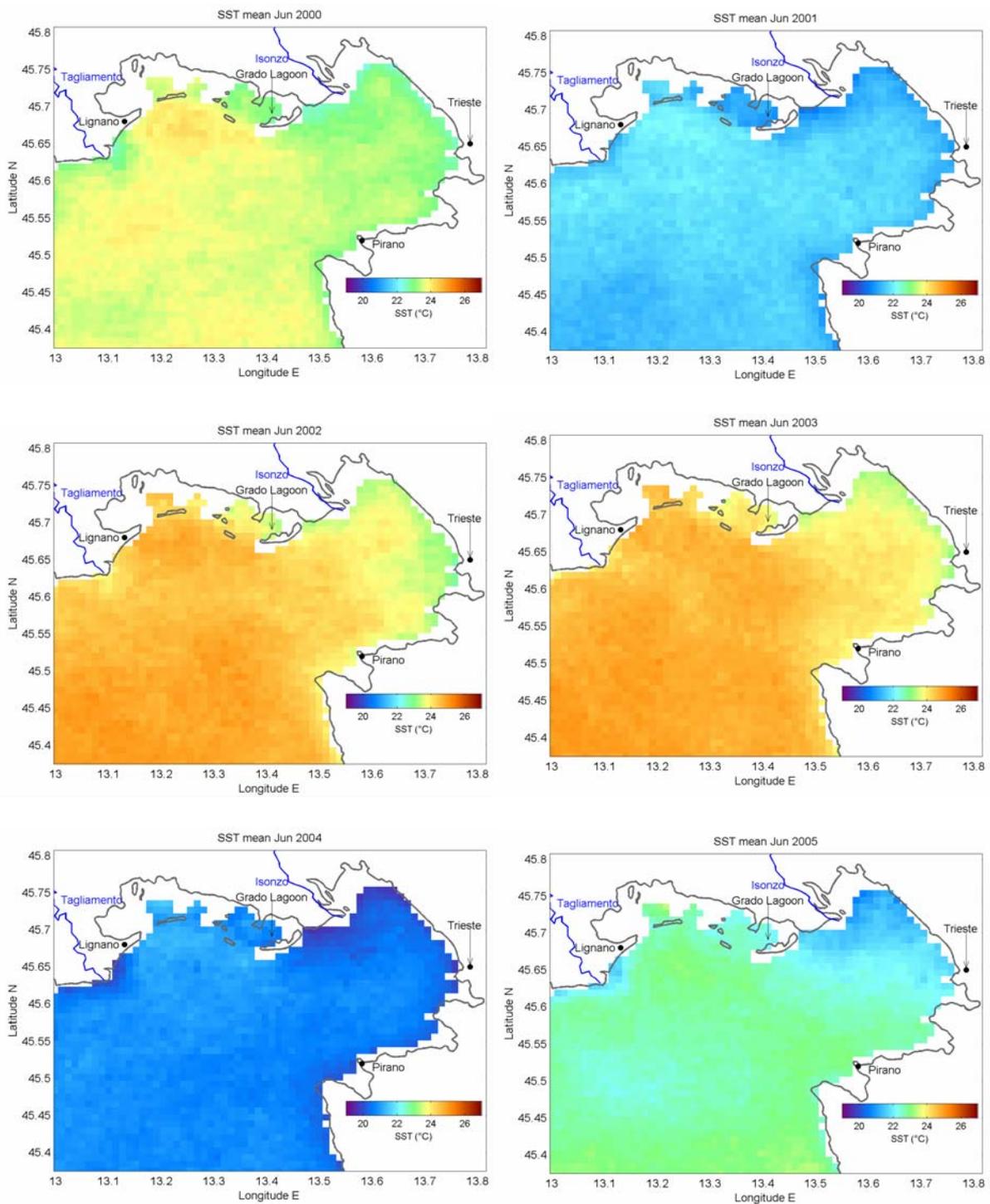


Figura 36. Come la figura 19 ma per giugno.

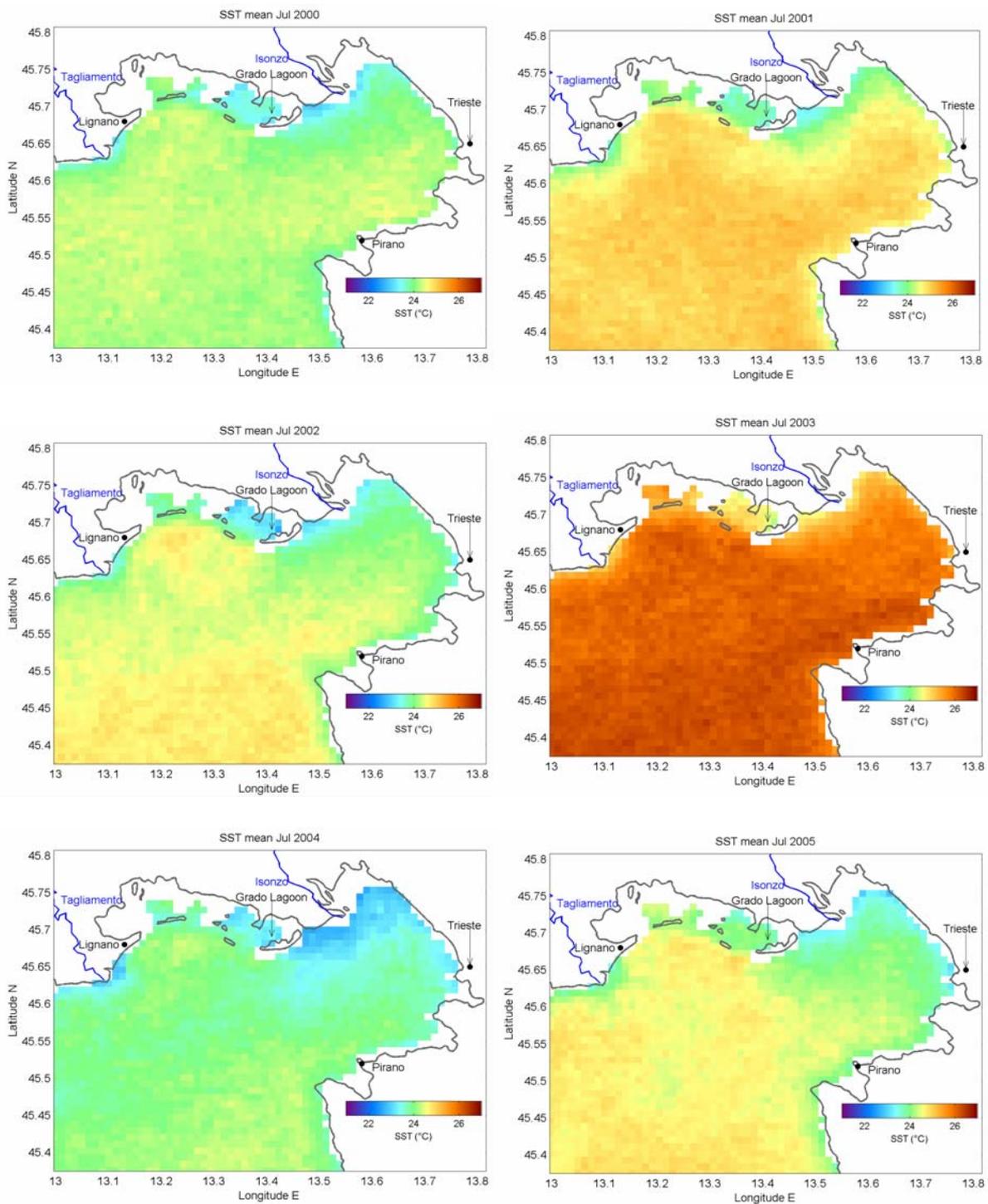


Figura 37. Come la figura 19 ma per luglio.

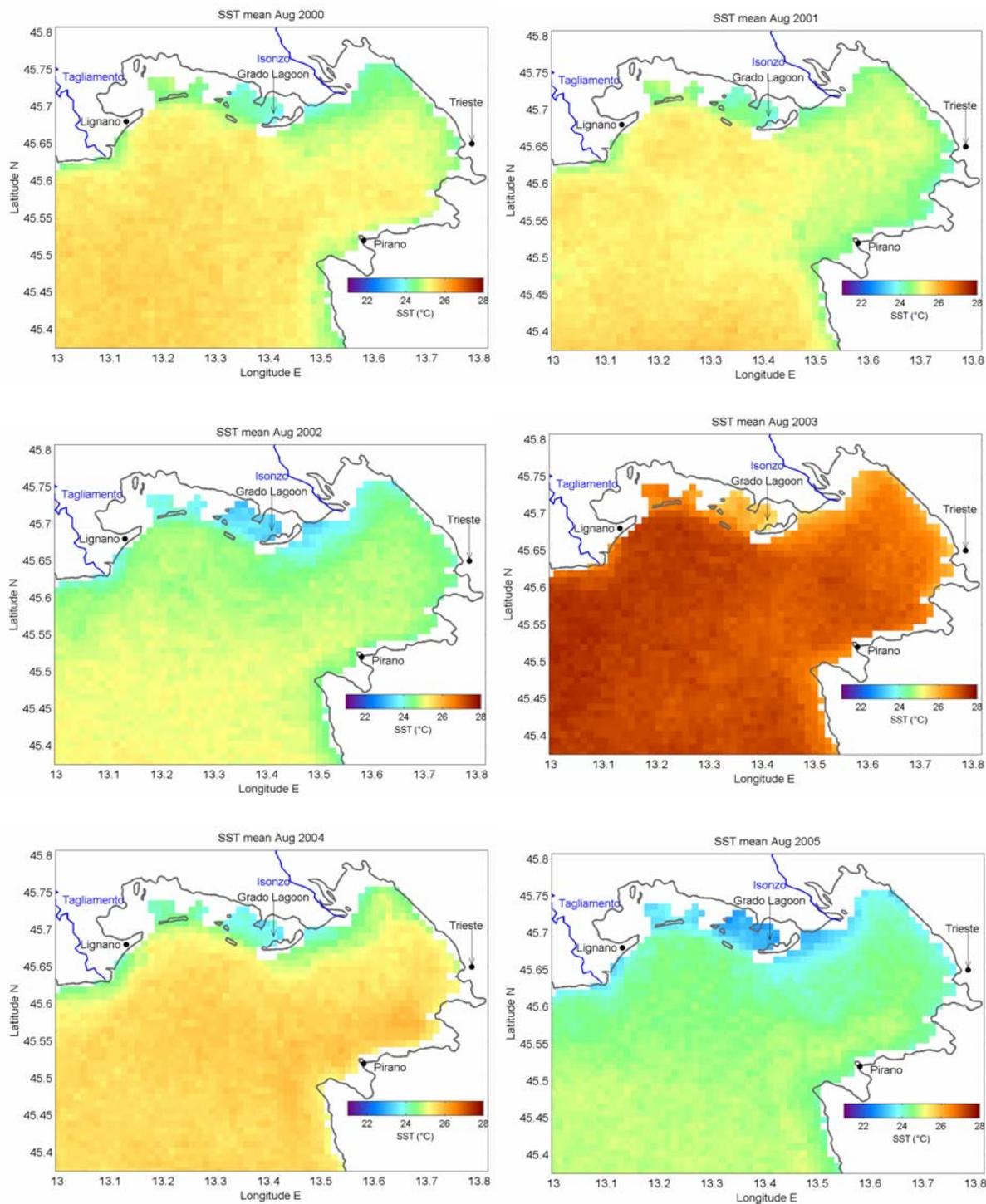


Figura 38. Come la figura 19 ma per agosto.

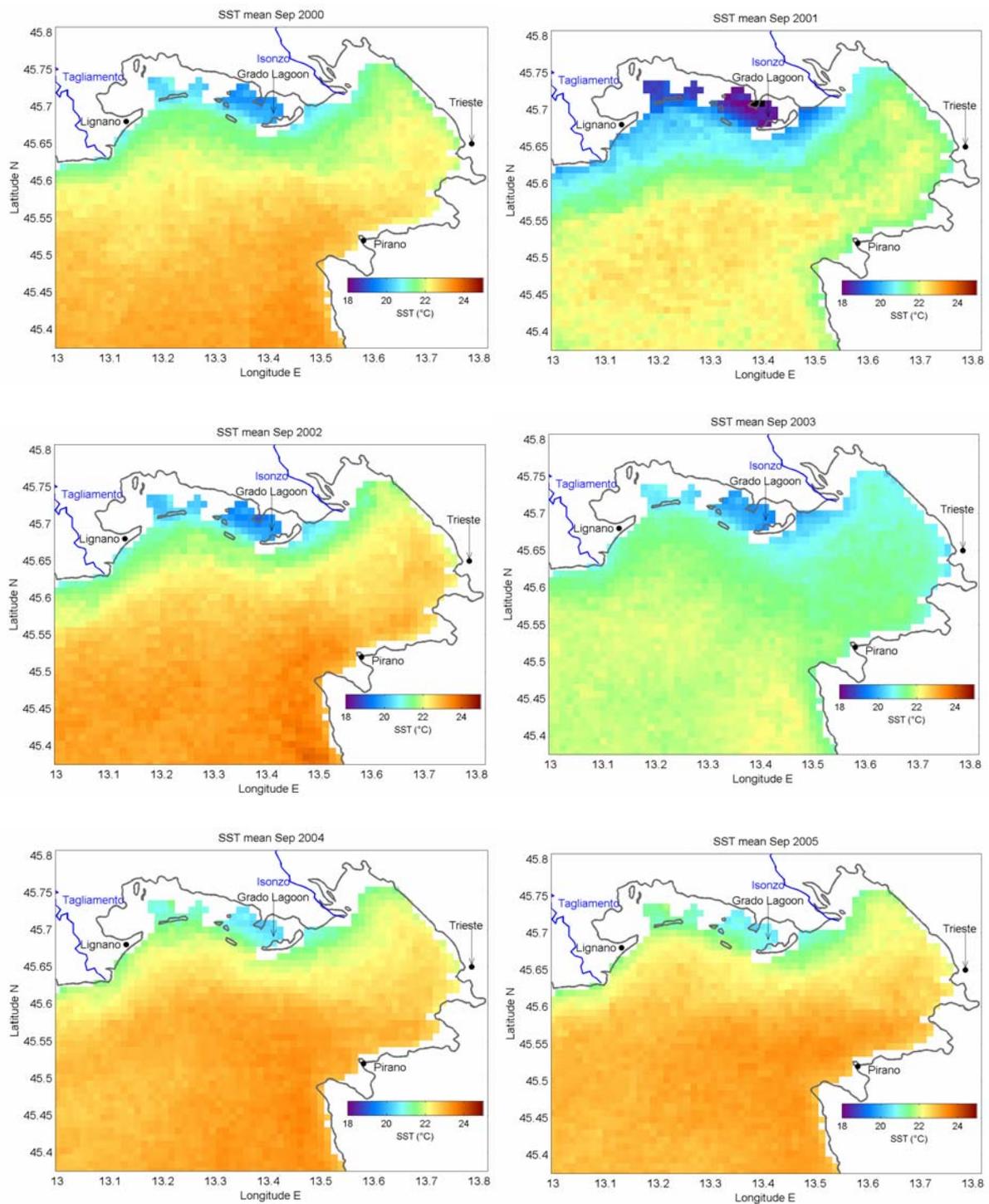


Figura 39. Come la figura 19 ma per settembre.

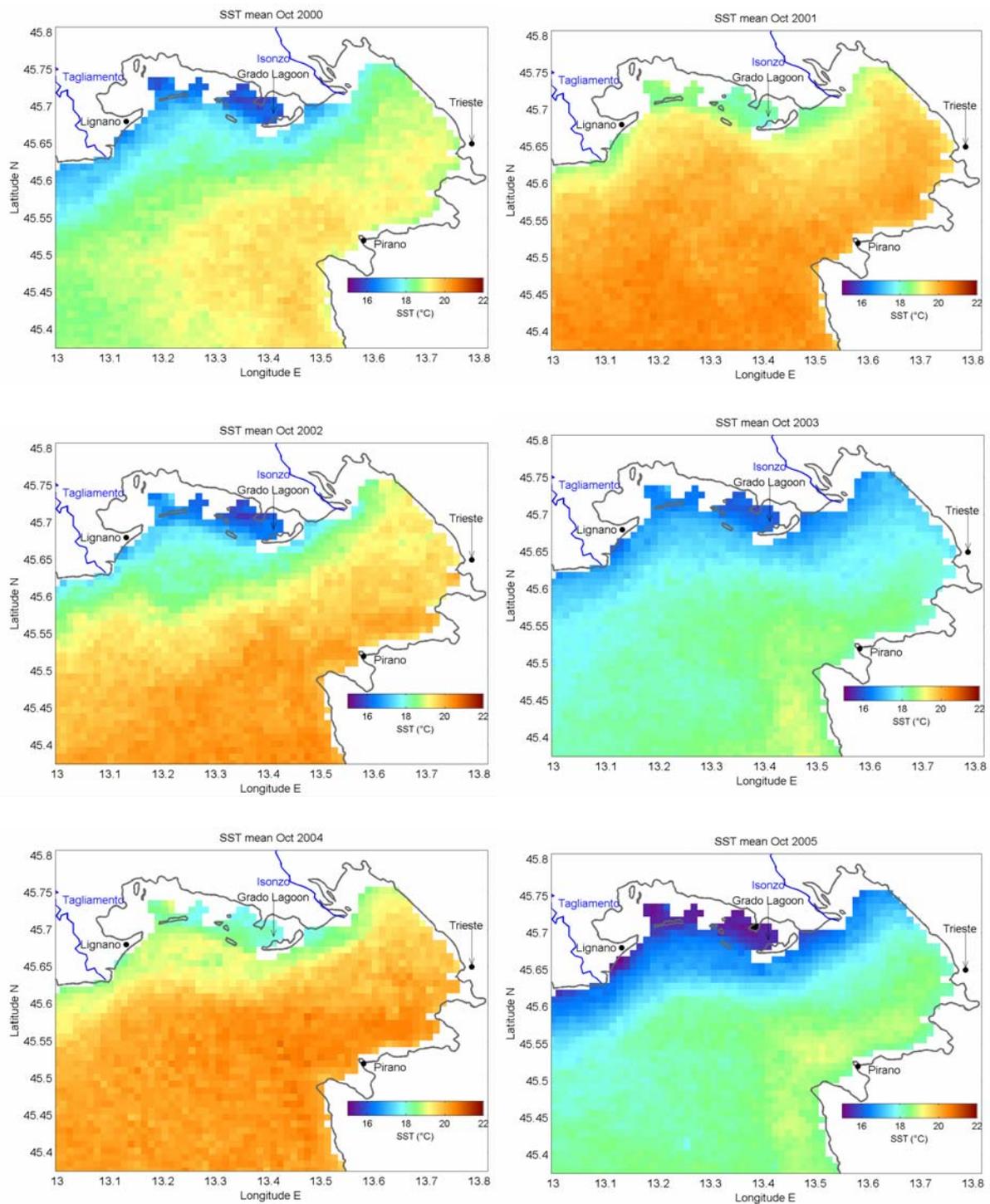


Figura 40. Come la figura 19 ma per ottobre.

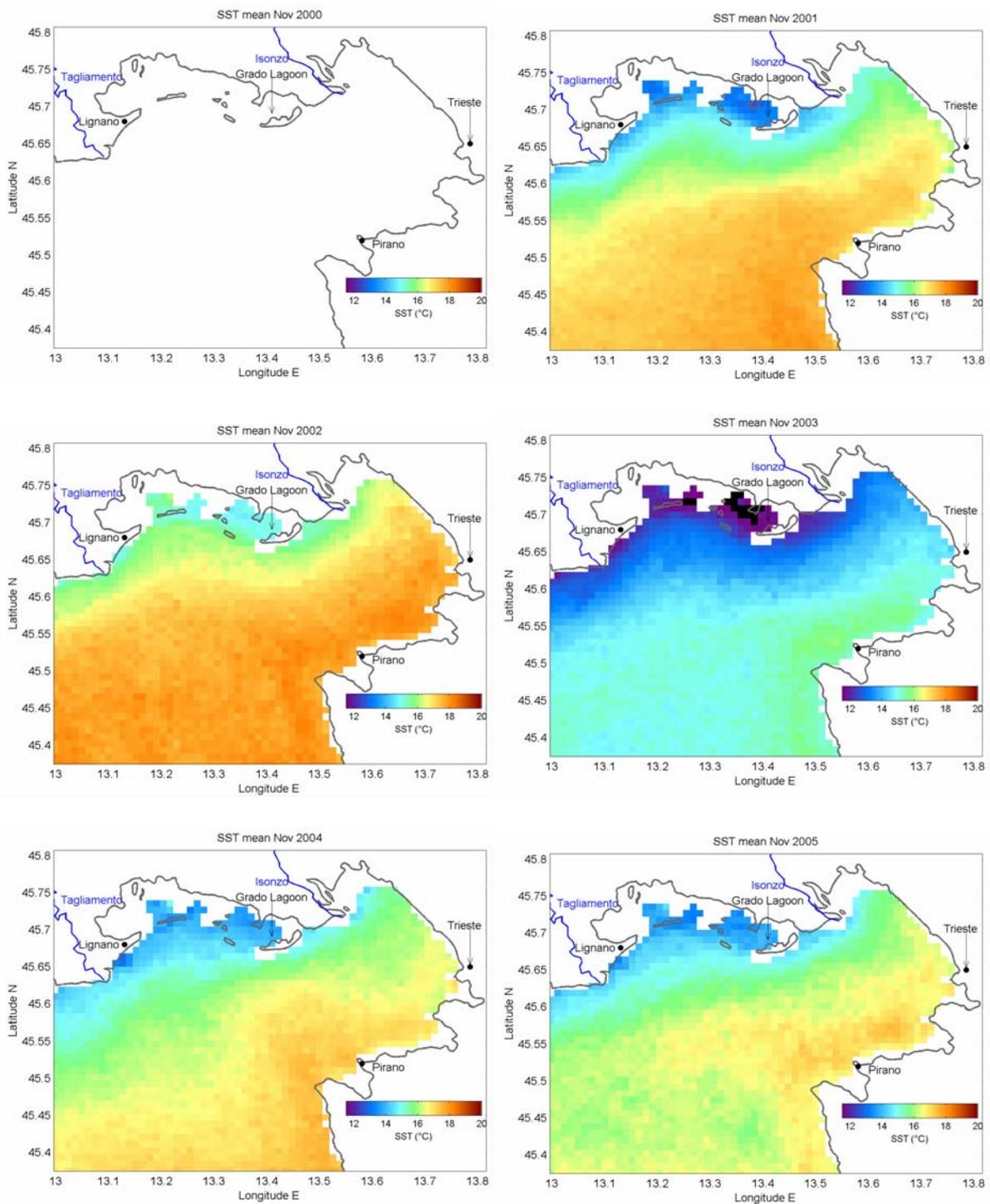


Figura 41. Come la figura 19 ma per novembre.

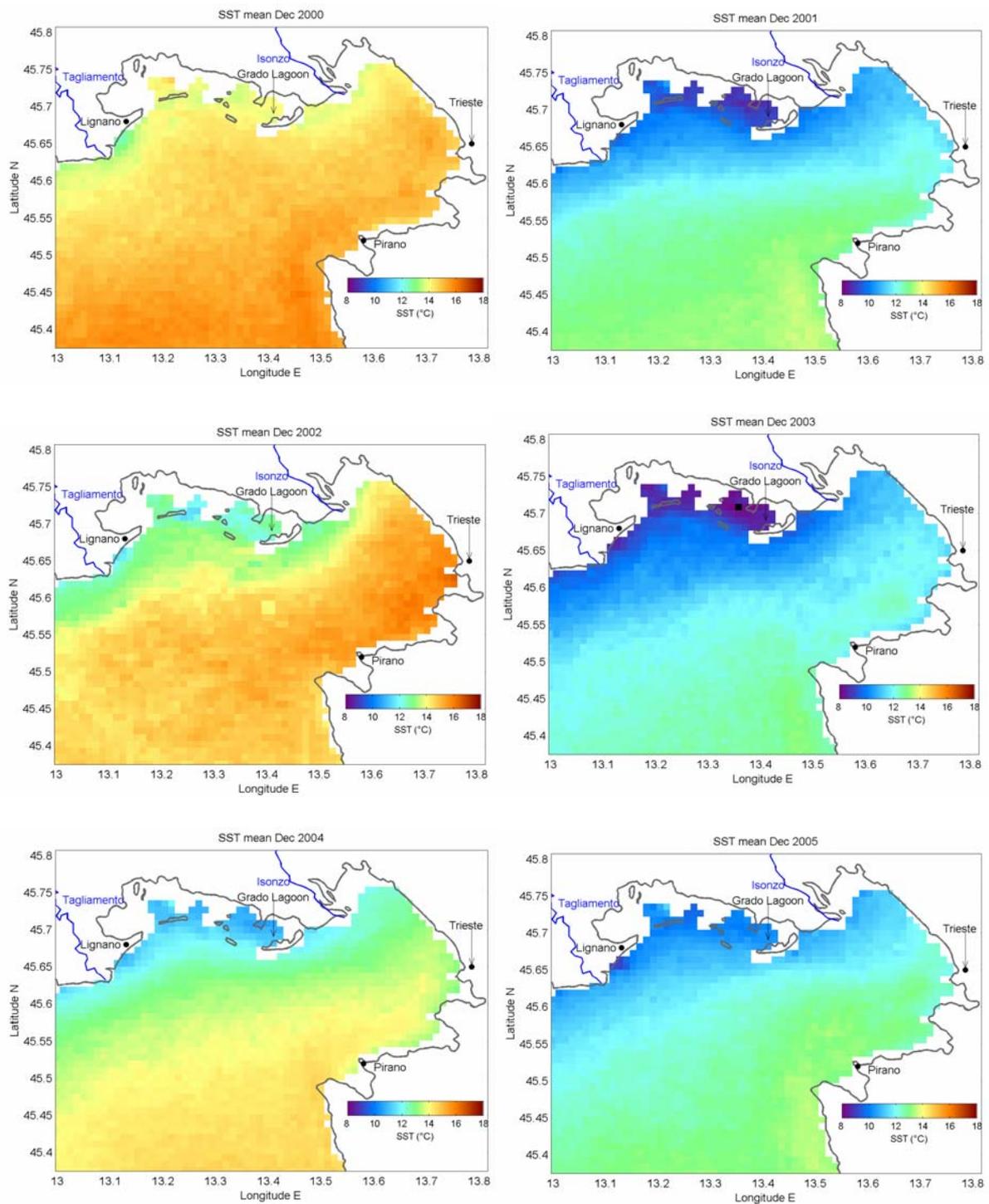


Figura 42. Come la figura 19 ma per dicembre.