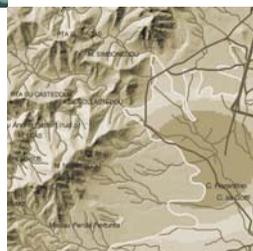




La salinizzazione dei suoli nelle piane agricole della Sardegna

DISTRIBUZIONE, INTENSITÀ E VALUTAZIONE DEL RISCHIO

a cura di R. Puddu, S. Fanni, S. Loddo, D. Manca



Agris

Agenzia Regionale per la ricerca scientifica
e l'innovazione in agricoltura



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

Agris

Agenzia Regionale per la ricerca scientifica
e l'innovazione in agricoltura



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

DIPARTIMENTO PER LA RICERCA NELLE PRODUZIONI VEGETALI - *Direttore Dott. Mario Lendini*
Servizio Studi ambientali e qualità delle produzioni - Settore scientifico Agronomia e Pedologia

Responsabile tecnico-scientifico
Rita Puddu

Rilevamento e campionamento
Stefania Fanni, Stefano Loddo, Daniele Manca, Massimo Melis, Rita Puddu

Elaborazione dati, testi e immagini
Stefania Fanni, Stefano Loddo, Daniele Manca, Rita Puddu

Sistema Informativo Territoriale
Stefano Loddo

Analisi di Laboratorio
Nicoletta Fadda (responsabile Laboratorio), Massimo Melis (referente Laboratorio per il progetto), Massimo Corda, Piergiorgio Lai, Alessandra Sanna, Francesco Sanna.

Collaborazioni specifiche
Applicazione tecniche geostatistiche: Anna Maria Castrignanò (CRA-ISAGRO di Bari), Emanuele Barca (CNR Bari).

Contributi
Dati catastali forniti dall'Agenzia LAORE - Dipartimento Produzioni Vegetali, Settore Pedologia Strati informativi C.T.R., DEM e CORINE LAND COVER forniti dall'Assessorato EE.LL, Finanza e Urbanistica, Servizio Informativo e Cartografico Regionale, Settore Cartografia Regionale Strato informativo Carta dell'indice di aridità fornito dal Consorzio SAR Sardegna srl, Settore Agrometeorologia

Ringraziamenti

Si ringraziano tutti i colleghi con i quali si è avuto un proficuo scambio di idee ed esperienze e per le utili conversazioni che hanno costituito un prezioso contributo per approfondire i temi trattati nel lavoro.

In particolare si ringraziano:

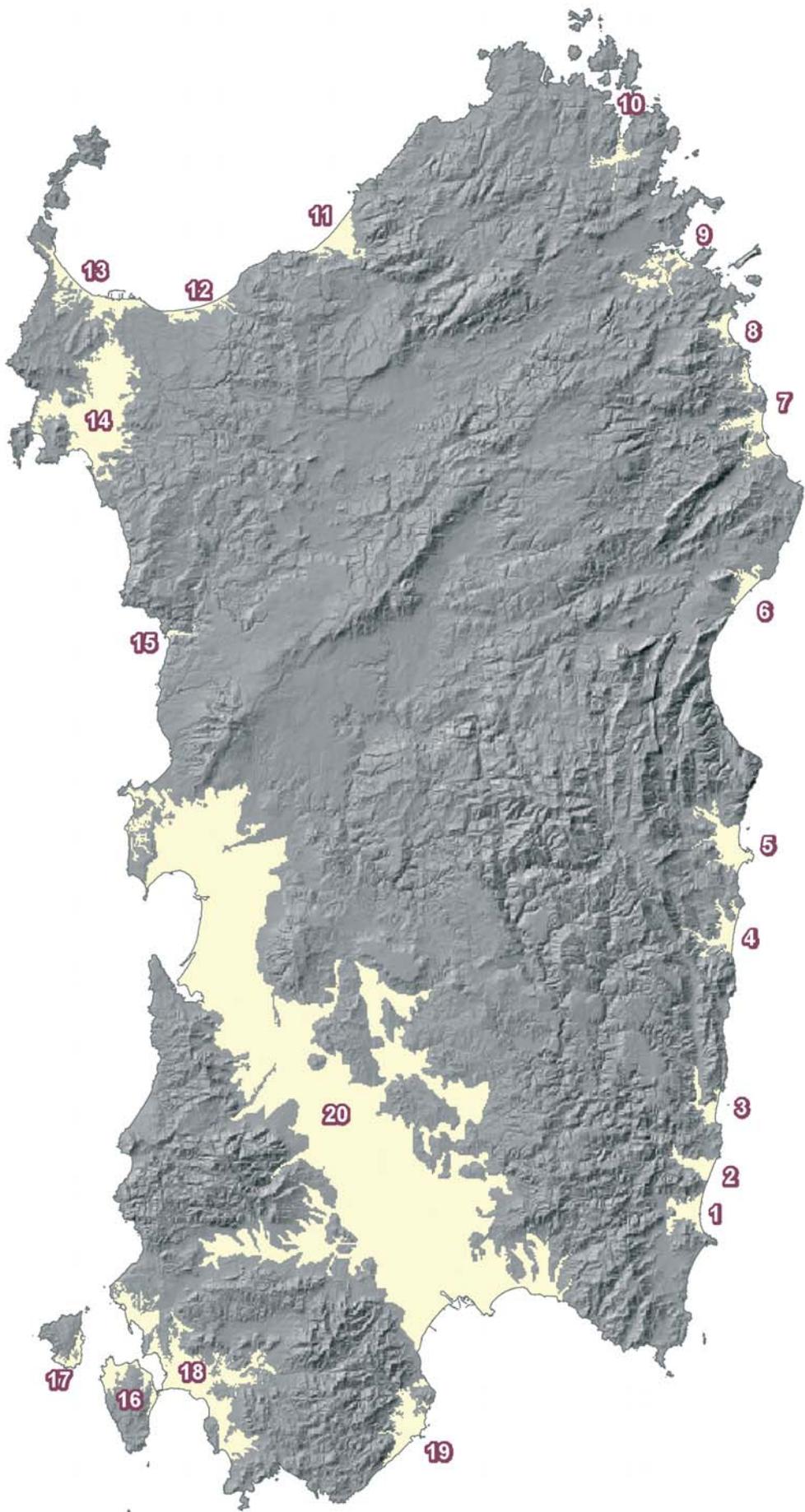
il Prof. Giorgio Ghiglieri del Dipartimento Ingegneria del Territorio dell'Università di Sassari e il Dr. Claudio Zucca del Nucleo Ricerca Desertificazione di Sassari per la disponibilità nel fornire le informazioni e i risultati degli studi effettuati in Nurra;

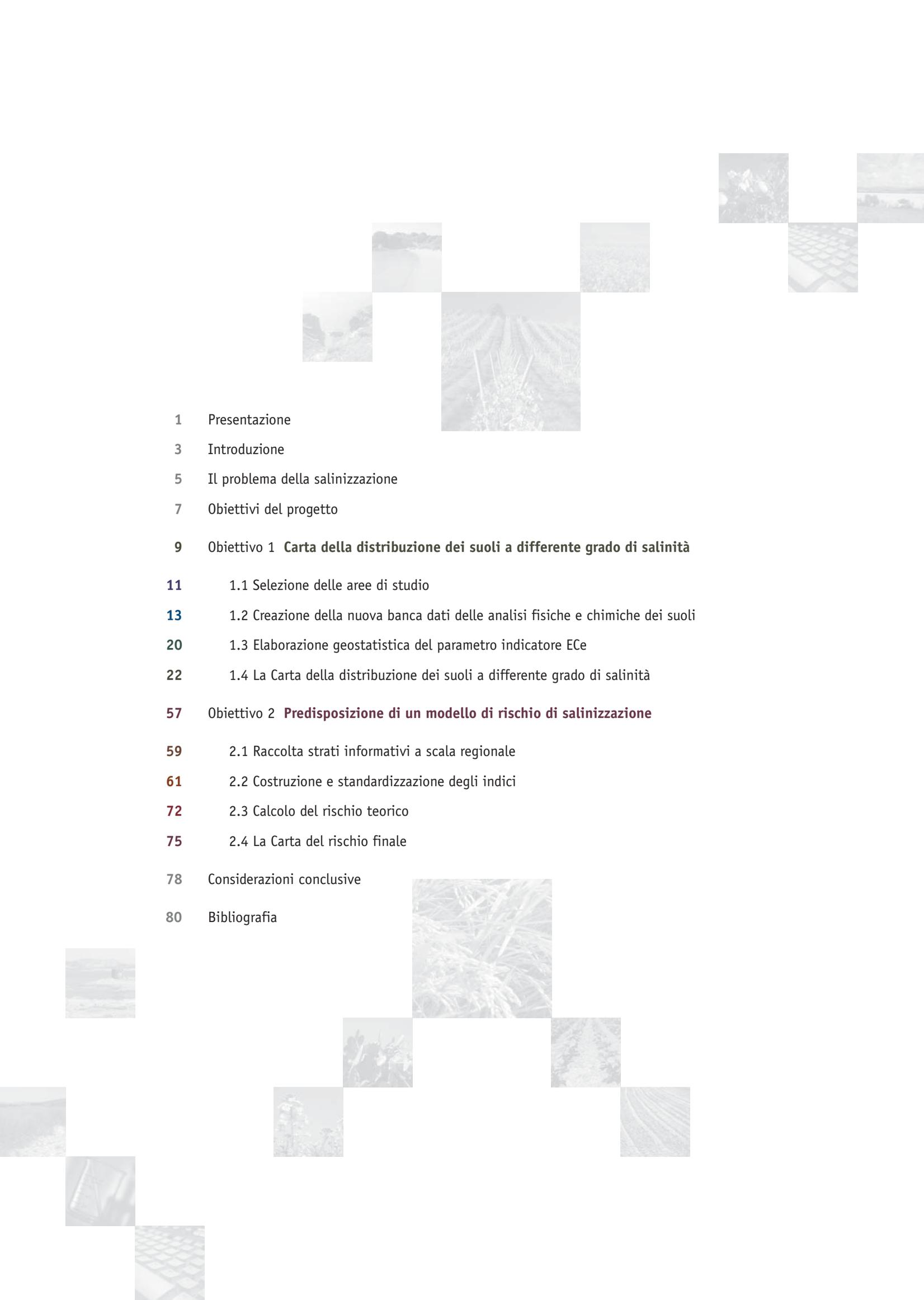
il Dr. Massimiliano Mameli del Dipartimento di Arboricoltura dell'AGRIS Sardegna, per gli scambi avuti su peculiari valutazioni di tipo agronomico;

la Dott.ssa Annamaria Repetto, coordinatrice del Settore Utilizzazione del Territorio dell'ex CRAS al momento dell'avvio di questo progetto, per la stima e la professionalità con cui ha sempre sostenuto il gruppo di lavoro durante lo svolgimento delle attività;

il Prof. Paolo Mattana della Facoltà di Economia dell'Università di Cagliari per il costante supporto offerto durante il trattamento dei dati statistici per il modello del rischio;

il Dr. For. Gianluca Serra del Servizio della sostenibilità Ambientale e Valutazione Impatti dell'Assessorato Difesa dell'Ambiente; grazie alle sue osservazioni qualunque "disquisizione pedologica" diventa sempre molto fruttuosa. Un grazie sincero, infine, al Prof. Angelo Aru per la lettura critica del lavoro, i suggerimenti e la grande esperienza che immancabilmente mette a disposizione.





1	Presentazione
3	Introduzione
5	Il problema della salinizzazione
7	Obiettivi del progetto
9	Obiettivo 1 Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità
11	1.1 Selezione delle aree di studio
13	1.2 Creazione della nuova banca dati delle analisi fisiche e chimiche dei suoli
20	1.3 Elaborazione geostatistica del parametro indicatore ECe
22	1.4 La Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità
57	Obiettivo 2 Predisposizione di un modello di rischio di salinizzazione
59	2.1 Raccolta strati informativi a scala regionale
61	2.2 Costruzione e standardizzazione degli indici
72	2.3 Calcolo del rischio teorico
75	2.4 La Carta del rischio finale
78	Considerazioni conclusive
80	Bibliografia

Presentazione

È passato mezzo secolo dall'inizio degli studi e ricerche sui suoli della Sardegna ad opera del Centro Regionale Agrario Sperimentale. Non è stato facile iniziare studi e ricerche sulla genesi dei suoli né tanto meno sulla sistematica per poi passare alle varie applicazioni.

Sino ai primi anni '60 e anche dopo, sembrava che le sole analisi chimiche, anche di routine, potessero risolvere i problemi relativi alla conoscenza dei suoli, alla loro variabilità spaziale e temporale e ai vari problemi di utilizzazione agricola o forestale.

Presso il Centro Regionale Agrario Sperimentale, oggi AGRIS, l'Ente Autonomo del Flumendosa, oggi ENAS, e successivamente presso le Università di Cagliari e Sassari, furono iniziati e portati a termine diversi lavori sia nel campo della ricerca che in quello dell'applicazione agraria ed ingegneristica. L'insegnamento universitario iniziò qualche anno più tardi, prima nel corso di laurea in Scienze Geologiche della Facoltà di Scienze M.F.N. dell'Università di Cagliari, e successivamente nella Facoltà di Agraria dell'Università di Sassari. Così cominciò una scuola di Pedologia in Sardegna con un modesto numero di allievi che è cresciuto nel tempo. Fra questi allievi tre sono gli autori di questo interessante lavoro: Rita Puddu, Stefano Loddo e Stefania Fanni.

L'evoluzione scientifica e tecnologica impone nuove metodologie come quelle applicate nel loro lavoro per affrontare un grande problema italiano, mediterraneo e mondiale ossia quello della salinizzazione e della definizione di un modello del rischio di tale fenomeno.

Sin dagli anni '90, nell'ambito del progetto dell'Unione Europea sulla desertificazione nel Mediterraneo, a cui hanno partecipato Rita Puddu e Stefano Loddo, il problema della salinizzazione ha avuto un ruolo importante sia nello studio dei processi che in quelli di lotta e tutela.

Dai risultati ottenuti non sembrerebbe che il problema sia di grande rilevanza in Sardegna, ma se si rapporta alle aree di interesse, ossia le superfici pianeggianti, il rischio assume un'importanza ben più elevata.

Il modello presentato in questa sede non solo costituisce un momento importante per la conoscenza, ma segna una tappa per la sua applicazione ad area vasta e in riferimento ad altri problemi ambientali della Sardegna e del Mediterraneo, in particolare per le risorse ambientali non facilmente rinnovabili, come i suoli e le acque.

Sono sicuro che l'AGRIS, insieme all'Agenzia LAORE e all'ENAS, con la collaborazione anche delle due Università sarde, potrà colmare quelle lacune sulla conoscenza dei processi pedologici e delle metodologie di studio per soddisfare le esigenze dell'Isola e per diventare un esempio per tutto il Mediterraneo.

Angelo Aru

Professore Ordinario di Geopedologia
Università di Cagliari



Introduzione

Il progetto che presentiamo costituisce il compendio delle attività svolte nel biennio 2006-2007, come gruppo di lavoro di Pedologia e del Laboratorio di analisi fisico-chimiche dell'AGRIS, sulla tematica della salinizzazione dei suoli in aree agricole e costiere.

Con alcuni progetti preliminari a scala locale, avviati nel 2000 e incentrati sulla verifica dell'estensione e diffusione dei suoli salini nei territori agricoli di Muravera, Arborea e Decimoputzu, abbiamo iniziato ad affrontare il problema di come valutare, a fini cartografici, un fenomeno di cui non è mai stata quantificata in Sardegna l'incidenza in termini areali e di intensità, seppure notoriamente presente e ricorrente in molte pianure agricole irrigue.

La nutrita bibliografia consultata su questo argomento e i diversi esempi di modellizzazione del rischio proposti dalle varie comunità scientifiche nazionali e internazionali a cui abbiamo fatto riferimento, ci hanno indotto a estendere i nostri studi e le informazioni acquisite con le precedenti esperienze a tutto il territorio regionale, partendo dalla constatazione che le conoscenze sulla salinizzazione dei suoli in Sardegna sono sempre state riferite a poche situazioni locali e conseguentemente molto frammentarie.

Oltre a ciò, la scarsità di misure ben distribuite nell'intero territorio regionale ha portato, in alcuni casi, a una eccessiva teorizzazione del fenomeno cosicché le stime effettuate sull'estensione dei suoli salini in Sardegna sono state sinora basate sulla somma delle superfici in cui è "probabile" che si verifichino problemi di salinizzazione (per un riscontro oggettivo dei fattori potenziali di rischio) ma non necessariamente confortate da dati reali di salinità misurati.

Il nostro primo obiettivo è stato perciò quello di realizzare una cartografia che quantificasse l'estensione dei suoli salini e l'intensità della manifestazione nelle aree agricole più importanti, al fine di fornire un dato ufficiale sulle proporzioni del fenomeno a scala regionale.

La *Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità della Sardegna* rappresenta, in tal senso, un documento inedito di cui la Regione Sardegna disporrà per un'ulteriore conoscenza del proprio territorio, soprattutto a fini pianificatori e di programmazione delle attività produttive, grazie anche alle ampie opportunità di collegamento con le banche dati e i Sistemi Informativi Geografici predisposti dalle diverse amministrazioni per la stesura dei piani regionali (Piano Paesaggistico, Piano di Sviluppo Rurale, ecc.).

A completamento del lavoro, infine, abbiamo impostato un *Modello di calcolo del rischio di salinizzazione* utilizzando, in un primo momento, la *Carta* come documento di verifica del modello stesso e, successivamente, come livello informativo essenziale per il calcolo definitivo del rischio.

Sviluppato come obiettivo secondario in seno al progetto, e qui esposto nelle sue linee metodologiche principali, il *Modello* vuole rappresentare un utile strumento di analisi della problematica *salinizzazione* che potrà essere applicato, grazie alla possibilità di essere arricchito con nuovi dati, a studi di maggior dettaglio in territori più circoscritti.

Rita Puddu



Il problema della salinizzazione

La salinizzazione è un processo di degrado dei suoli ampiamente studiato dalla comunità scientifica internazionale per le importanti implicazioni riconosciute oramai non solo in campo agronomico ma a livello ambientale *tout court* (Monteleone, 2006). La salinizzazione è soprattutto

un problema di desertificazione, che si realizza e acuisce in particolar modo nelle regioni a clima arido e semi-arido con manifestazioni e intensità diversamente apprezzabili.

Il fenomeno consiste nel progressivo accumulo di sali solubili nel suolo. Può essere distinto in due tipi: salinità primaria, di origine naturale, e salinità secondaria, indotta dall'uomo attraverso pratiche agricole non adeguate e un uso del territorio non sostenibile (irrigazione con acque non idonee, abuso di concimi minerali, eccessivi emungimenti dalle falde, cementificazione degli alvei, ecc.).

I processi di accumulo si manifestano in particolar modo nelle piane agricole costiere, che per loro natura risultano sensibili a fenomeni di ingressione marina, ma anche in molte pianure agricole irrigue interne dove il rischio di salinizzazione è di norma dovuto all'utilizzo di acque di scarsa qualità, spesso aggravato dalla presenza di suoli con proprietà che limitano una buona lisciviazione dei sali, come la presenza di orizzonti impermeabili e la sfavorevole posizione fisiografica.

La salinizzazione si manifesta attraverso la riduzione della biodiversità, lo sviluppo stentato delle coltivazioni e, più in generale, con la riduzione della fertilità del suolo e delle produzioni agrarie.



◀ Foto 1. **Serdiana - Su Staini Saliu**

Stagno interno alla fine della stagione estiva in cui i processi di salinizzazione primaria sono al culmine per la forte evaporazione in atto.

▼ Foto 2. **Villaputzu**

Suoli agricoli in area costiera interessati da salinità primaria. L'accumulo superficiale dei sali è dovuto alla risalita capillare favorita da una falda salmastra poco profonda.





Foto 3. Sestu ▲



Foto 4. Villaputzu ►

Esempi di salinizzazione secondaria. Le pratiche agricole adottate, come l'uso eccessivo di concimi minerali (Foto 3) e l'irrigazione a goccia con acque saline (Foto 4) causano il progressivo accumulo di sali in superficie.

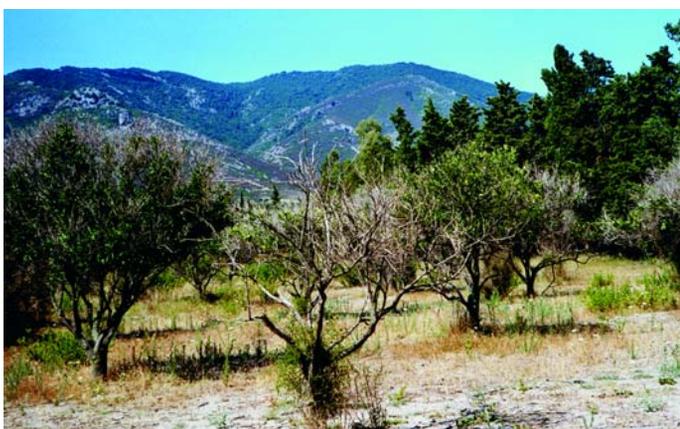


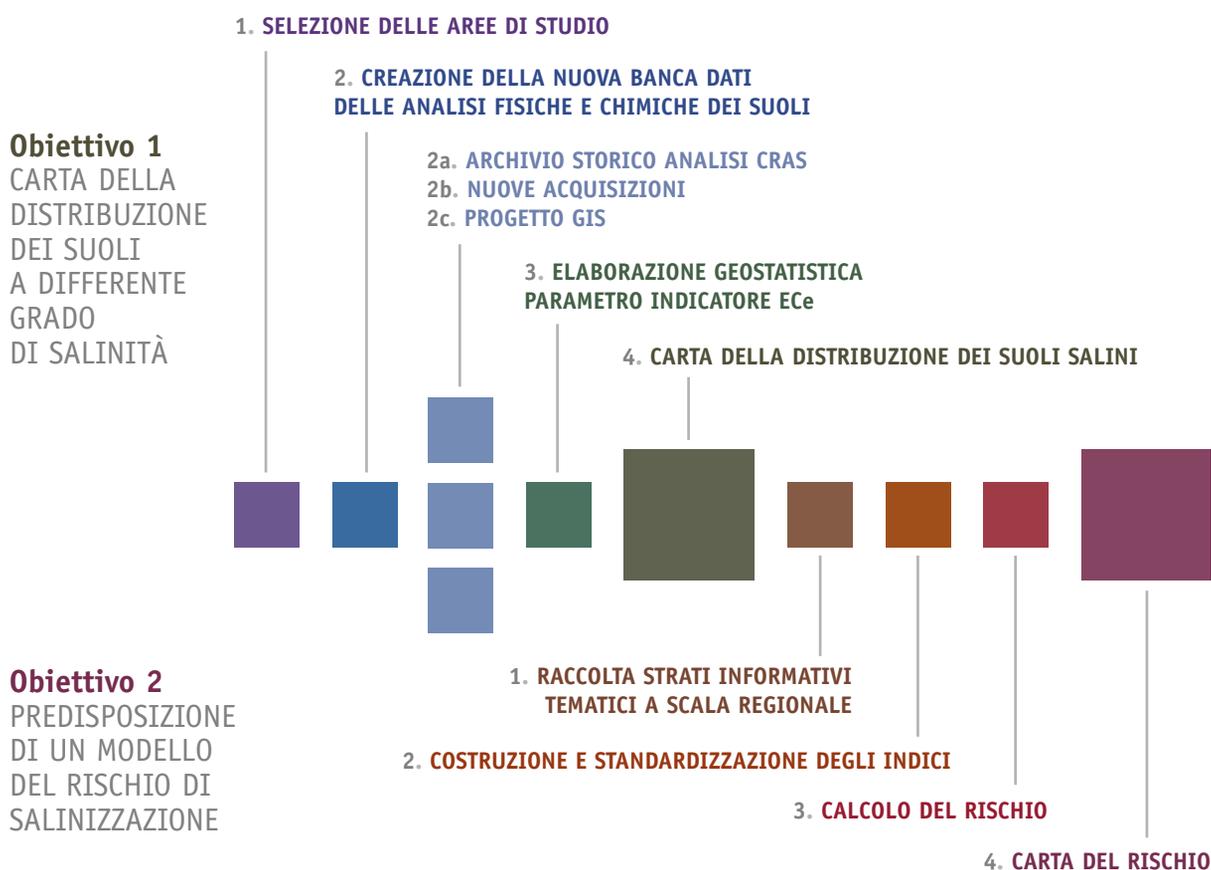
Foto 5 e 6. Muravera
Aree agricole in stato di abbandono per problemi di salinità.

Obiettivi del progetto

- 1) REALIZZAZIONE DELLA **CARTA DELLA DISTRIBUZIONE DEI SUOLI** A DIFFERENTE GRADO DI SALINITÀ NELLE AREE AGRICOLE DELLA SARDEGNA
- 2) IMPOSTAZIONE DI UN **MODELLO DI CALCOLO DEL RISCHIO** DI SALINIZZAZIONE

La Carta della distribuzione dei suoli salini ha rappresentato il tematismo preminente dell'intero progetto ed è stata propedeutica alla procedura utilizzata nella predisposizione del modello del rischio di salinizzazione per il quale è stata impiantata una base logica di strati informativi da inserire in un GIS, di cui la carta stessa rappresenta il tematismo più importante.

Le fasi operative sono state articolate, e di seguito descritte, secondo questo schema:



1. Selezione delle aree di studio

Lo studio è stato condotto sulle porzioni del territorio regionale in cui l'assetto orografico e ambientale costituiscono "fattori predisponenti" all'insorgere dei processi di salinizzazione; le aree di indagine selezionate, pertanto, sono state circoscritte attraverso la combinazione di due

vincoli morfologici ritenuti idonei a delimitare le superfici con maggior grado di esposizione al rischio di salinizzazione e a rappresentare, al tempo stesso, una sufficiente variabilità pedologica e d'uso agricolo del suolo. Tali vincoli sono una quota massima di 100 metri sul livello del mare e una classe di pendenza compresa tra lo 0 e il 2%.

Con questi criteri sono state delimitate le 20 aree di indagine riportate in **figura 1**. Su di esse sono stati pianificati ed eseguiti 431 nuovi campionamenti di suolo ed effettuate le analisi di laboratorio a integrazione di quelle già esistenti. Complessivamente i dati analitici utilizzati sono stati 1547, distribuiti su una superficie di quasi 250.000 ettari (**tabella 1**).

Dato il carattere regionale dello studio, la definizione del numero dei nuovi punti di prelievo e della loro distribuzione nel territorio è stata basata sulla scala di riconoscimento, o generalizzata, 1:250.000.

In particolare si è tenuto conto:

- 1) delle indicazioni della FAO (FAO, 1985), che dettano il numero minimo di osservazioni alle diverse scale di rilevamento;
- 2) del posizionamento dei dati analitici già disponibili;
- 3) dell'estensione delle aree di indagine;
- 4) della necessità di ottenere una distribuzione ottimale dei punti ai fini dell'elaborazione geostatistica.

Tabella 1
Aree di studio, superfici indagate e numero di dati utilizzati. Le superfici si intendono al netto delle tare morfologiche e antropiche (specchi d'acqua, piccoli rilievi isolati, insediamenti urbani e industriali, infrastrutture varie).

ID	AREE DI STUDIO	Superficie in ettari	Numero di campioni	
			nuovi prelievi	dati esistenti
1	S. Priamo	1.722	13	11
2	Muravera – Villaputzu – S. Vito	1.509	-	230
3	Quirra	1.265	15	9
4	Barisardo	2.239	12	92
5	Tortolì	3.350	15	60
6	Orosei	1.266	15	21
7	Posada	2.209	10	42
8	Budoni – San Teodoro	1.270	13	-
9	Olbia	2.325	13	1
10	Arzachena	1.282	9	2
11	Valledoria	2.866	15	1
12	Sorso	1.490	12	22
13	Porto Torres – Stintino	2.639	17	-
14	Nurra	18.623	72	-
15	Bosa	165	7	5
16	Isola di S. Antioco	2.121	13	8
17	Isola di S. Pietro	592	20	5
18	Basso Sulcis – P.ta de S'Aliga	12.212	38	21
19	Pula	3.468	10	5
20	Campidano – Cixerri – Marmilla	184.531	112	581
	TOTALE	247.144	431	1116

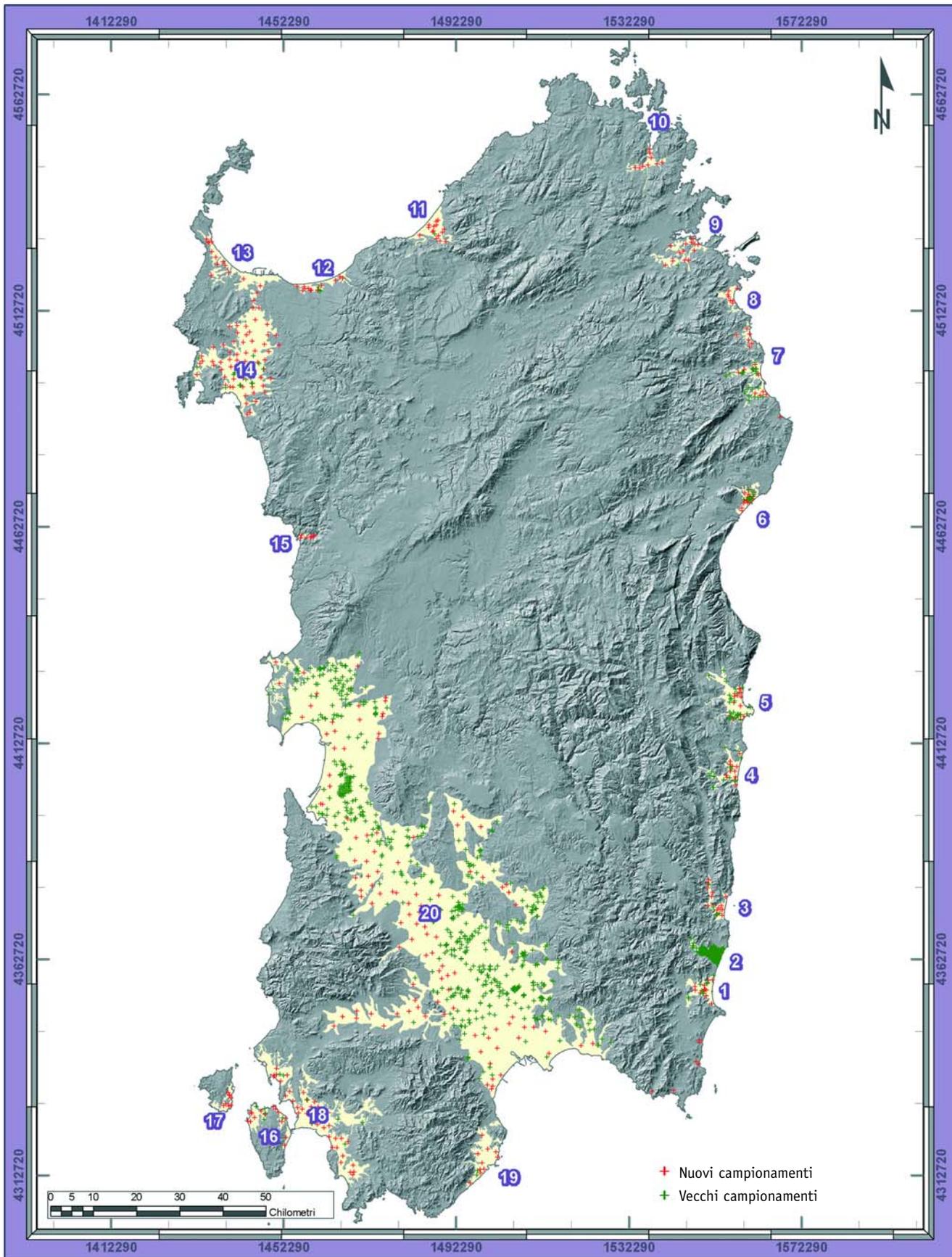


Figura 1 Aree di indagine e punti di campionamento

2. Creazione della nuova banca dati delle analisi fisiche e chimiche dei suoli

2a. ARCHIVIO STORICO ANALISI

Il laboratorio di analisi chimico-fisiche del Dipartimento Produzioni Vegetali dell'AGRIS ha maturato, in oltre 30 anni di attività, una notevole

esperienza nelle analisi dei suoli, delle acque e delle piante, fornendo una media di circa 4000 analisi all'anno. Le analisi sono state prodotte soprattutto per conto di operatori dell'assistenza tecnica agli agricoltori, di varie istituzioni universitarie e dei ricercatori della Agenzia stessa.

Nel corso degli anni i risultati analitici sono stati organizzati secondo differenti sistemi di archiviazione informatica, sempre associati a un certificato d'uscita in formato cartaceo. Più precisamente una prima forma di archiviazione è avvenuta su server SUN® in ambiente UNIX® su database ORACLE®, a cui è succeduta, a partire dall'anno 2000, una semplice archiviazione su foglio elettronico Excel®.

Per la costituzione di una nuova banca dati, funzionale al Sistema Geografico Informativo gestore della cartografia dei suoli salini, si è dovuto affrontare preliminarmente la verifica di tutte le determinazioni analitiche sui suoli prodotte per le più svariate richieste (analisi per piani di concimazione, analisi per studi pedologici in senso stretto, analisi di controllo e monitoraggio, ecc.) e successivamente lavorare sull'armonizzazione dei dati differenzialmente archiviati. È stata poi avviata la progettazione di un nuovo modello logico di database, da cui poter estrarre facilmente i parametri specifici utilizzabili per la carta.

Una prima organizzazione è stata fatta con l'omologazione dei dati a uno stesso formato tabellare su foglio elettronico



Excel®, includendo tutti i tipi di analisi svolte, da quelle cosiddette "di routine" (granulometria, pH, basi di scambio, macroelementi, ecc.) a quelle derivate da specifiche richieste (pF, microelementi, metalli pesanti, ecc.).



Contemporaneamente si è verificata l'attinenza delle metodiche analitiche in relazione agli standard ufficiali attualmente adottati, effettuando la necessaria conversione o trascrizione dell'unità di misura di talune determinazioni a un unico sistema di riferimento (es. da % a g/kg, mmhos/cm a dS/m e così via).

I dati così riuniti in un'unica tabella sono stati poi selezionati, in funzione della loro esclusiva utilità al progetto, secondo i seguenti criteri:

- a) *rintracciabilità del campione nel territorio regionale*: in mancanza di un riferimento alla località di prelievo (assenza di coordinate catastali e/o geografiche) il dato è stato automaticamente escluso dal database;
- b) *campionamenti effettuati in pieno campo*: tutte le analisi sui suoli campionati in serra sono state riorganizzate in uno specifico database, ma non contemplate nelle valutazioni per questo progetto;
- c) *età delle determinazioni analitiche*: le analisi antecedenti al 1997 non sono state incluse nella banca dati in quanto non archiviate elettronicamente; la Carta pertanto è stata elaborata sui dati relativi al decennio 1997-2006.



2b. NUOVE ACQUISIZIONI

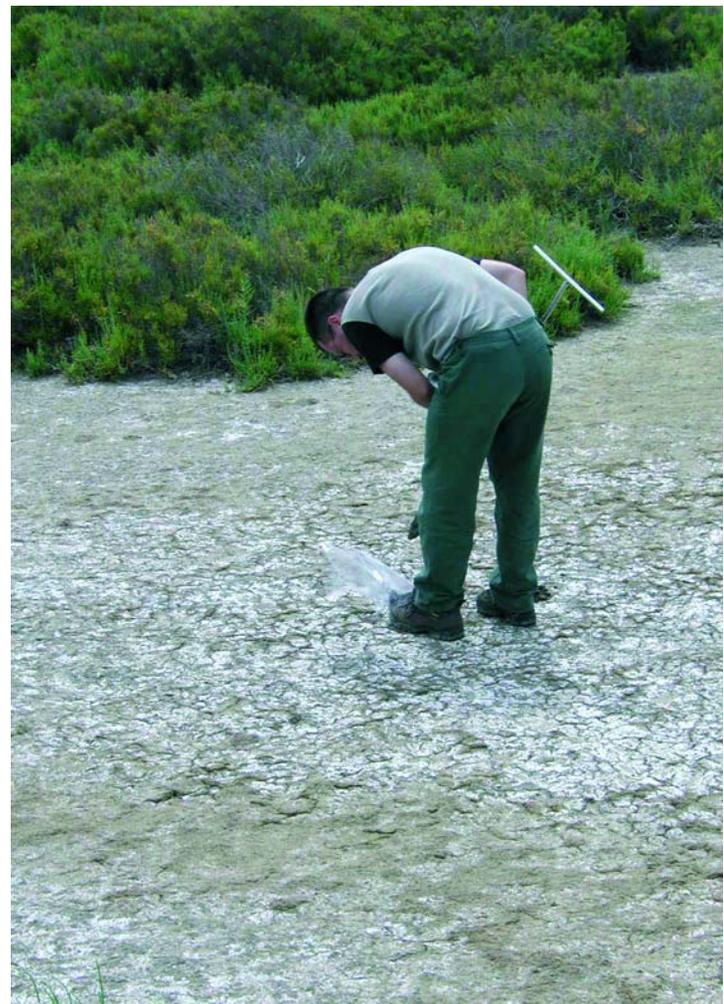
L'indagine sul fenomeno, condotta con campionamenti eseguiti mediante trivella a mano di tipo Edelman, ha interessato esclusivamente lo spessore del top soil (profondità media di 40 cm), in quanto corrispondente allo strato arabile dei suoli agrari esplorato dalle radici della maggior parte delle piante.

I punti di prelievo sono stati georeferenziati con un GPS portatile in coordinate UTM-WGS84, poi convertite in UTM Gauss-Boaga tramite il software *Traspunto*.

Sebbene l'ubicazione dei punti sia stata individuata preliminarmente alla fase di campionamento per ottenere una distribuzione spaziale omogenea ai fini dell'elaborazione geostatistica, si è talvolta reso necessario correggerne la posizione sul campo, in funzione dell'accessibilità ai campi e dell'uso del suolo presente al momento del campionamento; quando è stato possibile si è comunque preferito operare sempre in presenza di usi agricoli. Nelle piane costiere, al fine di stimare l'influenza sul processo di salinizzazione della variabile "distanza dalla costa e dagli specchi d'acqua salini", sono stati effettuati dei campionamenti lungo i bordi degli stagni o all'interno delle aree palustri, per la presenza di suoli a elevato contenuto naturale in sali, anche se privi di interesse agricolo.

I campioni infine sono stati consegnati in laboratorio per l'esecuzione delle analisi fisico-chimiche, eseguite in accordo con i "Metodi ufficiali di analisi chimica e fisica del suolo" del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (Pagliai, 2001).

Ad analisi concluse, i dati sono stati immessi nel database secondo le regole di armonizzazione e omologazione precedentemente predisposte per l'archivio storico del laboratorio.





Alcuni momenti
del campionamento



2c. PROGETTO GIS

Per sviluppare il progetto cartografico con il GIS è stato necessario convertire tutti i riferimenti catastali, contenuti nei certificati di analisi dell'ex CRAS, nelle loro corrispondenti coordinate geografiche puntuali (centroidi) secondo il datum ROMA40, ossia il sistema di riferimento con cui è georeferenziata la maggior parte della cartografia in Italia e, in particolare quella disponibile per la Sardegna.

La conversione delle informazioni geografiche dal formato Cassini-Soldner, tipico delle informazioni cartografiche catastali, al ROMA40 con coordinate Gauss-Boaga è un tema ampiamente dibattuto nell'ambito delle problematiche cartografiche¹.

Per la Sardegna le informazioni disponibili per la georeferenziazione dei centroidi dei mappali catastali nel datum ROMA40 sono piuttosto scarse. L'unica indicazione è rappresentata dal catasto olivicolo e viticolo creato dall'AIMA negli anni '90 e disponibile in Sardegna presso l'ente di sviluppo agricolo LAORE. Il lavoro dell'AIMA contiene, in formato raster, tutti i fogli catastali della Sardegna e le informazioni numeriche sulle coordinate dei centroidi dei mappali in appositi file di testo.

Con lo scopo di ottenere uno shape file di punti a partire da queste informazioni, i file di testo sono stati processati e filtrati tramite un software originale appositamente progettato in Visual Basic® in occasione di questo lavoro. Le informazioni sulla localizzazione dei centroidi (coordinate X e Y), sul Comune di appartenenza (codice ISTAT) e sul foglio e mappale catastale sono state estratte con una procedura semiautomatica assistita dall'operatore e inserite all'interno di un database relazionale in formato .mdb di Access®. In questo modo è stata ottenuta l'informazione della posizione geografica dei mappali, organizzata secondo una chiave univoca costituita dal Codice ISTAT del Comune, dal numero del foglio catastale e dal numero del mappale catastale.

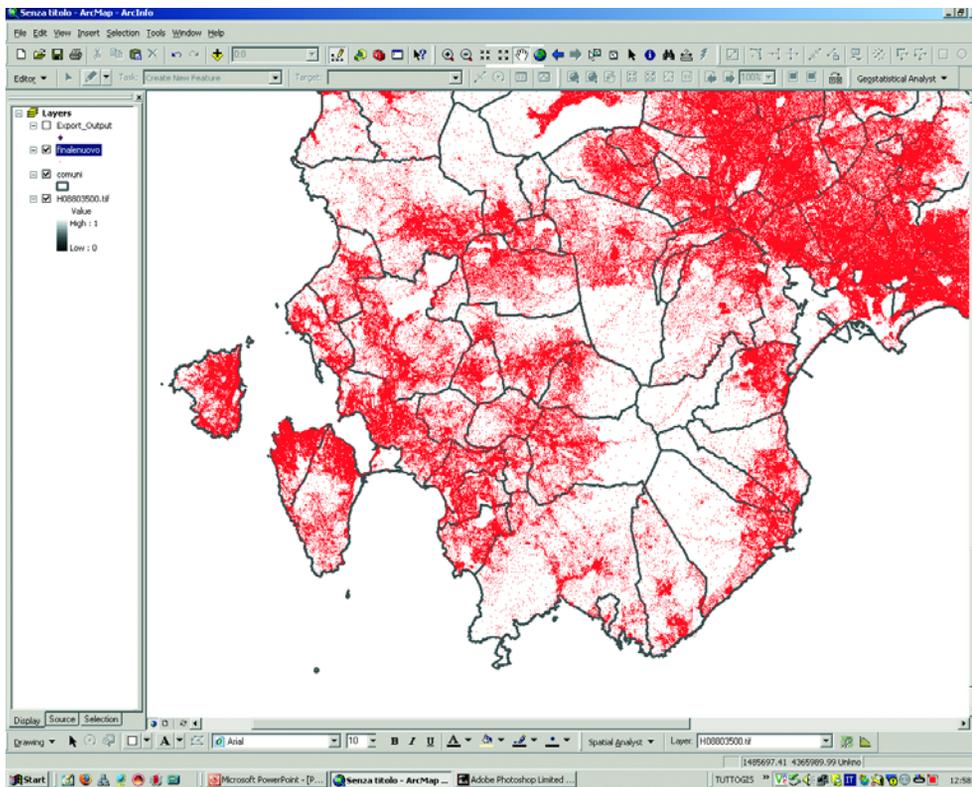
Il database relativo ai centroidi è stato quindi convertito in uno shape file costituito da circa 2 milioni e 600 mila punti, ognuno rappresentativo di un mappale catastale della Sardegna (**figura 2a**).

Le difficoltà incontrate sono state notevoli, in primo luogo legate alla numerosità dei punti da generare e quindi alla dimensione e gestione dello shape file risultante e, in secondo luogo, legate al problema della numerazione dei fogli e dei mappali, che nel tempo è cambiata diverse volte in funzione dell'evoluzione del frazionamento fondiario.

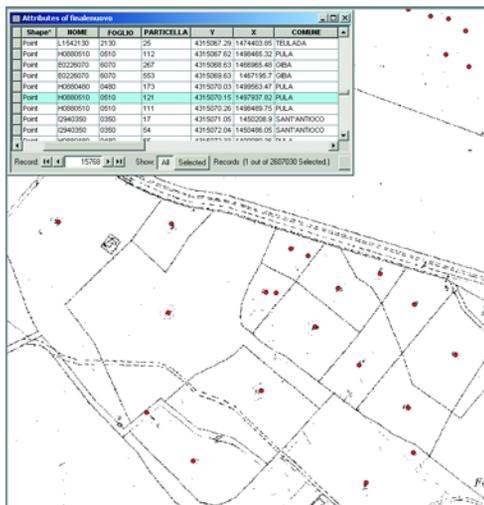
Allo stesso modo le analisi chimiche dei suoli estratte dal database ORACLE® sono state controllate e omologate. Anche per questo livello informativo è stata creata una chiave univoca di relazione uguale alla precedente (codice ISTAT – n. Foglio – n. Mappale).

Grazie alla presenza di questi campi comuni, la tabella delle analisi e quella dei dati catastali sono state collegate per generare una terza tabella dove compaiono le informazioni analitiche relative alle chiavi univoche comuni. Questa tabella è stata importata in ambiente GIS e, in funzione delle coordinate Gauss Boaga in essa contenute, è stato generato uno shape file di oltre 2300 certificati di analisi chimico-fisiche dei suoli (**figura 2b**).

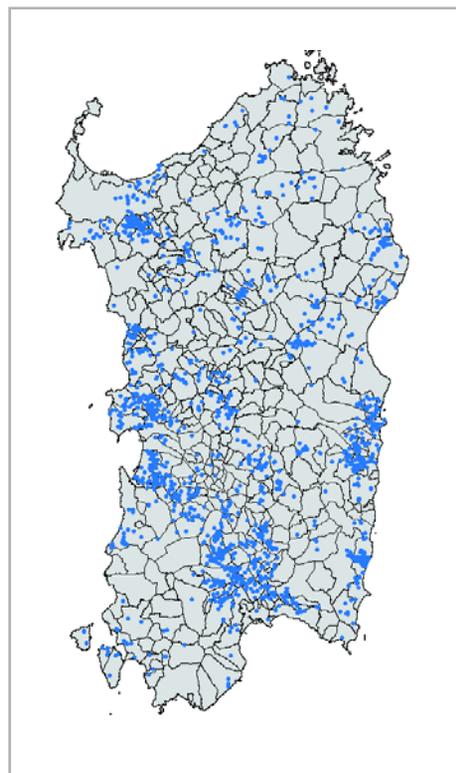
¹ Si tratta di due modi differenti di rappresentazione di uno spazio curvo (porzioni di superficie della Terra) su un foglio di carta piano (la mappa vera e propria). Il Sistema Catastale Italiano si riferisce alla rappresentazione della Terra secondo un Ellissoide di riferimento (Ellissoide di Bessel) differente, come forma e misure, dall'ellissoide di riferimento utilizzato dal sistema Gauss-Boaga (Ellissoide Internazionale di Hayford).



◀ **Figura 2a**
Stralcio dello shape file derivante dalla georeferenziazione in Gauss Boaga dei 2.600.000 centroidi del catasto AIMA



▲ **Dettaglio della Figura 2a**
Nuovo database dopo il processing in Visual Basic® contenente i dati catastali associati ai relativi centroidi attraverso la chiave univoca



▶ **Figura 2b**
Shape file delle 2300 analisi agganciate

SCELTA DEL PARAMETRO INDICATORE

Comunemente viene definito salino un suolo che contiene lo 0.1 - 0.2% di sali solubili, criterio che risulta piuttosto impreciso poiché non dà indicazione sulla concentrazione della soluzione del suolo a diretto contatto con le radici, che è a sua volta funzione della quantità d'acqua presente. Le variazioni del contenuto idrico del suolo influenzano sensibilmente non solo la concentrazione, ma anche la composizione chimica della soluzione e gli equilibri fra gli ioni in soluzione e quelli legati in forma scambiabile alla fase solida. Si sceglie quindi di esprimere la salinità non come percentuale in peso di sali solubili (TDS), ma come concentrazione della soluzione del suolo determinata dalla misura della sua conducibilità

elettrica dell'estratto in pasta satura (Electrical Conductivity Extract, o ECe), espressa in dS/m a 25°C. Questo parametro risulta ben correlato sia alla concentrazione salina che alla pressione osmotica della soluzione circolante del suolo. All'aumento della concentrazione delle soluzioni corrisponde, infatti, un aumento della pressione osmotica per cui, oltre un certo valore, le piante non sono più capaci di assorbire acqua e si comportano come se fossero in condizioni di aridità. In aggiunta all'effetto osmotico le piante, di fronte ad elevate concentrazioni di particolari specie ioniche, sono soggette a squilibri nutrizionali, che comportano conseguentemente uno sviluppo stentato, manifestazioni di tossicità, diminuzione delle produzioni e in casi estremi alla morte delle piante (Aringhieri, 1999).

Secondo l'U.S. Laboratory Staff, e in senso strettamente pedologico, un suolo è classificato come salino quando la sua conducibilità elettrica è superiore a 4 dS/m, il pH è minore di 8 e la percentuale di Sodio di scambio (ESP) è minore di 15.

Il limite di 4 dS/m per la conducibilità elettrica assume un significato agronomico importante in quanto rappresenta il livello di salinità a cui la crescita e lo sviluppo di un gran numero di colture, tra le più comuni, comincia ad essere influenzato negativamente.

La **tabella 2** riporta i limiti di tolleranza delle principali colture agrarie in condizioni di massima produzione potenziale; per incrementi di poche unità di conducibilità si registrano, per quasi tutte le colture indicate, riduzioni della produzione anche del 25% (FAO, 1988).

Alla luce di quanto esposto, la rappresentazione della variabilità spaziale della salinità nelle aree indagate è stata espressa come variazione di Conducibilità Elettrica dell'estratto in pasta satura, da ora in poi citata come ECe.

COLTURE DA PIENO CAMPO	ECe (dS/m)
orzo	8.0
barbabietola	7.0
sorgo	6.8
grano duro	5.7
riso	3.0
mais	1.7
fava	1.5
fagiolo	1.0
COLTURE ORTICOLE	ECe (dS/m)
zucchini	4.7
bietola da orto	4.0
pomodoro	2.5
ceetriolo	2.5
sedano	1.8
cavolo	1.8
patata	1.7
peperone	1.5
lattuga	1.3
cipolla	1.2
fragola	1.0
carota	1.0
COLTURE FORAGGERE	ECe (dS/m)
orzo da foraggio	6.0
loietto	5.6
festuca	3.9
veccia	3.0
medica	2.0
mais da foraggio	1.8
trifoglio alessandrino	1.5
trifoglio pratense	1.5
COLTURE ARBOREE	ECe (dS/m)
olivo	2.7
pompelmo	1.8
arancio	1.7
limone	1.7
pesco	1.7
pero	1.7
melo	1.7
noce	1.7
albicocco	1.6
mandorlo	1.5
susino	1.5
vite	1.5

Tabella 2

Soglia di tolleranza alla salinità del suolo di alcune specie di interesse agrario per la Sardegna in condizioni di massima produzione potenziale

PRINCIPI GENERALI DELLA GEOSTATISTICA

Le metodologie della statistica spaziale, o geostatistica, si rivelano in genere molto efficaci per la stima di variabili la cui natura è intrinsecamente territoriale, consentendo la creazione di mappe di stima in punti non monitorati. Infatti, mentre l'analisi statistica tradizionale esplora i dati svincolandoli dalla loro localizzazione nello spazio, con la geostatistica si attua una rappresentazione cartografica di dati rilevati, da cui emergono raggruppamenti geografici spontanei indicanti aree con differenti valori della variabile considerata.

Il contributo principale della geostatistica è quello di aver messo a punto una procedura basata sul concetto classico della regressione lineare e di averla adattata alla trattazione di problemi in cui il fattore chiave è rappresentato dalla dipendenza spaziale fra i dati; l'assunto di base è che i valori dell'attributo oggetto dello studio non sono distribuiti casualmente nello spazio, ma variano con continuità e sono tra loro dipendenti (o autocorrelati), altrimenti espresso, secondo la prima legge della geografia di Tobler, come *"le cose più vicine sono più simili rispetto alle cose più lontane"*. La continuità spaziale è, in tal senso, un riflesso di tutti i processi che avvengono nell'ambiente.

Nell'applicare la geostatistica agli studi ambientali, quale nel caso specifico la rappresentazione della variabilità dei suoli salini nel territorio, si deve necessariamente affrontare il problema di come massimizzare la verosimiglianza del campo spaziale indagato, e ricostruito in carta, rispetto alla realtà. È necessario, in pratica, trovare il metodo più idoneo per ottimizzare la stima nei punti non campionati partendo dalle caratteristiche di *unicità* e *non-ripetitività* dei dati misurati.

La stima avviene attraverso l'utilizzo di opportuni interpolatori che permettono di ottenere restituzioni grafiche a vario grado di accuratezza in funzione del numero e della distribuzione dei punti misurati.

Le tecniche tradizionali di interpolazione spaziale offerte dalla geostatistica sono diverse (spline, inverso del quadrato della distanza, natural neighbor, ecc.) e tutte possono rappresentare un buon strumento interpretativo della variabilità di un fenomeno. Queste però non permettono di verificare l'errore della predizione nei punti non campionati, e il grado di incertezza sui valori stimati è pesantemente condizionato dalla quantità di dati sperimentali disponibili e dalla diversità dei valori assoluti associati.

Solo la tecnica del *kriging*, permette di valutare la varianza di stima (*error kriging*), in altri termini l'affidabilità della carta, ma la possibilità del suo utilizzo è necessariamente subordinata al possesso di un'elevata quantità di dati misurati.

ELABORAZIONE GEOSTATISTICA DELLA VARIABILE "ECe"

In funzione della scala di rilevamento, della superficie indagata e della diversa numerosità di punti misurati a disposizione per ciascuna delle 20 aree, sono state applicate due differenti tecniche geostatistiche: il *kriging* e *l'Inverso del Quadrato della Distanza (IDW)*.

Poiché l'abbassamento dell'errore di stima presuppone una numerosità di dati misurati molto alta, il *kriging* è stato utilizzato solo nelle aree in cui questo requisito era garantito:

3. Elaborazione geostatistica del parametro indicatore ECe



- 1) nella piana di Muravera-Villaputzu-S. Vito perché si disponeva di una elevata quantità di dati derivati dagli studi pregressi;
- 2) nella Nurra perché la sua estensione, in rapporto alla scala utilizzata, ha consentito di raggiungere un numero adeguato di campioni;
- 3) nel Campidano-Cixerri-Marmilla perché si disponeva già di un elevato numero di analisi d'archivio e l'ampliamento del data-set con i nuovi prelievi ha permesso di ottenere un'ottimale distribuzione dei campioni sul territorio.

L'estensione delle altre aree non ha permesso di utilizzare la stessa tecnica a causa di un insufficiente numero di dati imposto dalla scala di rilevamento 1:250.000; l'elaborazione spaziale è stata in questi casi ottenuta attraverso l'IDW.

In sintesi, tutte le aree trattate con la tecnica del *kriging* rappresentano una "media" del fenomeno e nella mappatura i punti caposaldo (realmente misurati) sono anch'essi mediati. Il grado di precisione della stima nei punti non misurati è risultato così molto elevato ma, al tempo stesso, si è persa l'informazione del valore campionato.

Con l'IDW, al contrario, si è mantenuto il valore "vero" nei punti campionati ma la stima dell'interpolazione nei punti ignoti soffre di un maggior grado di errore.

In ogni caso, entrambe le tecniche hanno permesso di valutare con buona approssimazione la variabilità territoriale della salinizzazione e sono risultate soddisfacenti, in relazione alla scala adottata, per delineare aree omogenee per espressione del fenomeno².

² Le elaborazioni geostatistiche col *kriging* sono state condotte con l'ausilio del software *Isatis*® della Geovariances, in collaborazione con i ricercatori del CRA-ISAGRO di Bari; le elaborazioni geostatistiche con l'IDW delle restanti aree e il pre-processing di tutti i dati georeferenziati sono state invece elaborate dal gruppo di Pedologia dell'AGRIS tramite lo *Geostatistical Analyst* di *ARCMAP*® di ESRI.

La variabilità spaziale del fenomeno “salinizzazione” nelle aree agricole della Sardegna è stata formulata come variabilità del parametro Conducibilità Elettrica dell’estratto in pasta satura (ECe) nello strato superficiale del suolo. Il territorio indagato è stato discretizzato in 10 classi di ECe, con intervalli variabili in funzione della risposta produttiva alle variazioni di conducibilità delle colture agrarie più diffuse in Sardegna.

Poiché la maggior parte delle colture può subire sensibili riduzioni di produzione anche per variazioni minime di ECe, si è scelto di istituire le prime otto classi sulla base di incrementi molto piccoli, ossia di 0,5 dS/m. Tali incrementi sono stati applicati sino a 4 dS/m, valore soglia per la definizione dei suoli salini. Oltre questo valore solo poche colture risultano tolleranti (per lo più seminativi e foraggere), conseguentemente il range per la definizione della nona classe è stato fissato tra 4 e 8 dS/m (valore limite per l’orzo, la coltura più tollerante). Dato l’interesse agronomico pressoché nullo delle aree in cui questo valore viene superato, nell’ultima classe sono stati accorpati tutti i valori di salinità > di 8 dS/m. Questa classe in realtà include uno spettro di valori molto diversi, arrivando a picchi di ECe assai elevati (valore massimo misurato = 127 dS/m nell’area di Budoni) che si rinvergono soprattutto in corrispondenza delle aree peristagnali e lagunari.

La Carta presente in allegato, che per motivi tipografici è stata restituita alla scala approssimativa di 1:300.000, costituisce la sintesi delle elaborazioni effettuate nelle 20 aree di studio (con il dettaglio del 250.000), esposte singolarmente in relazione.

Per tutte le 20 piane agricole sono state inserite le seguenti informazioni:

- una tabella con la ripartizione, in ettari e in percentuale, delle superfici corrispondenti ad ognuna delle 10 classi di ECe;
- un diagramma con le percentuali delle superfici suddivise in sole quattro classi di ECe per una lettura più sintetica della distribuzione dei suoli *poco salini* (0-2 dS/m), *mediamente salini* (2-4 dS/m), *salini* (4-8 dS/m) e *molto salini* (>8 dS/m).

Nella **tabella 3** si riporta lo stesso dato di sintesi per tutta la Sardegna, esprimendo la ripartizione delle aree in relazione:

- 1) all’intera superficie regionale;
- 2) alla Superficie Agricola Utilizzabile (SAU);
- 3) alla superficie effettivamente indagata.

Dall’esame della *Carta* e dall’elaborazione dei dati analitici in possesso è emerso che il fenomeno di salinizzazione dei suoli, nonostante i segnali allarmanti espressi dalla comunità agricola che hanno indotto ad affrontare questo studio, è risultato complessivamente di modesta entità, prevalentemente diffuso nelle piane costiere entro una fascia di due chilometri dal mare e in buona parte circoscritto ad aree seminaturali di retrospiaggia o prossime agli stagni.

4. La Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità



Nelle più estese piane agricole della Nurra e del Campidano-Cixerri-Marmilla sono stati riscontrati valori elevati di salinità solamente a livello locale. I più rilevanti si concentrano intorno all'area di Arborea, specialmente nelle aree della bonifica di Sassu, dove l'ECe comunque non supera i 10 dS/m (risultante dall'interpolazione di valori anche superiori a 23 dS/m), grazie all'effetto combinato delle opere di bonifica idraulica e dell'uso diffuso di acque irrigue consortili di buona qualità.

Tabella 3
Estensione e ripartizione percentuale dei suoli rilevati per classi di Conducibilità Elettrica dell'estratto in pasta satura

	Ettari	% rispetto alla Sardegna	% rispetto alla SAU regionale	
superficie Sardegna	2.409.000			
superficie SAU	1.020.411	42,4		
superficie indagata	247.143	10,3	24,2	
CLASSI DI ECe (dS/m)	Ettari	% rispetto alla Sardegna	% rispetto alla SAU regionale	% rispetto alla superficie indagata
0 - 2 suoli poco salini	224.029	9,3	22,0	90,6
2 - 4 suoli mediamente salini	13.453	0,6	1,3	5,4
4 - 8 suoli salini	4.652	0,2	0,5	1,9
> 8 suoli molto salini	5.008	0,2	0,5	2,0

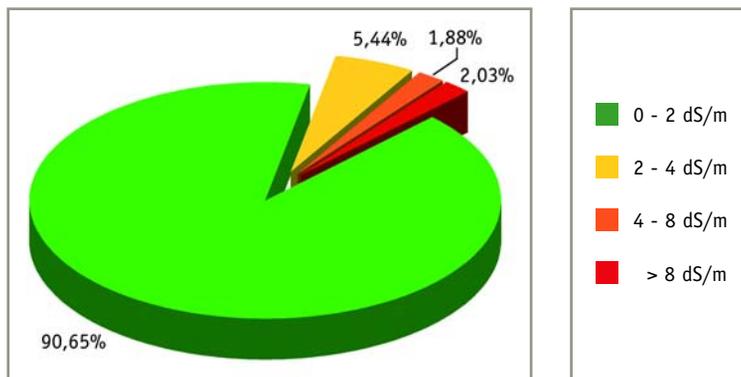
Dai dati di sintesi riportati in **tabella 3** si evidenzia che i suoli compresi nelle classi da *mediamente salini* a *molto salini* non superano il 9,3% dell'area indagata, mentre rappresentano appena il 2,3% della SAU regionale.

Il risultato, apparentemente confortante, può portare a sottovalutare le gravi ripercussioni che la salinizzazione dei suoli, seppure localizzata, induce nel territorio interessato da tale problema. Non deve essere trascurato, infatti, quanto la natura altamente variabile del fenomeno, sia in termini di diffusione che di intensità, dipenda da fattori a loro volta molto dinamici nel tempo e nello spazio, come ad esempio il clima e la gestione antropica. Pertanto, la tendenza all'incremento o alla regressione dei processi di salinizzazione può essere valutata solo a partire dalla conoscenza dello stato del fenomeno nel territorio in un dato momento, e solo attraverso un monitoraggio di medio e lungo periodo.

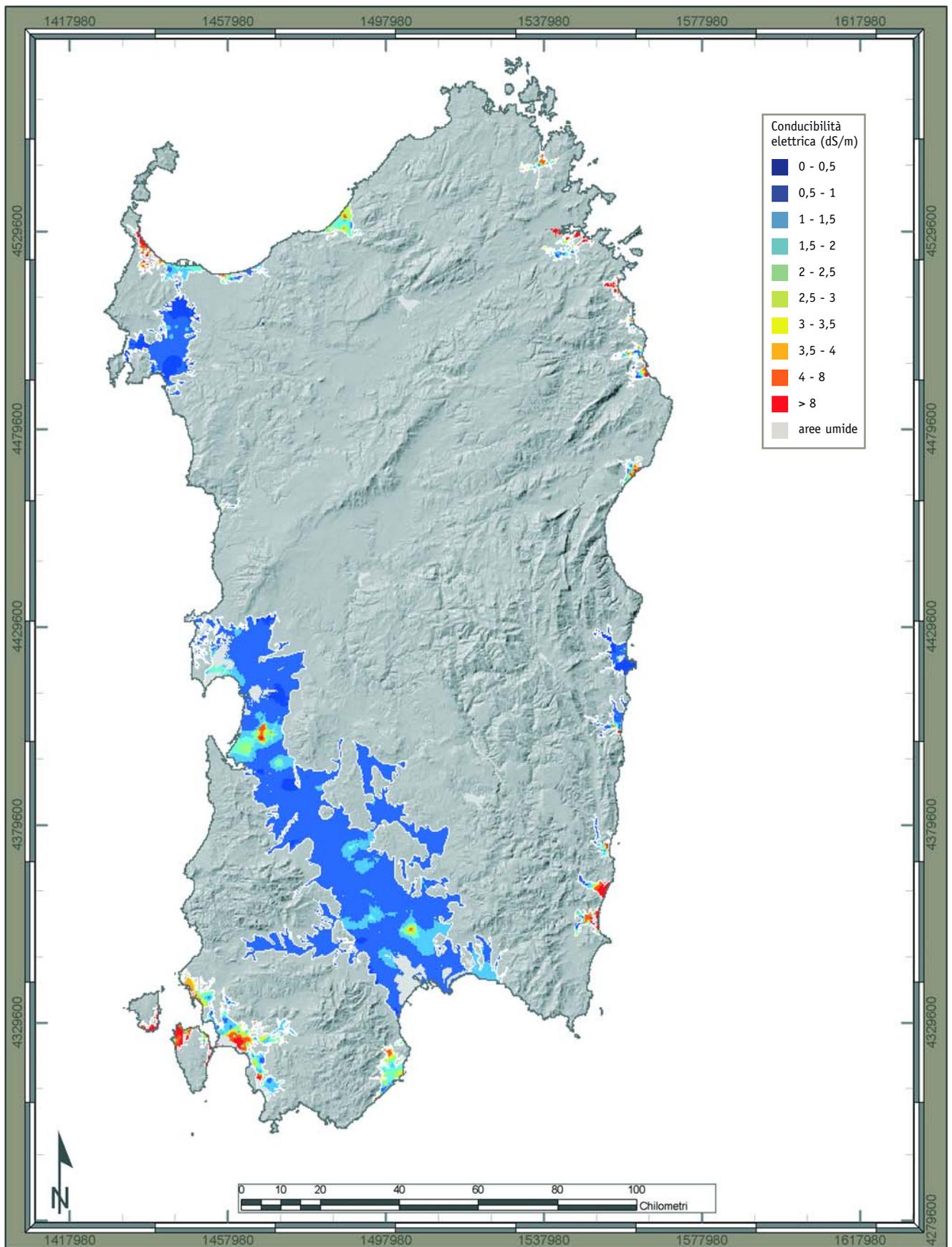
In tal senso la *Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità* realizza il duplice scopo di fornire la base di conoscenze allo stato attuale sul grado di salinità dei suoli nel territorio regionale ed evidenziare, al contempo, le situazioni locali su cui sarebbe opportuno approfondire le indagini o comunque intraprendere azioni di controllo continue e durature.

Regione

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	14414	5,83
0,5 - 1	170660	69,05
1 - 1,5	29101	11,78
1,5 - 2	9853	3,99
2 - 2,5	5966	2,41
2,5 - 3	3444	1,39
3 - 3,5	2420	0,98
3,5 - 4	1624	0,66
4 - 8	4652	1,88
>8	5008	2,03
totale	247143	100,00

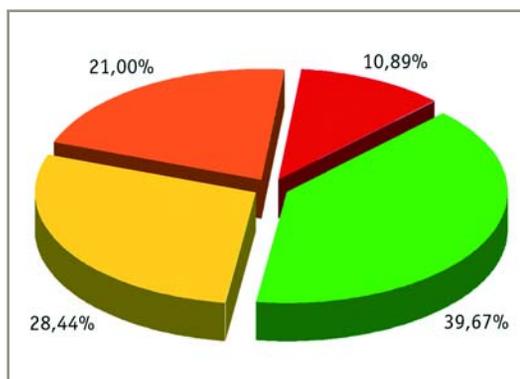


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe rispetto alla superficie totale indagata



1 San Priamo

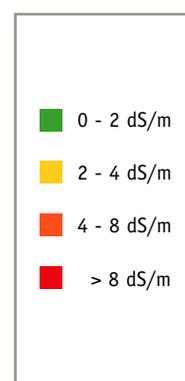
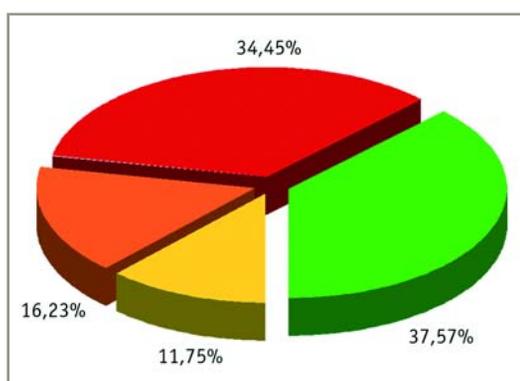
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	46	2,67
0,5 - 1	170	9,85
1 - 1,5	316	18,33
1,5 - 2	152	8,82
2 - 2,5	201	11,68
2,5 - 3	149	8,66
3 - 3,5	71	4,10
3,5 - 4	69	4,00
4 - 8	362	21,00
>8	188	10,89
totale	1722	100,00



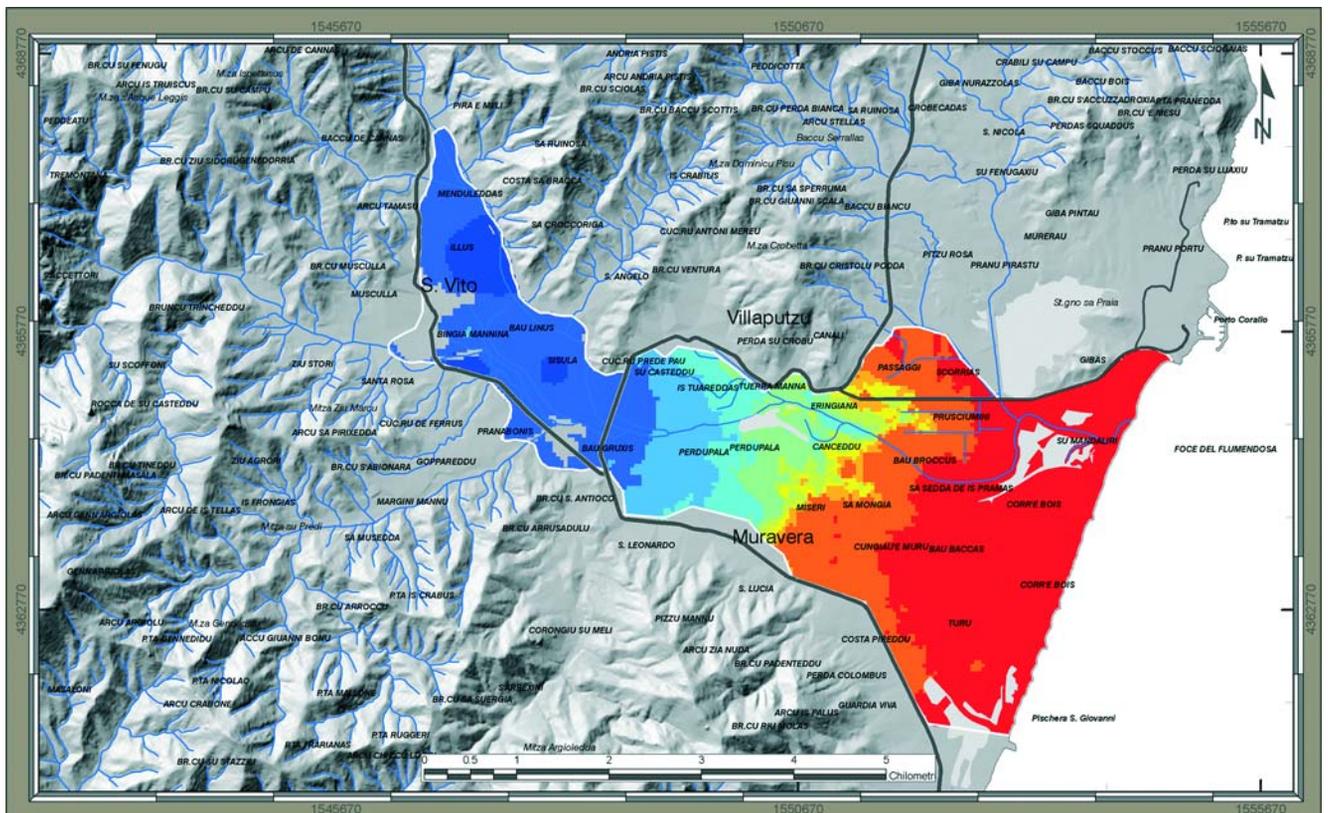
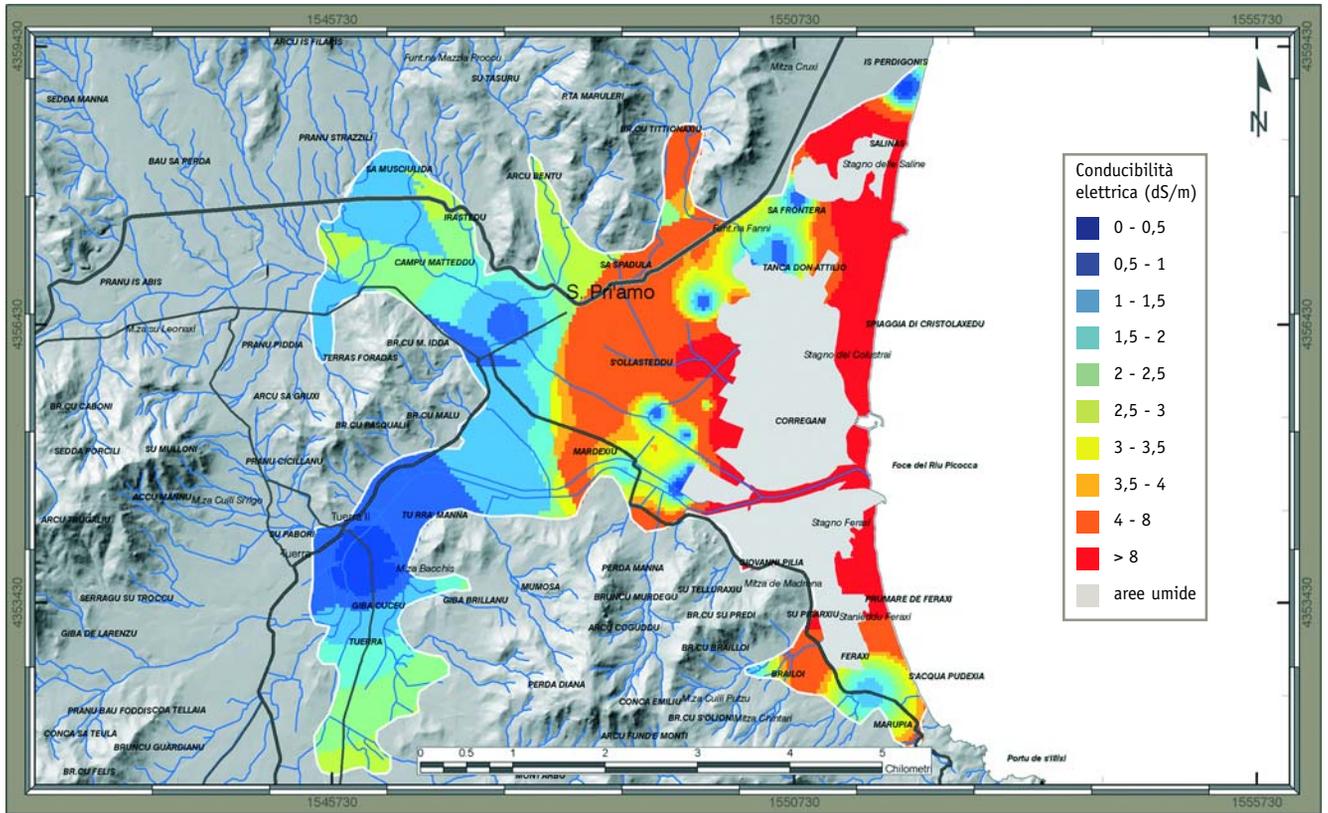
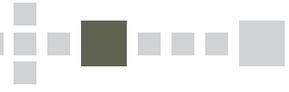
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

2 Muravera - Villaputzu - San Vito

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	62	4,09
0,5 - 1	304	20,13
1 - 1,5	117	7,73
1,5 - 2	85	5,62
2 - 2,5	77	5,09
2,5 - 3	39	2,60
3 - 3,5	31	2,03
3,5 - 4	31	2,04
4 - 8	245	16,23
>8	520	34,45
totale	1509	100,00

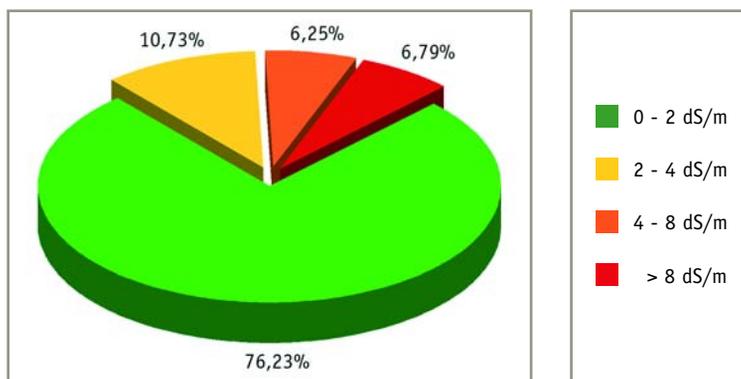


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

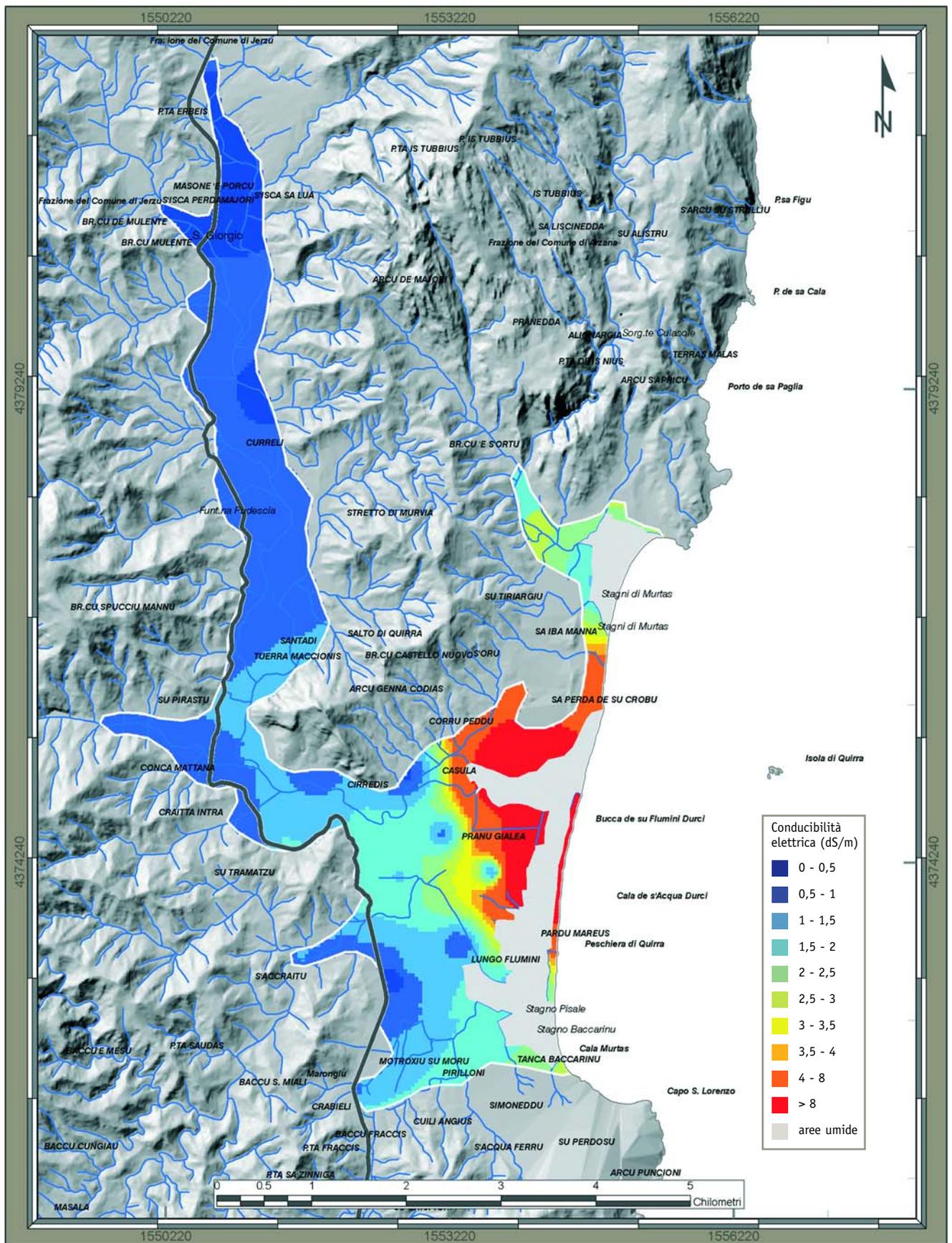


3 Quirra

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	104	8,20
0,5 - 1	444	35,09
1 - 1,5	249	19,71
1,5 - 2	168	13,24
2 - 2,5	63	4,95
2,5 - 3	40	3,15
3 - 3,5	21	1,66
3,5 - 4	12	0,97
4 - 8	79	6,25
>8	86	6,79
totale	1265	100,00



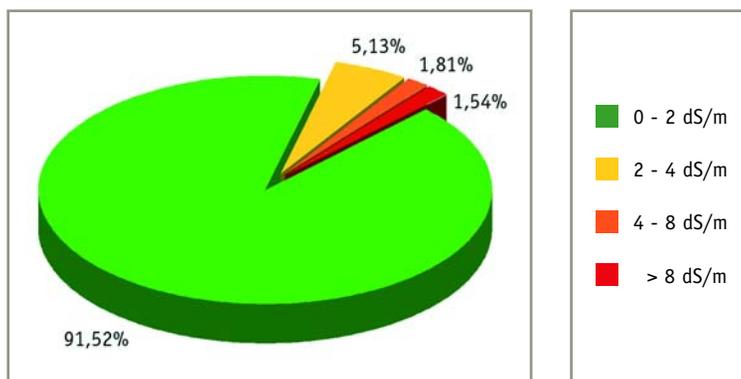
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe



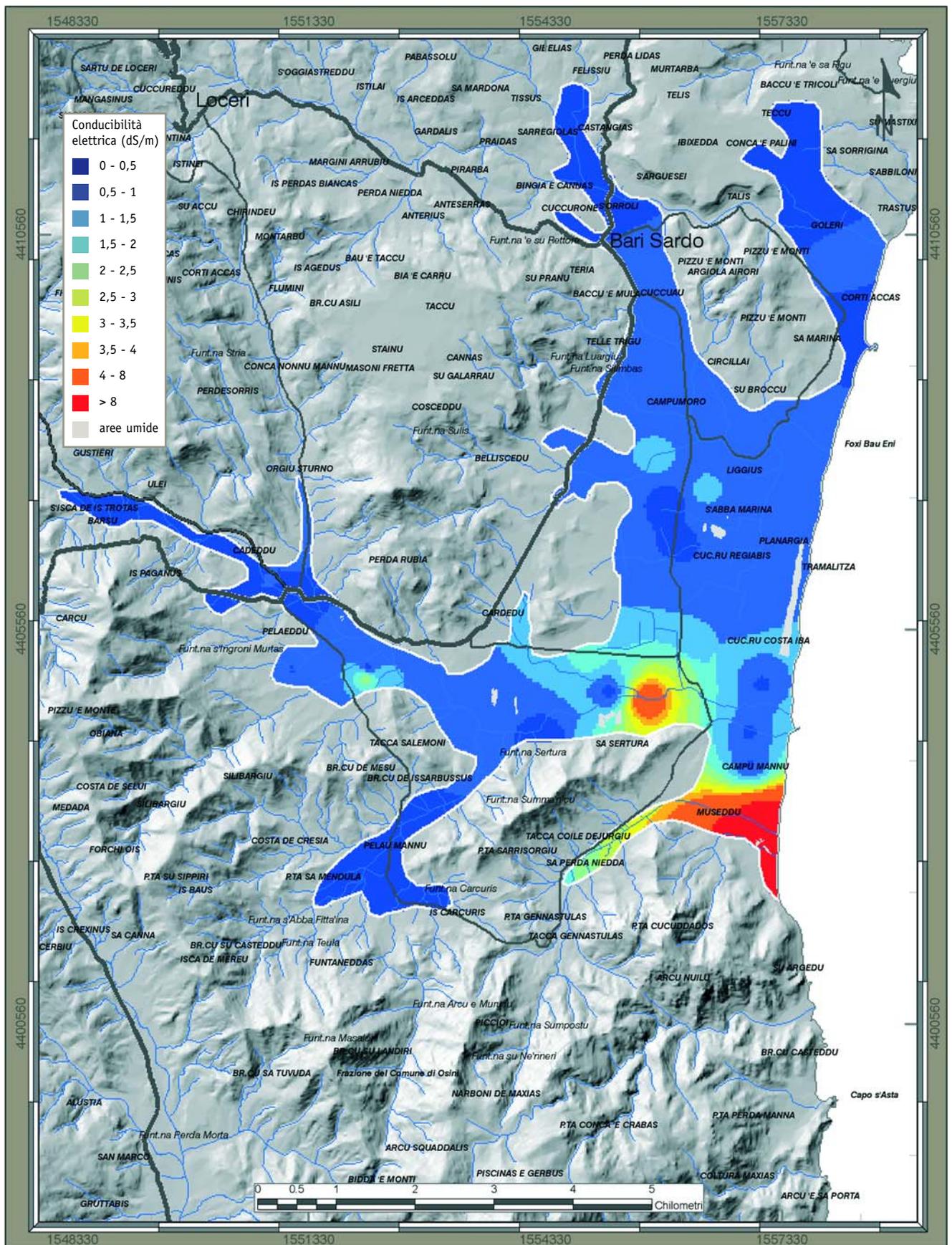
4

Barisardo

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	534	23,84
0,5 - 1	1216	54,31
1 - 1,5	240	10,73
1,5 - 2	59	2,64
2 - 2,5	35	1,57
2,5 - 3	30	1,32
3 - 3,5	29	1,28
3,5 - 4	22	0,96
4 - 8	40	1,81
>8	35	1,54
totale	2239	100,00

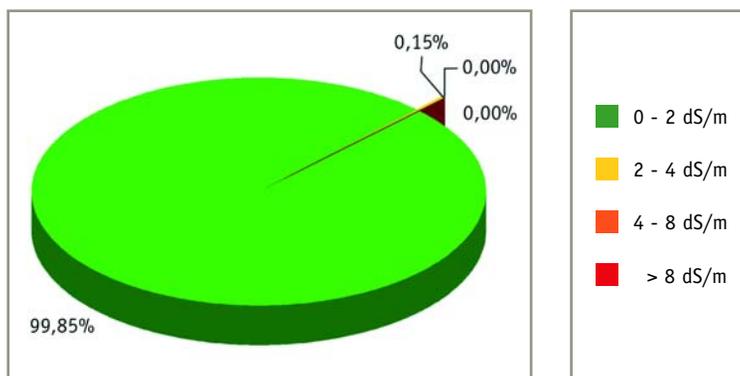


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

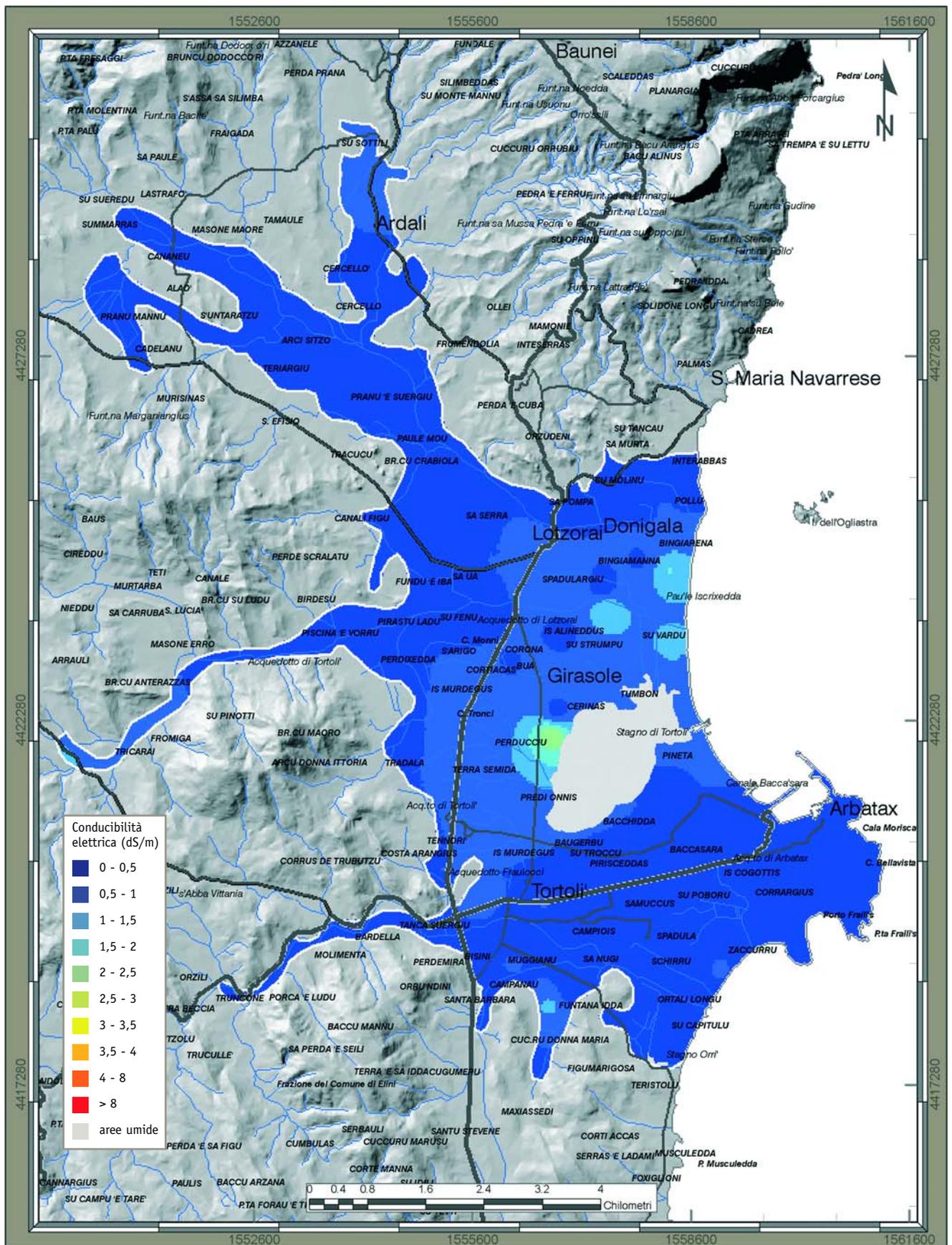


5 Tortolì

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	2315	69,11
0,5 - 1	923	27,54
1 - 1,5	96	2,86
1,5 - 2	11	0,34
2 - 2,5	5	0,15
2,5 - 3	0	0,00
3 - 3,5	0	0,00
3,5 - 4	0	0,00
4 - 8	0	0,00
>8	0	0,00
totale	3350	100,00

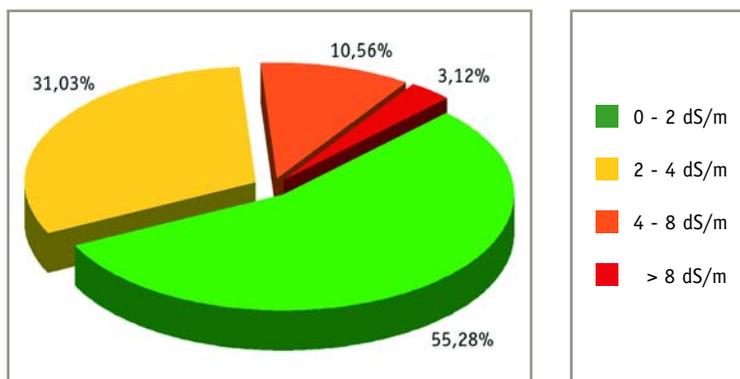


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

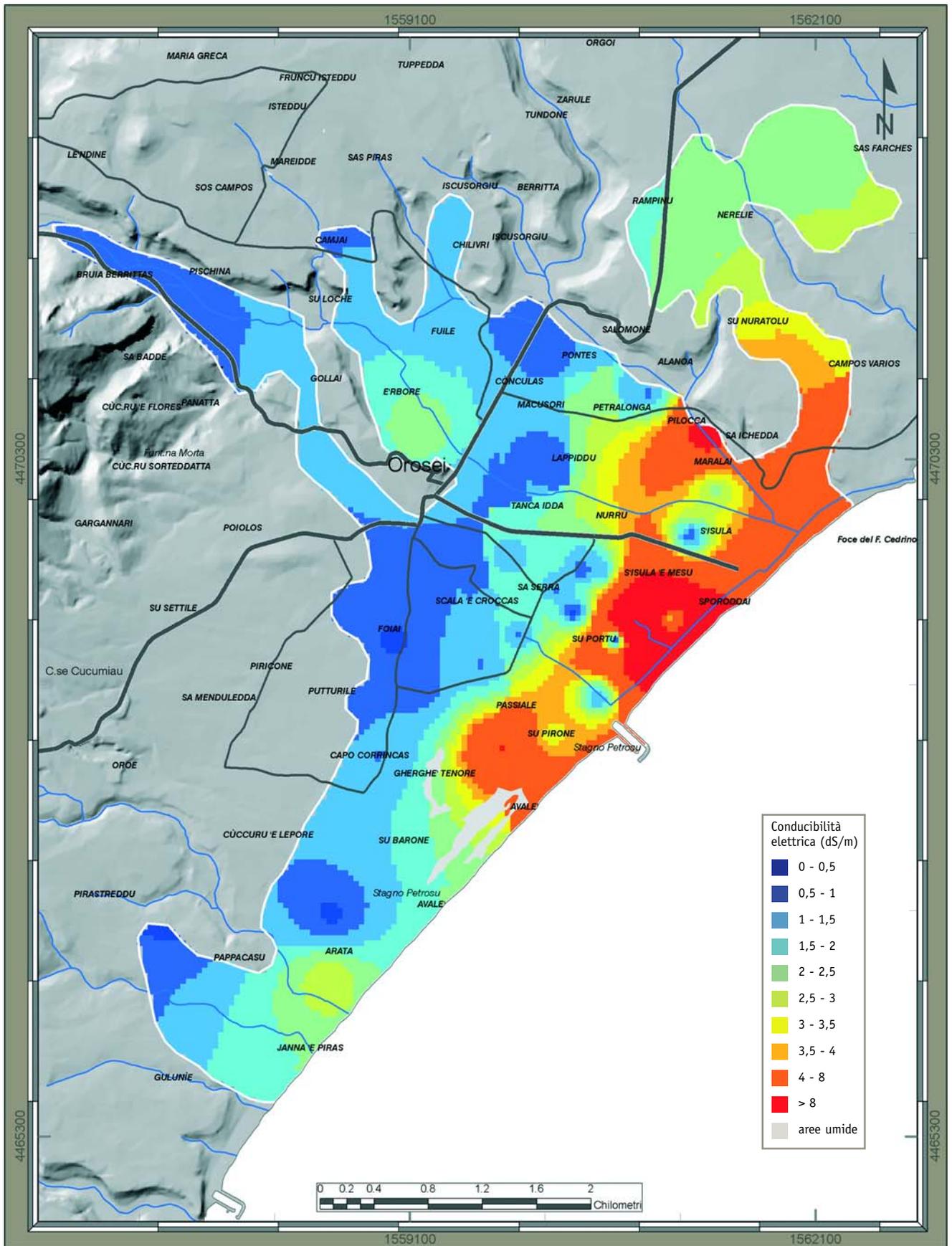


6 Orosei

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	8	0,63
0,5 - 1	210	16,57
1 - 1,5	311	24,54
1,5 - 2	172	13,55
2 - 2,5	209	16,54
2,5 - 3	78	6,15
3 - 3,5	53	4,21
3,5 - 4	52	4,13
4 - 8	134	10,56
>8	40	3,12
totale	1266	100,00

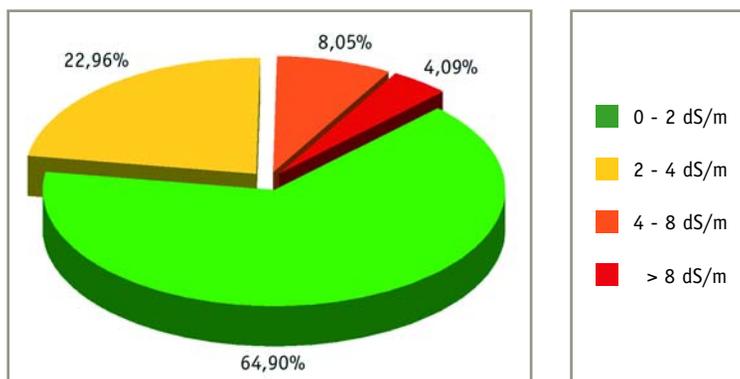


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

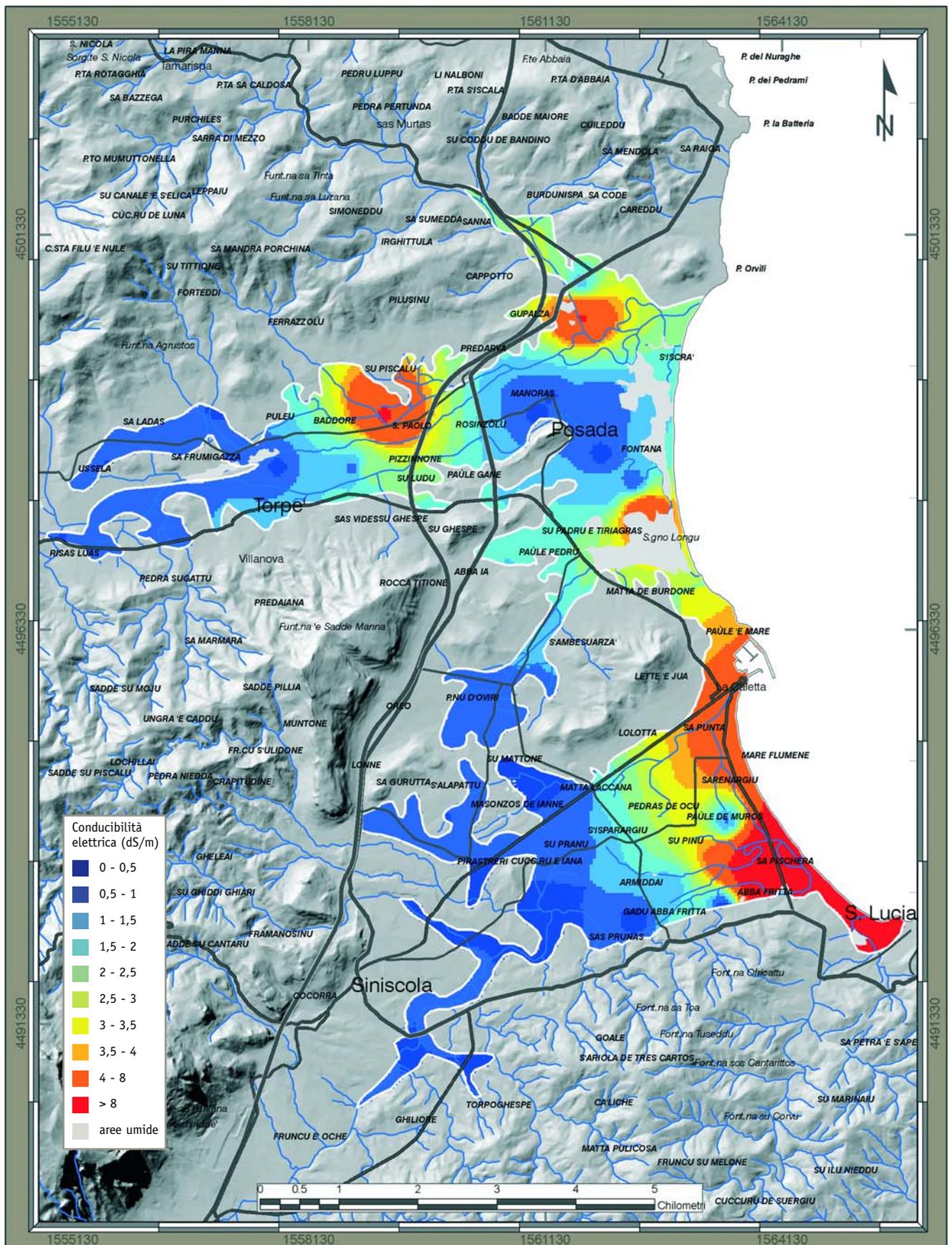


7 Posada

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	185	8,37
0,5 - 1	701	31,72
1 - 1,5	298	13,47
1,5 - 2	251	11,34
2 - 2,5	190	8,59
2,5 - 3	132	5,99
3 - 3,5	110	4,99
3,5 - 4	75	3,39
4 - 8	178	8,05
>8	90	4,09
totale	2209	100,00



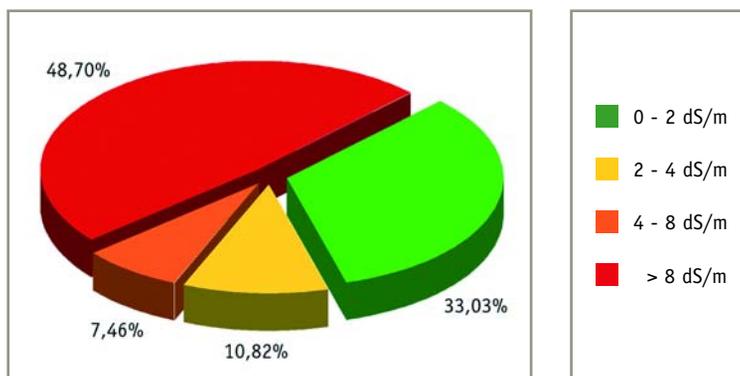
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe



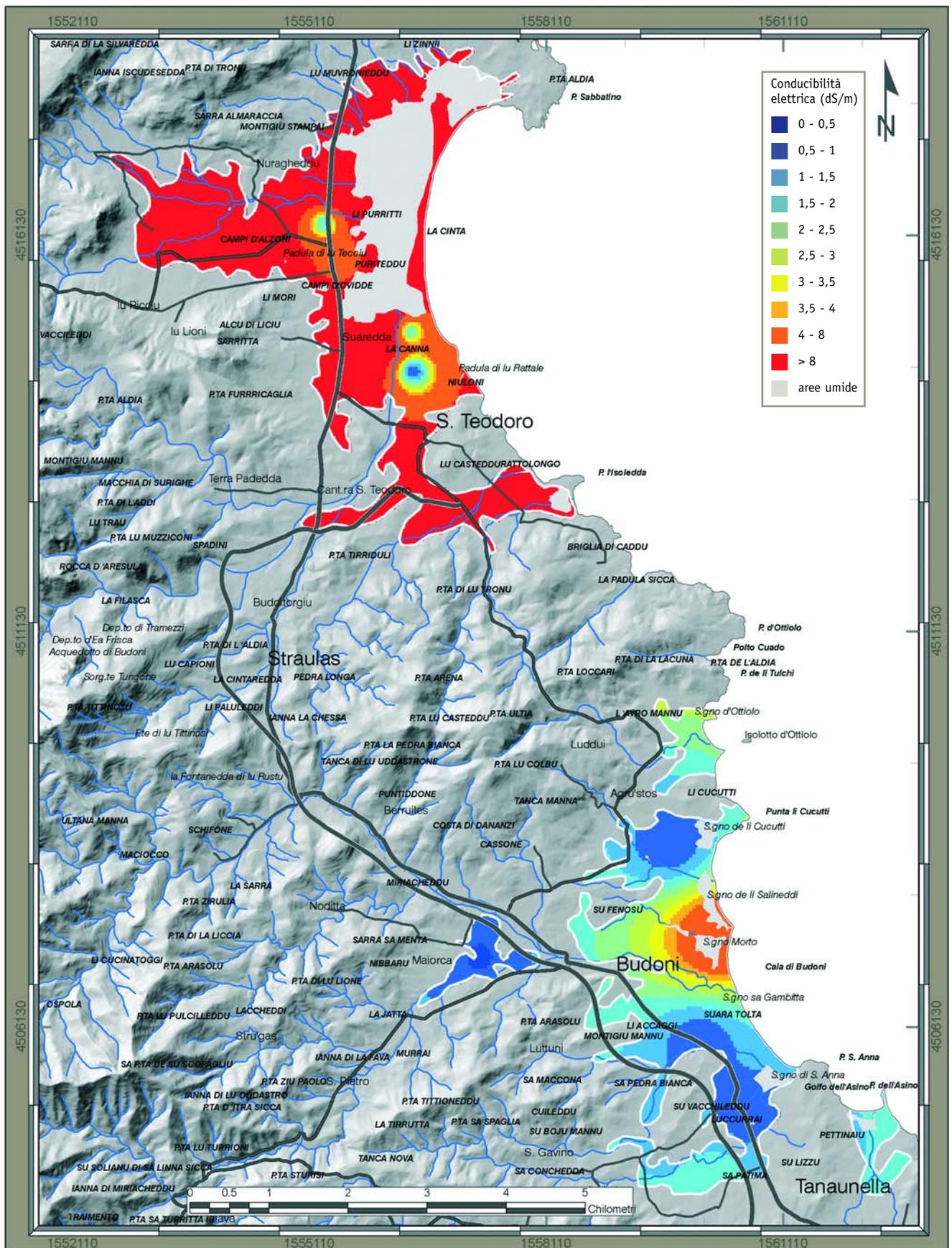
8

Budoni - San Teodoro

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	7	0,54
0,5 - 1	145	11,41
1 - 1,5	113	8,88
1,5 - 2	155	12,19
2 - 2,5	51	4,03
2,5 - 3	38	2,96
3 - 3,5	26	2,08
3,5 - 4	22	1,75
4 - 8	95	7,46
>8	619	48,70
totale	1270	100,00

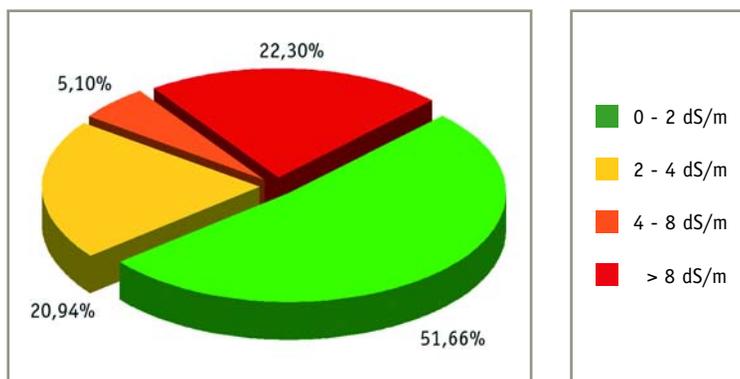


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe



9 Olbia

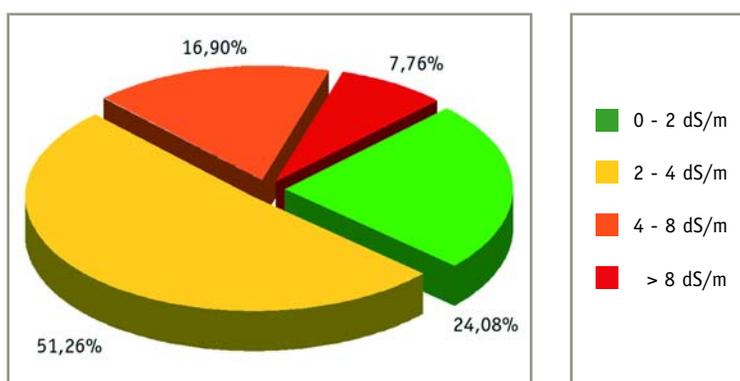
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	11	0,47
0,5 - 1	344	14,79
1 - 1,5	468	20,15
1,5 - 2	378	16,25
2 - 2,5	219	9,42
2,5 - 3	125	5,40
3 - 3,5	115	4,93
3,5 - 4	28	1,20
4 - 8	119	5,10
>8	518	22,30
totale	2325	100,00



Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

10 Arzachena

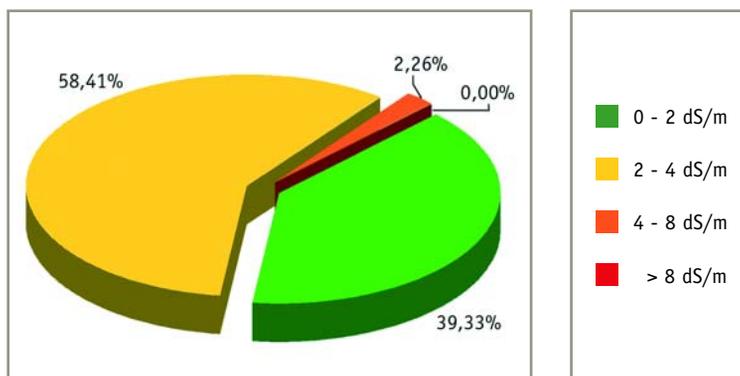
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	4	0,27
0,5 - 1	51	3,94
1 - 1,5	100	7,79
1,5 - 2	155	12,07
2 - 2,5	165	12,84
2,5 - 3	191	14,88
3 - 3,5	175	13,67
3,5 - 4	127	9,87
4 - 8	217	16,90
>8	100	7,76
totale	1282	100,00



Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

11 Valledoria

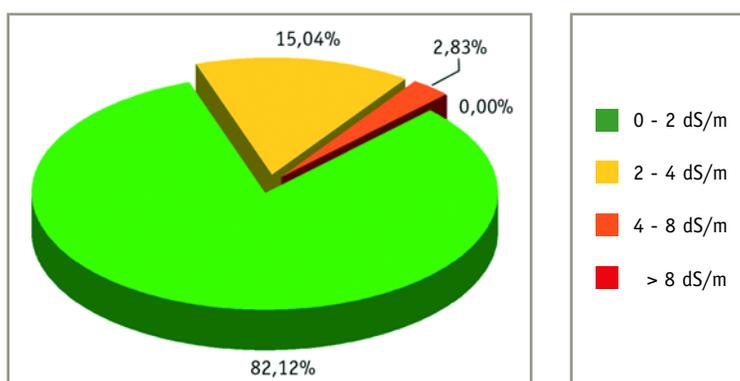
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	0	0,00
0,5 - 1	59	2,07
1 - 1,5	131	4,57
1,5 - 2	937	32,69
2 - 2,5	977	34,09
2,5 - 3	527	18,38
3 - 3,5	121	4,23
3,5 - 4	49	1,71
4 - 8	65	2,26
>8	0	0,00
totale	2866	100,00



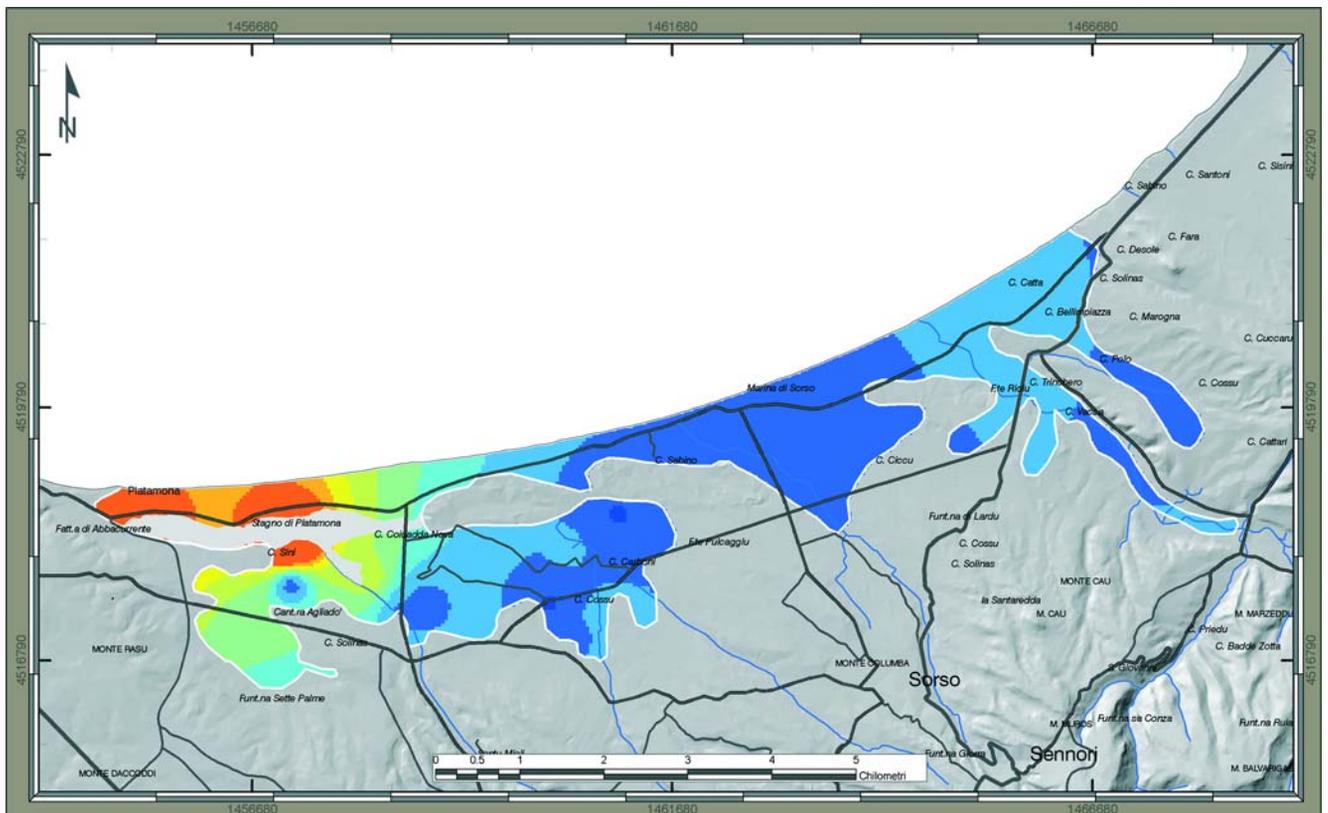
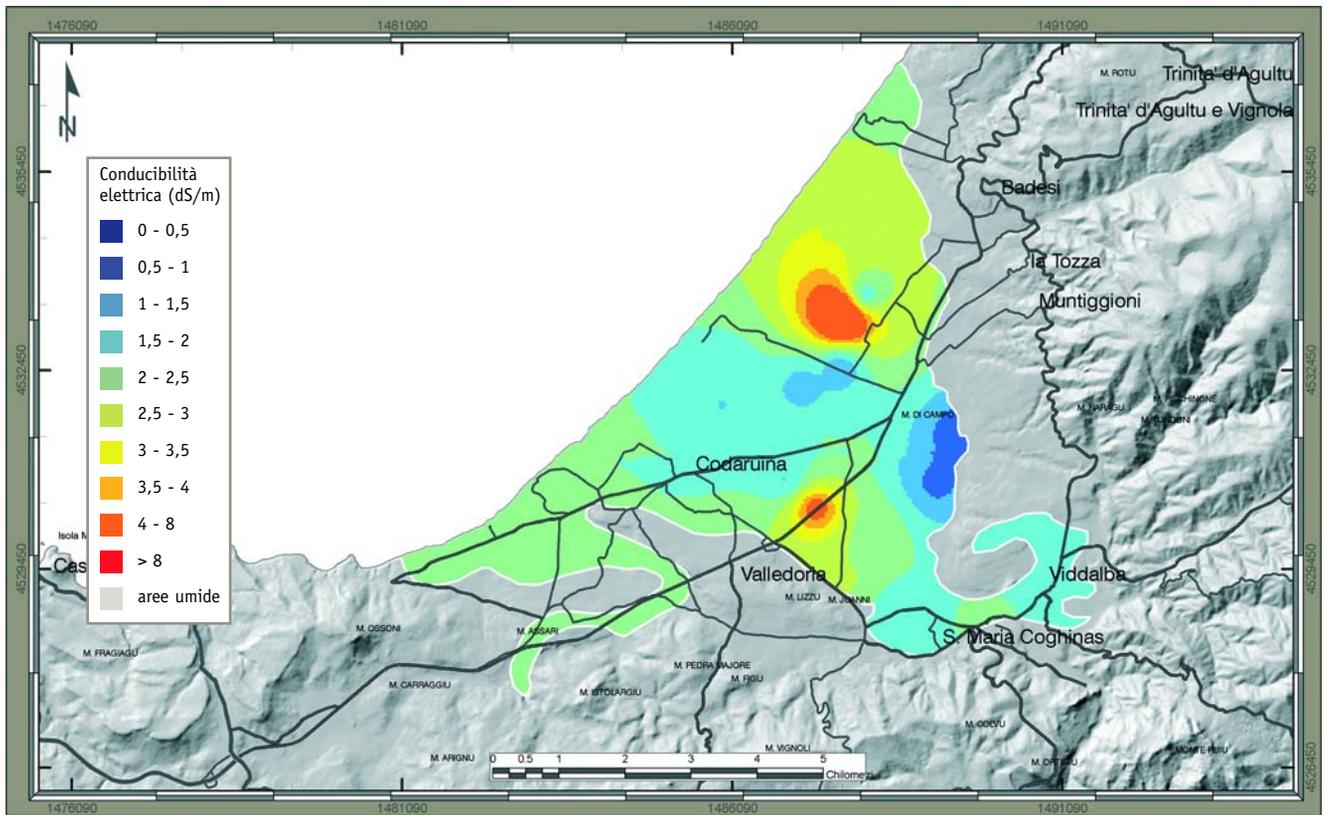
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

12 Sorso

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	6	0,41
0,5 - 1	682	45,77
1 - 1,5	448	30,04
1,5 - 2	88	5,91
2 - 2,5	131	8,80
2,5 - 3	53	3,56
3 - 3,5	14	0,96
3,5 - 4	26	1,72
4 - 8	42	2,83
>8	0	0,00
totale	1490	100,00



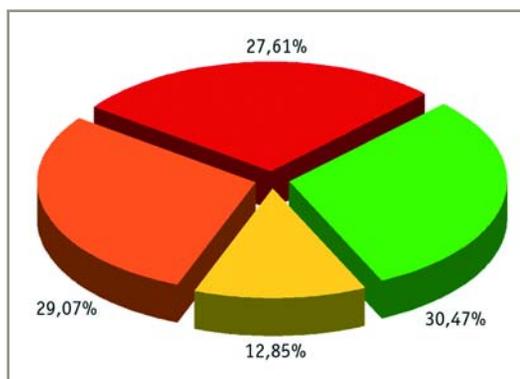
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe



13

Porto Torres - Stintino

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	0	0,00
0,5 - 1	148	5,63
1 - 1,5	530	20,08
1,5 - 2	126	4,77
2 - 2,5	93	3,53
2,5 - 3	83	3,14
3 - 3,5	94	3,57
3,5 - 4	69	2,61
4 - 8	767	29,07
>8	729	27,61
totale	2639	100,00

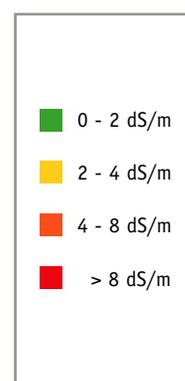
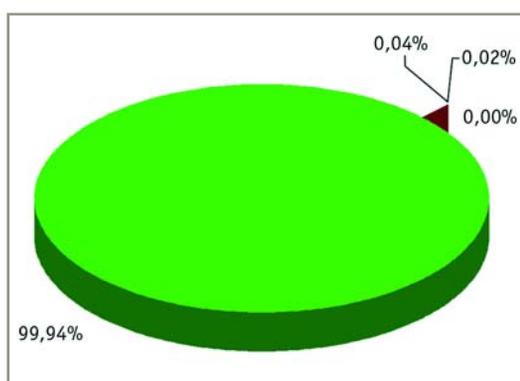


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

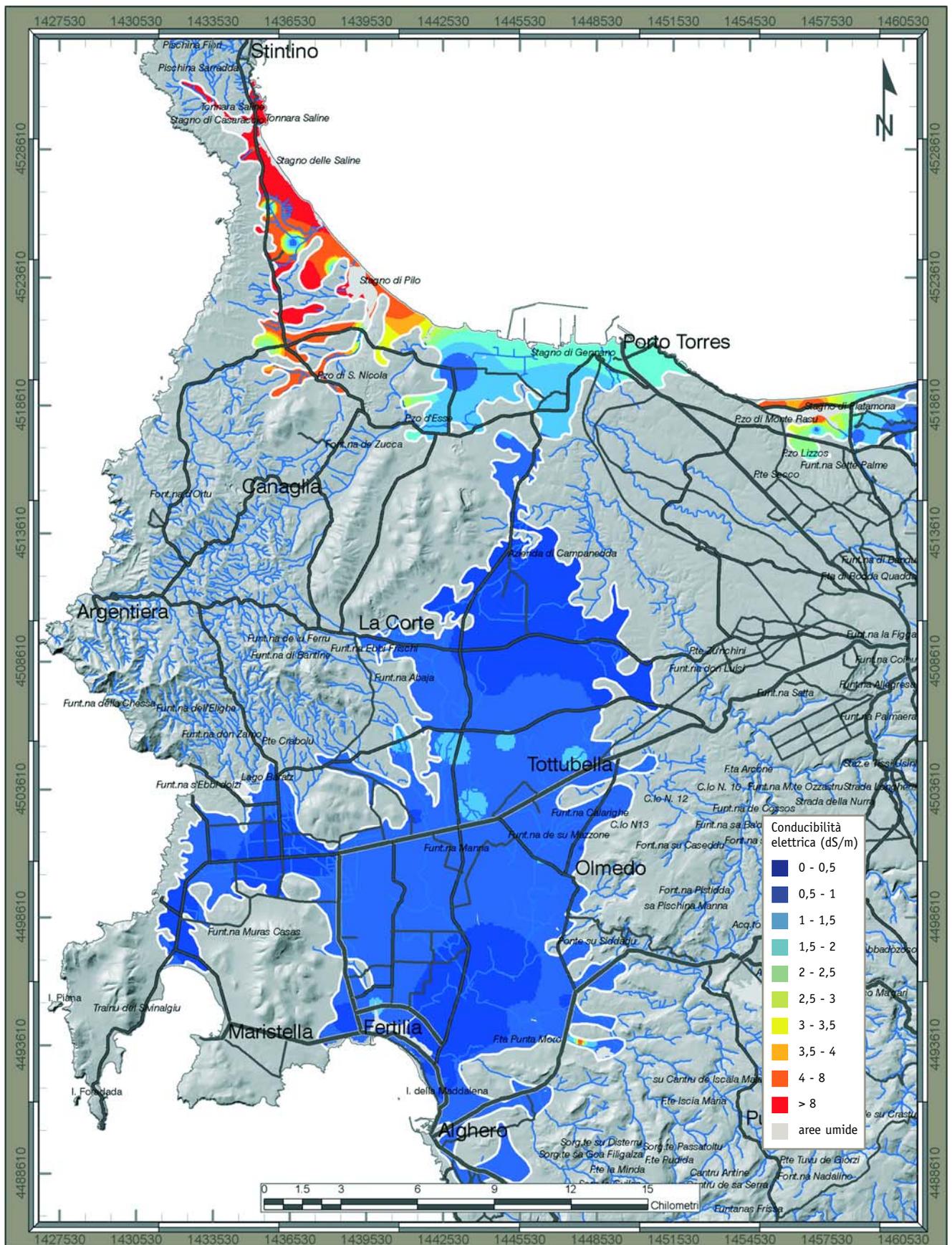
14

Nurra

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	6306	33,86
0,5 - 1	11822	63,48
1 - 1,5	472	2,54
1,5 - 2	10	0,05
2 - 2,5	3	0,02
2,5 - 3	2	0,01
3 - 3,5	2	0,01
3,5 - 4	2	0,01
4 - 8	4	0,02
>8	0	0,00
totale	18623	100,00

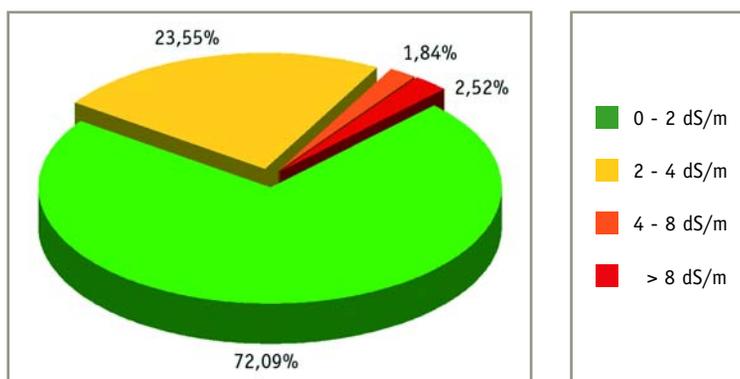


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe



15 Bosa

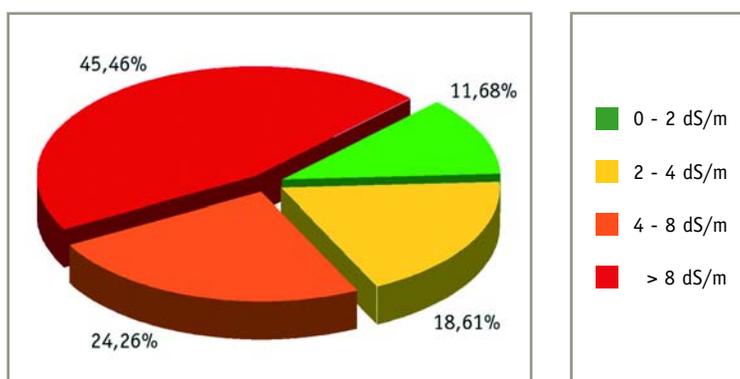
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	0	0,00
0,5 - 1	54	32,46
1 - 1,5	47	28,29
1,5 - 2	19	11,34
2 - 2,5	32	19,57
2,5 - 3	5	2,91
3 - 3,5	1	0,68
3,5 - 4	1	0,39
4 - 8	3	1,84
>8	4	2,52
totale	165	100,00



Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

16 Sant'Antioco

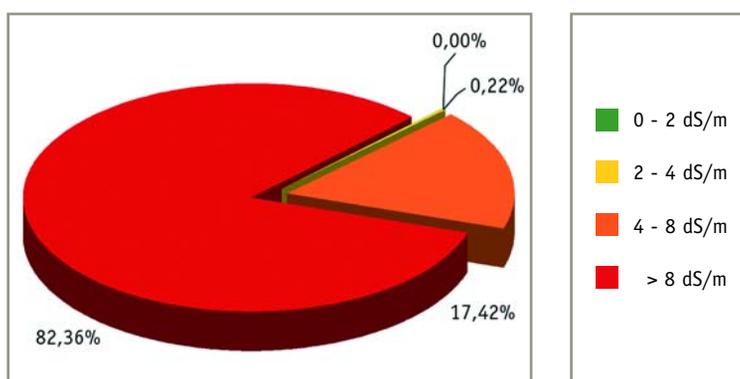
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	2	0,11
0,5 - 1	24	1,12
1 - 1,5	94	4,41
1,5 - 2	128	6,03
2 - 2,5	116	5,47
2,5 - 3	114	5,38
3 - 3,5	85	3,99
3,5 - 4	80	3,78
4 - 8	515	24,26
>8	964	45,46
totale	2121	100,00



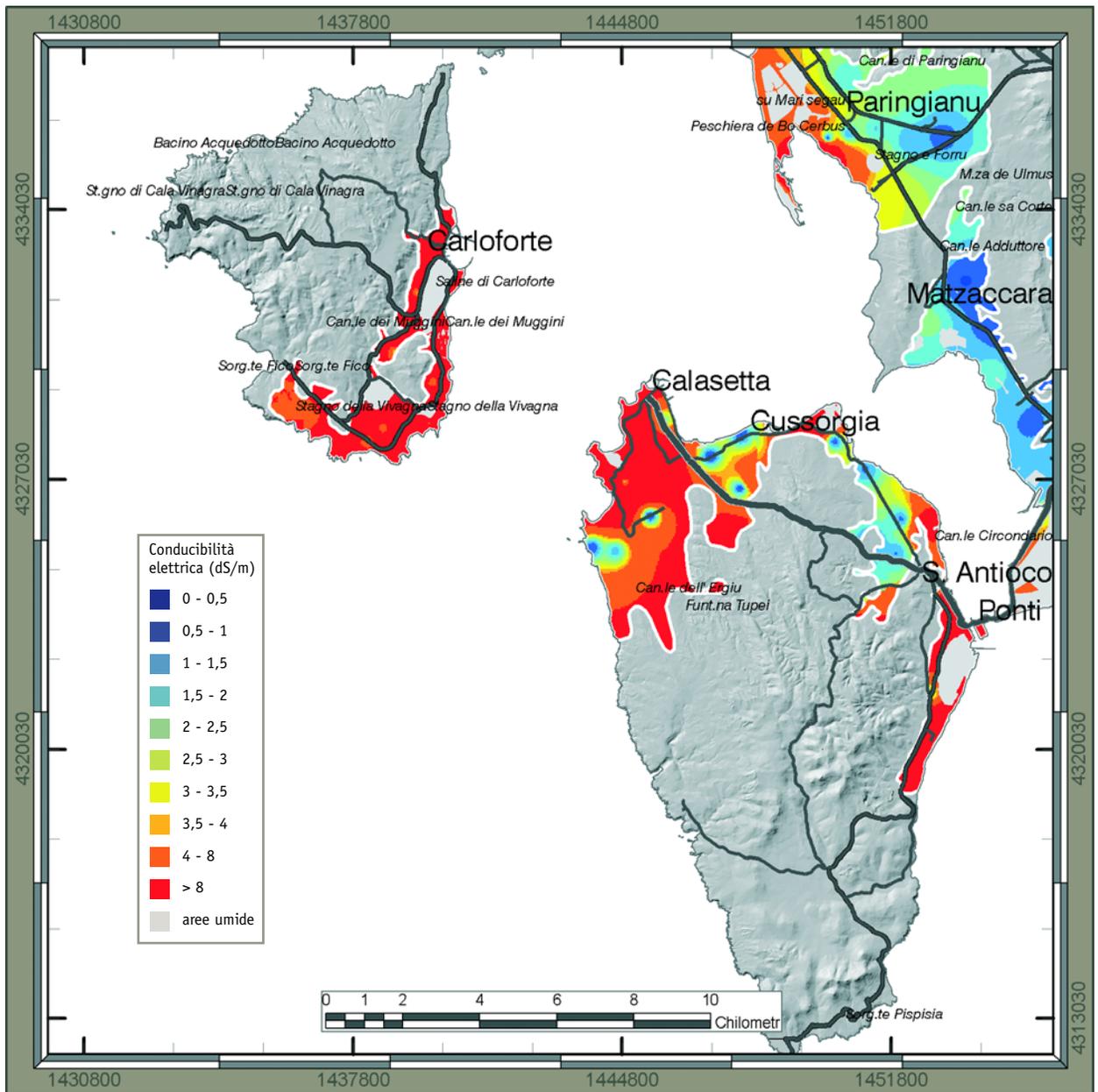
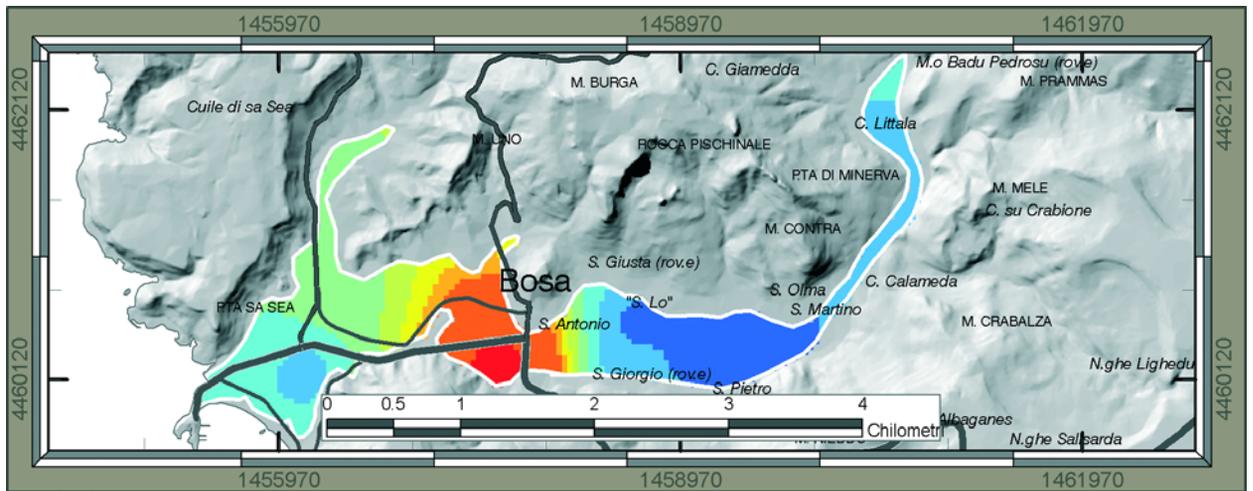
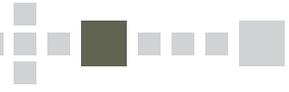
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

17 Isola di San Pietro

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	0	0,00
0,5 - 1	0	0,00
1 - 1,5	0	0,00
1,5 - 2	0	0,00
2 - 2,5	0	0,00
2,5 - 3	0	0,00
3 - 3,5	0	0,03
3,5 - 4	1	0,19
4 - 8	103	17,42
>8	487	82,36
totale	592	100,00



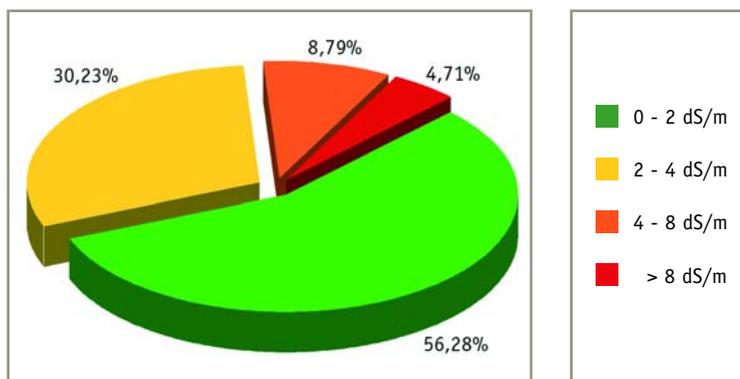
Ripartizione % dei suoli per classi di ECe



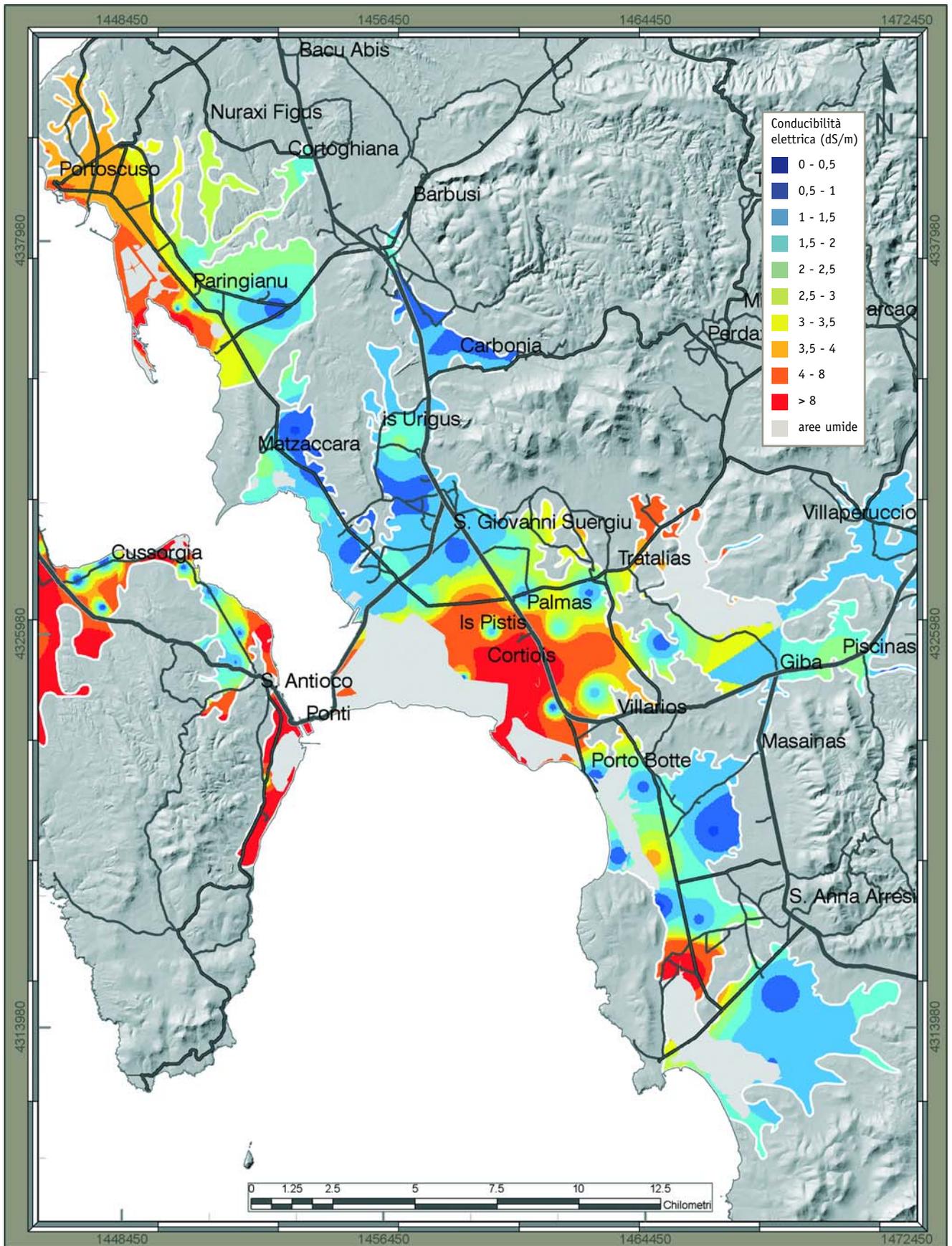
18

Basso Sulcis - Punta de S'Aliga

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	23	0,19
0,5 - 1	908	7,44
1 - 1,5	4058	33,23
1,5 - 2	1883	15,42
2 - 2,5	1266	10,37
2,5 - 3	938	7,68
3 - 3,5	881	7,22
3,5 - 4	606	4,96
4 - 8	1073	8,79
>8	575	4,71
totale	12212	100,00

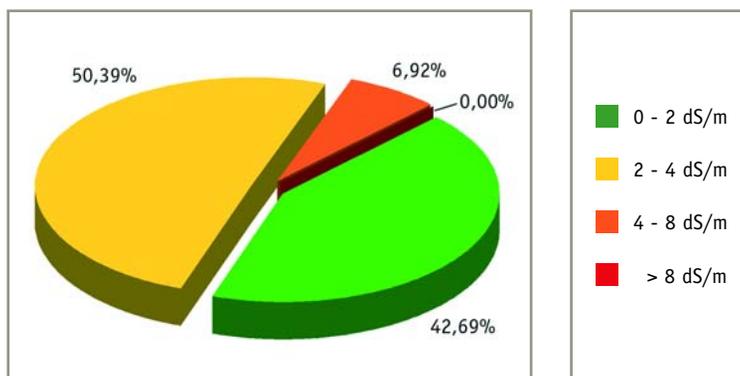


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

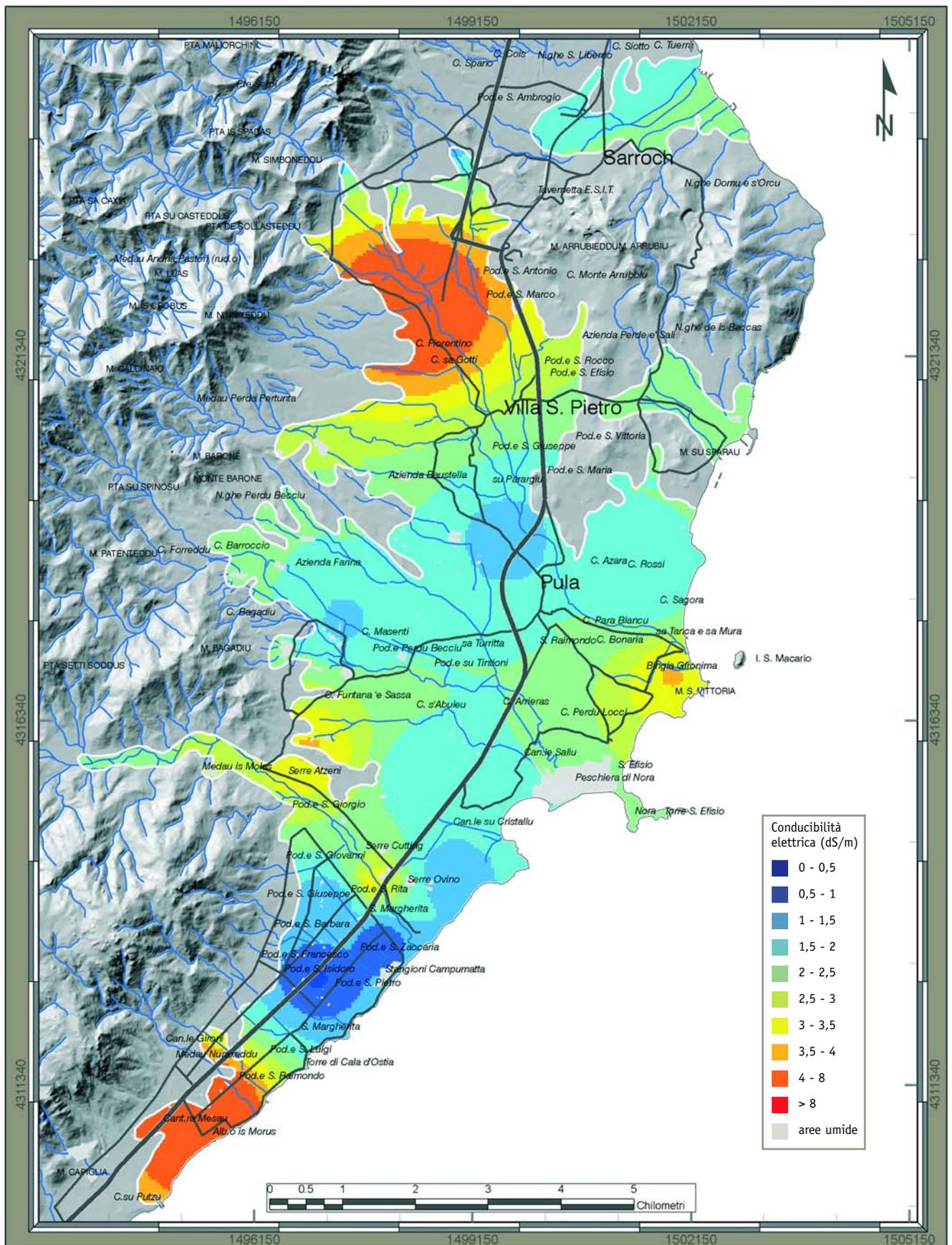


19 Pula

classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	5	0,15
0,5 - 1	78	2,26
1 - 1,5	221	6,38
1,5 - 2	1176	33,90
2 - 2,5	885	25,53
2,5 - 3	401	11,57
3 - 3,5	293	8,45
3,5 - 4	168	4,84
4 - 8	240	6,92
>8	0	0,00
totale	3468	100,00

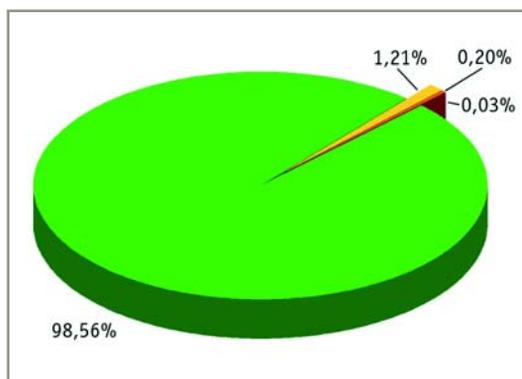


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe

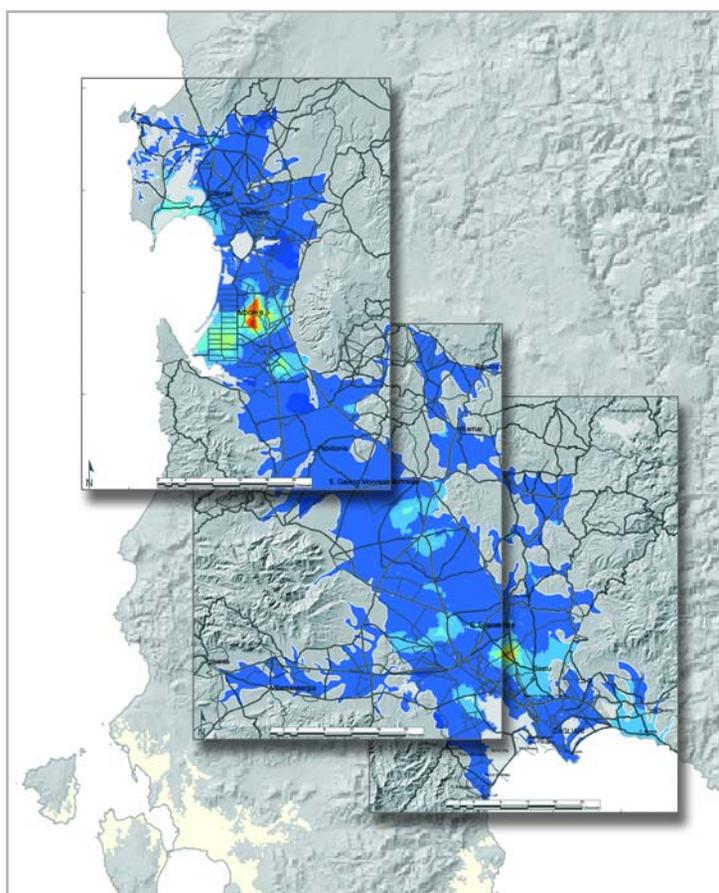


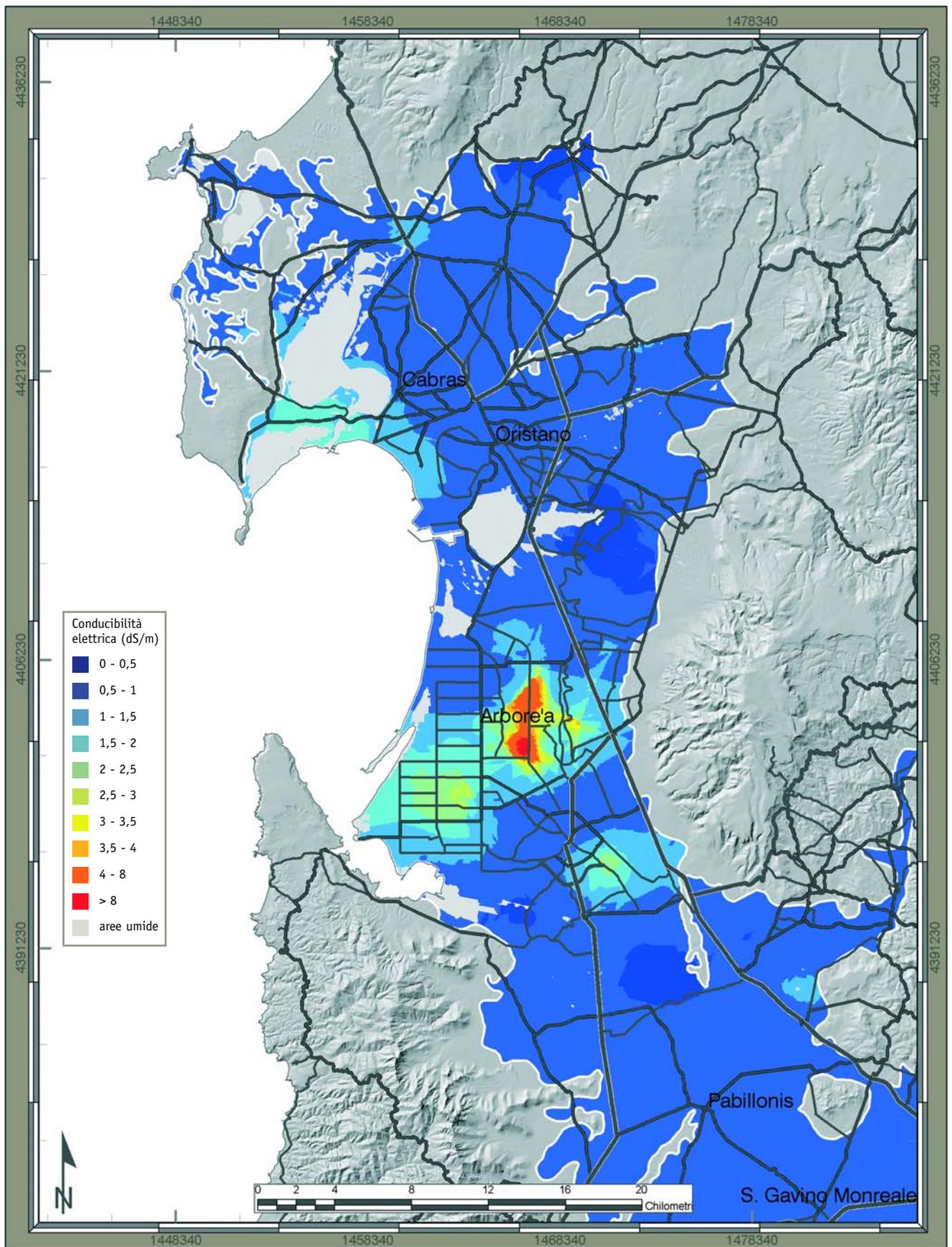
Campidano - Cixerri - Marmilla

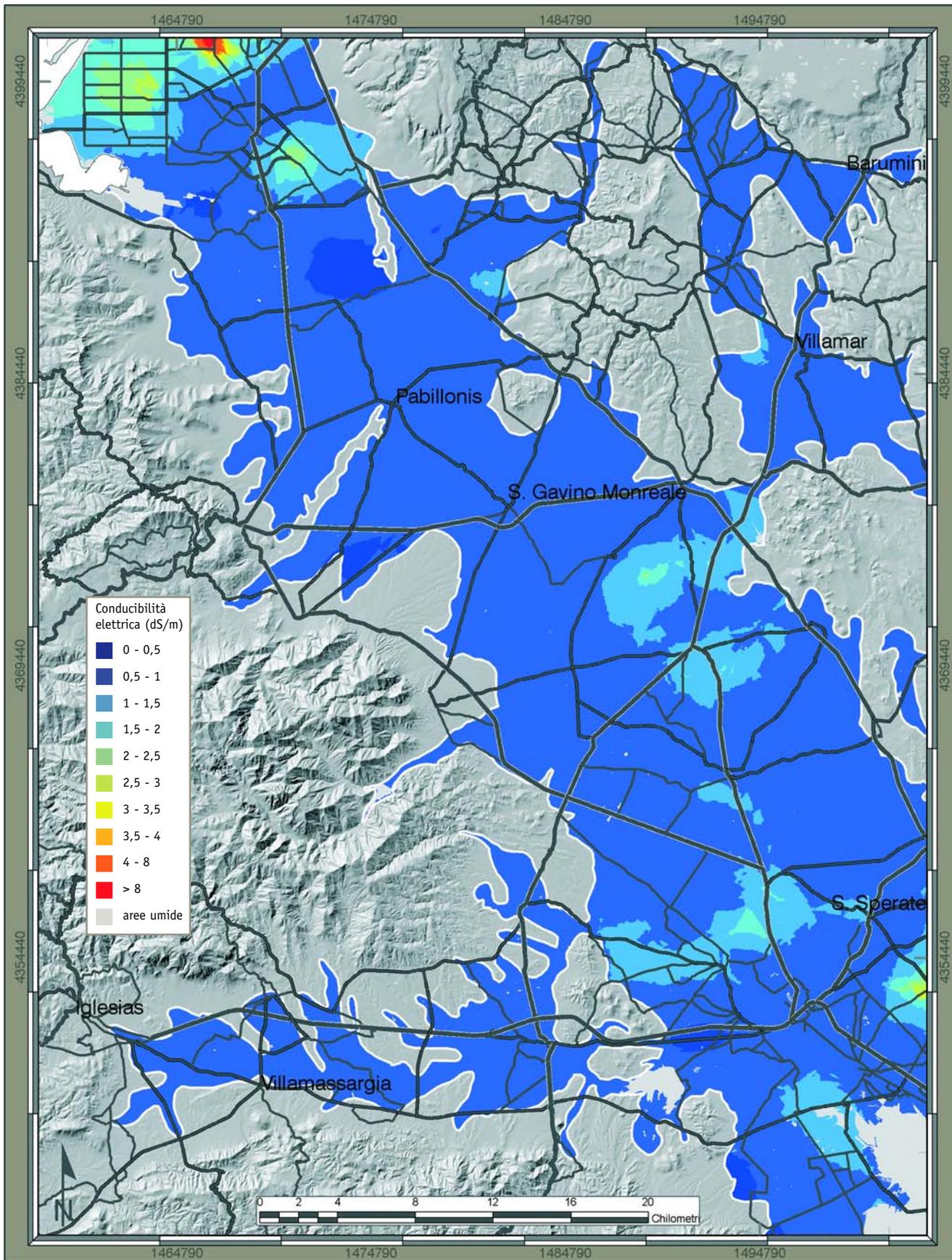
classi di ECe	area in ettari	%
0 - 0,5	4796	2,60
0,5 - 1	152378	82,58
1 - 1,5	20794	11,27
1,5 - 2	3903	2,12
2 - 2,5	1247	0,68
2,5 - 3	500	0,27
3 - 3,5	298	0,16
3,5 - 4	185	0,10
4 - 8	373	0,20
>8	55	0,03
totale	184531	100,00

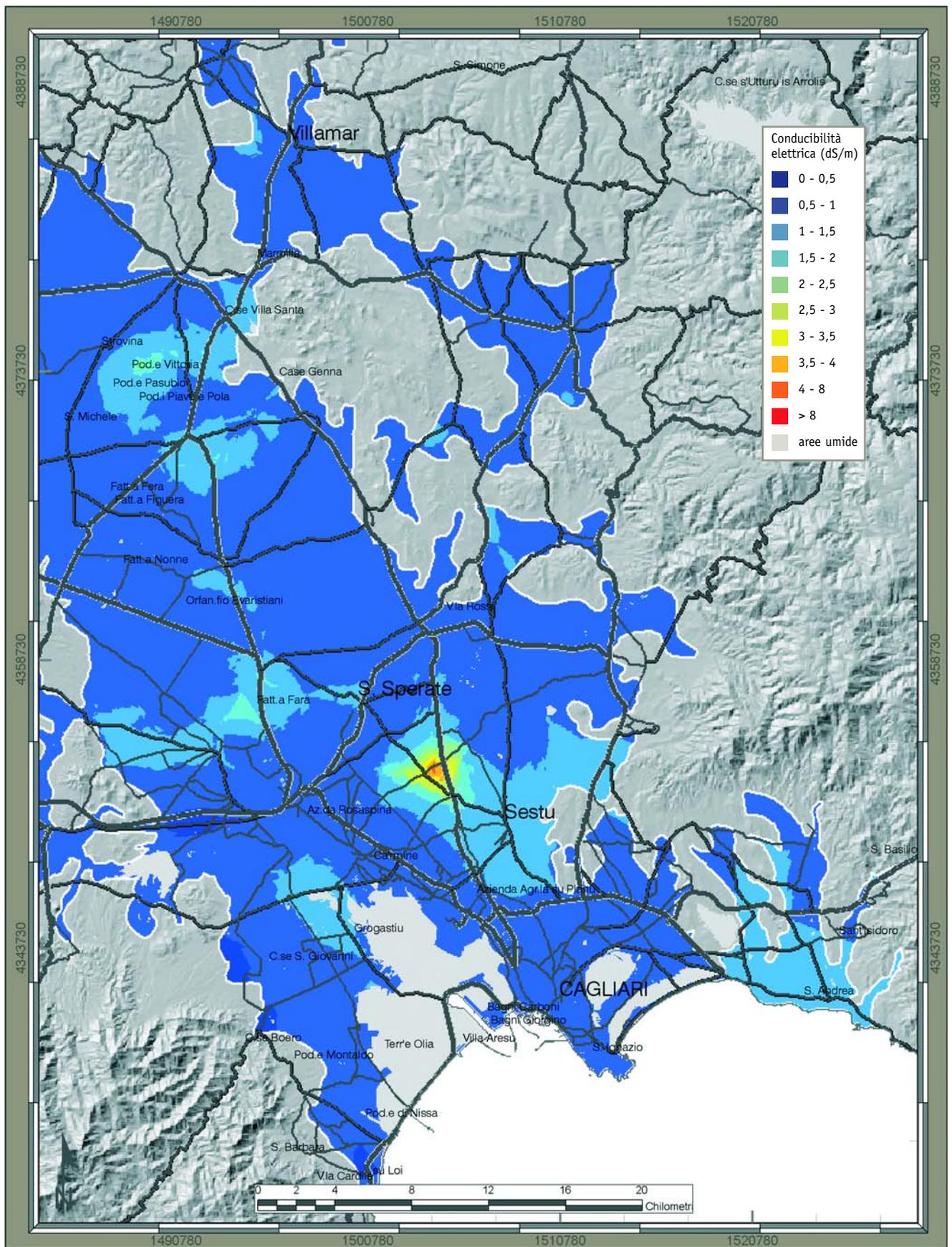


Ripartizione % dei suoli per classi di ECe









1. Raccolta strati informativi a scala regionale

Con lo scopo di valutare la suscettività delle aree di pianura della Sardegna al degrado per salinizzazione dei suoli è stato predisposto un modello,

su base GIS, che, partendo dal corredo informativo delle principali cartografie tematiche a disposizione, predica la localizzazione delle aree dove il fenomeno mostra le maggiori probabilità di manifestarsi.

In linea con la bibliografia consultata (Bui, 1997; Eilers et al., 2000; Garatwa and Bollin, 2002; Muscarà et al., 2003; Shook, 1997; Tanavud et al., 2004; Tang Yanli, 2002) il modello di calcolo è stato sviluppato sulla base della formula di Varnes, più frequentemente utilizzata nel calcolo del rischio idrogeologico, $R = P \times V$, dove le possibili variabili naturali e antropiche che determinano il RISCHIO sono sintetizzate nei fattori "PERICOLOSITÀ" (P) e "VULNERABILITÀ" (V) del territorio considerato.

Esso è un modello "fisicamente basato", ossia l'algoritmo che lo descrive è fondato sulla conoscenza del fenomeno e sui principali parametri fisici che lo condizionano. Può anche essere considerato un "system model" (Biggs et al., 2003) in quanto incorpora contemporaneamente un modello concettuale e un modello matematico rappresentati su base GIS. Questo tipo di modello offre l'indubbio vantaggio di poter essere migliorato man mano che la conoscenza del fenomeno si approfondisce o che la qualità dei dati a disposizione migliora.

I processi di salinizzazione dei suoli sono alquanto complessi; essi dipendono da fattori climatici, da fattori legati essenzialmente alla litologia del substrato (con particolare riguardo alle sue caratteristiche idrogeologiche), da fattori antropici legati nella fattispecie alle pratiche di gestione agricola e degli acquiferi, soprattutto in prossimità della linea di costa. Dipendono inoltre dalle caratteristiche morfologiche del sito considerato, in termini di quota orografica, pendenza del versante e distanza dal mare e, infine, dalle caratteristiche fisico-chimiche intrinseche dei suoli.

Tutti questi fattori sono stati considerati nel modello utilizzato. Le informazioni disponibili sui suddetti fattori provengono per gran parte da dati cartografici pubblici ampiamente disponibili o da rielaborazioni originali degli stessi; alcuni altri dati invece, come quelli che descrivono la salinizzazione del *topsoil* nelle piane agricole della Sardegna, sono stati ricavati da rilevamenti originali non pubblicati e da database riservati di proprietà dell'AGRIS. Tutta la cartografia digitale reperita è stata resa omogenea attraverso la conversione in formato raster dei tematismi altrimenti disponibili in altro formato.

In sintesi i documenti utilizzati sono:

- per il fattore **climatico**: Carta dell'indice di aridità, fornita dal Servizio Agrometeorologico Regionale della Sardegna e riferita agli anni 1991-2000. È stato utilizzato un raster GRID nativo con passo 250 m, ricampionato con passo di 40 m e georiferito al datum Roma40;
- per il fattore **idrogeologico**: Carta delle permeabilità dei substrati. Sulla base delle indicazioni fornite per le formazioni geologiche della Sardegna da Caboi et al. (1982) è stata redatta una carta originale delle permeabilità dei substrati geolitologici della

Sardegna. La base di riferimento per la delimitazione dei poligoni è stata tratta dalla Carta dei Suoli della Sardegna alla scala 1:250.000 che individua 12 unità geolitologiche (o unità di paesaggio);

- per il fattore **morfologico**: Modello Digitale del Terreno (DEM) con passo di 40 m, in formato raster GRID, utilizzato per ricavare le informazioni relative alle quote e alla pendenza (fonte: Assessorato EE.LL, Finanza e Urbanistica, Servizio Informativo e Cartografico Regionale). È stata inoltre calcolata la distanza dalla linea di costa;
- per il fattore **antropico**: Carta dell'uso e della copertura del suolo CORINE livello 4: è stato utilizzato uno shape file proveniente dall'Assessorato EE.LL.FF.U della RAS, riclassificato e convertito in raster GRID con passo di 40 m;
- per il fattore **pedologico**: Carta dei Suoli della Sardegna alla scala 1:250.000 (Aru, et al., 1991). Dal punto di vista geometrico questa informazione cartografica (in formato nativo shape file di ESRI, successivamente trasformato in raster GRID con passo di 40 m) è topologicamente corretta, essendo priva di sliver e/o buchi. Lo strato informativo è stato arricchito di informazioni testuali e delle corrispondenti parametrizzazioni numeriche. Il documento, oltre ad essere stato utilizzato per l'estrazione delle informazioni relative alla pedologia, rappresenta la base cartografica anche per le informazioni di tipo idrogeologico.

L'insieme degli strati informativi elencati, reperiti o prodotti come originali, è stato raccolto a formare gli indici che intervengono a definire l'algoritmo del modello. Essi, per semplicità, saranno d'ora in poi indicati come Indice **climatico**, Indice **morfologico**, Indice **idrogeologico**, Indice **pedologico** e Indice di **gestione**. Ciascun indice somma a sé la caratteristica di condizionare "comunque" il fenomeno di salinizzazione, sia che costituisca il fattore predisponente i processi d'accumulo dei sali nel suolo, sia che, al contrario, ne rappresenti il fattore inibitore.

2. Costruzione e standardizzazione degli indici

Per esprimere i fattori che condizionano il fenomeno di salinizzazione sotto forma di Indici è stata utilizzata una procedura di codifica comune a tutti gli

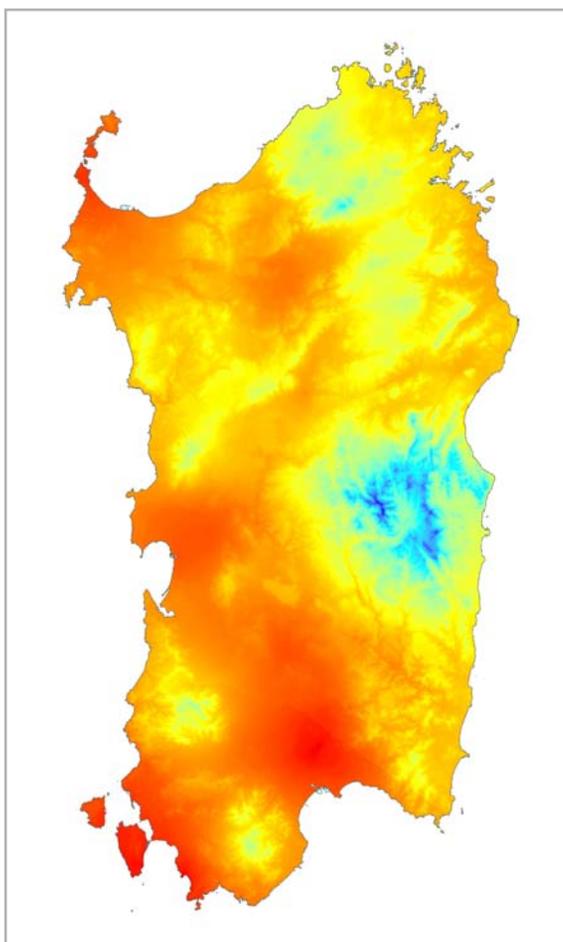
strati informativi utilizzati, basata sull'assunzione che **ogni parametro è classificato secondo un valore crescente e proporzionale alla sua "capacità" di favorire il processo di accumulo di sali nel suolo.**

Di seguito vengono descritte le modalità di costruzione degli indici.

COSTRUZIONE DEGLI INDICI

Indice climatico (Ic)

Per il fattore clima è stata utilizzata la "Carta degli Indici di aridità" elaborata dal Servizio Agrometeorologico Regionale. La Carta del SAR utilizzata classifica il territorio regionale nelle seguenti classi climatiche, sulla base dei valori degli Indici di aridità rilevati in un arco temporale di dieci anni (1991-2000):



- clima *umido*
(classe Indice di aridità > 1);
- clima *subumido*
(classe Indice di aridità compreso tra 1 e 0.65);
- clima *subumido secco*
(classe Indice di aridità compreso tra 0.65 e 0.5);
- clima *semiarido*
(classe Indice di aridità < 0.5).

In termini di predisposizione al processo, questo strato informativo è stato riclassificato attribuendo valori crescenti a partire dal clima umido a quello semiarido:

Tipo di clima	Classe
clima <i>umido</i>	1
clima <i>subumido</i>	2
clima <i>subumido secco</i>	3
clima <i>semiarido</i>	4

◀ **Figura 3**
Strato informativo A
(Carta dell'Indice di Aridità ricampionata e standardizzata).
Dal blu al rosso: aridità crescente.

Indice morfologico (Im)

La conformazione orografica del sito influisce notevolmente sulle possibilità di permanenza dei sali sulla superficie o all'interno del profilo del suolo. I parametri compresi in questo indice sono: la *pendenza* del sito, la sua *quota* sul livello del mare e la sua *distanza* dalla linea di costa.

Sulla base dei vincoli morfologici imposti per la delimitazione delle aree di studio nella prima fase di progetto, è stato creato un filtro che escludesse dal calcolo del modello tutte le aree con pendenza superiore al 2%, considerando che oltre questa soglia i movimenti idrici superficiali o interni al profilo del suolo possono essere tali da permettere la lisciviazione dei sali.

Sono state altresì filtrate le aree con quota sul livello del mare superiore a 100 m, con lo scopo di considerare solamente le aree in prossimità della linea di costa non soltanto per via "orizzontale" ma anche in senso "verticale" eliminando così le falesie, dove i punti orizzontalmente vicini o sulla linea di costa si trovano però distanti verticalmente dal mare.

Le rimanenti aree sono state classificate in funzione della sola quota (classi più basse = quote più alte).

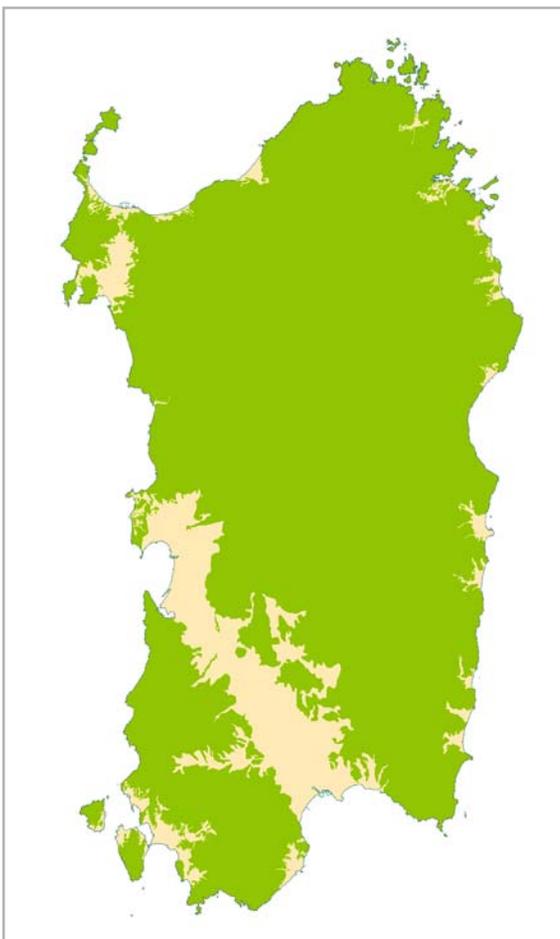


Figura 4a

Strato informativo Pendenza (P) e Quota (Q)
(Dal DEM, classificato e standardizzato)
In verde pendenza > 2% e quota > 100 m

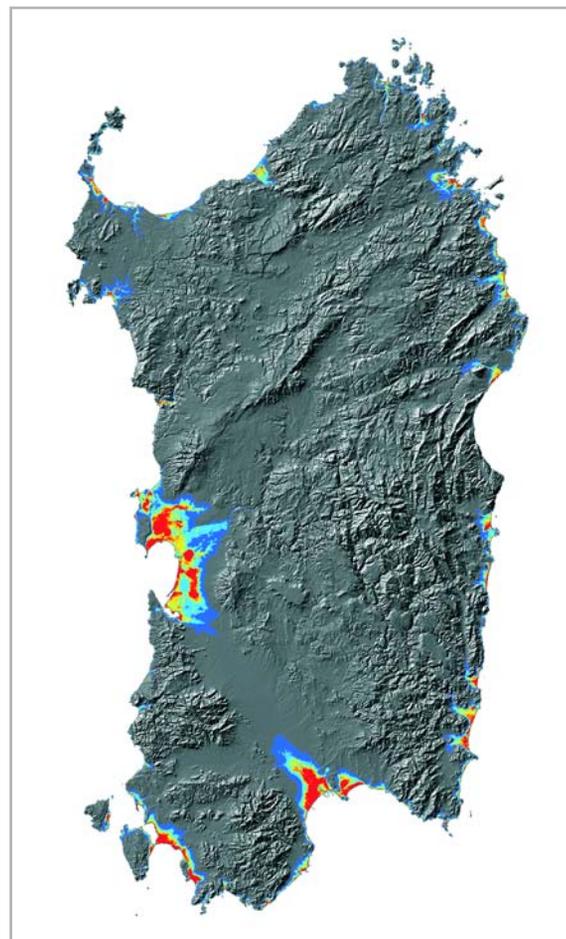


Figura 4b

Strato informativo Quota delle aree costiere
(Dal DEM, classificato e standardizzato)



La distanza del sito dalla costa è un parametro che influisce notevolmente sulla possibilità che un suolo possa essere salinizzato per ingressione della falda salmastra. Questo parametro è stato suddiviso in classi con valori assegnati in maniera decrescente man mano che ci si allontana dal mare. Nella prima classe il valore cambia ogni 25 m fino ai 100 m di distanza dalla costa; successivamente, l'ampiezza delle classi aumenta progressivamente secondo il seguente schema:

Distanza dalla linea di costa	Ampiezza della classe
fino 100 m	25 m
da 100 m a 1 km	50 m
da 1 km a 2 km	100 m
da 2 km a 10 Km	200 m
da 10 km a 20 km	500 m
da 20 km fino al punto più interno della Sardegna	1 km

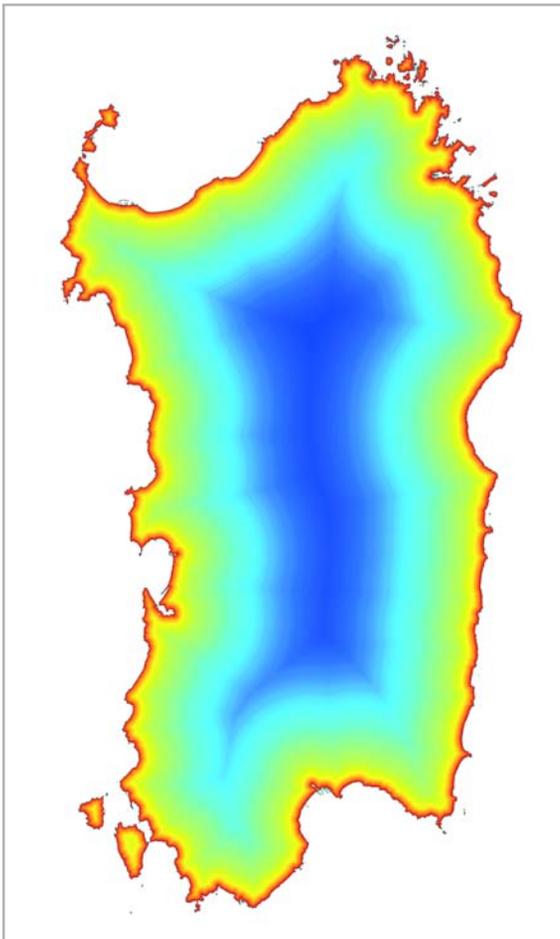


Figura 4c
Strato informativo Distanza dalla costa (D)
Classificato e standardizzato

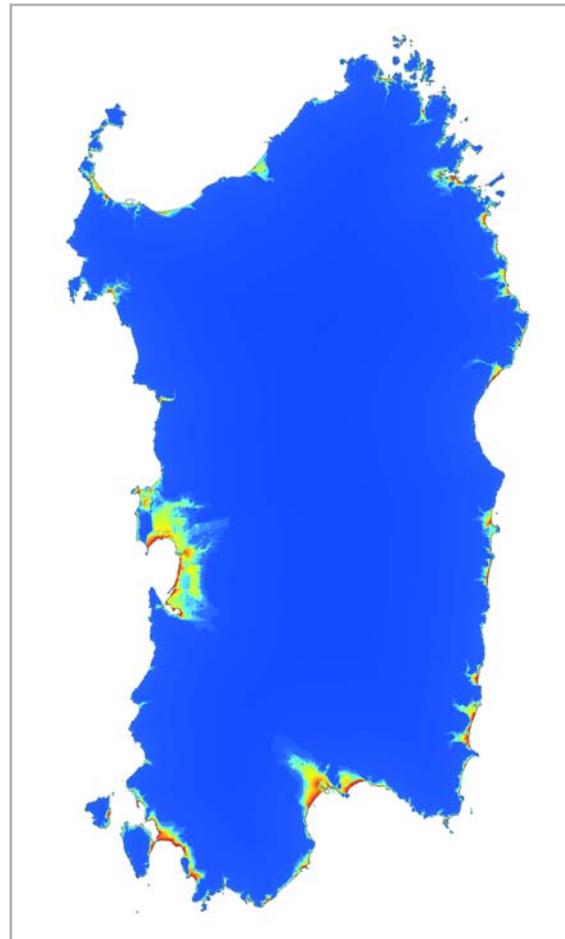


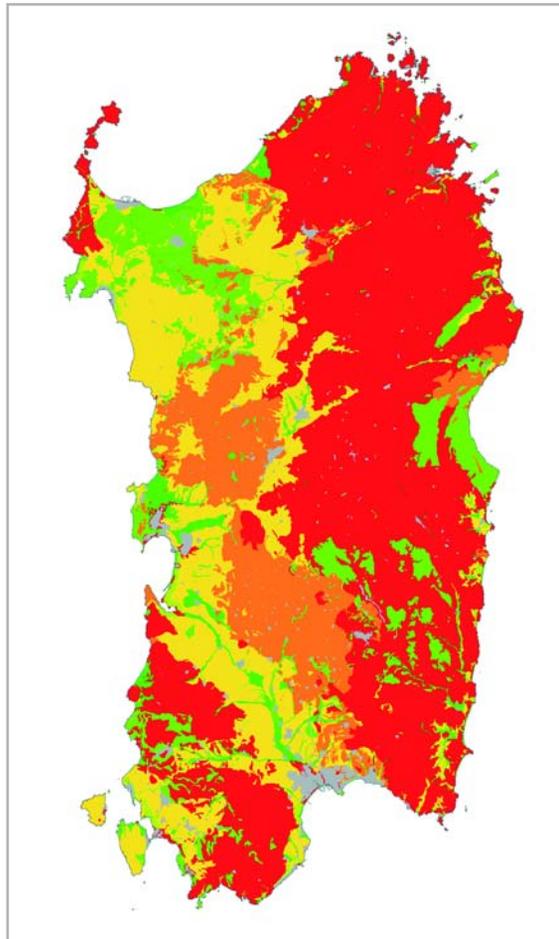
Figura 4d
PRODOTTO DEGLI STRATI INFORMATIVI
 $P \times Q \times D = Im$
Dal rosso al blu valori decrescenti

Indice idrogeologico (Ii)

Questo indice considera l'influenza che il substrato offre nel processo di salinizzazione dei suoli. La permeabilità di esso, semplicemente stimata, è stata divisa in permeabilità per *porosità* o per *fratturazione* e classificata secondo la sua intensità (bassa, media, alta). Si è reputato che la predisposizione del sito a manifestare il fenomeno della salinizzazione del suolo varia in misura inversamente proporzionale alla permeabilità del substrato.

In sintesi si considera che più un litotipo è permeabile più è in grado di trasmettere verso la superficie gli effetti benefici delle acque dolci di falda e smaltire così eventuali surplus di sali dalle rocce e dai sedimenti, limitandone il loro ingresso e la loro permanenza nei suoli. Per contro, lo stesso litotipo permeabile, in presenza di una falda idrica salina superficiale (come nel caso delle pianure costiere) può in questo caso comportarsi come un fattore innescante il fenomeno, in quanto favorisce l'ingressione della falda stessa verso l'interno e, in ultima analisi, verso i suoli. Per questo motivo, i litotipi appartenenti alle unità alluvionali posseggono una doppia classificazione, a seconda che si trovino o meno in prossimità della linea di costa (precisamente entro i 2 km dalla costa, valore stimato sulla base dei precedenti studi nell'area di Muravera).

Figura 5
Strato informativo Ps
(Carta delle permeabilità
redatta in originale e standardizzata)
Dal rosso al verde: permeabilità crescente





A questo scopo è stata utilizzata la classificazione per permeabilità dei substrati effettuata da Caboi et al. (1982), modificata e applicata sullo shape file della Carta dei Suoli della Sardegna. Le classi individuate sono sei, con valori crescenti da 1 a 6 dai più permeabili ai meno permeabili, secondo il seguente schema:

Unità geolitologica	Permeabilità	Classe
Calcari, dolomie e calcari dolomitici del Paleozoico e Mesozoico	Alta per fessurazione e carsismo	1
Sabbie eoliche dell'Olocene	Alta per porosità	1
Calcari organogeni, calcareniti, arenarie, conglomerati del Miocene	Complessivamente medio-alta per porosità nei termini detritici, alta per fessurazione e/o carsismo nei termini carbonatici	2
Alluvioni, conglomerati, arenarie eoliche dell'Olocene: a) sedimenti alluvionali sabbioso-ghiaiosi compresi oltre la fascia dei 2 Km dalla linea di costa b) sedimenti alluvionali limo-argillosi entro la fascia dei 2 Km dalla linea di costa	a) medio-alta per porosità b) complessivamente medio-bassa per porosità, localmente medio-alta nei livelli a matrice più grossolana	2 4
Argille, arenarie, conglomerati (Form.ne del Cixerri e di Ussana) dell'Eocene, Oligomocene, Miocene	Complessivamente media per porosità nei termini arenacei e conglomeratici; bassa per porosità nei termini argillosi	3
Alluvioni e arenarie eoliche del Pleistocene	Complessivamente media per porosità; localmente medio-alta nei livelli a matrice più grossolana	3
Rocce effusive acide (andesiti, rioliti, riolaciti, etc.) e intermedie (fonoliti) del Cenozoico	Complessivamente medio-bassa per fessurazione	4
Sedimenti litoranei (paludi, lagune costiere, etc.) dell'Olocene	Medio-bassa per porosità	4
Rocce effusive basiche (basalti) del Pliocene sup. e Pleistocene	Complessivamente da medio-bassa a bassa per fessurazione	5
Marne, arenarie, calcari marnosi del Miocene	Bassa per porosità, localmente medio-bassa nei termini più arenaci	5
Metamorfiti (scisti, scisti arenacei, argilloscisti, etc.) del Paleozoico	Complessivamente bassa per fessurazione	6
Rocce intrusive (graniti, granodioriti, leucograniti, etc.) del Paleozoico	Complessivamente bassa per fessurazione; localmente medio-bassa lungo le principali dislocazioni per faglie	6

Si sottolinea come tale classificazione, riferendosi a un documento cartografico con scala di 1:250.000, non consenta di cogliere le variazioni locali di permeabilità che comunque intervengono all'interno delle macro unità geolitologiche.

Indice pedologico (Ip)

L'influenza della componente dei suoli sul fenomeno della salinizzazione è certamente il dato più importante all'interno del modello fisico di rappresentazione del rischio. In mancanza di un archivio pedologico regionale con una buona e numerosa distribuzione di dati nel territorio, statisticamente utilizzabili, si è proceduto a codificare le informazioni contenute nella Carta dei Suoli della Sardegna in funzione delle proprietà pedologiche più importanti nel favorire o limitare i processi di salinizzazione. I parametri selezionati, che vanno a costituire l'Indice pedologico, sono cinque:

- la *permeabilità* del suolo, cioè quanto il profilo del suolo è in grado di trasmettere un flusso idrico, sia in senso verticale che orizzontale. È stata divisa in otto classi, con ordine inversamente proporzionale alla conducibilità idraulica, secondo il seguente schema:

Descrizione	Classe
Suoli da permeabili a molto permeabili	1
Suoli permeabili	2
Suoli da permeabili a mediamente permeabili	3
Suoli da permeabili a poco permeabili	4
Suoli mediamente permeabili	5
Suoli da mediamente permeabili a poco permeabili	6
Suoli da poco permeabili a mediamente permeabili	7
Suoli poco permeabili	8

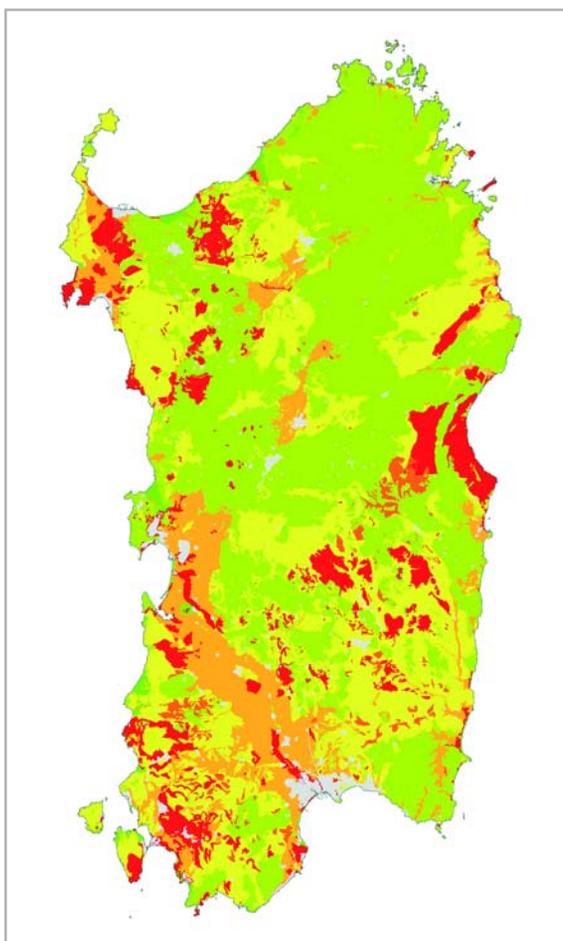


Figura 6a

Strato informativo Permeabilità suoli (Pe)
Dal rosso al verde: permeabilità crescente.

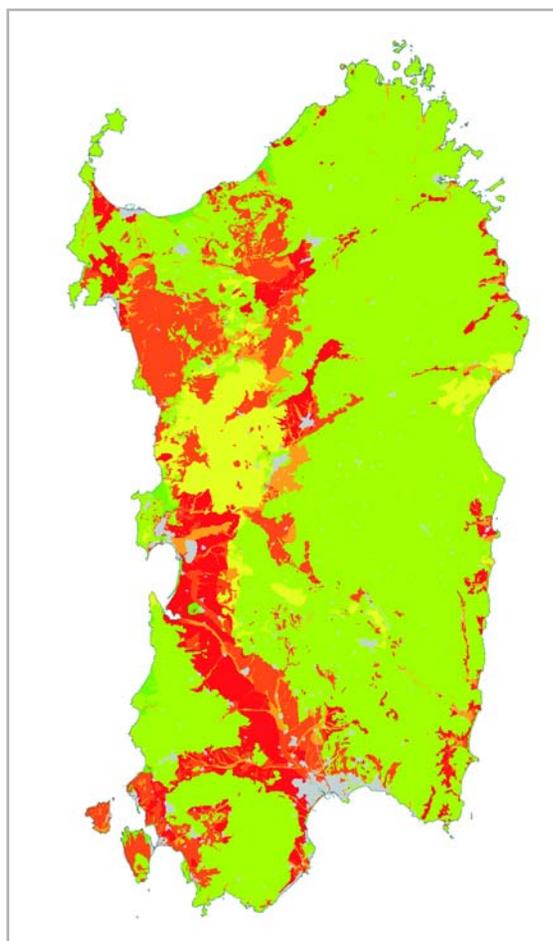


Figura 6b

Strato informativo Drenaggio suoli (Dr)
Dal rosso al verde: drenaggio crescente.



- il *drenaggio* della stazione, vale a dire quanto la superficie dei suoli sia in grado di favorire l'ingresso dell'acqua all'interno del profilo. Questo dato è stato diviso in sei classi, con ordine inversamente proporzionale, secondo il seguente schema:

Descrizione	Classe
Drenaggio eccessivo	1
Drenaggio buono	2
Drenaggio buono, talvolta moderato	3
Drenaggio buono, talvolta lento	4
Drenaggio lento	5
Drenaggio da lento a molto lento	6

- la *profondità* del suolo, misurata in centimetri dalla superficie, divisa in nove classi con ordine inversamente proporzionale, secondo il seguente schema:

Descrizione	Classe
Suolo profondo (oltre i 100 cm)	1
Suolo da profondo a mediamente profondo	2
Suolo da profondo a poco profondo	3
Suolo da mediamente profondo a profondo	4
Suolo mediamente profondo (tra 50 e 100 cm)	5
Suolo da mediamente profondo a poco profondo	6
Suolo da poco profondo a profondo	7
Suolo da poco profondo a mediamente profondo	8
Suolo poco profondo (inferiore a 50 cm)	9

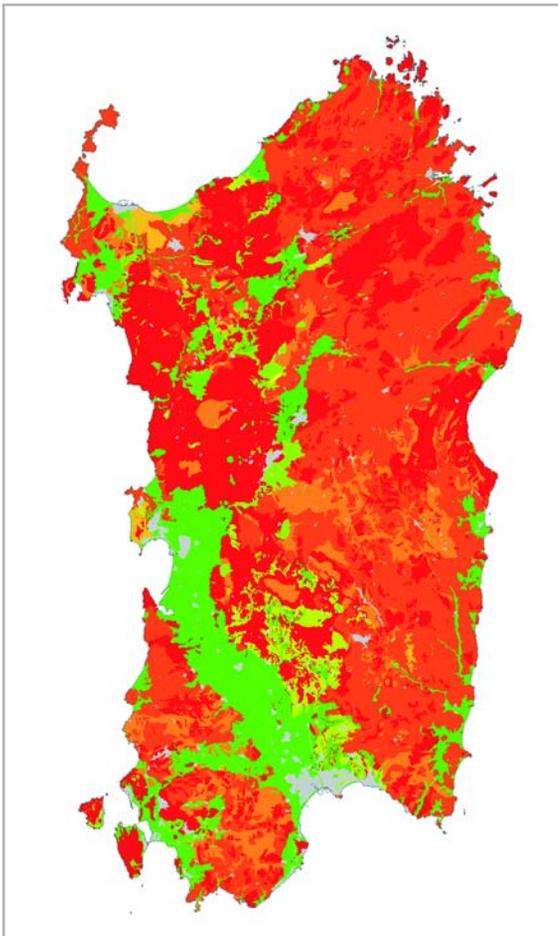


Figura 6c
 Strato informativo Profondità suoli (Pr)
 Dal rosso al verde: profondità crescente.

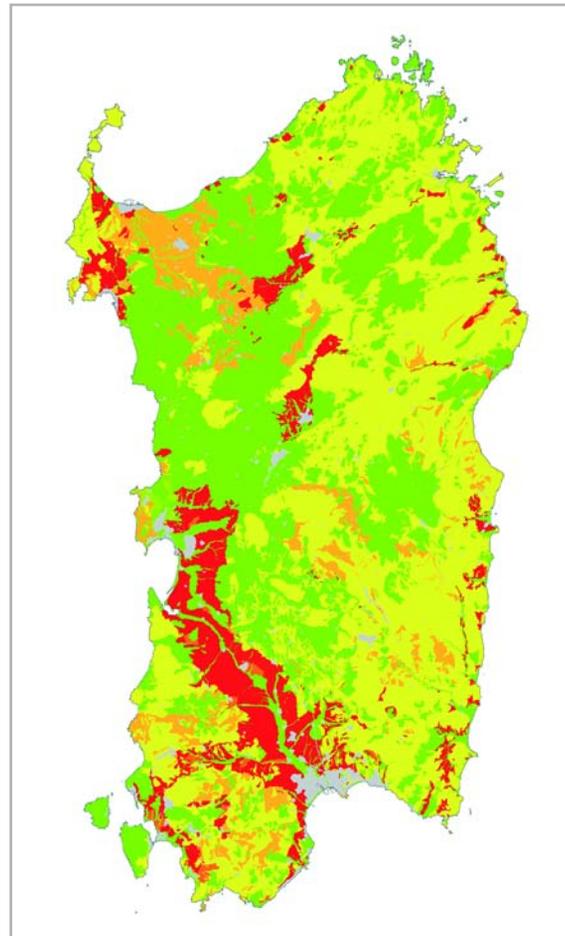


Figura 6d
 Strato informativo Orizzonti suoli (Or)
 Dal rosso al verde: orizzonti a permeabilità decrescente
 (da Btg-Btkm a Bw-C)

- la presenza e il tipo di *orizzonti* impermeabili, classificata in sette classi con ordine inversamente proporzionale in funzione di quanto un orizzonte si oppone alla risalita di una eventuale falda freatica superficiale o, analogamente, impedisce l'allontanamento per lisciviazione di sali provenienti dalla superficie, secondo il seguente schema:

Descrizione	Classe
Orizzonte impermeabile assente	1
Orizzonte calcico profondo	2
Orizzonte argillico subordinato	3
Orizzonte calcico	3
Orizzonte argillico	4
Orizzonte argillico e calcico associati	5
Orizzonte argillico e calcico, anche cementati	6
Orizzonte argillico con gley	7

- la *reazione* del suolo, vale a dire la concentrazione degli ioni idrogeno, rappresentata dal suo pH. Sono state identificate sette classi, con ordine inversamente proporzionale all'acidità.

Descrizione	Classe
Suoli acidi (pH inferiore a 5.6)	1
Suoli da subacidi ad acidi	2
Suoli subacidi (pH tra 5.6 e 6.5)	3
Suoli neutri (pH tra 6.6 e 7.3)	4
Suoli da neutri a subalcalini	5
Suoli subalcalini (pH tra 7.4 e 7.8)	6
Suoli da subalcalini ad alcalini (pH tra 7.4 a oltre 7.8)	7

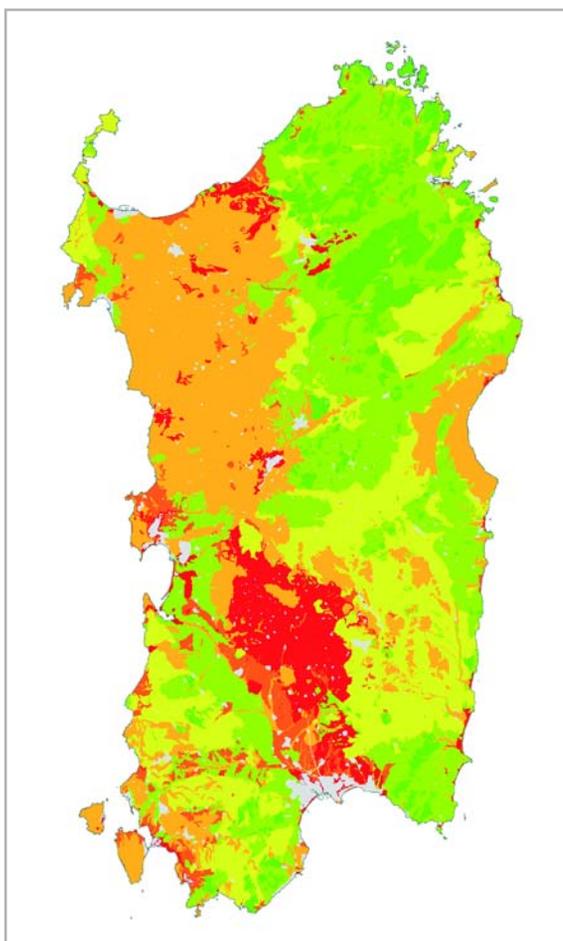


Figura 6e
Strato informativo Reazione suoli (Rz)
Dal rosso al verde: acidità crescente.

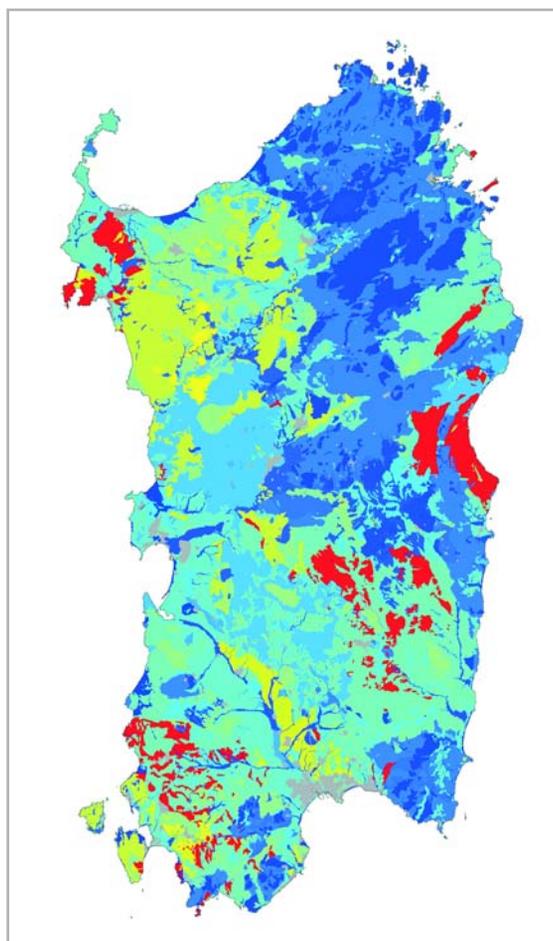


Figura 6f
PRODOTTO DEGLI STRATI INFORMATIVI
 $Pe \times Dr \times Pr \times Or \times Rz = Ip$
Dal rosso al blu: valori decrescenti.



Indice di gestione (Ig)

In un modello di rischio vengono identificati i livelli di *vulnerabilità* del territorio in funzione delle componenti ambientali che possono subire dei danni, soprattutto economici, a causa della loro esposizione al fenomeno studiato. Per quanto riguarda la salinizzazione dei suoli è stata considerata la componente *uso e copertura del suolo*, con particolare riferimento alla componente colturale poiché costituisce l'uso prevalente nelle aree di interesse.

Il dato sulle tipologie d'utilizzo del suolo e loro diffusione nel territorio è stato ottenuto dall'analisi critica della Carta dell'Uso del Suolo della Sardegna (CORINE Land Cover livello IV), aggiornata all'anno 2003. I parametri scelti per la classificazione sono stati: *sensibilità dell'uso* alla salinità e suo *valore economico*.

Le colture presenti in Sardegna sono state in questo modo classificate in ordine direttamente proporzionale alla difficoltà di sopportare livelli di salinità crescenti senza subire rilevanti decrementi produttivi (colture più sensibili = classi più alte). Per stabilire le classi si è fatto riferimento ai livelli di tolleranza indicati nel già citato Bollettino della FAO (1988). A tutti gli usi antropici e quelli naturali che non mostrano alcuna sensibilità all'elevato tenore di sali nel suolo, invece è stato attribuito il valore zero.

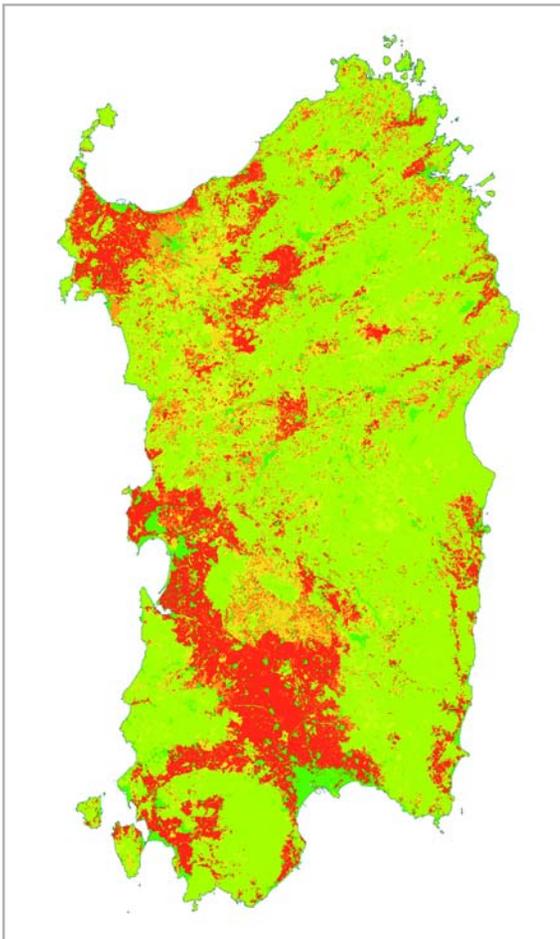


Figura 7a

Strato informativo Sensibilità dell'uso (S)
Dal verde al rosso: sensibilità crescente.

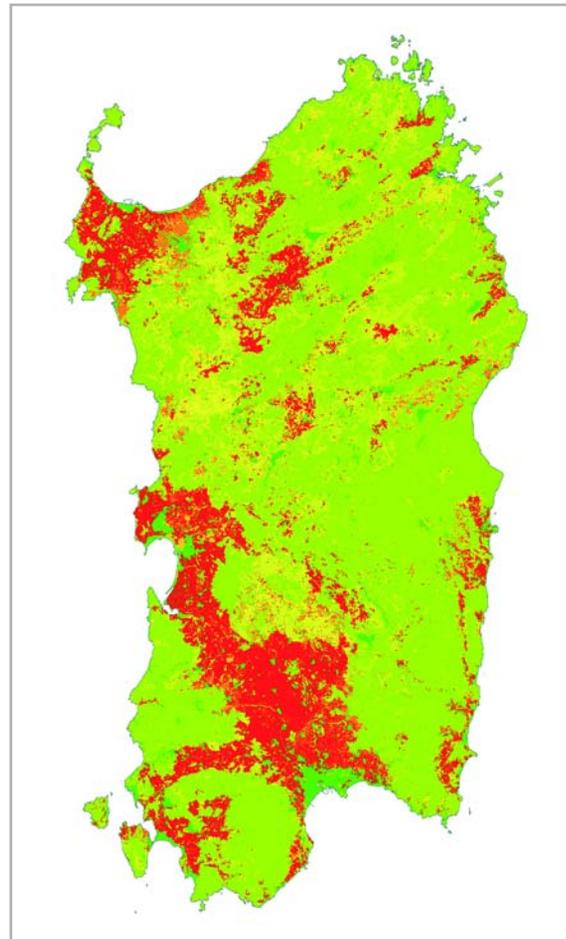
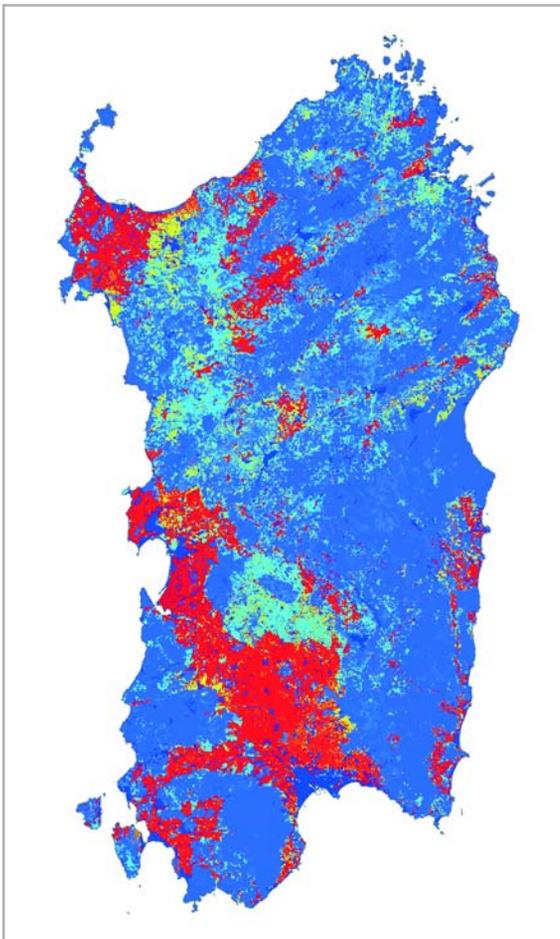


Figura 7b

Strato informativo Valore economico dell'uso (Ve)
Dal verde al rosso: sensibilità crescente.

Cod Corine	Uso	Classe sensibilità	Classe valore
2124	Colture in serra	8	15
2123	Vivai	7	15
2121	Seminativi semplici e colture orticole a pieno campo	7	14
242	Sistemi colturali e particellari complessi	7	13
222	Frutteti e frutti minori	7	12
221	Vigneti	7	11
2412	Colture temporanee associate al vigneto	7	9
2112	Prati artificiali	6	6
223	Oliveti	5	10
2411	Colture temporanee associate all'olivo	5	8
2122	Risaie	4	7
2111	Seminativi in aree non irrigue	4	4
231	Prati stabili	3	5
2413	Colture temporanee associate ad altre colture permanenti	3	3
243	Aree prev. occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	3	2
321	Aree a pascolo naturale	3	1
3242	Aree a ricolonizzazione artificiale	2	2
244	Aree agroforestali	2	1
333	Aree con vegetazione rada > 5% e< 40%	2	1
313	Boschi misti di conifere e latifoglie	2	1
3221	Cespuglieti e arbusteti	2	1
3231	Macchia mediterranea	2	1
31122	Sugherete	2	3
3232	Gariga	2	1
3111	Boschi di latifoglie	2	1
3241	Aree a ricolonizzazione naturale	2	1
3121	Boschi di conifere	2	1
31124	Altro	1	1
31121	Pioppeti, saliceti, eucalitteti	1	1
3222	Formazioni di ripa non arboree	1	1
3313	Aree dunali coperte da vegetazione di ampiezza superiore a 25m	1	1
124	Aree aeroportuali ed eliporti	0	0
411	Paludi interne	0	0
3312	Aree dunali non coperte da vegetazione di ampiezza superiore a 25m	0	0
131	Aree estrattive	0	0
1421	Aree ricreative e sportive	0	0
141	Aree verdi urbane	0	0
5122	Bacini artificiali	0	0
5121	Bacini naturali	0	0
133	Cantieri	0	0
143	Cimiteri	0	0
1322	Depositi di rottami a cielo aperto, cimiteri di autoveicoli	0	0
1321	Discariche	0	0
522	Estuari e delta	0	0
1122	Fabbricati rurali	0	0
5111	Fiumi, torrenti e fossi	0	0
1223	Grandi impianti di concentrazione e smistamento merci	0	0
1224	Impianti a servizio delle reti di distribuzione	0	0
1212	Insedimento di grandi impianti di servizi	0	0
1211	Insedimento industriale/artigianale e commerciale e spazi annessi	0	0
5211	Lagune, laghi e stagni costieri a produzione ittica naturale	0	0
3315	Letti di torrenti di ampiezza superiore a 25m	0	0
421	Paludi salmastre	0	0
332	Pareti rocciose e falesie	0	0
1222	Reti ferroviarie e spazi annessi	0	0
1221	Reti stradali e spazi accessori	0	0
3311	Spiagge di ampiezza superiore a 25m	0	0
1111	Tessuto residenziale compatto e denso	0	0
1112	Tessuto residenziale rado	0	0
1121	Tessuto residenziale rado e nucleiforme	0	0



Per il valore economico delle colture riferito alla realtà produttiva sarda è stata operata un'analoga classificazione sulla base di varie fonti bibliografiche (dati ISTAT e articoli vari sull'economia agricola dell'Isola). Anche in questo caso la classificazione è direttamente proporzionale: le colture economicamente più vantaggiose corrispondono alle classi più alte.

In totale sono state ottenute otto classi per la componente *sensibilità* e quindici classi per la componente *valore economico* dell'Indice.

Figura 7c
PRODOTTO DEGLI STRATI INFORMATIVI
 $S \times V_e = I_g$
Dal rosso al blu: valori decrescenti.

STANDARDIZZAZIONE

Tutte le variabili selezionate per la costruzione degli indici sono state standardizzate allo scopo di neutralizzare l'elevata eterogeneità dovuta alle loro differenti unità di misura. Ogni valore della variabile originaria è stato pertanto sostituito con quello della variabile standardizzata secondo la formula:

$$Z_x = (X - \bar{X}) / s_x$$

dove:

Z_x = variabile standardizzata

X = valore della variabile

\bar{X} = valore medio della variabile

s_x = deviazione standard

3. Calcolo del rischio teorico

Con la costruzione degli indici, e la loro successiva standardizzazione, tutte le tematiche fisiche e antropogeniche sono state classificate e rese confrontabili secondo strati informativi coerenti con la problematica trattata.

Ad esclusione dei soli indici climatico e idrogeologico, entrambi derivanti dalla riclassificazione di un unico livello informativo (Indice di aridità e Permeabilità del substrato geolitologico), tutti gli altri indici esprimono l'interrelazione tra due o più parametri, nell'ambito di uno stesso livello tematico, che intervengono nel favorire o limitare l'esposizione dei suoli al rischio di salinizzazione.

Sono stati quindi riuniti tutti i termini necessari per l'espressione del rischio secondo la già citata formula:

$$[1] R = P \times V$$

L'Indice Pedologico **Ip**, l'Indice Morfologico **Im**, l'Indice Idrogeologico **Ii** e l'indice climatico **Ic** sono stati aggregati nel fattore Pericolosità potenziale (**P**) e assumono così il significato di "indicatori di predisposizione fisica del territorio al rischio di salinizzazione". L'Indice di Gestione **Ig** costituisce invece il fattore Vulnerabilità (**V**), ossia esprime "la potenzialità delle colture presenti a subire danni per l'esposizione alla sorgente di pericolo *salinizzazione del suolo*".

La funzione prescelta per mettere in relazione gli indici tra di loro si basa su una operazione di tipo moltiplicativo. La formula [1] assume pertanto la seguente declinazione:

$$[2] R = (Ic \times Im \times Ii \times Ip) \times Ig = \\ = [A \times (Q \times P \times D) \times Ps \times (Pe \times Dr \times Pr \times Or \times Rz)] \times (S \times Ve)$$

dove:

Ic = Carta dell'Indice di aridità (A) riclassificata e standardizzata;

Im = prodotto tra la Carta delle Quote (Q), Carta della pendenza (P) e Carta della distanza dal mare (D) riclassificate e standardizzate;

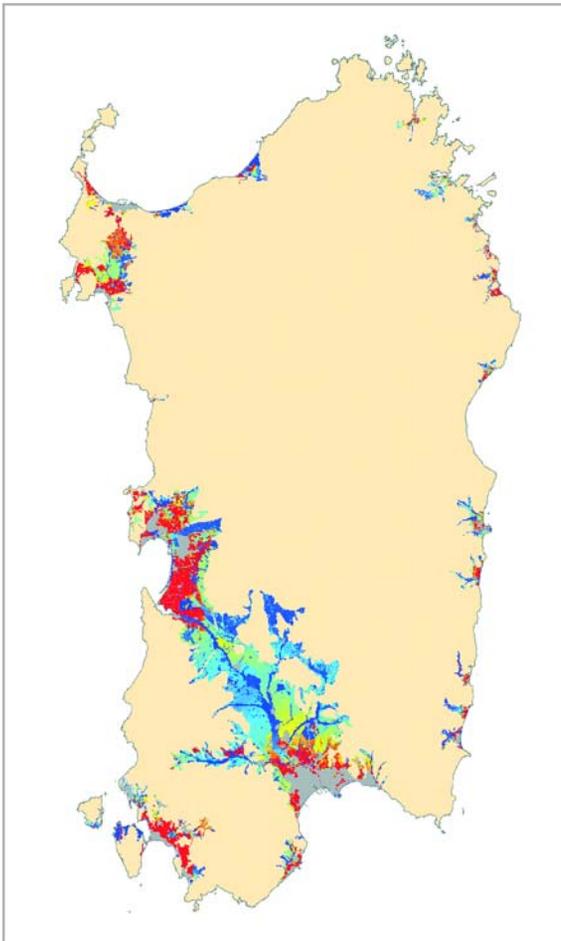
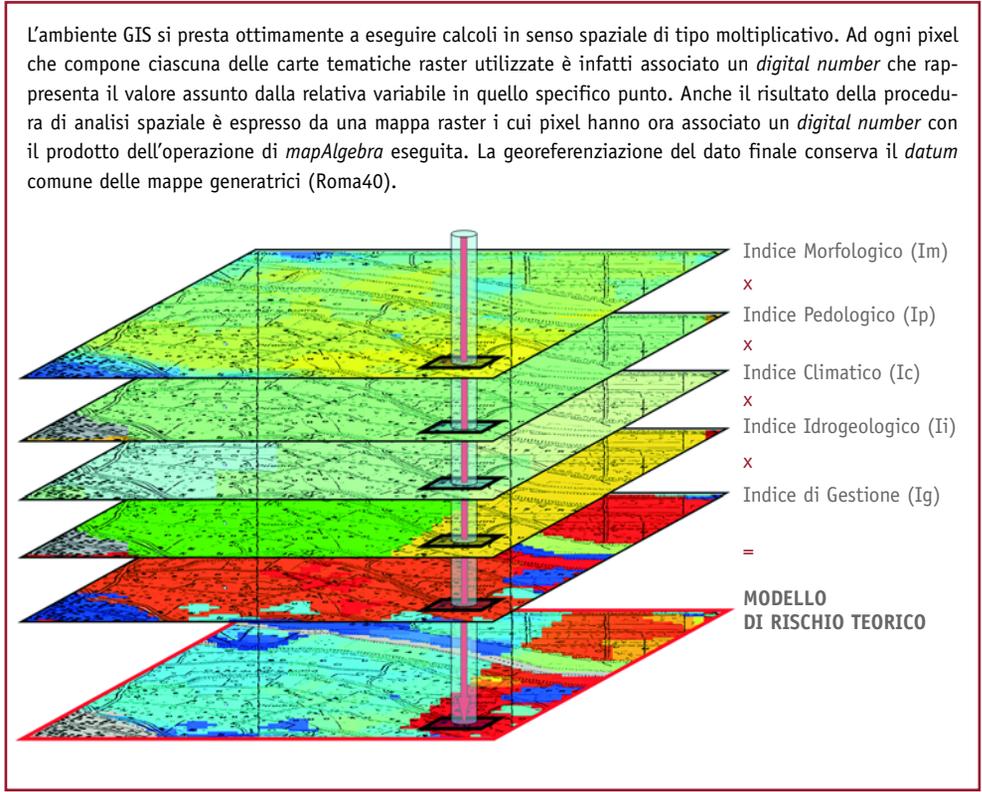
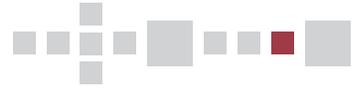
Ii = Carta delle Permeabilità dei substrati (Ps) riclassificata e standardizzata;

Ip = prodotto tra la Carta della permeabilità dei suoli (Pe), Carta del drenaggio (Dr), Carta delle profondità degli orizzonti (Pr), Carta del tipo di orizzonti pedologici (Or) e Carta della reazione (Rz), derivate dalla Carta dei Suoli riclassificata e standardizzata;

Ig = prodotto tra la Carta della sensibilità delle colture (S) e la Carta del valore economico delle colture (Ve) derivate dalla CORINE Land Cover riclassificata e standardizzata.

L'uso dell'algoritmo moltiplicativo è stato ritenuto adatto a questo tipo di calcolo spaziale in quanto permette di sfruttare le proprietà aritmetiche relative al valore zero. In tal modo, infatti, viene mantenuta l'attribuzione di **rischio nullo** in quelle porzioni di territorio in cui gli elementi di pericolosità e/o di vulnerabilità risultano assenti, come nel caso di aree non coperte da suolo (roccia affiorante, aree edificate, specchi d'acqua) o già naturalmente saline (zone perlagunari e stagnali)³.

Il risultato del prodotto [2] è rappresentato dalle carte delle **figure 3, 4, 5, 6, 7 e 8**.



La carta di **figura 8** costituisce il punto di arrivo del processo di calcolo, ossia la rappresentazione spaziale dell'esposizione "teorica" del territorio al rischio di salinizzazione. Tale carta si basa su fattori fisici e antropici oggettivamente valutabili e presenta pertanto un indubbio valore predittivo in mancanza di analisi di controllo.

Al fine di verificare la capacità predittiva del modello si è proceduto ad un'analisi di robustezza, calcolando la correlazione tra la *Carta del rischio teorico* e la *Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità*, riclassificata e standardizzata secondo le medesime procedure applicate agli altri strati informativi (formato aster GRID passo 40 metri)⁴.

Il risultato ottenuto, pari a 0.43, è apparso piuttosto soddisfacente in considerazione della tipologia composta dei dati di *input* utilizzati.

Figura 8
Mappa del rischio teorico

Appare evidente che il modello così impostato offre una capacità analitica funzionale e dinamica sotto diversi aspetti. In particolare, la progressiva introduzione dei singoli fattori moltiplicativi permette di operare uno screening continuo dei parametri che influenzano maggiormente i processi di salinizzazione. In altre parole, se ogni mappa raster in uscita dalle operazioni di calcolo intermedie viene correlata alla carta dei valori misurati è possibile stimare quanto il parametro aggiunto nel calcolo aumenti o diminuisca la correlazione. In questo modo è possibile stimare il “peso” del parametro stesso e attribuirgli un coefficiente di incidenza nel calcolo complessivo.

L'ottimizzazione del calcolo ed il perfezionamento della capacità predittiva del modello costituiranno oggetto di futuro approfondimento.

³ In realtà le relazioni che intercorrono tra i vari parametri considerati sono di natura più complessa e sarebbe necessario, oltre che molto costoso, indagare approfonditamente sulle modalità delle loro variazioni relative. Per far ciò, però, sarebbe necessaria una mappatura dei parametri stessi molto più accurata di quella utilizzata ai fini della realizzazione del modello in esame, eliminando quelle regioni di stazionarietà del valore del parametro, rappresentate invece dalle unità cartografiche degli strati informativi utilizzati (es. Carta dei Suoli, Carta delle permeabilità). In sintesi sarebbe necessario utilizzare dei dati costruiti con logica fuzzy, dove vengono meglio descritte le variazioni dei processi naturali, invece di mappe vector, dove le suddette variazioni vengono discretizzate in classi. Va da sé che per ottenere tali risultati è necessario avviare campagne di rilevamento ad hoc, con una elevata densità di campionamento e con accurate procedure di interpolazione dei dati ricavati. Il modello proposto per la rappresentazione del rischio di salinizzazione, pertanto, contiene l'inevitabile grado di approssimazione dovuto all'utilizzo dei dati attualmente disponibili, permettendo comunque di ricavare in maniera immediata, e con procedure molto più economiche, l'informazione richiesta.

⁴ Il formato raster non consente un calcolo diretto dell'indice di correlazione secondo la formula:

$$r = [\sum (X - \bar{X}) \times (Y - \bar{Y}) / n] / s_x \times s_y$$

poiché non è possibile effettuare, al numeratore, la sommatoria delle n variabili, rappresentate nel caso specifico dai 18 milioni di pixel delle carte di input. Il calcolo dell'indice di correlazione pertanto è stato effettuato considerando il prodotto tra le variabili X e Y come il prodotto, rispettivamente, tra i due strati informativi “Carta del rischio teorico” e “Carta dei suoli salini”. I valori \bar{X} , \bar{Y} , s_x , s_y sono invece rappresentati dai valori medi delle variabili X e Y e dalle loro deviazioni standard calcolate automaticamente dallo Spatial Analyst di ARCMAP. L'indice di correlazione della mappa di output, anch'essa in formato raster, corrisponde in questo modo al valore medio della mappa stessa.

4. La carta del rischio finale

La Carta del rischio finale è stata ottenuta integrando il fattore Pericolosità potenziale **P** della formula

[1] con il fattore moltiplicativo **E_{Ce}**, derivato dalla “Carta della distribuzione dei suoli a differente grado di salinità” riclassificata e standardizzata.

L’inserimento del livello tematico “**misura della salinità dei suoli**” completa e perfeziona il calcolo del RISCHIO in quanto aggiunge l’informazione “manifestazione del fenomeno” che, facendo riferimento al concetto di PERICOLOSITÀ di Varnes⁵, rappresenta l’occorrenza di una fonte di pericolo nel territorio, rappresentato in questo caso dalla *salinità* nelle aree di pianura della Sardegna.

Il rischio così ricalcolato è espresso dalla **figura 9**.

La mappa raster di *output*, analogamente alla Carta del rischio “teorico”, assume valori continui nello spazio; tuttavia, al fine di facilitare la lettura interpretativa e avere una visione immediata, in termini relativi, delle porzioni di territorio esposte a un diverso grado di rischio di salinizzazione, si è preferito suddividere la scala dei valori in 5 livelli, corrispondenti alle classi di rischio MOLTO BASSO, BASSO, MEDIO, ALTO e MOLTO ALTO.

Gli estremi delle classi sono stati localizzati con un criterio manuale, tenendo conto delle distribuzioni di frequenza dei pixel operata dal programma e del loro addensamento locale. La **tabella 4** riporta l’estensione delle aree agricole ripartite nelle 5 classi di rischio. Da questa si calcola che il 6,3 % della superficie indagata ricade nelle classi di rischio alto e molto alto, pari a 15.551 ettari del totale.

Se si confronta questo dato con le misure di conducibilità elettrica effettuate e riportate nel precedente capitolo (**tabella 3**, pag.23), che indicavano l’ammontare dei suoli salini e molto salini al 3,9%, risulta che le aree a rischio sono superiori del 2,4%, corrispondente a circa 6000 ettari della superficie totale indagata.

Questo risultato appare coerente con le considerazioni fatte a conclusione del precedente capitolo in quanto indica come i suoli, pur non manifestando valori elevati di salinità al momento della misura, possono comunque essere sottoposti a condizioni fisiche e ambientali favorevoli all’insorgenza del fenomeno di salinizzazione.

Tabella 4
Estensione, in ettari e percentuale, dei suoli suddivisi per classe di rischio.

Classe di rischio	superficie in ettari	% rispetto all’area indagata
molto basso	181.812	73,6
basso	30.745	12,4
medio	19.035	7,7
alto	13.449	5,4
molto alto	2.102	0,9

⁵ Definizione di pericolosità di Varnes, tratta dal rapporto UNESCO del 1984 Landslides Hazard Zonation – a review of principles and practice (riferita al pericolo di frana ma diffusamente applicata in relazione a tutti i fenomeni naturali): “probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente dannoso in un determinato intervallo di tempo e in una certa area”.

Infine, affinché una carta di questo tipo rappresenti un utile strumento operativo a disposizione di chi è preposto alla tutela del territorio, ai livelli di entità del rischio è stata associata la valutazione degli interventi che si ritiene debbano essere prioritari per garantire la conservazione dei suoli di interesse agricolo, come riportato in **tabella 5**.

Classe di rischio	Misure di intervento e di tutela
molto basso	Azioni di intervento non necessarie, fatte salve le condizioni ambientali e antropiche attuali
basso	Prevenzione e mantenimento delle condizioni ambientali e antropiche attuali
medio	Azioni di controllo del fenomeno attraverso piani di monitoraggio e interventi di tutela localizzati
alto	Reti di monitoraggio nelle aree d'interesse agricolo e interventi di bonifica finalizzati alla correzione delle condizioni ambientali e antropiche causa del fenomeno
molto alto	

Tabella 5
Indicazioni generali delle misure di intervento e tutela per classe di rischio

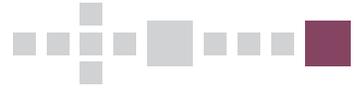
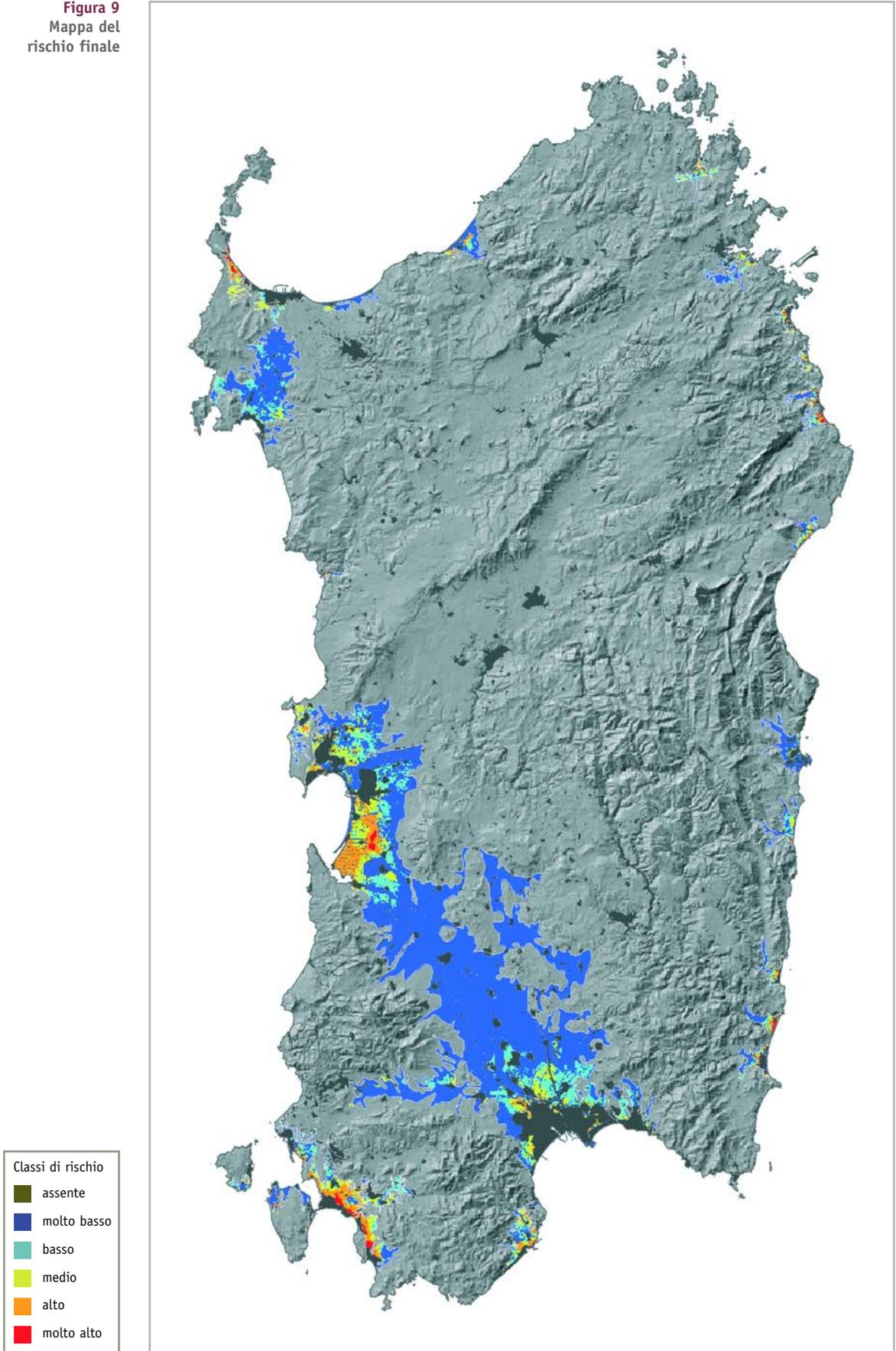


Figura 9
Mappa del
rischio finale



Considerazioni conclusive

Il lavoro presentato è stato articolato in due obiettivi ed ha avuto lo scopo di fornire una base di conoscenze unitaria del fenomeno di salinizzazione dei suoli su scala regionale.

Con la *Carta dei suoli a differente grado di salinità della Sardegna* è stata data una misura dell'estensione e dell'intensità della salinità nei suoli delle aree agricole più importanti; con il *Modello di calcolo del rischio di salinizzazione* è stata invece fornita una procedura di valutazione del rischio supportata da una ricca base informativa, restituita graficamente con la mappatura delle aree a differente grado di rischio delle aree agricole della Regione.

Entrambi i documenti sono stati realizzati attraverso l'utilizzo di un Sistema Geografico Informativo che li rende flessibili e aggiornabili nel tempo ed offre larghe possibilità di una loro applicazione negli studi territoriali e ambientali.

Le metodologie adottate sono state coerenti con la qualità e la quantità dei dati disponibili, che talora si sono mostrati molto disarmonici nella loro distribuzione sul territorio. I risultati, se da una parte risentono di questa disorganicità ed offrono, per alcuni aspetti, elementi di debolezza, propongono tuttavia altri elementi di importante innovazione rispetto alla tradizionale trattazione cartografica della tematica *salinizzazione*.

Tra gli elementi di innovazione sono stati ritenuti particolarmente significativi i seguenti:

- primo esempio in Sardegna di documento cartografico in formato digitale con rappresentazione della *variabilità spaziale*, *intensità* ed *estensione* dei suoli salini a scala regionale;
- ampia distribuzione delle misure nelle piane agricole della Sardegna;
- georeferenziazione di oltre 1500 dati analitici su terreni agrari e valorizzazione del loro potenziale con l'utilizzo in ambiente GIS;
- creazione di una banca dati e di un Sistema Informativo Geografico sulla tematica specifica della salinizzazione;
- possibilità di utilizzo del Sistema Informativo per finalità applicative in campo agronomico, ambientale e pianificatorio;
- codifica dei dati "qualitativi" contenuti nella Carta dei Suoli della Sardegna e loro trasformazione in informazioni interrogabili con il GIS;
- possibilità di interscambio delle informazioni con analoghe banche dati esistenti presso altre istituzioni.

Gli elementi di debolezza sono stati rilevati soprattutto in relazione ai seguenti aspetti:

- tematismo *idrogeologia* non sufficientemente sviluppato per carenza o frammentarietà di dati su *acque* e *falde* nel territorio regionale;
- mancanza di informazioni sullo stato di salinizzazione dei suoli in profondità per carenza e/o frammentarietà di dati pedologici nel territorio regionale;
- eterogeneità degli strati informativi regionali disponibili (Carta Indice di Aridità: passo 250 metri; DEM: passo 40 metri; Carta dei Suoli: scala 250.000; Corine Land Cover: approssimazione al 25.000).



Le criticità riscontrate mettono in luce una forte necessità di disporre di dati costantemente aggiornati e più numerosi nell'affrontare studi a carattere ambientale e territoriale. Ciò rende auspicabile una valorizzazione dei dati esistenti presso i diversi uffici dell'Amministrazione Regionale, attraverso l'attivazione di una rete di comunicazione tra le banche dati e i Sistemi Informativi Geografici che vi risiedono, nonché la promozione di nuovi e più approfonditi studi ambientali, e in particolar modo sui suoli e sulle acque, che investano l'intero territorio della Sardegna.

BIBLIOGRAFIA

- Aringhieri, R. 1999. I sali nel terreno. Collana tecnico-scientifica INAPA. CNR, Istituto per la Chimica del Terreno.
- Aru, A., Baldaccini, P., Vacca, A. 1991. Carta dei suoli della Sardegna. Regione Autonoma della Sardegna e Università degli Studi di Cagliari.
- Biggs, A.J.W., Power, R.E., Brough, D.M. 2003. A preliminary assessment of salinity risk modelling in the Queensland Murray-Darling Basin. Department of Natural Resources and Mines, Toowoomba. QNRM03155
- Bui, E. 1997. Assessing the regional risk of salinization over the Dalrymple Shire CSIRO Technical Report 26/27
- Caboi, R., Cidu, R., Pala, A., Pecorini G. 1982. Le acque fredde della Sardegna-Lineamenti idrogeologici e idrogeochimici. In Ricerche Geotermiche in Sardegna con particolare riferimento al graben del Campidano, CNR Relazione finale Progetto Finalizzato Energetica, 25-55
- Eilers, R.G., W.D. Eilers and T. Brierley. 2000. Risk of Soil Salinization. In McRae, T., C.A.S. Smith and L.J. Gregorich (eds). Environmental Sustainability of Canadian Agriculture: Report of the Agri-Environmental Indicator Project. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa Ont.
- F.A.O., 1985. Guidelines: Land Evaluation for irrigated agriculture. FAO Soil Bulletin n. 55
- F.A.O., 1988. La qualità de l'eau en agriculture. Bulletin FAO d'Irrigation et de drainage n. 29, rev. 1.
- Garatwa, W., Bollin C. 2002. Disaster Risk Management - Working Concept. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH
- Monteleone, M. 2006. Problematiche della salinità nelle aree irrigue meridionali. Italian Journal of Agronomy, 1:129-202.
- Muscarà, C., Jacobelli, P., Fiduccia, A., Ruggiero, M., 2003. Processi di conoscenza e tecniche GIS per la pianificazione del Sistema Insediativi "Sicuro". Atti della VII Conferenza Nazionale ASITA
- Pagliai, M. (eds.). 2001. Metodi di analisi fisica del suolo. Collana di metodi analitici per l'agricoltura. Edizione Franco Angeli.
- Shook, G. 1997. An assessment of disaster risk and its management in Thailand. Disasters 21 (1): 77-88
- Tanavud, C., Yongchalermchai, C., Bennui, A., Densreeserekul O. 2004. Assessment of flood risk in Hat Yai Municipality, Southern Thailand, using GIS. Journal of Natural Disaster Science, 26 (1): 1-14
- Tang Yanli. 2002. The Application of GIS and RS for Coastline Change detection and Risk Assessment to Enhanced Sea Level Rise. Master thesis ITC – Enschede, the Netherlands



**Carta della distribuzione dei suoli
a differente grado di salinità**

A collage of various agricultural images including crops, fields, and farm equipment, arranged in a stepped pattern.

Agris

Agenzia Regionale per la ricerca scientifica
e l'innovazione in agricoltura



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

DIPARTIMENTO PER LA RICERCA NELLE PRODUZIONI VEGETALI

Viale Trieste, 111 - 09123 Cagliari

Tel. +39 070 20111 - Fax +39 070 285381

ISBN 978-88-903404-1-3



9 788890 340413 >