



4 ATTIVITA' DI CARATTERIZZAZIONE

Nel presente capitolo vengono riportate le attività di caratterizzazione, suddivise nelle diverse fasi attuative del Piano di caratterizzazione ICRAM, così come realizzate dal Commissario Delegato per l'Emergenza Bonifiche e la Tutela delle Acque della Regione Siciliana mediante SIAP.

Per la corretta esecuzione delle attività di caratterizzazione ICRAM ha fornito agli enti esecutori delle attività, per ciascuna fase attuativa, tutta la documentazione tecnica necessaria. In particolare, per l'esecuzione del piano # CII-Pr-SI-P-03.03, relativo alla Fase I, ICRAM ha fornito:

- il protocollo di campionamento, analisi e restituzione dei dati per l'esecuzione delle attività di caratterizzazione dei sedimenti e degli organismi dell'area marina inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Priolo (doc. ICRAM rif. # Protocollo di campionamento analisi e restituzione dati _02 CII-Pr-SI-P-02.04);
- il piano operativo di campionamento, contenente i codici delle stazioni di campionamento, le relative coordinate, i codici dei campioni da prelevare e conservare, le analisi da effettuare su ciascun campione, fornito in due versioni successive:
 - il piano operativo per il campionamento delle matrici sedimenti e biota dell'intera fase I della Rada di Augusta (doc. ICRAM rif. # Piano operativo campionamento_CII-Pr-SI-P-03.03_v.2) ed, in particolare:
 - quale estratto del primo, per facilità di lettura in campo:
 - il piano operativo relativo alle sole indagini di cui al secondo stralcio (doc. ICRAM rif. # Piano operativo campionamento_CII-Pr-SI-P-03.03_v.3_completamento_Fase_I);
 - il piano operativo campionamento bivalvi_CII-Pr-SI-P-03.03_v.1;
 - il piano operativo campionamento pescato_CII-Pr-SI-P-03.03_v.1;

Per l'attuazione del piano # CII-Pr-SI-P-05.02, relativo alla Fase II, ICRAM ha fornito:

- il protocollo di campionamento, analisi e restituzione dei dati per l'esecuzione delle attività di caratterizzazione dei sedimenti dell'area marina inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Priolo – Rada di Augusta – Fase II (doc. ICRAM rif. # Protocollo di campionamento analisi e restituzione dati _01 CII-Pr-SI-P-05.02);
- il piano operativo di campionamento dei sedimenti per la realizzazione del piano di caratterizzazione ambientale (doc. ICRAM # CII-Pr-SI-P-05.02) della Rada di Augusta nel sito di interesse nazionale di Priolo (rif. doc. # Piano operativo CII-Pr-SI-P-05.02_v.7), contenente i codici delle stazioni di campionamento, le relative coordinate, i codici dei campioni da prelevare e conservare, le analisi da effettuare su ciascun campione.

Nel corso di tutte le attività di caratterizzazione, personale specializzato ICRAM è stato presente in campo, per il supporto tecnico necessario all'applicazione corretta degli specifici protocolli.



4.1 Indagini geofisiche

Preliminarmente all'esecuzione delle attività di campionamento previste sul comparto sedimenti, così come previsto dal piano di caratterizzazione ICRAM, nell'area d'indagine sono state effettuate indagini geofisiche al duplice scopo di calibrare lo schema di campionamento previsto per i sedimenti e definire lo spessore di sedimento incoerente affiorante nell'area. Sono, inoltre, state condotte indagini per l'individuazione di eventuali residuati bellici, ai fini dell'esecuzione delle attività di campionamento in condizioni di sicurezza.

Rilievi eseguiti in Fase I ("aree prioritarie" e "completamento")

Le indagini geofisiche previste in tale fase sono state eseguite dalla Soc. Coop. Nautilus per conto di SIAP utilizzando la seguente strumentazione: Magnetometro al cesio, Side Scan Sonar (SSS), Sub Bottom Profiler (SBP) e Multibeam (MB). I rilievi sono stati eseguiti con l'ausilio del rimorchiatore ZEPHIR di proprietà della Soc. Gestione Pontoni di Augusta (SR).

Per ovviare ad interazioni di tipo acustico e conseguenti interferenze tra gli strumenti, durante l'esecuzione delle indagini è stata adottata una speciale configurazione di acquisizione.

L'area d'indagine è stata rilevata seguendo delle linee di navigazione predisposte su transetti paralleli tra loro, utilizzando contemporaneamente Magnetometro, Side Scan Sonar e Multibeam, il che ha permesso un'accurata indagine dello strato superficiale del fondale, integrando il dato morfologico fornito dal Side Scan Sonar con il dato batimetrico ad alta risoluzione fornito dal MultiBeam.

Le stesse linee di navigazione sono state ripercorse dall'imbarcazione equipaggiata con Sub Bottom Profiler. Tale strumento ha permesso d'indagare lo spessore dei sedimenti al fine di discriminare la consistenza dei depositi incoerenti.

In entrambe le configurazioni di *survey* la strumentazione geofisica era interfacciata con un sistema di posizionamento satellitare DGPS in modalità RTK, al fine di raggiungere una precisione centimetrica in planimetria, e con una girobussola per le correzioni di assetto.

Rilievi eseguiti in Fase II

Le indagini geofisiche relative alla Fase II sono state eseguite dalla Soc. Coop. SELC per conto di SIAP utilizzando la seguente strumentazione: Magnetometro, Side Scan Sonar (SSS), Sub Bottom Profiler (SBP) e Multibeam (MB). I rilievi sono stati eseguiti, per eliminare la potenziale interferenza tra gli strumenti, utilizzando due distinte imbarcazioni:

- la M/B SAN GIOVANNI, iscritta presso la Capitaneria di Porto di Chioggia, appositamente modificata per garantire migliore posizionamento, stabilità e qualità di acquisizione dei dati. Tale imbarcazione era equipaggiata con:
 - sistema Multibeam (MB) Swath Sonar System RESON 8125 ad alta risoluzione;
 - magnetometro G881 Geometrics;
 - sistema IXSEA OCTANS con girobussola a fibre ottiche e sensore di moto tridimensionale integrato per la compensazione dei movimenti su 3 assi e della deviazione dell'imbarcazione;



- sonda multiparametrica per la determinazione del profilo della velocità del suono nell'acqua, Reson SVP/15;
- coppia di ricevitori Ashtech Z-Surveyor, a doppia frequenza, con antenna GPS, operante in modalità RTK On-the-fly.
- la M/B SAN ROCCO, iscritta presso la Capitaneria di Porto di Chioggia, anch'essa modificata per una migliore acquisizione dei dati, allestita con:
 - ecoscandaglio single beam (SB) ODOM Echotrak MKII a doppia frequenza 24/200 khz;
 - sub bottom profiler (SBP) digitale Innomar SES-2000 Compact con trasduttore a doppia frequenza;
 - side Scan Sonar (SSS) digitale C-MAX a doppia frequenza (100- 500 kHz);
 - sensore di moto TSS DMS2-05 per la compensazione dei movimenti sui 3 assi e della deviazione dell'imbarcazione;
 - coppia di ricevitori Ashtech Z-Surveyor, a doppia frequenza, con antenna GPS operante in modalità RTK *on the fly*.

Inoltre a terra è stato installato un mareometro RBR digitale munito di *datalogger* interno, per la correzione in *post-processing* dei dati di marea, in posizione idonea e collegato alla rete altimetrica tramite livellazione trigonometrica.

Le imbarcazioni hanno seguito le medesime linee di navigazione, e quindi di *survey*, ad una distanza temporale tale da garantire la sovrapposizione dei dati e la non interferenza tra i diversi sensori utilizzati.

4.2 Rilievi per l'individuazione di ordigni bellici

Al fine di garantire l'esecuzione dell'attività di campionamento in condizioni di sicurezza sono state eseguite indagini finalizzate all'individuazione di eventuali residui bellici. Tali indagini sono inoltre servite ad evidenziare la presenza di eventuali elementi antropici (quali cassoni di cemento affondati o servizi in disuso) in grado di inficiare il corretto recupero dei campioni.

Nel presente paragrafo vengono brevemente descritte le modalità di esecuzione di tali indagini e ne vengono illustrati i risultati, così come riportati dalle ditte esecutrici.

Rilievi eseguiti in Fase I (aree prioritarie e completamento)

Le attività di rilevamento di ordigni bellici sono state eseguite utilizzando Magnetometro al cesio, Side Scan Sonar (SSS) e Sub Bottom Profiler (SBP).

Il Magnetometro al cesio ha la capacità di rilevare eventuali anomalie magnetiche causate dalla presenza di elementi ferrosi nei primi metri del fondale marino; il Side Scan Sonar è in grado di discriminare la tipologia del fondale ed evidenziare la presenza di eventuali "ingombri"; il Sub Bottom Profiler è stato utilizzato per determinarne eventuale tipologia ed estensione.

L'interpretazione dei dati *in situ*, confermati poi dall'elaborazione dei dati processati, non ha evidenziato la presenza di masse magnetiche tali da compromettere le attività di carotaggio previste. Tuttavia, il rilievo condotto ha consentito di identificare zone con particolare morfologia del substrato che, in fase di campionamento, sono



risultate tali da rendere difficoltoso, e a volte impossibile, il carotaggio (Figura 14, Figura 15). In particolare è stato possibile individuare:

- un'area compresa tra il "Pontile Superpetroliere" ed il "Pontile Nato" con affioramenti rocciosi, come pure alcuni tratti prospicienti la diga Meridionale;
- un'area antistante i pontili ERG che, nella fascia più costiera, risulta caratterizzata da sedimenti grossolani con abbondante presenza di matte morta;
- diverse zone con matte morta o substrato argilloso all'interno delle "aree prioritarie";
- un'area in prossimità delle banchine di ormeggio della Marina Militare (area settentrionale della Rada) ad elevata presenza di corpi morti, boe, catene, ecc;
- un'area compresa tra le due "aree prioritarie" costituita da fondali rocciosi;
- un'area con affioramenti rocciosi in prossimità dell'imboccatura principale (bocca di Levante) della Rada nei punti a ridosso della Diga.

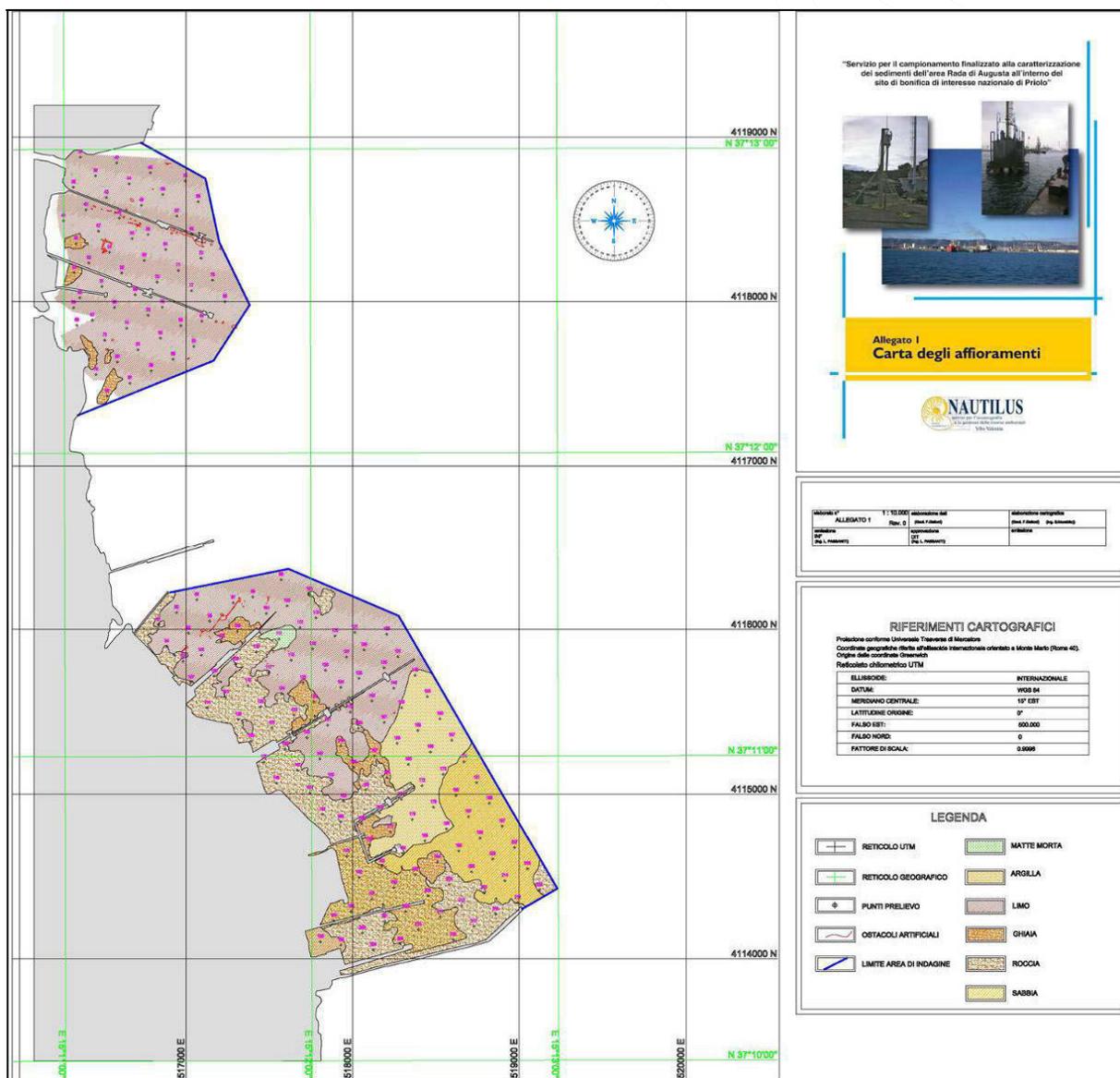


Figura 14: Carta degli affioramenti nelle "aree prioritarie" secondo le elaborazioni della ditta incaricata.

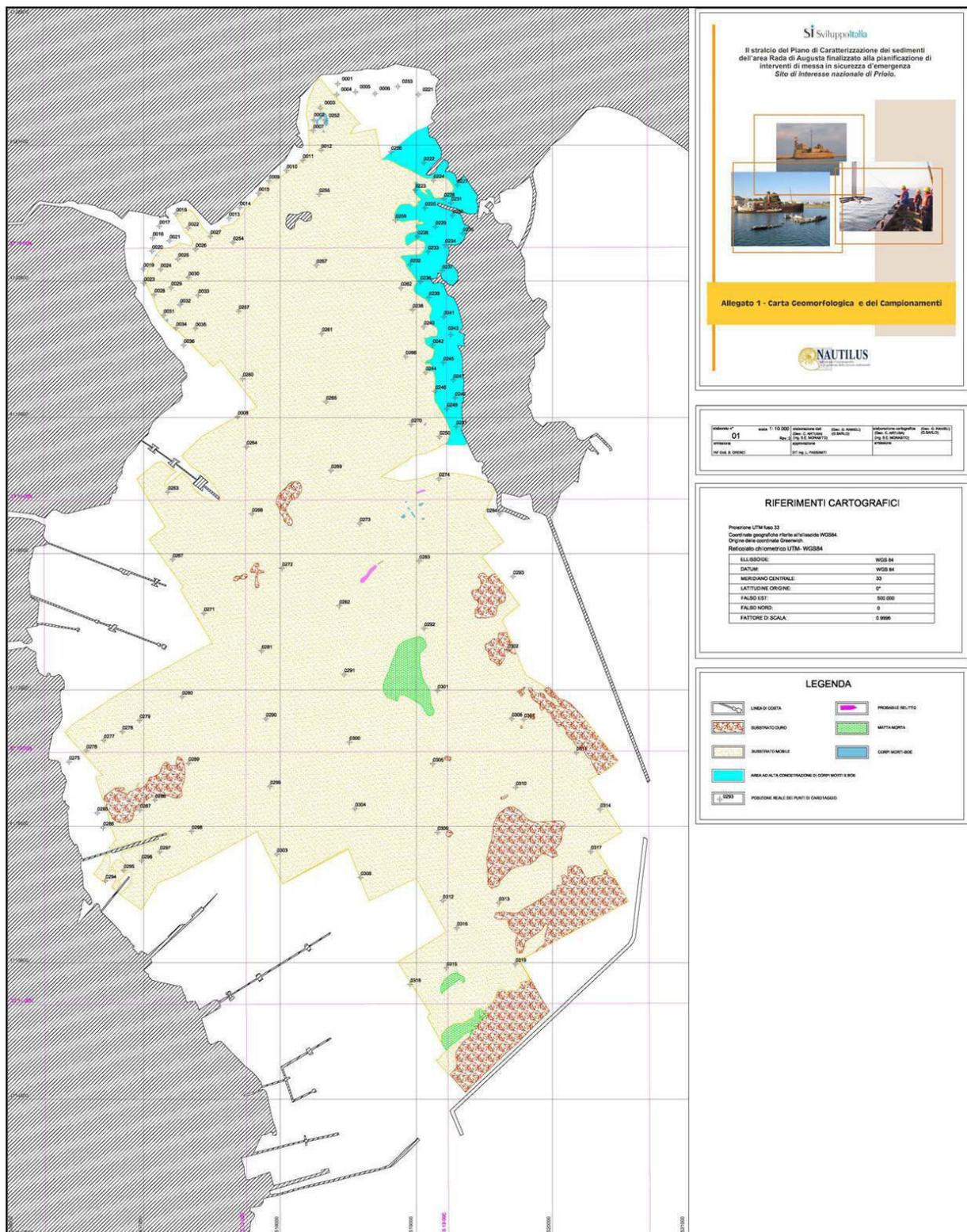


Figura 15: Carta degli affioramenti nell'area d'indagine secondo le elaborazioni della ditta incaricata.

Rilievi eseguiti in Fase II

Le attività per la verifica della presenza di eventuali ordigni bellici sul fondale marino sono state condotte successivamente alle indagini geofisiche e prima di procedere con le attività di campionamento. Tale ricognizione è stata eseguita per maglie di lato



10x10 m in corrispondenza di ciascun punto di campionamento previsto. Le attività sono state eseguite utilizzando una sonda magnetometrica ad uso subacqueo.

L'interpretazione dei dati *in situ*, confermati poi dall'elaborazione dei dati processati, non ha evidenziato la presenza di masse magnetiche tali da compromettere le attività di carotaggio previste. Tuttavia, il rilievo ha consentito di identificare zone con particolare morfologia del substrato (Figura 16). In particolare è stato possibile individuare:

- sedimenti sabbiosi e/o limosi largamente rappresentati nel centro del bacino, che risultano disturbati da solchi d'ancora e strisciate e da target di origine antropica; si osserva spesso materiale di risulta, cavi, catene e corpi morti;
- sabbia affiorante nella Rada, ascrivibile a diversi momenti storici, sottoposta ad operazioni di rimozione quali, ad esempio, dragaggi evidenziati da gradini morfologici e solchi rilevabili tramite SSS, ma anche da SBP, nella parte NW del porto. Anche nella parte NE della Rada, a ridosso dell'isolotto di Augusta, si notano solchi di dragaggio perpendicolari alla direzione della linea di costa;
- tracce di movimenti franosi rilevati nel settore settentrionale della Rada: si tratta di "slumping" (scivolamenti gravitativi) associabili probabilmente alla variazione dell'assetto di equilibrio naturale del sedimento a seguito delle attività di dragaggio. Intorno a tale rilievo sono stati infatti evidenziate e mappate diverse tracce attribuibili a solchi di dragaggio;
- affioramenti rocciosi presenti principalmente nei settori meridionali, orientali, ed in aree molto ristrette nel settore più occidentale della Rada. Anche nella porzione centrale è stata cartografata qualche piccola area con affioramento roccioso; il passaggio tra affioramenti rocciosi e sedimento incoerente è segnato sempre dalla presenza sul fondale di piccoli massi e blocchi.



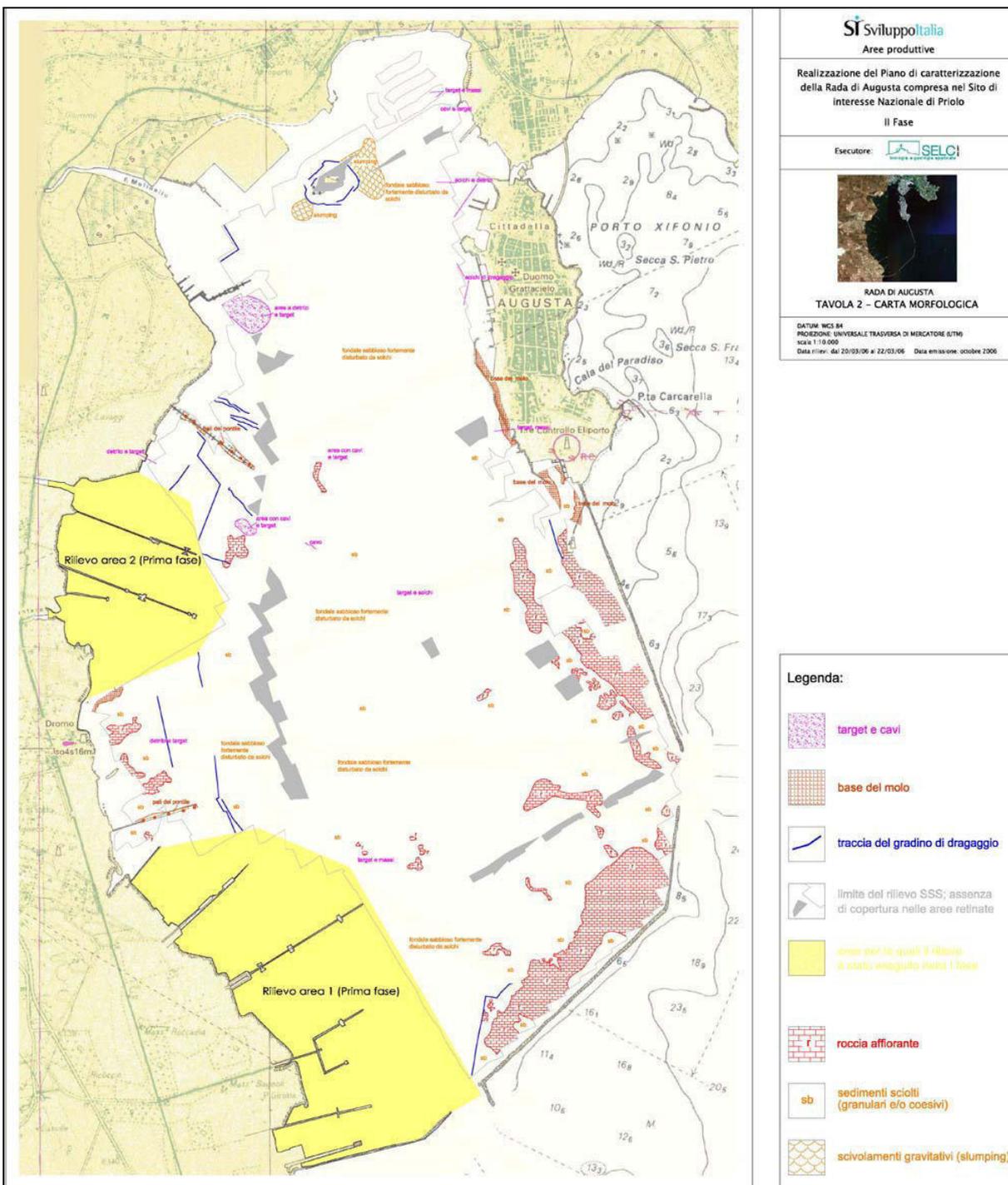


Figura 16: Carta degli affioramenti nell'area d'indagine secondo le elaborazioni della ditta incaricata.



4.3 Attività di caratterizzazione del comparto sedimenti

4.3.1 Attività relative alla Fase I (doc. ICRAM # CII-Pr-SI-P-03.03)

Le attività sono state eseguite nel pieno rispetto dei protocolli previsti. Nel corso delle attività di assistenza in campo ICRAM ha selezionato, sulla base della criticità attesa dalle informazioni pregresse e riscontrata nel corso del campionamento, una serie di campioni su cui effettuare, per proprio conto, le analisi previste dal piano di caratterizzazione. Per tali campioni ICRAM ha pertanto prelevato le aliquote di campione destinate alla conservazione, sulle quali ha effettuato le analisi previste.

Il confronto tra i risultati delle analisi effettuate da ICRAM e le analisi effettuate dal laboratorio incaricato ha evidenziato una buona correlabilità per la maggior parte dei parametri ricercati.

Caratterizzazione dei sedimenti delle "aree prioritarie" (I stralcio)

In corrispondenza delle stazioni di campionamento delle "aree prioritarie" era previsto il prelievo di n. 184 carote di sedimento, per un totale di campioni pari a n. 920, su n. 709 dei quali eseguire analisi chimico-fisiche e microbiologiche.

Il prelievo previsto dei campioni è stato soggetto a modifiche durante le attività di campo, a causa della presenza di aree con substrati non campionabili. In particolare, nell' "area prioritaria Sud" lo schema di caratterizzazione dei sedimenti è stato adattato in funzione della natura rocciosa o grossolana del substrato, che ha impedito l'esecuzione dei carotaggi nella totalità delle stazioni di campionamento previste.

In particolare, sono pertanto stati eseguiti n. 145 carotaggi e n. 39 prelievi di sedimenti superficiali, laddove è risultato impossibile l'utilizzo del vibrocarotiere. Le stazioni di campionamento effettivamente campionate sono riportate in Figura 17.

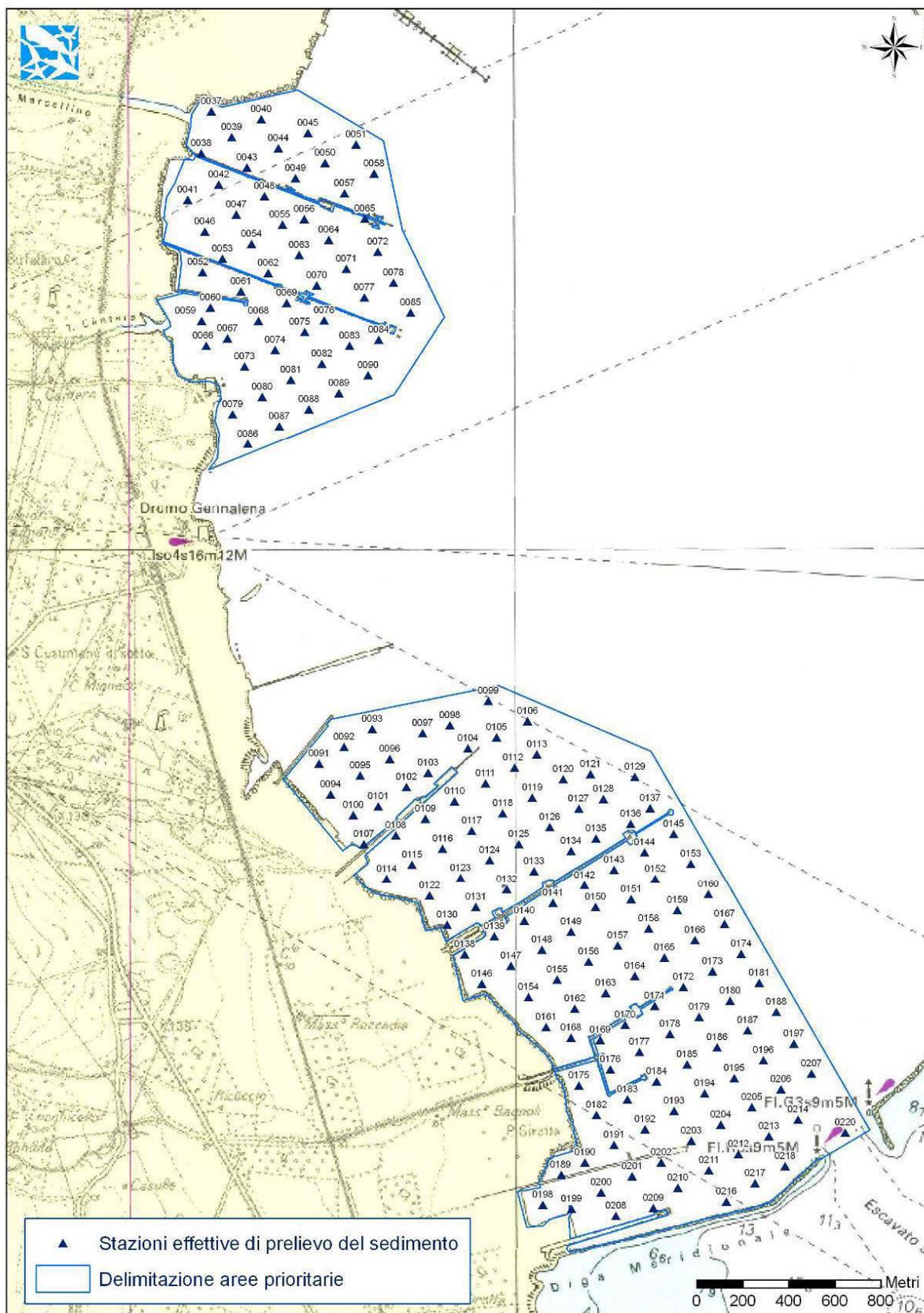


Figura 17: Aree prioritarie: ubicazione delle stazioni reali di campionamento dei sedimenti



Per il prelievo delle carote è stato utilizzato un vibrocarotiere a percussione (Ditta Imprefond), con un *liner* interno in polietilene che ha garantito il recupero indisturbato del campione. Il carotiere ha prelevato le carote della lunghezza prevista in un'unica operazione, senza soluzione di continuità, ad eccezione dei punti in cui la presenza di substrato roccioso ne abbia impedito il recupero. In questo caso è stato prelevato un campione superficiale, rappresentativo della tipologia del substrato, mediante benna Van Veen.

I *liner* contenenti il sedimento campionato, una volta tolti dall'asta del carotiere, sono stati aperti per il subcampionamento mediante taglio longitudinale, processo che ha garantito la non compressione del sedimento a seguito di estrusione, la visione completa delle caratteristiche stratigrafiche del sedimento e di eventuali variazioni sedimentologiche o strutturali lungo tutta la verticale campionata.

Dopo la misura del recupero complessivo, le carote sono state fotografate (riportando su apposita targa il codice della stazione, la data di prelievo e la lunghezza della carota) e ispezionate visivamente da personale specializzato al fine di eseguire una descrizione stratigrafica.

Le carote sono state subcampionate separando, partendo dal top, le sezioni di sedimento corrispondenti agli intervalli: 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 100-120 cm e 180-200 cm. Ove non si è raggiunto lo spessore di prelievo previsto, si è proceduto al prelievo degli ultimi 20 cm di sedimento campionato. Nel caso dei campioni superficiali è stato prelevato uno spessore pari a 10 cm di sedimento, confrontabile con la prima sezione delle carote.

Per poter eseguire il subcampionamento ciascun livello è stato decorticato dello strato più esterno, a contatto con le pareti interne del *liner*, per evitare potenziali contaminazioni del campione.

Prioritariamente al subcampionamento delle aliquote previste, sono stati eseguiti:

- il prelievo dell'aliquota destinata alla determinazione dei composti volatili (Idrocarburi IC \leq 12, BTEX, composti alifatici clorurati e cancerogeni), sulle sezioni ove tali analisi erano state previste;
- la misura di pH e potenziale redox (su tutte le sezioni ad eccezione dei livelli ove, causa le caratteristiche tessiturali del sedimento, ad esempio ghiaia, ciottoli o argilla sovraconsolidata, non sia stato possibile registrarne i valori).

Il numero complessivo dei campioni di sedimento prelevati è stato pari a n. 704, di cui n. 594 sono stati destinati alle analisi fisiche, chimiche e microbiologiche previste.

Nel dettaglio, secondo quanto previsto dal piano di caratterizzazione ICRAM, sono state eseguite le seguenti determinazioni analitiche:

- su n. 594 campioni: granulometria, metalli ed elementi in tracce (Al, As, Cd, Cr tot, Fe, Hg, Ni, Pb, Cu, Sn, Zn, V), IPA [Naftalene, Acenaftene, Acenaftilene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo (a) antracene, Crisene, Benzo (b) fluorantene, Benzo (k) fluorantene, Benzo (a) pirene, Dibenzo (a,h) antracene, Benzo (g,h,i) perilene, Indeno (1,2,3-cd) pirene, Dibenzotiofene], PCB, Esaclorobenzene (HCB), Azoto e Fosforo, TOC, Cianuri, Idrocarburi IC $>$ 12, Idrocarburi IC \leq 12;
- su 73 campioni: Composti clorurati (Esaclorobutadiene, Clorofenoli);
- su 90 campioni: Solventi aromatici (BTEX);



- su 93 campioni: Analisi microbiologiche (Streptococchi fecali, Salmonella, Spore di clostridi solfitoreducitori);
- su 38 campioni: Pesticidi organoclorurati, Solventi alifatici cancerogeni, Composti organostannici (TBT);
- su 22 campioni: Diossine e furani;
- su 7 campioni: Amianto.

Caratterizzazione delle aree di "completamento Fase I"

Le aree di completamento di Fase I, come previsto dal piano ICRAM (rif. doc. # CII-Pr-SI-P-03.03), sono state caratterizzate con il prelievo di un totale di n. 135 carote di lunghezza variabile, distribuite sull'area come mostrato in Figura 18.

Anche in questo caso, lo schema di caratterizzazione dei sedimenti è stato adattato in funzione della natura rocciosa o grossolana del substrato anche se, a differenza di quanto riscontrato nelle "aree prioritarie", in quelle di "completamento Fase I", l'intero spessore previsto è risultato in linea di massima campionabile, ad esclusione di un numero limitato e non significativo di stazioni di campionamento, ubicate principalmente nella fascia costiera di collegamento tra le aree prioritarie e molto a ridosso della diga foranea meridionale.

Per il prelievo delle carote è stato utilizzato un vibrocarotiere a percussione (di proprietà di IAMC-CNR di Napoli), diverso da quello utilizzato nella fase precedente ma con analoghe capacità tecniche, associato ugualmente ad un *liner* interno in polietilene, che ha garantito il recupero indisturbato del campione. Il carotiere ha prelevato le carote della lunghezza prevista in un'unica operazione, senza soluzione di continuità, ad eccezione dei punti in cui la presenza di substrato roccioso ne abbia impedito il recupero. Le modalità di subcampionamento e preparazione del campione sono invece le medesime descritte per il I stralcio della Fase I di caratterizzazione.

Dalle carote eseguite sono stati prelevati partendo dal top i seguenti livelli: 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 100-120 cm e 180-200 cm. Ove non si è raggiunto lo spessore di prelievo previsto si è proceduto al prelievo degli ultimi 20 cm di sedimento.

La strategia adottata ha consentito il prelievo totale di n. 659 campioni, di cui n. 529 destinati a determinazioni analitiche di tipo chimico-fisiche e microbiologiche e i rimanenti destinati a conservazione.

Nel dettaglio, secondo quanto previsto dal piano di caratterizzazione ICRAM, sono state eseguite le seguenti determinazioni analitiche:

- su n. 529 campioni: granulometria, metalli ed elementi in tracce (Al, As, Cd, Cr tot., Fe, Hg, Ni, Pb, Cu, Sn, Zn, V), IPA [Naftalene, Acenaftene, Acenaftilene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo (a) antracene, Crisene, Benzo (b) fluorantene, Benzo (k) fluorantene, Benzo (a) pirene, Dibenzo (a,h) antracene, Benzo (g,h,i) perilene, Indeno (1,2,3-cd) pirene, Dibenzotiofene], PCB, Esaclorobenzene (HCB), Azoto e Fosforo, TOC, Cianuri, Idrocarburi IC>12, Idrocarburi IC≤12;
- su 32 campioni: Solventi aromatici (BTEX);
- su 32 campioni: Analisi microbiologiche (Streptococchi fecali, Salmonella, Spore di clostridi solfitoreducitori);



- su 10 campioni: Pesticidi organoclorurati, Solventi alifatici cancerogeni, Composti organostannici (TBT);
- su 10 campioni: Diossine e furani.

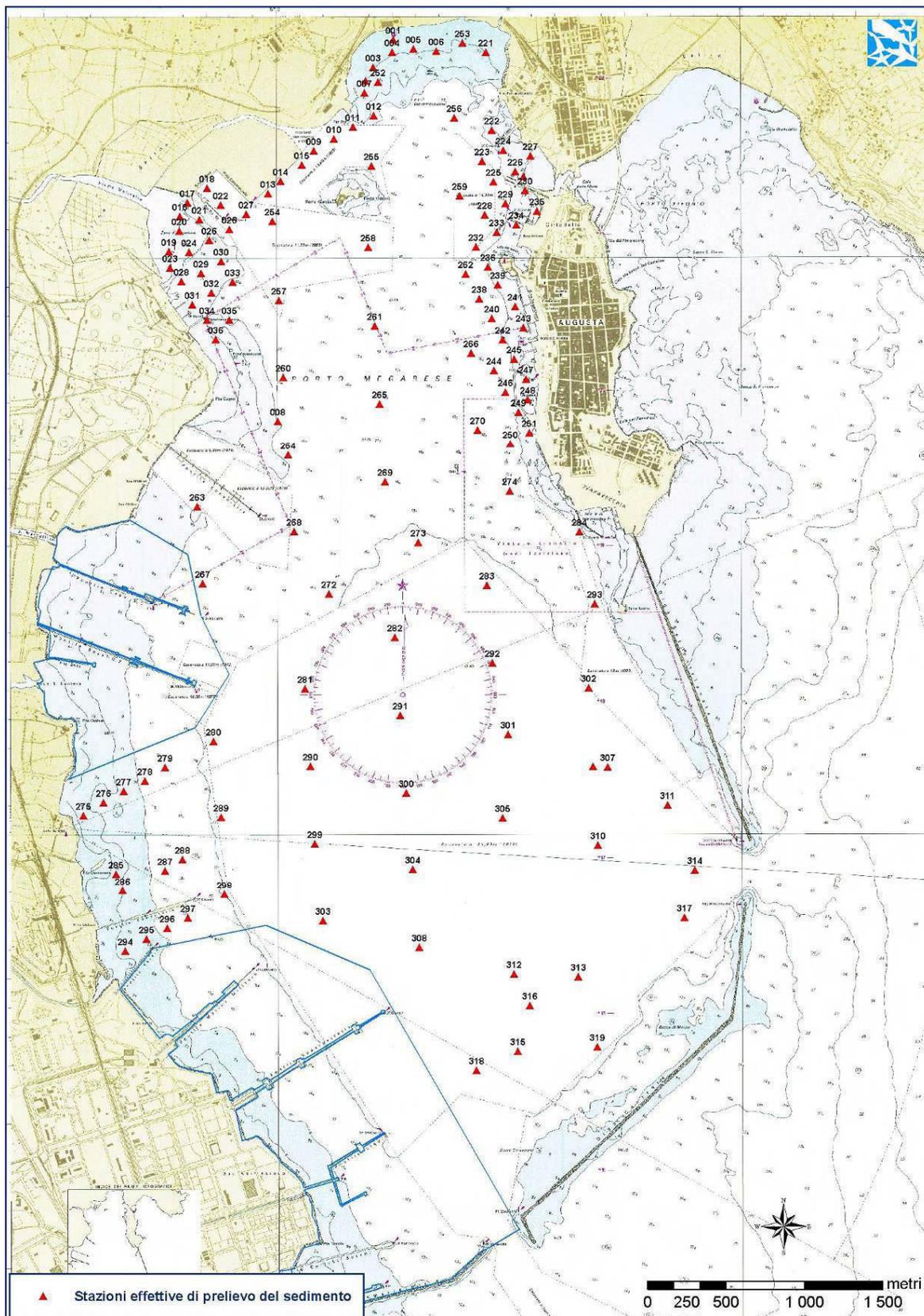


Figura 18: Completamento Fase I: ubicazione delle stazioni reali di campionamento dei sedimenti



Contestualmente alla Fase I di caratterizzazione è stata inoltre eseguita da ICRAM una campagna di indagine integrativa per l'acquisizione delle caratteristiche ecotossicologiche dei sedimenti (cfr. par. 5.1 e par. 6.2.5).

4.3.2 Attività relative alla Fase II (doc. ICRAM # CII-Pr-SI-P-05.02)

Le attività sono state eseguite nel pieno rispetto dei protocolli previsti.

Durante le attività analitiche ICRAM ha selezionato una serie di campioni su cui effettuare un numero significativo di analisi previste dal piano di caratterizzazione. Prima dell'inizio di tali attività sono state avviate procedure di intercalibrazione con il laboratorio incaricato delle analisi. Durante lo svolgimento delle analisi sono stati inoltre effettuati sopralluoghi nei laboratori incaricati.

Nel corso di tali attività, a fronte del riscontro di alcune difformità tra i risultati del laboratorio incaricato e quelli ottenuti da ICRAM, si è manifestata la necessità di far ripetere alcune analisi da un altro laboratorio accreditato. In particolare, i parametri analitici per cui è stata necessaria la ripetizione delle analisi su tutti i campioni sono stati: Mercurio (Hg), Idrocarburi IC \geq 12 e Esaclorobenzene (HCB); i parametri analitici per cui, invece, è stata necessaria la ripetizione delle analisi solo su un numero significativo di campioni sono stati: Cadmio (Cd), Nichel (Ni), Rame (Cu) e Zinco (Zn). Queste ulteriori indagini hanno permesso di ottenere i dati utili per procedere alla valutazione dei risultati ed alla loro successiva elaborazione.

Secondo il piano di caratterizzazione ICRAM era previsto il prelievo di n. 250 carote di sedimento, per un numero totale pari a n. 1000 campioni, su cui eseguire analisi chimico-fisiche, microbiologiche ed ecotossicologiche. Nel corso delle attività di campionamento sono state apportate alcune modifiche rispetto a quanto originariamente previsto, causa la presenza di fondale con coltre sedimentaria non campionabile. Le stazioni effettivamente campionate sono riportate in Figura 19.

Per il prelievo delle carote è stato utilizzato un vibrocarotiere a percussione (mod. P3 - Rossfelder di proprietà della Soc. Coop. SELC), diverso da quello utilizzato nella fase precedente ma con analoghe capacità tecniche, associato ugualmente ad un *liner* interno in polietilene, che ha garantito il recupero indisturbato del campione. Il carotiere ha prelevato le carote della lunghezza prevista in un'unica operazione, senza soluzione di continuità, ad eccezione dei punti in cui la presenza di substrato roccioso ne abbia impedito il recupero. Le modalità di subcampionamento e preparazione del campione sono invece le medesime descritte per le precedenti fasi di caratterizzazione.

Sulla base delle risultati delle precedenti caratterizzazioni, e al fine di integrare le informazioni per la successiva fase di elaborazione dei dati, i livelli prelevati e destinati alle analisi sono stati modificati rispetto al piano originale. Partendo dal top sono stati selezionati i seguenti livelli: 0-20 cm, 30-50 cm, 80-90 cm, 100-120 cm e 180-200 cm. Ove non si è raggiunto lo spessore di prelievo previsto si è proceduto al prelievo degli ultimi 20 cm di sedimento.

Nel dettaglio, secondo quanto previsto dal piano di caratterizzazione ICRAM, sono state eseguite le seguenti determinazioni analitiche:



- su n. 945 campioni: granulometria, metalli ed elementi in tracce (Al, As, Cd, Cr tot., Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sn, V, Zn), IPA [Naftalene, Acenaftene, Acenaftilene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo (a) antracene, Crisene, Benzo (b) fluorantene, Benzo (k) fluorantene, Benzo (a) pirene, Dibenzo (a,h) antracene, Benzo (g,h,i) perilene, Indeno (1,2,3-cd) pirene], PCB, Pesticidi organoclorurati, Esaclorobenzene (HCB), Azoto e Fosforo, TOC, Cianuri, Idrocarburi IC>12, Idrocarburi IC≤12;
- su 95 campioni: Solventi aromatici (BTEX);
- su 94 campioni: Analisi microbiologiche (Streptococchi fecali, Salmonella, Spore di clostridi solfitoreducitori);
- su 95 campioni: Solventi alifatici cancerogeni;
- su 50 campioni: Composti organostannici (TBT);
- su 30 campioni: Diossine e furani.

Sono inoltre state eseguite analisi ecotossicologiche per un totale complessivo di dati utili pari a n. 56 campioni di sedimento, superficiali e profondi (Figura 20).

Nella Figura 20 è riportata l'ubicazione delle stazioni ove sono stati prelevati i campioni per l'esecuzione dei saggi ecotossicologici.

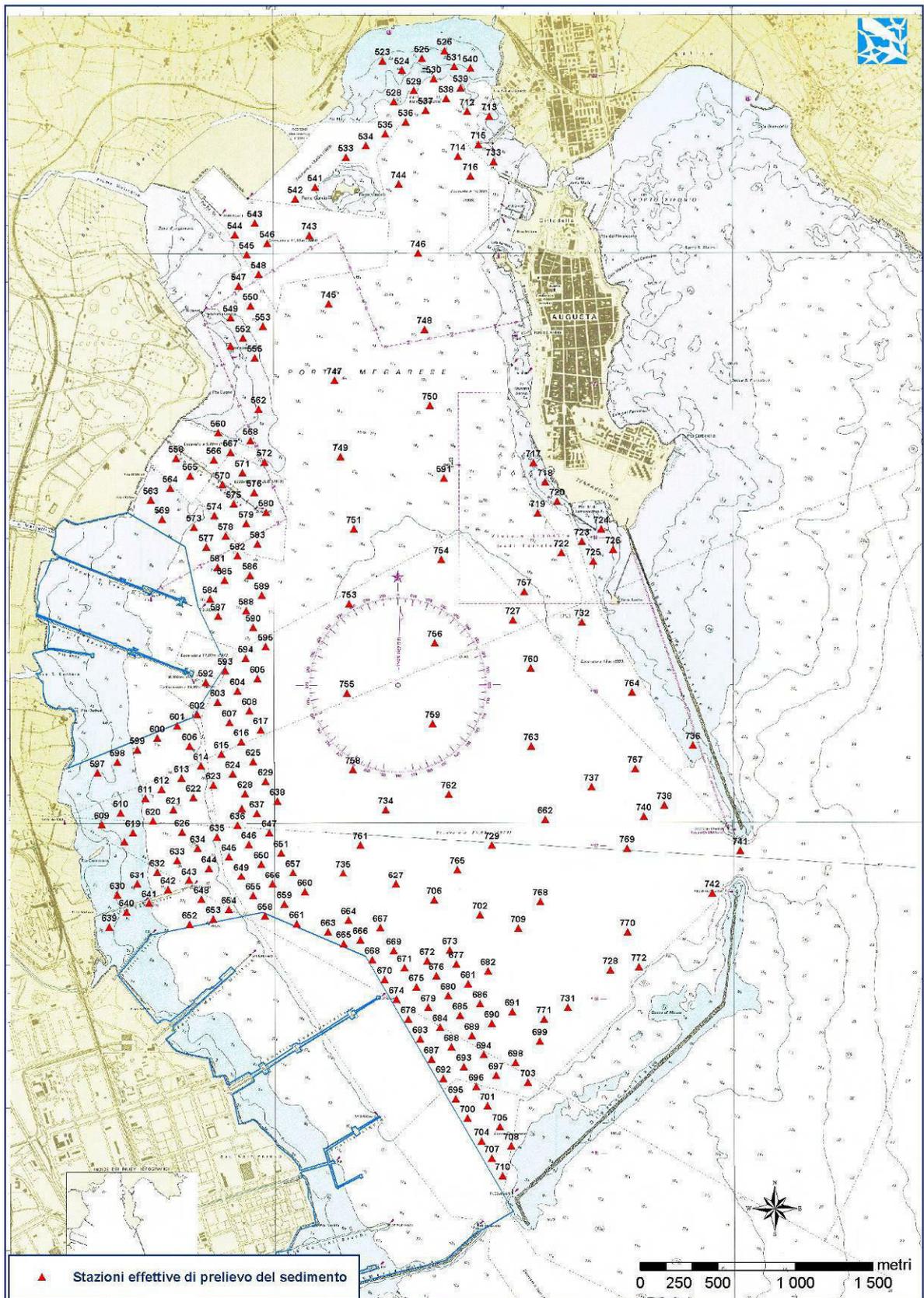


Figura 19: Fase II: ubicazione delle stazioni reali di campionamento dei sedimenti

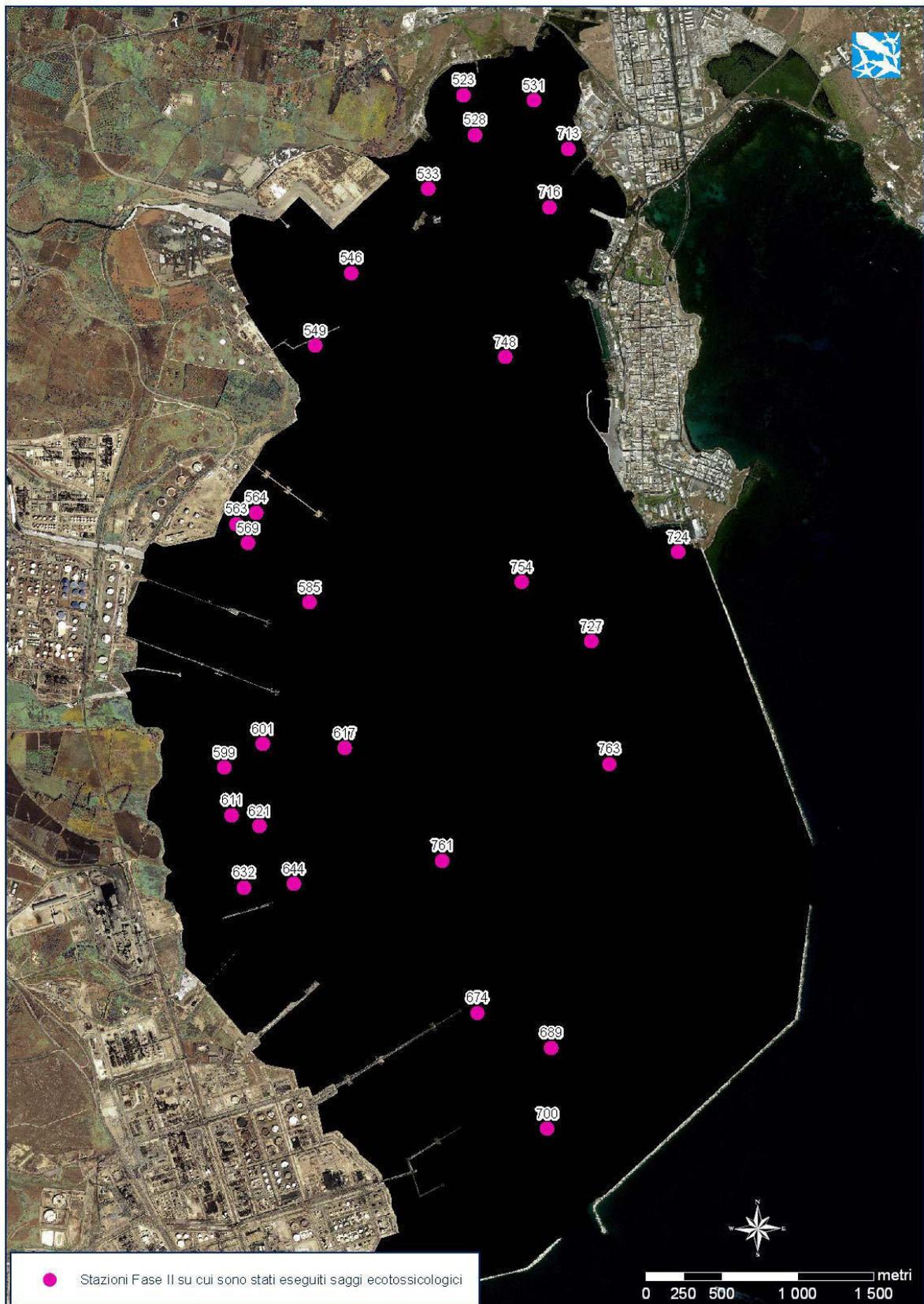


Figura 20: Fase II: ubicazione delle stazioni di campionamento per l'esecuzione di saggi ecotossicologici



4.3.3 Indagini integrative eseguite da ICRAM: i carotaggi "in continuo"

Per una corretta valutazione dello stato di qualità dei fondali marini, anche in relazione al forte contributo antropico che ha interessato, e continua ad interessare, l'area marina inclusa nel sito di bonifica di interesse nazionale, ICRAM ha ritenuto necessario eseguire un'indagine più approfondita in merito alle concentrazioni di alcuni parametri ambientali, allo scopo di discriminarne i diversi apporti, potenzialmente attribuibili sia a fenomeni di inquinamento che a caratteristiche geochimiche naturali, tipiche dell'area. Sulla base di tali indagini si è inoltre cercato di ricostruire l'entità di tali fenomeni, identificando per questi stessi parametri valori di concentrazione da utilizzare come riferimento per l'area.

L'indagine, effettuata in concomitanza con l'esecuzione di entrambe le fasi di caratterizzazione, è consistita nel prelievo complessivo di n. 6 carote di sedimento provenienti da diversi settori della Rada di Augusta (Figura 80).

Al fine di avere un quadro completo dell'andamento delle concentrazioni dei parametri indagati in tutta la Rada e per tutto lo spessore campionato, anche in funzione delle caratteristiche granulometriche del sedimento, le carote sono state sezionate in livelli di spessore pari a 2 cm per tutta la loro lunghezza, garantendo in questo modo una verifica dettagliata delle concentrazioni di contaminanti presenti lungo tutta la verticale della carota: per tale motivo sono state definite carote "in continuo".

Nel dettaglio sono state prelevate per essere analizzate secondo questo criterio, n. 2 carote all'interno delle cosiddette "aree prioritarie", in corrispondenza delle stazioni di campionamento PR01/82 e PR01/152 per le quali il recupero è stato rispettivamente di 200 cm e di 140 cm; n. 2 carote nell'area centrale della Rada, esternamente alle aree prioritarie, in corrispondenza delle stazioni di campionamento PR01/299 e PR02/662, con un recupero rispettivamente di 283 cm e 241 cm e, infine, n. 2 carote nell'area più settentrionale della Rada, in corrispondenza delle stazioni PR01/268 e PR02/591, per le quali il recupero è stato rispettivamente di 290 cm e di 215 cm.

Le carote "in continuo" sono state prelevate nel corso delle attività di caratterizzazione descritte nei paragrafi 4.3.1 e 4.3.2 e le modalità di campionamento e di preparazione dei campioni coincidono pertanto con quanto già descritto.

Al fine di avere un quadro completo dell'evoluzione sedimentaria dei depositi marini recenti, per ognuna di queste carote è stata effettuata la descrizione stratigrafica dell'intero spessore campionato.

Per ricostruire l'andamento delle concentrazioni dei contaminanti più significativi con la profondità, di tutte le sezioni prelevate lungo la carota è stato analizzato un numero di livelli maggiore nello spessore più superficiale e più diradato negli strati sottostanti, a copertura comunque dell'intero spessore campionato.

Per ciascun livello prelevato sono state eseguite le analisi granulometriche, quale parametro fondamentale per la comprensione della distribuzione e dell'accumulo dei contaminanti nel sedimento, e sono stati determinati i livelli di concentrazione per i seguenti parametri:

- Metalli ed elementi in tracce (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn);
- Idrocarburi Policiclici Aromatici [Naftalene, Acenaftene, Fluorene, Fenantrene, Antracene, Fluorantene, Pirene, Benzo (a) antracene, Crisene, Benzo (b)



fluorantene, Benzo (k) fluorantene, Benzo (a) pirene, Dibenzo (a,h) antracene, Benzo (g,h,i) perilene, Indeno (1,2,3-cd) pirene];

- Policlorobifenili (PCB 5, PCB 18, PCB 31, PCB 44, PCB 52, PCB 66, PCB 87, PCB 101, PCB 110, PCB 138, PCB 141, PCB 151, PCB 153, PCB 170, PCB 180, PCB 183, PCB 187, PCB 206). E' stato ricercato in aggiunta anche il PCB 209, in quanto già riscontrato in concentrazioni significative nei sedimenti indagati nel corso della fase prioritaria di caratterizzazione.

4.4 Attività di caratterizzazione sul comparto biotico

Le attività di campionamento del comparto biotico sono state condotte nel mese di febbraio 2005, nell'ambito della campagna di caratterizzazione delle "aree prioritarie", con modalità differente rispetto a quanto originariamente previsto dal piano CII-Pr-SI-P-03.03 (secondo quanto indicato nella nota inviata da ICRAM a SIAP il 14 febbraio 2005).

Le attività di caratterizzazione del biota sono state eseguite dalla Soc. Coop. Nautilus con la supervisione scientifica dell'ICRAM.

Tali attività sono consistite nel:

- prelievo di organismi bivalvi (*Mytilus galloprovincialis*) in n. 3 stazioni interne alla Rada (una presso il Pontile Esso n. 2, una presso il Pontile Liquidi ed una presso la Diga Foranea Sud) e in n. 1 esterna ad essa, come campione di riferimento; nello specifico, il campione di riferimento è stato ricavato dalle reste di un allevamento di Siracusa;
- trapianto di organismi bivalvi (*Mytilus galloprovincialis*) provenienti dall'area di riferimento (allevamento di Siracusa) in n. 1 stazione, ubicata all'interno della Rada, all'interno delle "aree prioritarie" (scelta presso il Pontile Solidi), e relativo prelievo dopo un periodo di n. 5 settimane;
- esecuzione di n. 2 cale di pesca, di cui n. 1 di riferimento, esterna alla Rada, per il prelievo di n. 3 specie di organismi bento-nectonici (triglia di fango - *Mullus Barbatius*, sarago - *Diplodus* sp.; boga - *Boops boops*).

I mitili sono stati campionati mediante operatore subacqueo. In ciascuna stazione sono stati selezionati un numero di individui pari a 30. Gli individui campionati sono stati puliti grossolanamente dai residui di sedimento, grossi filamenti e resti vegetali e successivamente posti in ambiente refrigerato, trasportati in laboratorio e lì processati. In laboratorio, gli organismi selezionati sono stati misurati e la loro parte molle è stata raccolta e suddivisa, per ogni stazione di prelievo, in n. 3 pool.

Per il reimpianto nella stazione interna alla Rada sono state prelevate dall'impianto selezionato due reste di mitili da 5 kg e sono state assicurate alla base di alcuni piloni del pontile Solidi. Da tali reste prima di procedere al reimpianto sono stati prelevati circa 30 esemplari, a costituire il campione cosiddetto "di riferimento".

Occorre precisare che il reimpianto (e quindi anche il prelievo del campione di riferimento) è stato eseguito per due volte, sempre nella stessa stazione, perché il primo campione, al termine della fase di stazionamento (6 settimane) non è stato più ritrovato. Per il secondo reimpianto i mitili sono stati raccolti dopo 5 settimane.



Il campionamento degli organismi bento-nectonici, stante l'indisponibilità *in situ* di barche attrezzate alla pesca allo strascico, è stato realizzato mediante reti di posta a maglia differente.

Le specie da analizzare sono state selezionate, sulla base dei criteri esposti nel piano di caratterizzazione, a valle della prima pescata. La pescata di "riferimento" è stata effettuata in località Golfo Xifonio.

Per ciascuna pescata sono stati raccolti un numero di circa 10-30 esemplari di ogni specie. Per ogni specie, gli esemplari sono stati misurati e suddivisi in n. 5 pool, posti in ambiente refrigerato, trasportati in laboratorio e lì processati. Dai pool così ottenuti sono stati ricavati a loro volta i pool di muscolo e fegato, prelevati da ciascun esemplare, sui quali sono state effettuate le analisi.

Sui campioni di organismi bivalvi (*Mytilus galloprovincialis*), sia nativi che trapiantati, sono state eseguite le seguenti analisi:

- Metalli ed elementi in tracce (As, Cd, Cr tot, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn);
- Policlorobifenili (PCB);
- Esaclorobenzene (HCB);
- Composti organoclorurati (Esaclorobutadiene, pp'-DDE)
- Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).

Sui campioni di muscolo e fegato prelevati dagli organismi bento-nectonici (triglia di fango - *Mullus Barbatu*s; sarago - *Diplodus* sp.; boga - *Boops boops*) sono state eseguite le seguenti analisi:

- Metalli ed elementi in tracce (As, Cd, Cr tot, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn);
- Policlorobifenili (PCB);
- Esaclorobenzene (HCB);
- Composti organoclorurati (Esaclorobutadiene, pp'-DDE)
- Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).

L'ubicazione delle stazioni prelievo degli organismi marini, ad eccezione della stazione di riferimento per gli organismi bivalvi, un allevamento sito in località Siracusa, è riportata in Figura 21. Le cale di pesca per il prelievo degli organismi bento-nectonici vengono indicate con la stazione di inizio ("i") e di fine cala ("f").

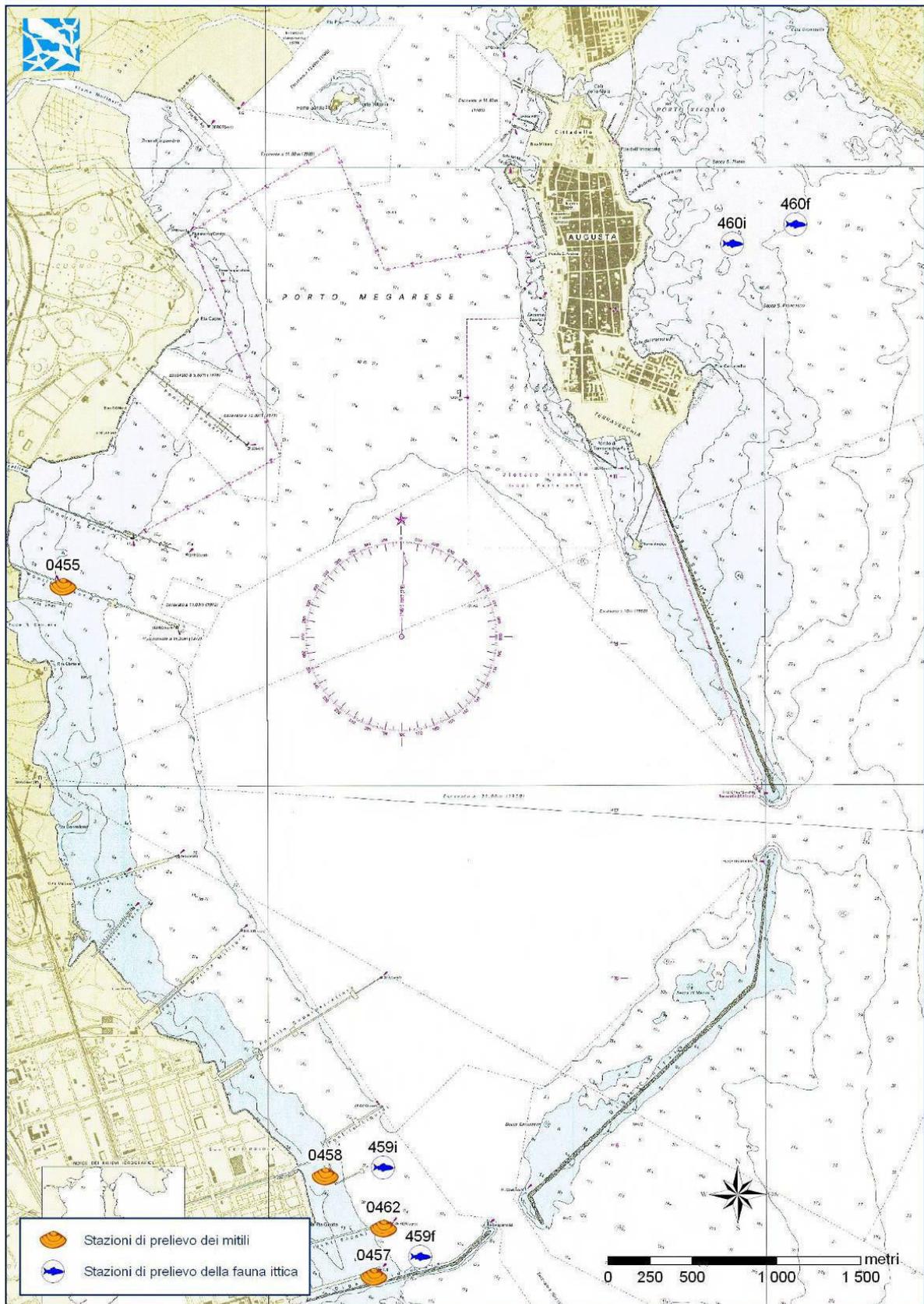


Figura 21: Ubicazione stazioni di prelievo degli organismi marini



5 CRITERI E METODI PER LA VALUTAZIONE E L'ELABORAZIONE DEI RISULTATI

5.1 Valori di concentrazione di riferimento dell'area

Al fine di valutare il grado di contaminazione dei sedimenti caratterizzati e la relativa pericolosità per l'ambiente acquatico circostante, è necessario fare riferimento a standard di qualità riconosciuti a livello nazionale ed internazionale. A tale scopo ICRAM ha ritenuto opportuno, in seguito a riunioni tecniche tenutesi presso la Direzione Qualità della Vita del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, confrontare i risultati delle attività di caratterizzazione con i livelli chimici di riferimento indicati in ambito internazionale per la salvaguardia dell'ambiente marino.

Nel caso di sedimenti di corpi idrici marino-costieri, contraddistinti da forti alterazioni causate da attività umana pregressa o attuale, il criterio adottato per la valutazione della qualità è quello di tipo ecotossicologico, che associa il grado di contaminazione all'eventuale effetto tossico nei confronti di organismi rappresentativi del corpo idrico.

I principi di tossicità ed ecotossicità costituiscono le basi scientifiche recepite nelle più importanti normative ambientali (Direttiva 76/464/CEE del 04.05.1976, Direttiva 2000/60/CE, Decreto Legislativo 11.05.1999), sanciti nella decisione n. 2455/2001/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 20.11.2001 in cui si individua una lista di 33 sostanze prioritarie per gli ambienti acquatici in Europa, sulla base di una procedura di valutazione di rischio per l'ambiente e la salute umana denominata COMMPS (*COmbined Monitoring-based and Modelling-based Priority Setting*) che ha tenuto conto dei seguenti aspetti:

- rischio intrinseco della sostanza interessata (ecotossicità acquatica, capacità di bioaccumulo, tossicità per gli esseri umani attraverso vie di esposizione acquatiche);
- dati sul monitoraggio dei sedimenti forniti dai 15 Stati Membri dell'Unione Europea;
- altri fattori indicativi del rischio di contaminazione ambientale, quali il volume di produzione e le modalità d'uso delle sostanze interessate.

L'integrazione chimico-ecotossicologica rappresenta, inoltre, il criterio di base per lo sviluppo dei diversi "Action Levels" adottati dai diversi paesi europei aderenti alla OSPAR Commission per la gestione dei sedimenti da dragare (OSPAR, 2004. Overview of contracting parties' national Action Levels for Dredged material, 22 pp).

In tale contesto l'ICRAM, misurandosi con i più accreditati e diffusi criteri internazionali per la gestione dei sedimenti da movimentare, di concerto con ISS, nell'elaborazione dei valori di intervento, ha "scelto" di fare riferimento ad una delle metodologie più seguite, ideata da Mac Donald e Long (Long *et al.*, 1995; MacDonald, 1994), definita dell' "approccio dei livelli di effetto". Tale metodologia associa statisticamente dati chimici e biologici per definire sia la concentrazione nel sedimento sotto il quale gli effetti si osservano raramente (TEL - *Threshold Effect Level*), sia la concentrazione sopra il quale gli effetti tossici sono frequentemente attesi (PEL - *Probable Effect Level*).



Tale metodo viene applicato diffusamente in molti Stati da diversi enti e agenzie internazionali, tra cui USEPA (U.S.A. Environmental Protection Agency), l'USACE (U.S.A. Army Corp of Engineers), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Ministero dell'Ambiente canadese, RIVM Institute olandese, etc. Nel caso specifico della valutazione di sedimenti contaminati si è ritenuto opportuno adottare, come criterio ecotossicologico di riferimento, il PEL (Probabile Effect Level), che rappresenta il livello chimico di un determinato contaminante al quale corrispondono con elevata probabilità effetti tossici nei confronti della vita acquatica. Il superamento di tale limite costituisce quindi un rischio per l'ecosistema acquatico.

Nell'individuazione dei valori di riferimento non ci si è limitati a riportare meramente i valori di riferimento di letteratura, ma si è cercato di adattarli alle realtà locali, soprattutto per quanto concerne i metalli pesanti, utilizzando dati sito-specifici sia per quanto riguarda le informazioni sulle caratteristiche chimiche che ecotossicologiche.

A tale scopo, nel corso delle diverse fasi di caratterizzazione eseguite dal Commissario Delegato per l'Emergenza Bonifiche e la Tutela delle Acque della Regione Siciliana all'interno della Rada di Augusta, ICRAM ha eseguito indagini integrative finalizzate ad ottenere informazioni di tipo chimico ed ecotossicologico, utili per l'elaborazione dei valori chimici di riferimento ai fini della bonifica.

Per quanto riguarda gli aspetti chimici sono state campionate ed analizzate in continuo n. 6 carote di sedimento per l'individuazione, seppur approssimativa, dei livelli di fondo di alcuni elementi in tracce di particolare rilievo per le caratteristiche geochimiche locali (cfr. par. 6.2.4).

Per ciò che concerne le caratteristiche ecotossicologiche, invece, la campagna di indagine eseguita da ICRAM ha previsto il prelievo e l'analisi di n. 12 campioni di sedimento superficiale, ubicati all'interno della Rada (Figura 22), sui quali sono stati condotti saggi biologici di tossicità acuta mediante il batterio marino *Vibrio fischeri* (applicato all'elutriato e alla fase solida privata dell'acqua interstiziale) e l'alga verde *Dunaliella tertiolecta* (applicata all'elutriato).

Sulla base delle informazioni derivanti da tali indagini e dall'integrazione con i dati presenti in letteratura nazionale ed internazionale (tra cui principalmente il manuale ICRAM sui dragaggi portuali) ICRAM ha definito i cosiddetti "valori di intervento", riportati in Tabella 7.

I valori di intervento sono stati presentati da ICRAM in sede di Conferenza di Servizi "istruttoria" del 18 luglio 2005 (doc. ICRAM # CII-Pr-SI-PR-valori intervento Rada-01.01) e relativamente ai quali la Conferenza di Servizi "decisoria" del 14 settembre 2005 ha formulato una presa d'atto.

Le sostanze prese in considerazione sono quelle di cui in Tabella 2 del D.M. n. 367 del 6 novembre 2003 (pubblicato in Gazzetta Ufficiale l'8 gennaio 2004), che fissa standard di qualità ambientale per i sedimenti, alle quali si è ritenuto opportuno aggiungere Rame, Zinco, composti organostannici e, nel caso specifico della Rada di Augusta, l'Esaclorobenzene (HCB), poiché indicatori di contaminazione di origine antropica. In particolare riguardo all'HCB, essendosi rivelato nell'area in questione un contaminante di particolare rilevanza ambientale, il corrispondente valore d'intervento è stato fissato pari a 5 µg/kg.



Le analisi ecotossicologiche, eseguite nel corso della Fase II di caratterizzazione dal Commissario Delegato per l’Emergenza Bonifiche e la Tutela delle Acque della Regione Siciliana, hanno permesso di confermare i valori d’intervento già precedentemente definiti.

BOI-PR-SI-PR-RADA

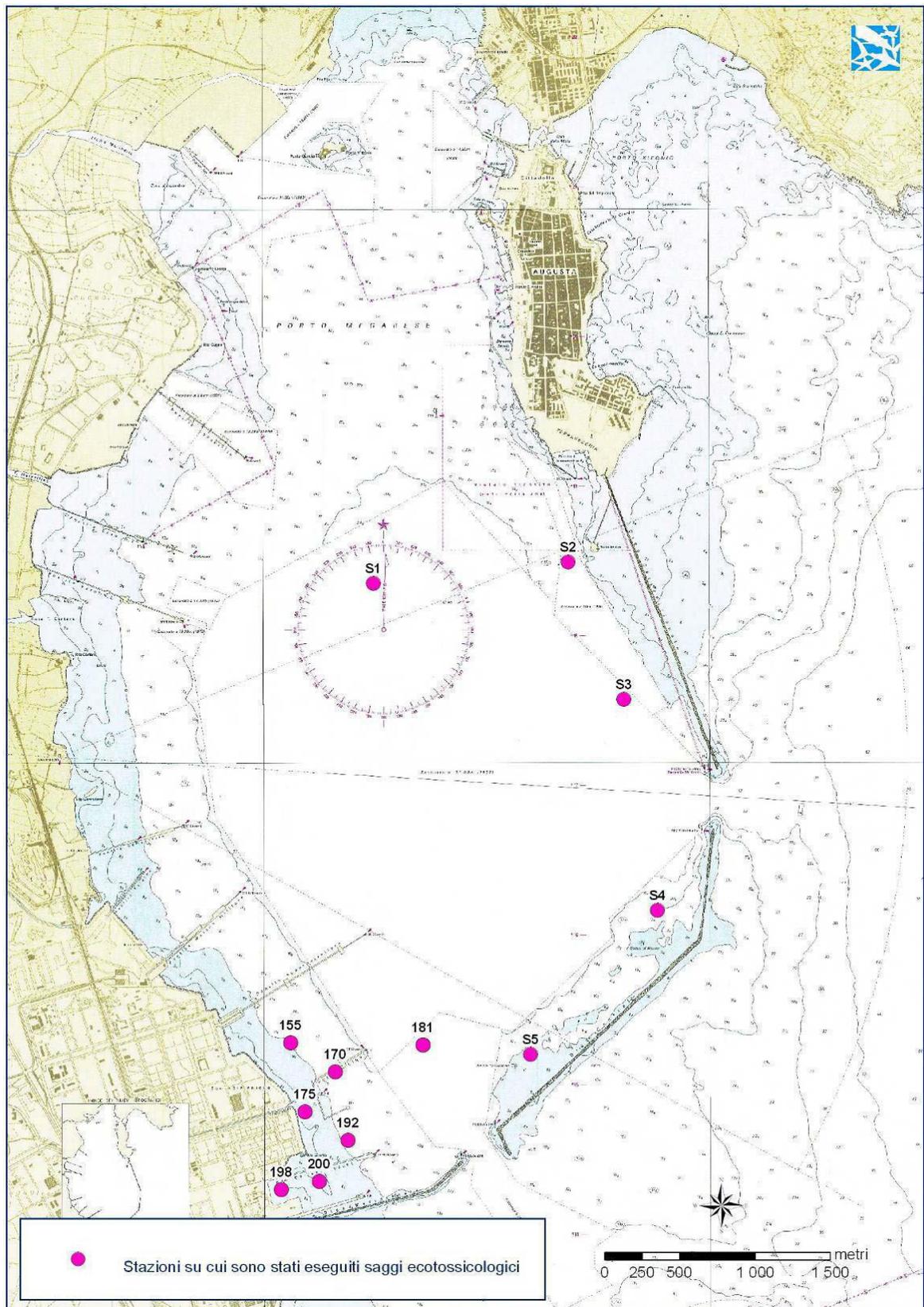


Figura 22: Ubicazione delle stazioni di campionamento per l'esecuzione di saggi ecotossicologici nel corso dell'indagine integrativa ICRAM



Tabella 7: Valori di intervento per il sito di bonifica di interesse nazionale di Priolo

NUMERO CAS		PARAMETRI	VALORI DI INTERVENTO
		Metalli	mg/kg s.s.
7440-38-2		Arsenico	32
7440-43-9	PP	Cadmio	1
7440-47-3		Cromo totale	150
7439-97-6	PP	Mercurio	1
7440-02-0	P	Nichel	63
7439-92-1	P	Piombo	80
		Rame	75
		Zinco	165
		Organostannici	µg/kg s.s.
	PP	Tributilstagno (Σ mono, di e tributil)	70 (Sn)
		Policiclici Aromatici	µg/kg s.s.
	PP	IPA totali	4000
50-32-8	PP	Benzo(a)pirene	760
120-12-7	P	Antracene	245
206-44-0	P	Fluorantene	1500
91-20-3	P	Naftalene	390
		Pesticidi	µg /kg s.s.
309-00-2		Aldrin	5
319-84-6	PP	Alfa esaclorocicloesano	1
319-85-7	PP	Beta esaclorocicloesano	1
58-89-9	PP	Gamma esaclorocicloesano lindano	1
		DDT	5
		DDD	5
		DDE	5
		HCB	5
60-57-1		Dieldrin	5
		Diossine e Furani	µg/kg
		Sommat. PCDD,PCDF e PCB diossina simili(T.E.)	30 X 10 ⁻³
<u>133-63-63</u>		PCB	µg/kg
		PCB totali	190



5.2 Metodologia di analisi dei dati di caratterizzazione e di stima dei volumi

Al fine di trasformare i dati puntuali acquisiti in informazioni di tipo tridimensionale, i risultati delle attività di caratterizzazione effettuate nella Rada di Augusta sono stati elaborati con diverse tecniche appartenenti a metodologie geostatistiche, al fine di ottenere le distribuzioni nello spazio dei diversi parametri di indagine.

Le aree caratterizzate da una differente densità di campionamento sono state trattate separatamente per rispettare, in fase di elaborazione, il diverso livello di informazione disponibile.

Per la stima della distribuzione nello spazio delle principali caratteristiche fisico chimiche dei sedimenti, sono state delimitate alcune aree, prevalentemente ubicate lungo la fascia costiera settentrionale della Rada di Augusta, dalla foce del fiume Mulinello fino alla Darsena Nuova, e lungo la fascia costiera occidentale, dall'area prioritaria settentrionale all'area prioritaria meridionale, che sono state discretizzate con griglie di celle di dimensione 50x50x0.5 m. La rimanente area centrale è stata discretizzata con una griglia con celle di dimensione 100x100x0.5 m. In Figura 23 vengono evidenziate le due tipologie di griglie adottate.

Per il solo calcolo dello strato campionabile della coltre sedimentaria è stata invece utilizzata per l'intera Rada una griglia con celle di dimensione 15x15 m (Figura 24).

Si precisa ad ogni modo che le stime riportate nel presente documento sono state effettuate con l'intento di ottenere una indicazione della distribuzione dei contaminanti all'interno dell'intera Rada di Augusta e di calcolare i volumi globali di sedimento contaminato da sottoporre a bonifica.

Ai fini della redazione di un progetto definitivo di bonifica su una specifica area, quindi, le elaborazioni di cui al presente progetto preliminare di bonifica potranno essere riconsiderate all'interno della singola area, utilizzando variogrammi elaborati specificatamente per tale area, individuando così con maggiore affidabilità i volumi di sedimento da bonificare.

Nel seguito verranno brevemente descritte le metodologie utilizzate per le diverse elaborazioni eseguite.

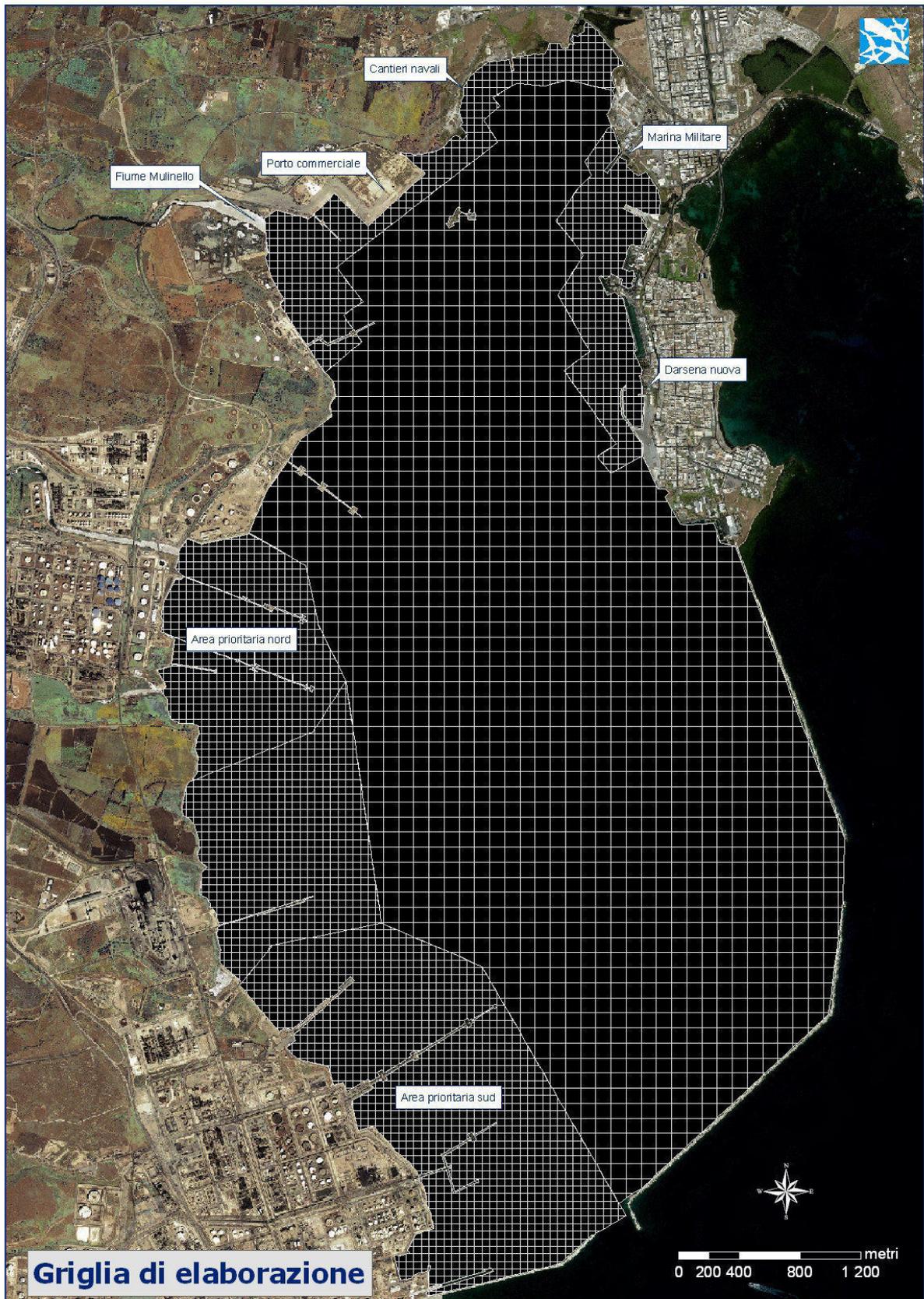


Figura 23: Griglie utilizzate per la discretizzazione delle aree oggetto di studio ai fini della stima della distribuzione spaziale delle principali caratteristiche fisico chimiche dei sedimenti

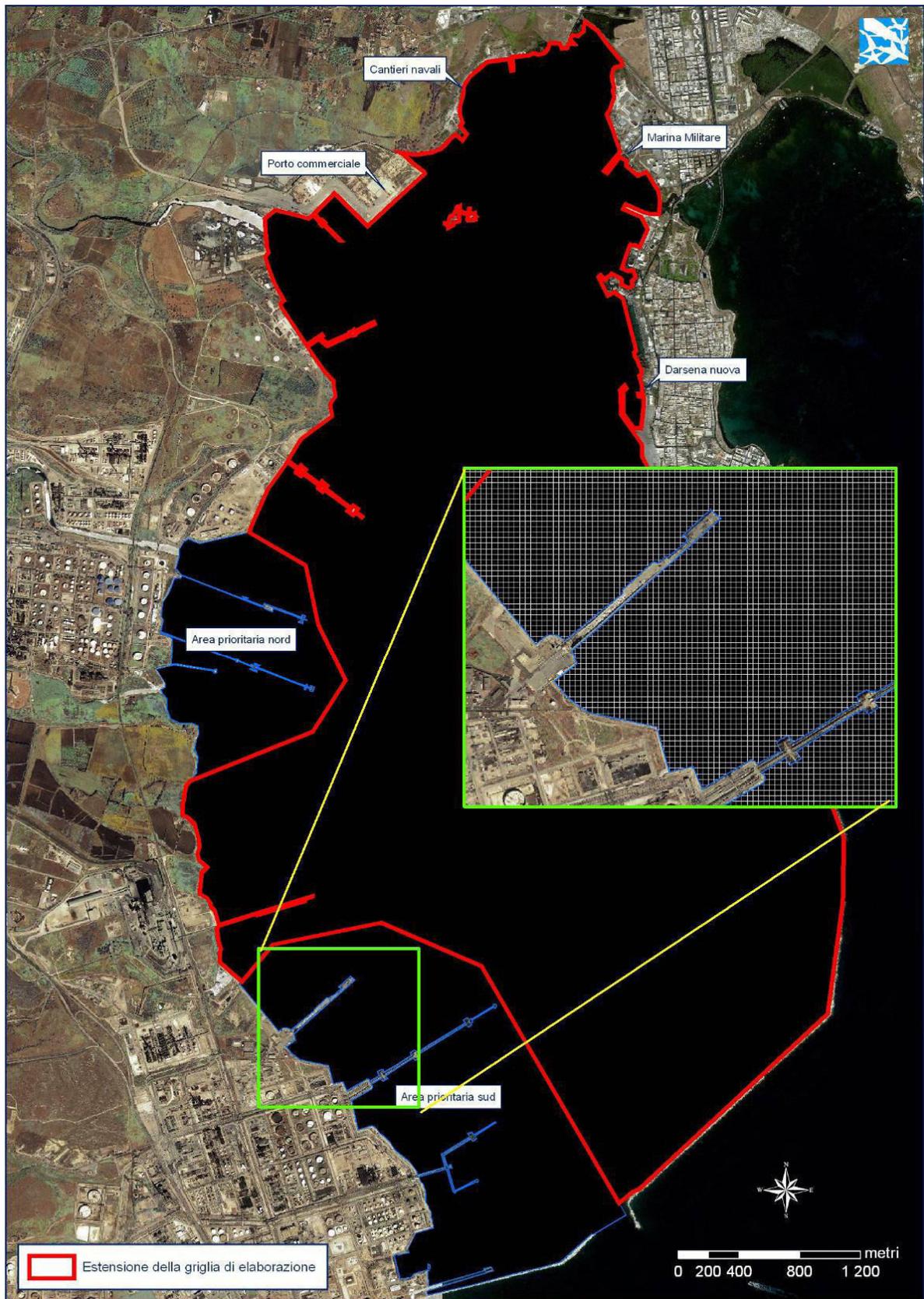


Figura 24: Griglie utilizzate per la discretizzazione delle aree oggetto di studio ai fini della stima dello strato campionabile della coltre sedimentaria



5.2.1 Determinazione dello spessore della coltre sedimentaria incoerente

Metodologia di interpretazione ed integrazione dei dati disponibili

L'obiettivo della presente attività, eseguita direttamente da ICRAM, è stato quello di determinare lo spessore della "coltre sedimentaria incoerente" definibile come sedimenti incoerenti più recenti che ricoprono un *substrato* non campionabile (costituito da roccia o argilla sovraconsolidata), all'interno del quale si considerano ridotte le probabilità di trasferimento verticale della contaminazione di tipo antropico.

Per la determinazione della "coltre sedimentaria incoerente" è stato necessario integrare le informazioni provenienti da indagini dirette, quali le stratigrafie dei singoli carotaggi, con quelle da indagini indirette, quali i rilievi geofisici eseguiti attraverso l'utilizzo di Sub Bottom Profiler (SBP), Side Scan Sonar (SSS) e Multibeam (MB). L'interpretazione dei dati disponibili ha permesso di ricostruire, con un buon grado di risoluzione, l'assetto geologico-stratigrafico dei sedimenti all'interno della Rada.

La metodologia utilizzata per l'integrazione dei dati disponibili è consistita nei seguenti passaggi:

- il posizionamento, lungo le linee sismiche eseguite, dei markers relativi ai singoli carotaggi effettuati in corrispondenza delle coordinate reali delle stazioni di carotaggio relative alle diverse fasi di campionamento, ad eccezione delle "aree prioritarie", per cui tali tracciati non erano disponibili. In tali aree si è proceduto al confronto tra le stratigrafie delle carote ed i relativi recuperi con l'elaborazione geofisica di substrato e morfologia eseguite in Fase I;
- l'individuazione, con l'ausilio della fotografia e della relativa descrizione stratigrafica, della corrispondenza tra gli orizzonti incontrati durante il carotaggio e la risposta sismica dei vari riflettori.

Tale metodologia ha permesso, con l'ausilio della fotografia e della relativa sezione stratigrafica, di individuare la corrispondenza tra gli orizzonti incontrati durante il carotaggio e la risposta sismica dei vari riflettori. E' stato così pertanto possibile, utilizzando il principio della continuità laterale, ricostruire l'assetto stratigrafico anche in aree non direttamente interessate dai campionamenti.

Le diverse facies interessate dai carotaggi e riconosciute nell'analisi delle sezioni sismiche possono essere così schematizzate, dal basso verso l'alto:

- un substrato duro, di natura prevalentemente rocciosa, ma anche argillosa molto compatta (argille sovraconsolidate);
- una coltre sedimentaria incoerente di spessore variabile;
- un livello superficiale dello spessore di pochi centimetri, fortemente idrato ed incoerente.

Il *substrato* non campionabile è stato raggiunto in diversi punti direttamente dai carotaggi ed è stato inoltre riconosciuto, grazie alla peculiare risposta sismica, su un'alta percentuale delle linee eseguite con SBP; esso è costituito da roccia che appare alterata e contornata da clasti e mattoni morti nella parte più superficiale. Le *argille sovraconsolidate*, invece, si rinvengono soprattutto nell'area occidentale della rada,



direttamente al di sopra della roccia; raggiungono spessori di 6-8 m e, quando presenti, costituiscono il riempimento di alcune delle aree più depresse del substrato roccioso.

La *coltre sedimentaria* incoerente è costituita da sabbie, sabbie-limose, limi-sabbiosi e limi; tale copertura poggia direttamente sul substrato roccioso o sulle argille sovraconsolidate e, nella parte centrale della rada, raggiunge spessori notevoli (12-14 m). Nelle sezioni sismiche esaminate sono individuabili, all'interno di tale copertura, diversi riflettori secondari, che probabilmente rappresentano locali variazioni granulometriche o di densità.

E' stata inoltre riscontrata la presenza, non continua e non sempre ben identificabile dalle sezioni sismiche, di un *livello superficiale*; questo è costituito per lo più da sedimento molto fine (limoso-argilloso), fortemente idrato ed incoerente e, in molti casi, caratterizzato da un forte odore di idrocarburi.

Una sintesi della sezione stratigrafica riconoscibile nella Rada di Augusta evidenzia (carta schematica):

- un substrato roccioso (Figura 25), che da profondità relativamente basse (20-30 cm o addirittura affiorante) nei pressi della linea di costa va approfondendosi verso l'area centrale della rada. Tale substrato appare molto irregolare, soprattutto nell'area sud-occidentale e sud-orientale, ed è caratterizzato da un'alternarsi di aree rialzate e depresse che hanno determinato un'estrema variabilità nella consistenza degli spessori sedimentari sovrastanti, che, infatti, anche a distanza di pochi metri tra loro, possono variare notevolmente (Figura 27);
- al di sopra del substrato, sia roccioso che argilloso, è presente una copertura sedimentaria (Figura 26), costituita da sedimenti prevalentemente sabbioso-limosi, con spessori variabili dai 12-14 m nel centro della rada, sino a scomparire del tutto nelle aree in cui il substrato affiora o è sub-affiorante, principalmente a ridosso delle scogliere e di alcuni pontili;
- al tetto della copertura sedimentaria, si riscontra saltuariamente la presenza di un orizzonte sedimentario limoso-argilloso altamente idrato ed incoerente; tale orizzonte non raggiunge mai spessori significativi (poche decine di cm) e, occasionalmente, è caratterizzato da un forte odore di idrocarburi.

Va comunque precisato che la fase di interpretazione ha comportato notevoli difficoltà, principalmente legate al particolare assetto geologico dell'area, quali ad esempio: la presenza di orizzonti discontinui e stratificazioni troncate di netto; la non facile identificazione delle caratteristiche litologiche del substrato; la non completa corrispondenza tra i punti di carotaggio e le linee sismiche effettuate; la non completa copertura di linee sismiche e di carotaggi; la presenza di aree con substrato fortemente irregolare e di zone dragate.

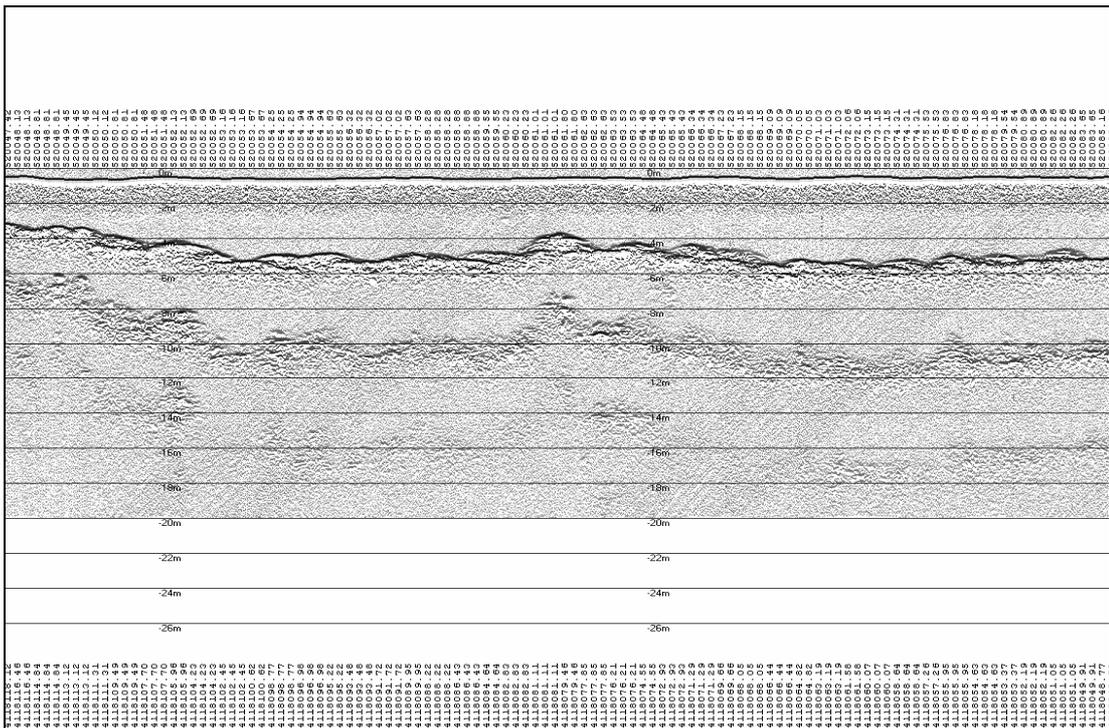


Figura 25: profilo sismico che evidenzia il substrato roccioso presente

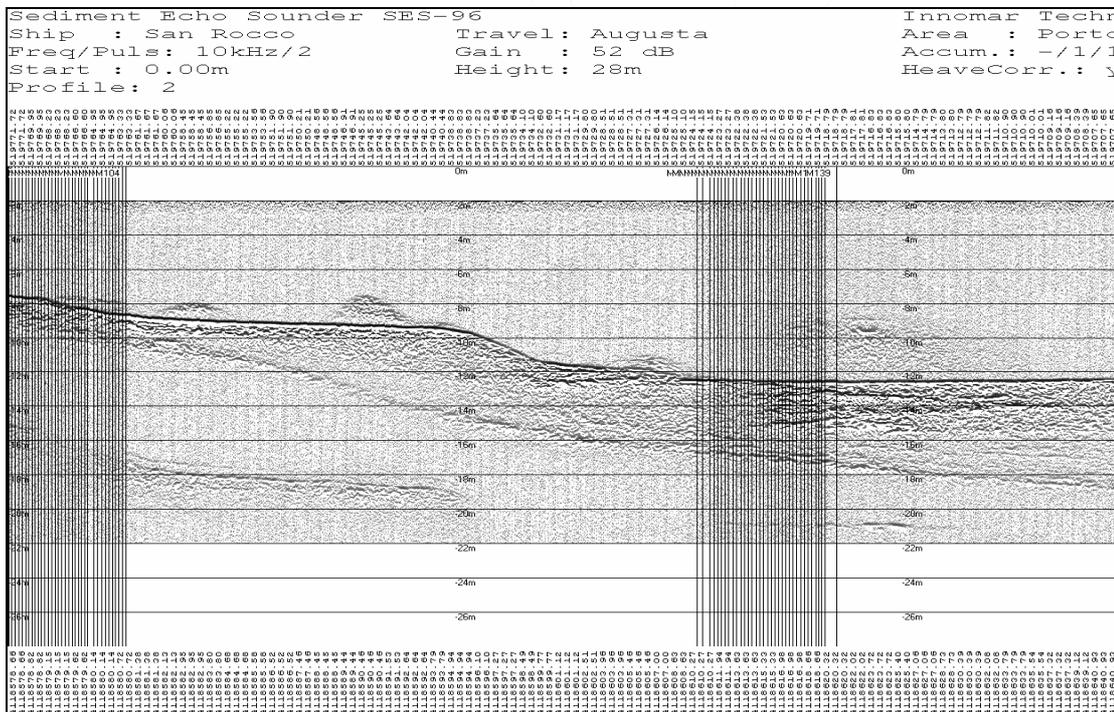


Figura 26: profilo sismico che evidenzia la coltre sedimentaria presente nella rada

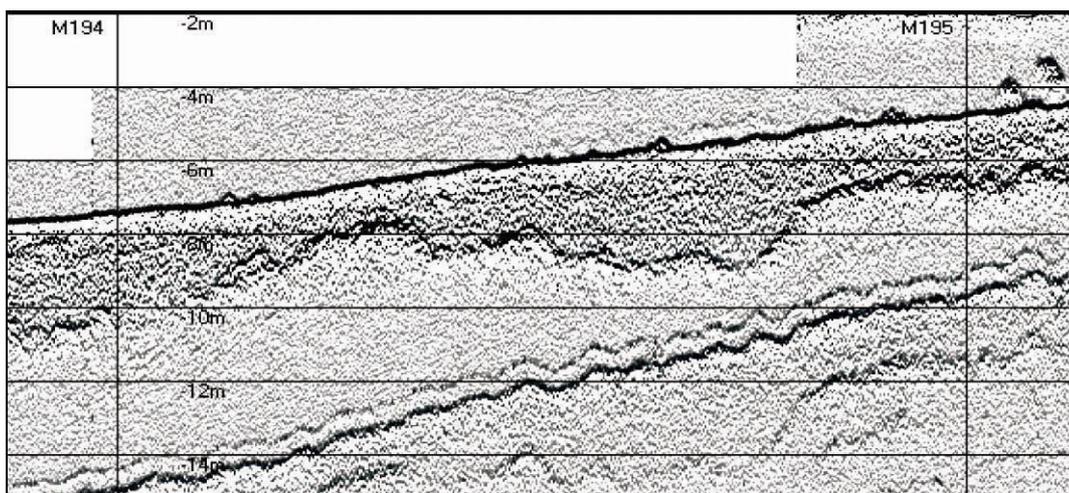


Figura 27: profilo sismico che evidenzia la presenza di sabbia nei vuoti del substrato roccioso

Ad ogni modo, alla luce della quantità e qualità dei dati esaminati, si ritiene che lo spessore della "coltre sedimentaria incoerente" sia stato determinato con un grado di precisione più che soddisfacente.

In generale, lo spessore della "coltre sedimentaria incoerente" così individuato (all'interno del quale è contenuto lo "strato caratterizzato" secondo il piano ICRAM) è stato discriminato con maggiore accuratezza laddove le indagini dirette hanno permesso di raggiungere il substrato. Nei casi, invece, in cui la profondità del riflettore, indicante il passaggio tra il substrato e la coltre sedimentaria, è stato individuato a profondità maggiori di quelle raggiungibili con i carotaggi, in livelli molto potenti e stratificati, o privi di una inconfutabile continuità laterale, la stima dello spessore della coltre sedimentaria è stata approssimata, in via del tutto cautelativa, per difetto.

Per tutta la Rada, sono inoltre stati considerati gli affioramenti rocciosi segnalati e cartografati dalle società esecutrici delle diverse fasi di caratterizzazione, nell'ambito delle attività di campo e dei rilievi geofisici eseguiti. Solo nell'area a ridosso della diga foranea orientale l'estensione del substrato affiorante potrebbe essere stata sottostimata, in quanto il suo andamento risulta particolarmente irregolare ed alcuni rilievi mostrano talvolta un ridotto dettaglio. Per questo settore, di circa 0.45 km², si è stimata la profondità della coltre sedimentaria considerando esclusivamente lo spessore di sedimento attraversato nelle stazioni PR01/736, PR01/302, PR01/732, PR01/293, PR01/725.

Metodo utilizzato per la stima dello spessore della coltre sedimentaria incoerente (Kriging con disuguaglianza)

I dati sullo spessore della coltre sedimentaria incoerente, derivati dalla fase di studio ed interpretazione delle linee sismiche e delle stratigrafie dei carotaggi, sono informazioni puntuali. Il substrato non campionabile è sempre presente al di sotto di quello campionabile, ma non sempre il carotiere o il SBP sono riusciti ad incontrarlo.



I dati relativi allo spessore dello strato campionabile si possono quindi dividere in due categorie:

- gli *hard data*, dove si conosce esattamente l'entità dello spessore
- ed i *soft data*, dove si conosce lo spessore minimo

Per la stima della carta dello spessore della coltre sedimentaria incoerente è stato quindi necessario elaborare sia i dati di spessore (*hard data*) che le disuguaglianze (*soft data*).

A tale scopo è stata utilizzata la metodologia del *kriging con disuguaglianze* che prevede due fasi consecutive di elaborazione:

- Sostituire le disuguaglianze con il valore atteso dello spessore della coltre sedimentaria incoerente in quel punto. Il valore atteso viene calcolato con la tecnica del Gibbs Sampler, che per ogni punto simula un certo numero di realizzazioni in accordo con il variogramma della variabile e condizionate ai valori degli *hard data* ed alle disuguaglianze.
- Stimare, tramite un *kriging* ordinario, una carta degli spessori della coltre sedimentaria incoerente utilizzando sia i valori misurati che quelli stimati a partire dalle disuguaglianze.

5.2.2 Stima delle concentrazioni (Block kriging)

Questo metodo, una variante del più noto *kriging* ordinario, utilizza il variogramma (modello tridimensionale della variabilità spaziale) per stimare la concentrazione media all'interno di un blocco, ovvero all'interno di ogni singola cella della griglia tridimensionale costruita nell'area di indagine. Per ottenere la concentrazione media all'interno dei blocchi ciascuno di questi viene discretizzato in un certo numero di blocchi più piccoli, in ognuno dei quali viene calcolata la concentrazione puntuale nel suo baricentro; l'insieme di tutte le concentrazioni ottenute viene poi mediato e costituirà la concentrazione media del blocco più grande.

Il vantaggio del *block kriging*, rispetto al *kriging* ordinario, consiste nell'ottenere delle stime più precise e, soprattutto, nell'associare al blocco un valore rappresentativo di tutto il suo volume e non solo del suo baricentro.

5.2.3 Stima delle frazioni granulometriche (Block Co-kriging)

Questo metodo permette di stimare contemporaneamente le percentuali delle diverse classi granulometriche (ghiaia, sabbia e pelite) rispettando in ogni punto il vincolo fisico che impone che la somma delle tre percentuali dia sempre cento.

Si costruiscono, preventivamente, i variogrammi diretti ed incrociati delle frazioni granulometriche, ovvero i modelli tridimensionali della variabilità spaziale delle percentuali dei passanti ai singoli vagli e delle loro correlazioni; una volta costruiti i variogrammi, questi vengono utilizzati per stimare, tramite il *block co-kriging*, le percentuali medie di ogni frazione granulometrica rispettando il vincolo imposto.