PARTE II

Ottobre 2010

Indice

Introduzione pag 1
Processi di salinizzazione dei suoli 2
Risposta delle piante alla salinità 5
Risposta dei suoli alla salinità e sodicità 7
Bonifica dei suoli salini 9
Bonifica dei suoli sodici 11
Obiettivi dello studio 12
Area di studio 13
Fasi dello studio 13
Fase 1 - Raccolta e rielaborazione delle informazioni esistenti 16
Carta dei sistemi di terre 16
Carta dell'utilizzazione agricola del suolo 17
Fase 2 - Primo rilevamento (autunno 2009) 19
Identificazione dei siti e campionamento dei suoli 19
Proprietà chimiche e fisiche dei suoli 20
Analisi convenzionali di laboratorio 20
Analisi statistica 21
Distribuzione spaziale (cartografia) delle proprietà dei suoli 29
Cartografia dello stato si salinità dei suoli 31
Spettrometria V-NIR 36
Analisi statistica 40
Distribuzione spaziale (cartografia) delle proprietà spettrali 42
Idrologia del suolo 44
Statistica descrittiva 48
Distribuzione spaziale (cartografia) delle proprietà idrologi-che 49
Fase 3 - Secondo rilevamento (estate 2010) 55
Identificazione dei siti di campionamento 55
Scavo e rilevamento dei profili 56
Descrizione e classificazione dei profili 57
Profilo P1 58
Profilo P2 62
Profilo P3 65
Profilo P4 68
Profilo P5 71
Fase 4 - Spettrometria V-NIR applicata alla predizione delle proprietà dei suoli 74
Background 74

Basi fisiche 74
Chemiometria 76
Meriti e limitazioni 77
Applicazione ai suoli dell'area di studio 77
Misure di riflettanza 77
Chemiometria 78
Partial least-squares regression (PLSR) 78
Manipolazione dei dati spettrali 79
Selezione del modello ottimale di calibrazione PLSR 79
Software utilizzato 80
Risultati e discussione 81
Fase 5 - Bilancio idrico delle colture 88
Metodologia 88
Risultati e discussione 92
Conclusioni 100
Bibliografia 108
Annesso A 115
Tavole 118

Introduzione

Gli ecosistemi delle regioni aride e semi-aride del pianeta, soprattutto quelli a maggiore disturbo antropico (spesso riferiti come 'agro-ecosistemi'), sono soggetti a vari processi di degrado, comunemente descritti come '**desertificazione**'. Tra questi processi la **salinizzazione** dei suoli gioca un ruolo rilevante (Wild, 2003).

La salinizzazione è l'accumulo di sali solubili nel *solum* (la parte superiore del profilo del suolo, includente gli orizzonti A e B) e/o nel *regolite* (lo strato o mantello di materiale roccioso frammentale ed inconsolidato, residuale o trasportato) ad un livello che impatta sulla produzione agricola, la "salute" ambientale, il benessere economico (Rengasamy, 2006). Un **suolo** è considerato **salino** se la conducibilità elettrica del suo estratto saturo (*electrical conductivity of satutared soil extract*, ECe) è superiore a 4 dS m^{-1} (US Salinity Laboratory Staff, 1954) (Tab. 1). Tuttavia, la soglia al disopra della quale si verificano effetti deleteri può variare in funzione di diversi fattori, includenti il tipo di pianta, il regime idrico dei suoli e le condizioni climatiche (Maas, 1986). La salinità del suolo produce anche squilibri nutrizionali nelle piante.

TABELLA 1 - Classificazione dei suoli affetti da salinità e proprietà che li distinguono (*US Salinity Laboratory Staff*, 1954).

Classe	ECe (dS m^{-1})	ESP	pH
Non salino	< 4	< 15	< 8.5
Salino	> 4	< 15	< 8.5
Sodico	< 4	> 15	> 8.5
Salino sodico	> 4	> 15	< 8.5

I sali solubili comunemente presenti nei suoli salini sono cloruri e solfati di sodio, calcio e magnesio. Sodio e cloro sono sicuramente gli ioni dominanti, soprattutto in suoli molto salini. Quando la salinità è dovuta ai sali di sodio, essa può portare alla formazione di **suoli sodici**, caratterizzati dalla dominanza di ioni Na^+ sul complesso di scambio. In questi suoli, gran parte degli ioni Cl^- è stata dilavata, lasciando sul posto ioni Na^+, legati

alle particelle più sottili del suolo (argille). Di conseguenza, queste particelle perdono la loro tendenza ad aggregarsi, allo stato umido, portando alla formazione di suoli instabili, impermeabili all'acqua e impenetrabili dalle radici. Un suolo è considerato sodico se la sua percentuale di sodio scambiabile (*exchange sodium percentage*, ESP) è superiore a 15 (Tab. 1). Tuttavia, la soglia di ESP non è la stessa in tutti i sistemi di classificazione. Per esempio, Nortcote e Skene (1972), nella mappatura dei suoli australiani con proprietà saline e sodiche, definiscono sodici i suoli che hanno un ESP compreso tra 6 e 15 e fortemente sodici quelli con un ESP di 15 o maggiore. La recente classificazione australiana dei suoli (Isabell, 1998) definisce '*sodols*' (suoli sodici) i suoli con un ESP superiore a 6.

I suoli affetti da sale (*salt-affected soils*) sono ampiamente diffusi in tutto il mondo. Attualmente, l'area globale interessata da fenomeni di salinizzazione e sodificazione è di circa 831 milioni di ettari (Martinez-Beltran e Manzur, 2005); nel bacino del Mediterraneo, essa interessa oltre 16 milioni di ettari (Leone e Stetudo, 1997).

In Italia, gran parte delle aree costiere sono potenzialmente a rischio di salinizzazione/sodificazione (Costantini *et al*., 2007). In Campania, le principali aree a rischio sono le fasce costiere delle pianure alluvionali del **basso Volturno** (oggetto della presente indagine) e del Sele (Fig. 1).

Processi di salinizzazione dei suoli

La sorgente diretta e originaria di sali nel suolo sono i minerali primari presenti nel suolo stesso e in rocce esposte della crosta terrestre (Shaimberg e Levy, 2004). Nel corso dei processi di alterazione chimica (idrolisi, idratazione, soluzione, ossidazione e carbonazione) i sali sono gradualmente rilasciati e resi solubili. Benché l'alterazione dei minerali primari sia la sorgente di tutti i sali solubili, vi sono pochi esempi in cui una quantità sufficiente di sali si è accumulata da quest'unica sorgente per formare suoli salini. Questi ultimi si trovano usualmente in aree che ricevono sali da altri luoghi e l'acqua è il vettore

principale. Il mare è la sorgente di sali nei suoli delle zone basse ai margini delle coste. Talvolta, i sali si muovono verso l'interno attraverso il trasporto di *spray* da parte del vento. Tuttavia, più comunemente, le sorgenti dirette di sali sono le acque superficiali e le falde. L'acqua agisce come sorgente di sali quando è utilizzata per l'irrigazione (*irrigation associated salinity*, IAS) e quando la falda si innalza, fino ad avvicinarsi alla superficie del suolo (*groundwater associated salinity*, GAS).

FIG. 1 - Aree a rischio di salinizzazione in Campania (fonte: Costantini *et al*., 2007. *Atlante Nazionale delle Aree a Rischio di Desertificazione*, CRA-INEA)[1]. L'immagine di *background* è una composizione RGB in colore vero, prodotta attraverso l'elaborazione di dati satellitari MIRS (*Multiangle Imaging SpectroRadiometer*).

[1] Le singole aree a rischio di salinizzazione sono state digitalizzate e salvate come *shape-file* a partire dalla carta in formato JPEG (salino_cam.jpeg) contenuta nel CD allegato all'Atlante. Prima della digitalizzazione, la carta è stata orterettificata e georeferita, rispetto al sistema di Coordinate UTM-WGS84. É stato quindi prodotto uno *shape-file* dell'insieme delle aree a rischio di salinizzaione della Campania, utilizzando l'*extention* "*geoprocessing*" di ArcView, a partire dallo *shape-file* delle singole aree e da quello dei limiti del territorio regionale della Campania.

La salinità associata alla falda (comunemente nota anche come '*seepage salinity*', salinità d'infiltrazione) è senza dubbio una delle principali cause di salinizzazione dei suoli nella fascia costiera del basso Volturno. L'acqua fuoriesce dalla falda salmastra (*brackish groundwater*) e, muovendosi per capillarità, raggiunge la superficie del suolo, trasportando i sali in essa disciolti (Fig. 2). La forza motrice del movimento verso l'alto dell'acqua e dei sali è l'evaporazione dal suolo e la traspirazione delle piante (Rangasamy, 2006). Notoriamente, l'accumulo di sali è elevato quando la falda è a meno di 1.5 m al disotto della superficie del suolo (Talsma, 1963). Tuttavia, questa soglia può variare in dipendenza delle proprietà idrauliche dei suoli e delle condizioni climatiche.

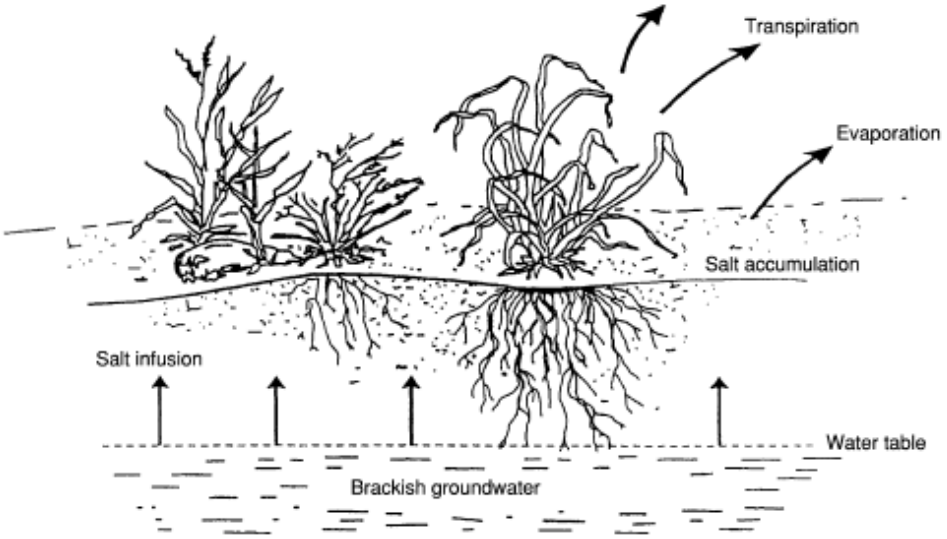


FIG. 2 - Processo di salinizzazione del suolo (da Hillel, 1998. *Environmental soil physic*s. Elsevier)

Anche l'irrigazione gioca un ruolo rilevante nel processo di salinizzazione dei suoli del basso Volturno, soprattutto quando l'acqua è estratta da pozzi più o meno salinizzati, per ingressione di acqua marina nelle falde di acque dolci. Come noto (Brady e Weil, 2002), l'irrigazione altera il bilancio idrico, apportando non solo più acqua al suolo ma anche più sali. Sia essa estratta da un fiume o pompata da una falda, anche l'acqua dolce di migliore qualità contiene sali disciolti. La quantità di sali apportata dall'acqua

dolce sembra trascurabile, ma l'ammontare di acqua applicata nel corso del tempo è enorme. L'acqua pura è persa per evapotraspirazione, ma i sali rimangono e si accumulano nel suolo. L'effetto è accentuato nelle aree costiere, dove le falde hanno elevati contenuti di sali e nelle aree climaticamente più secche, dove la domanda evaporativa dell'atmosfera è relativamente alta e, di conseguenza, sono necessarie grandi quantità di acqua per l'irrigazione.

Se l'acqua irrigua trasporta una significativa quantità di ioni Na^+ rispetto alle quantità di ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} e specialmente se sono presenti ioni HCO_3^-, gli ioni sodio vanno a saturare la maggior parte dei siti scambiabili colloidali, generando suoli sodici.

Risposta delle piante alla salinità

Le piante rispondono ai vari tipi di suoli affetti da sale in modo differente. In aggiunta ai problemi di carenza di nutritivi associati con elevati pH, elevati livelli di sali solubili influenzano le piante attraverso due meccanismi primari (Brady e Weil, 2002):

1. effetti osmotici - i sali solubili abbassano il potenziale osmotico dell'acqua, rendendo difficile la sua rimozione dal suolo da parte delle radici delle piante;
2. effetti di specifici ioni - il tipo di sale può determinare una grande differenza nel modo in cui le piante rispondono alla salinità. Certi ioni, includenti Na^+, Cl^-, $H_4BO_4^-$ e HCO_3^- sono abbastanza tossici per molte piante. In aggiunta agli effetti tossici specifici, elevati livelli di Na^+ possono causare squilibri nell'assorbimento e nell'utilizzazione di altri cationi. Per esempio, il Na^+ compete con lo ione nutritivo essenziale K^+ nel processo di trasporto attraverso la membrana cellulare durante l'assorbimento, rendendo difficile per la pianta di ottenere il K^+ di cui esse hanno bisogno da suoli solino-sodici o sodici. La presenza di adeguate quantità di ioni Ca^{2+} aiuta la pianta a discriminare tra Na^+ e K^+.

La produzione delle colture non è ridotta fino a quando non si eccede una certa soglia di salinità. Oltre questa soglia, la produzione decresce linearmente con l'innalzamento della salinità (Fig. 3) (Shainberg e Levy, 2004). Il valore di salinità corrispondente alla

produzione zero fornisce una stima della salinità massima che le piante possono tollerare. Le piante possono essere suddivise in quattro gruppi (da sensibili a tolleranti) in accordo con la loro risposta alla salinità (Tab. 2).

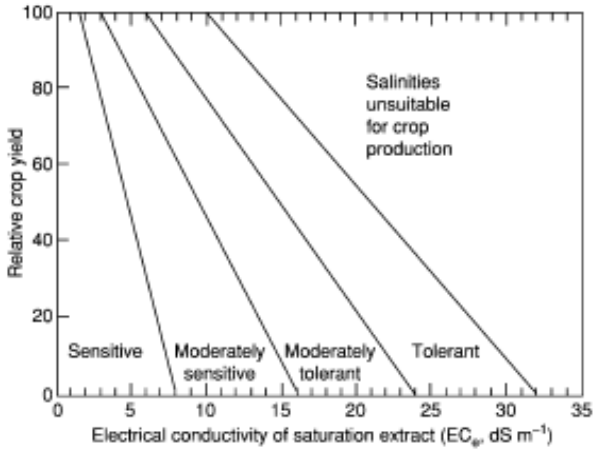


FIG. 3 - Produzione relativa delle colture in funzione della salinità dell'estratto saturo del suolo. (da Shaimberg I. and Oster J.D., 1978. *Quality of Irrigation water*. International Irrigation Information Center, Volcani Center, Israel)

TABELLA 2 - Tolleranza relativa alla salinità di alcune piante d'interesse per l'area di studio

Sensibili	Moderatamente sensibili	Moderatamente tolleranti	Tolleranti
Albicocco	Cavolfiore	Amarena	Barbabietola
Arancio	Cavolo	Asparago	Olivo
Carota	Cetriolo	Broccolo	Orzo (granella)
Cipolla	Erba medica	Frumento	
Fagiolo	Fava	Mandarino	
Fragola	Lattuga	Orzo (foraggio)	
Mandorlo	Mais	Pioppo	
Lampone	Patata	Soia	
Limone	Pisello	Sorgo	
Melo	Pomodoro	Zucchino	
Pero	Radicchio		
Pesco	Sedano		
Susino	Soia		
	Trifoglio		
	Vite		

da Maas E.V. and Grattan S.R., 1999. *Crop yields as afected by salinity*. Chap. 3, in R.W. Skaggs and J. van Shilfgaarde (eds.) "Agricultural drainage", Agronomy Monograph n. 38, Madison, Wis: ASA, CSSA, SSSA

La risposta delle piante alla salinità dipende anche da altri fattori includenti il suolo, il clima e la pianta stessa. Il contenuto di acqua nel suolo e la frequenza dell'irrigazione influenzano la tolleranza delle colture alla salinità. L'accorciamento degli intervalli d'irrigazione minimizza gli effetti deleteri della salinità. La tolleranza del sale di molte colture è migliorata quando è utilizzata l'irrigazione giornaliera a goccia. Anche il clima può modificare la risposta delle piante alla salinità. La tolleranza al sale è spesso ridotta in condizioni climatiche calde e secche; inoltre, le colture sembrano essere più tolleranti al sale in aree con condizioni d'inquinamento dell'aria che limitano la crescita delle piante. Fattori della pianta come la fase di crescita, la varietà e il portinnesto influenzano la risposta alla salinità. Orzo, grano e mais sono più sensibili alla salinità durante le prime fasi di germinazione. Bietola e girasole sono più sensibili alla salinità durante la germinazione che durante le successive fasi di crescita. Gli effetti della salinità sulla crescita vegetativa di alcune piante (es., grano, cotone) sono maggiori che sulla produzione di semi e fibra. Normalmente, la salinità sopprime la crescita della parte ipogea delle piante, piuttosto che quella delle radici. Anche il tipo di portinnesto nelle piante legnose può influenzare la tolleranza specifica alla salinità. Ad esempio, nel caso della vite, portinnesti come *Ramsey*, *Rupestris du Lor*, *99R* e *140 Ru* sono molto più tolleranti di altri portinnesti alla salinità del suolo (White, 2003).

Risposta dei suoli alla salinità e alla sodicità

Le proprietà fisiche e meccaniche dei suoli (es., espansione e dispersione delle argille, stabilità degli aggregati, conducibilità idraulica, scorrimento superficiale ed erosione) sono influenzate dalla salinità e dalla sodicità. Il principale fattore che determina l'entità dell'effetto deleterio del Na^+ sulle proprietà del suolo è la concentrazione salina nella soluzione del suolo. Con una bassa concentrazione, come nel caso di regioni umide o durante la stagione delle piogge nelle regioni semi-aride, anche una bassa sodicità (ESP < 5) ha un effetto negativo marcato e irreversibile sulle proprietà fisiche di molti suoli. Per contro, quando la concentrazione di sale raggiunge anche livelli moderati, l'e-

levata sodicità (10 < ESP < 30) causa moderati cambiamenti nelle proprietà fisiche e idrauliche dei suoli. Questo è dimostrato in Israele, dove viene utilizzata acqua per l'irrigazione del cotone di 4.6 dS m^{-1} e SAR[2] di 26. Durante la stagione irrigua (estate), non si osservano deterioramenti delle proprietà fisiche del suolo, poiché l'elevata concentrazione di sali previene gli effetti avversi della sodicità. D'altra parte, durante la successiva stagione piovosa, la concentrazione di elettroliti nella soluzione del suolo alla superficie del suolo stesso diventa bassa, rendendo il suolo suscettibile alla formazione di croste, alla bassa permeabilità e all'incremento dello scorrimento superficiale delle acque e dell'erosione (nelle aree pendenti, anche debolmente).

La risposta dei suoli alla sodicità e alla salinità dipende dalle proprietà dei suoli stessi (es., tessitura, mineralogia delle argille, limo e contenuti di ossi-idrossidi). I suoli smectitici sono molto più suscettibili alla sodicità rispetto a quelli caolinitici. I suoli calcarei sono meno suscettibili alla sodicità rispetto a quelli non calcarei. Suoli ricchi in ossi-idrossidi sono meno influenzati dalla sodicità rispetto a quelli poveri di ossi-idrossidi. Tuttavia, la risposta dei suoli alla sodicità dipende anche dalle proprietà tempo-dipendente, come la velocità d'inumidimento, il contenuto antecedente di acqua e la durata dell'inumidimento. Il rapido inumidimento dei suoli secchi disgrega gli aggregati e aumenta la suscettibilità del suolo alla sodicità. L'effetto della velocità d'inumidimento dipende dal contenuto precedente di acqua nei suoli. Una minore '*slaking*'[3] degli aggregati del suolo si verifica quando il contenuto prededente di umidità del suolo è elevato. Perdurando le condizioni di suolo umido, la stabilità degli aggregati aumenta (*aging effect*) e la loro suscettibilità alla sodicità diminuisce.

[2] SAR (*sodium absorption rate*) = $[Na^+]/(0.5[Ca^{2+}] + 0.5[Mg^{2+}])^{1/2}$, dove $[Na^+]$, $[Ca^{2+}]$ e $[Mg^{2+}]$ sono le concentrazioni (in mmol di carica per litro) di sodio, calcio e magnesio nell'acqua irrigua. Questo stesso parametro è talvolta utilizzato, invece dell'ESP, per valutare la sodicità del suolo. In tal caso le concentrazioni di sodio, calcio e magnesio sono quelle della soluzione del suolo. Un SAR di 13 corrisponde approssimativamente ad un ESP 15.

[3] *Slaking* è la rottura di grandi (> 2.5 mm), secchi aggregati strutturali di suolo in micro-aggregati (< 0.25 mm) quando il suolo è immerso rapidamente in acqua.

Bonifica[4] dei suoli salini

In suoli ideali in condizioni di flusso 'a pistone', la EC dell'acqua del suolo e quella dell'acqua applicata dovrebbero essere le stesse dopo il passaggio nel volume dei pori di acqua di pioggia o d'irrigazione. Tuttavia, i suoli non sono ideali, per due ragioni: (1) l'acqua scorre più velocemente attraverso le crepe (*cracks*) del suolo e nei pori più larghi tra gli aggregati che attraverso i fori più piccoli negli aggregati. Questa differenza di velocità di flusso dell'acqua è comunemente riferita come 'flusso *bypass*' o 'flusso preferenziale'; (2) la diffusione del sale e le reazioni chimiche non sono così sufficientemente rapide da far in modo che la concentrazione salina sia la stessa tra tutti i pori di differenti dimensioni, particolarmente durante i periodi di movimento rapido dell'acqua.

I modelli di trasporto dei sali hanno contribuito considerevolmente alla comprensione di questi processi. Tuttavia, non sono attualmente disponibili modelli matematici idonei per descrivere processi multipli concorrenti del flusso dell'acqua, includenti la variabilità spaziale delle proprietà idrauliche e tutte le reazioni chimiche − scambio, dissoluzione, precipitazione, equilibrio liquido-gas della CO_2 − coinvolti nel trasporto dei sali alla scala di campo. Di conseguenza, le linee guida per la bonifica sono largamente basate su relazioni ottenute da esperimenti di campo o con lisimetri (Shainberg e Levy, 2004).

Il metodo di applicazione dell'acqua e il tipo di suolo sono le variabili primarie che influenzano la quantità di acqua richiesta per la bonifica. Nei suoli salini, il 60% o più dei sali inizialmente presenti è lisciviato da uno spessore di acqua uguale alla profondità del suolo (Fig. 4) in condizioni di ristagno continuo (*ponded conditions*). I suoli franco-sabbiosi (*sandy loam*) con basso contenuto di acqua alla saturazione hanno una maggiore efficienza di lisciviazione (*leaching*) rispetto ai suoli franco-argillosi (*clay loam*) o argillosi (*clay*) (Fig. 4). I pori nei suoli sabbiosi sono più uniformi in diametro rispetto ai suoli franco-argillosi o argillosi. I suoli a tessitura più fine possono avere ampie fenditu-

[4] Con il termine bonifica (*reclamation*) si intende il ripristino delle proprietà chimiche e fisiche del suolo favorevoli alla elevata produttività.

re con larghi pori, allo stato secco, e pori fini negli aggregati, quando umidi. Questi canali di *bypass* riducono l'efficienza di lisciviazione.

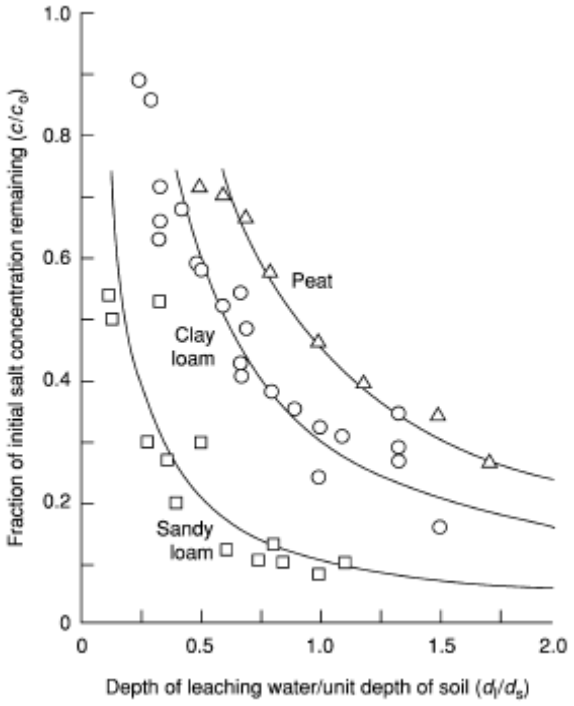


FIG. 4 - Profondità dell'acqua di lisciviazione per unità di profondità del suolo richiesta per bonificare un suolo salino per ristagno continuo. (da Oster J.D., Shaimberg I e Abrol I.P., 1996. In: Agassi M. (ed.) *Soil Conservation and Rehabilitation*. pp 315-342. New York: Marcel Dekker)

L'acqua richiesta per la lisciviazione può essere ridotta attraverso applicazioni intermittenti di acqua stagnante, particolarmente per i suoli finemente tessiturati (Fig. 5). Sotto sommersioni intermittenti, prevalgono le condizioni di insaturazioni nel profilo del suolo; in tal modo, è prevenuto il flusso *bypass* inefficiente nelle fenditure e nei pori larghi. Allo stesso modo, utilizzando l'irrigazione per aspersione (*sprinkler irrigation*), la bonifica avviene in condizioni di insaturazione e l'efficienza della lisciviazione aumenta.

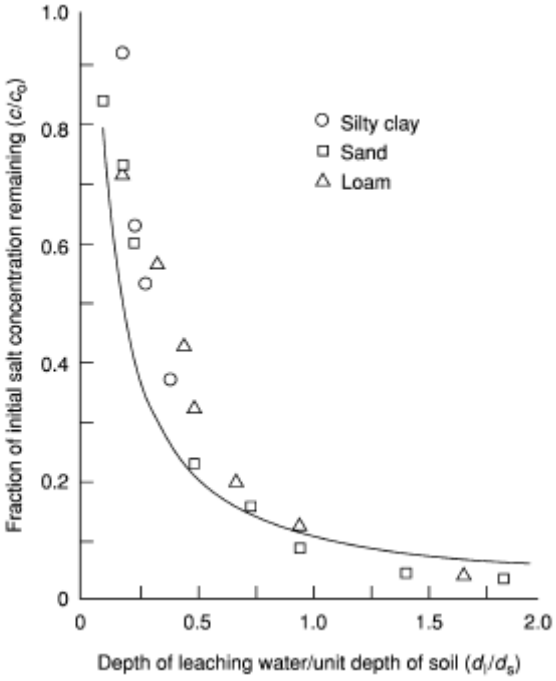


FIG. 5 - Profondità dell'acqua di lisciviazione per unità di profondità del suolo richiesta per bonificare un suolo salino per ristagno intermittente. (da Oster JD, Shaimberg I e Abrol IP, 1996. In: Agassi M. (ed) *Soil Conservation and Rehabilitation*. pp 315-342. New York: Marcel Dekker)

Bonifica dei suoli sodici

La bonifica dei suoli sodici dipende dalla somministrazione di sali di calcio per rimpiazzare il sodio scambiabile e dal mantenimento di adeguate condizioni di salinità per ribattere gli effetti avversi della sodicità sulle proprietà idrauliche dei suoli.

Il gesso ($CaSO_4$), incorporato nel suolo o lasciato alla sua superficie, è la sorgente di calcio più comunemente utilizzata per bonificare i suoli sodici e per migliorare l'infiltrazione dell'acqua. Quando il gesso è incorporato nel suolo, la riduzione dell'ESP è principalmente limitata all'intervallo di profondità del suolo dove il gesso è presente. Ciò in conseguenza della maggiore selettività dei siti di scambio per il calcio che per il sodio. Il gesso richiesto per la bonifica può essere stimato dall'ammontare di sodio scambiabile nello strato di suolo da bonificare.

Poiché la superficie del suolo è molto suscettibile alla sodicità, la bonifica dei suoli sodici attraverso lo spandimento di gesso è comunemente praticato in molte aree affette da sodicità. La quantità di gesso normalmente applicata dipende dall'entità delle piogge, assumendo che la concentrazione di gesso raggiunga il 50% della saturazione in gesso (Shainberg e Levy, 2004). Così, ad esempio, in regioni con una pioggia invernale di 500 mm, l'ammontare di gesso applicato è di 5 t ha^{-1}. Normalmente, il gesso è applicato successivamente alle lavorazioni autunnali. Ciò previene la formazione di croste e mantiene elevata la velocità d'infiltrazione la quale, a sua volta, garantisce una sufficiente infiltrazione di pioggia in grado di lisciviare i sali dalla zona radicale. La dissoluzione del gesso fornisce abbastanza elettroliti in grado di prevenire la formazione di croste e mantenere alta la velocità d'infiltrazione nonostante il fatto che la superficie del suolo non sia completamente bonificata.

Obiettivi dello studio

Come detto in precedenza, l'Atlante Nazionale delle Aree a Rischio di Desertificazione del CRA-INEA (Costantini *et al*., 2007) identifica nella fascia del basso corso del fiume Volturno un'area a rischio di salinizzazione. Tale area (come tutte le altre a livello nazionale) è stata delimitata sulla base di un indice che definisce le aree a falde idriche potenzialmente saline, associabili a suoli potenzialmente salini, generati da processi di risalita capillare e dall'irrigazione con acque irrigue ricche di sali. Le aree identificate sono quelle entro 6 chilometri dalla linea di costa e contemporaneamente inferiori a 10 metri di quota sul livello del mare. Esse rappresentano ambiti territoriali da "**analizzare a maggior dettaglio e dove intervenire in prima approssimazione, con misure di prevenzione e mitigazione**".

Obiettivo del presente lavoro è quello di fornire un **contributo concreto alla conoscenza attraverso un'indagine di dettaglio nell'area a rischio di salinizzazione del basso Volturno**, attraverso una metodologia integrata, basata sull'utilizzo di tecniche

convenzionali di rilevamento e di analisi con tecniche avanzate di spettrometria nel dominio ottico riflessivo.

Tenuto conto dei costi delle analisi convenzionali dei suoli, è stata inoltre sperimentata la possibilità di predizione di dette proprietà calibrando modelli '*low cost*' basati sull'utilizzo della spettrometria ottico-riflessiva (a cui si è già fatto cenno) e metodi avanzati di analisi statistica multivariata (chemiometria, pedometria).

Infine, considerata la necessità, molto sentita nell'area, di migliorare l'efficienza dell'uso dell'acqua irrigua, sono stati realizzati bilanci idrici dei suoli per le principali colture di riferimento dell'area, essenziali per la progettazione e gestione irrigua sostenibile, sia in condizioni di salinità-alcalinità sia in condizioni di non salinità-alcalinità.

Area di studio

Lo studio è stato focalizzato su un'area (Fig. 6), leggermente più ampia di quella riportata nell'Atlante Nazionale delle Aree a Rischio di Desertificazione (vedi Fig. 1), includente la parte dei comuni del basso Volturno più vicini alla costa, delimitata dai confini del "comprensorio a ruolo" del Consorzio di Bonifica del Bacino inferiore del Volturno.

La delimitazione dell'area è stata realizzata "intersecando", in ambiente ArcView, lo *shape-file* del "comprensorio a ruolo" con quello dei comuni costieri del basso Volturno, estratto dallo *shape-file* dei comuni della Campania allegato alla Carta dell'Utilizzazione Agricola dei Suoli (Regione Campania, 2004).

Fasi dello studio

Lo studio è stato suddiviso in cinque fasi:

Fase 1 - Sono state raccolte, rielaborate e acquisite in formato digitale le **informazioni preesistenti**.

Fase 2 - Sulla base delle informazioni acquisite, è stato programmato e realizzato un **primo rilevamento pedologico** alla fine del 2009. I suoli, campionati a due profondità,

con l'ausilio di trivellate speditive, sono stati assoggettati ad analisi chimiche e fisiche convenzionali di laboratorio e a misure idrologiche e spettroradiometriche. Le misure spettroradiometriche sono state processate, per la determinazione del colore Munsell e per l'estrazione d'informazioni riguardanti la presenza e l'intensità di bande di assorbimento, correlabili alla presenza di specifici minerali o gruppi di minerali dei suoli. I risultati delle analisi chimiche e fisiche e delle elaborazioni spettrometriche sono stati a) analizzati statisticamente, per valutare le loro caratteristiche generali (analisi statistica descrittiva) e la significatività delle differenze tra *top-soil* e *sub-soil* e b) spazializzati, per valutare la loro variabilità geografica, anche in relazione alle caratteristiche del paesaggio.

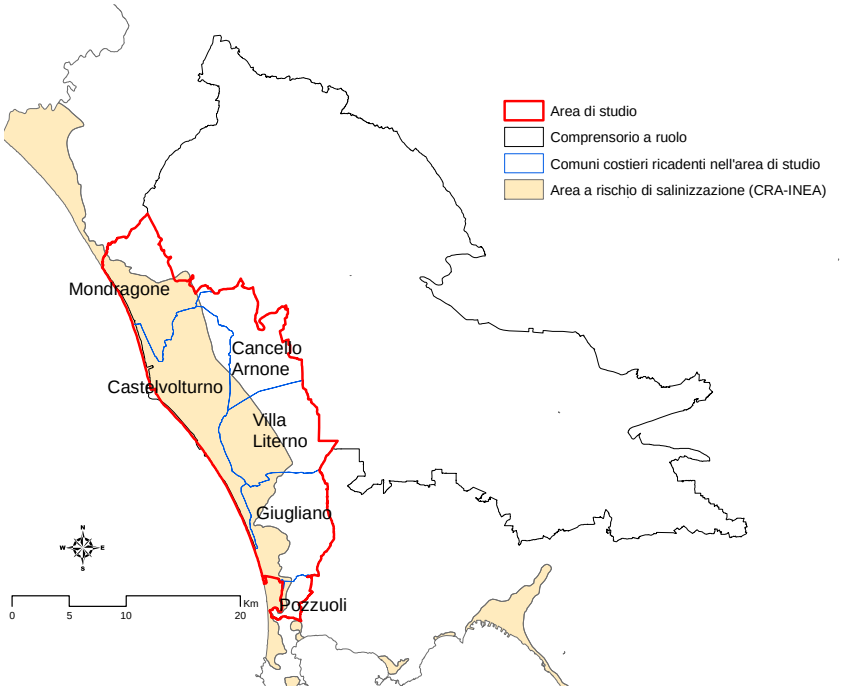


FIG. 6 - Localizzazione dell'area di studio. Sono riportati i limiti del "comprensorio a ruolo" del Consorzio di Bonifica del Basso Volturno e dei comuni ricadenti, interamente o in parte, all'interno dell'area di studio.

Fase 3 - I suoli campionati nel corso della precedente fase sono stati raggruppati in base alle loro caratteristiche spettrali, utilizzando l'analisi multivariata dei *cluster*, tenuto conto delle strette relazioni tra riflettanza e proprietà chimiche e fisiche dei suoli. Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati selezionati quattro siti di riferimento, in corrispondenza dei quali, all'inizio dell'estate del 2010, sono stati rilevati e studiati nel dettaglio i **profili dei suoli**. I suoli sono stati analizzati dal punto di vista chimico, fisico e spettroradiometrico e classificati con riferimento al sistema internazionale FAO - *World Reference Base* (WRB). È stato analizzato e classificato anche un quinto profilo, rilevato precedentemente.

Fase 4 - Le proprietà chimiche, fisiche e idrologiche analizzate nel corso delle Fasi 2 e 3 sono state relazionate alle misure spettroradiometriche, utilizzando metodi statistici multivariati avanzati, per la calibrazione di modelli rapidi e a basso costo di predizione di dette proprietà (**chemiometria**).

Fase 5 - Utilizzando le misure idrologiche acquisite in precedenza, i dati climatici disponibili e le informazioni bibliografiche riguardanti i coefficienti colturali, sono stati realizzati i **bilanci idrologici** delle colture più rappresentative, per ciascuno dei sotto-sistemi di paesaggio maggiormente interessati dal rilevamento, al fine di calcolare i *deficit* idrici, essenziali per valutare le esigenze irrigue effettive delle predette colture e prevedere i volumi addizionali di acqua necessari alla bonifica dei suoli affetti da sale.

Fase 1 - Raccolta e rielaborazione delle informazioni esistenti

Sono state raccolte, rielaborate e acquisite in formato digitale (*shape-files*) le informazioni cartografiche riguardanti: a) le aree a rischio di salinizzazione della Campania, in generale, e del basso Voltuno in particolare (Costantini *et al*., 2007), di cui si è già parlato nell'introduzione; b) i sistemi di terre (di Gennaro *et al*., 2002); c) l'uso del suolo (Regione Campania, 2009).

Inoltre, sono state acquisite le ortofoto a colori (2004) a grande scala della Regione Campania.

Carta dei sistemi di terre

La Carta dei sistemi di terre, disponibile in formato cartaceo, è stata acquisita attraverso: a) scansione e produzione di un file-immagine formato TIF; b) georeferenziazione in ambiente ENVI del file-immagine; c) digitalizzazione in ambiente ArcView delle linee (archi) corrispondenti ai confini delle unità cartografiche; d) produzione di uno *shape-file* di punti identificativi delle singole unità cartografiche; e) controllo e correzione di eventuali errori di digitalizzazione e attribuzione dei punti ai temi (unità cartografiche); f) trasformazione degli *shape-file* di linee e di punti in uno *shape-file* di poligoni.

Lo *shape-file* di poligoni è stato ulteriormente elaborato in ambiente ArcMap per la produzione di una Carta dei grandi sistemi di terre (Tav I) e di una Carta dei sistemi e sottosistemi di Terre (Tav II).

La Carta dei sistemi di terre (di Gennaro, 2002), realizzata secondo un "approccio analitico di tipo fisiografico ed integrato", suddivide il territorio in "ambiti geografici ragionevolmente omogenei per quanto riguarda i fattori ambientali che ne influenzano l'uso potenziale e le possibili dinamiche degradative. Essa, pertanto, illustra le strutture ambientali più o meno permanenti, legate all'azione integrata, nel tempo, del clima, dei sub-

strati, della morfologia, delle comunità biotiche e delle modificazioni antropiche permanenti".

In accordo con di Gennaro *et al.*, (2002), il concetto di "terre" è, pertanto, sostanzialmente differente da quello di "uso delle terre". Queste ultime rappresentano, infatti, "un aspetto più dinamico, legato al tipo di controllo sistematico che l'uomo applica in un determinato momento storico ad un sistema di terre allo scopo di soddisfare i suoi molteplici bisogni".

Considerata la più lenta dinamica temporale delle unità di "terre" rispetto alle unità di "uso delle terre", si è ritenuto opportuno considerare le prime come ambiti di riferimento per lo studio in esame.

"La legenda della Carta dei sistemi di terre si articola in tre livelli gerarchici: grandi sistemi di terre (Tav I), sistemi di terre e sottosistemi di terre" (Tav II).

"I grandi sistemi di terre rappresentano il repertorio essenziale di tipologie ambientali necessarie a strutturare e a descrivere la complessa articolazione territoriale" a scala regionale. "All'interno di ciascun grande sistema le interazioni complesse tra clima, morfologia, suoli, manto vegetale indirizzano secondo modalità date i processi idrogeologici, ecologici, e quelli legati alle produzioni agro-forestali". I grandi sistemi sono suddivisi in sistemi di terre "caratterizzati", rispetto ai grandi sistemi, "da maggiore uniformità climatica, lito-morfologica, pedologica, vegetazionale e agro-forestale". "Ad un livello di dettaglio ancora superiore, ciascun sistema si articola in sottosistemi di terre, caratterizzati da una maggiore omogeneità di condizioni ambientali".

Carta dell'utilizzazione agricola del suolo

La Carta dell'utilizzazione agricola del suolo dell'area di studio (Tav III) è stata estratta, attraverso operazioni di *geoprocessing* in ambiente ArcView, dalla Carta dell'utilizzazione agricola della Regione Campania (AS-CUAS) (Regione Campania, 2009), già disponibile in formato digitale.

La Carta dell'Utilizzazione Agricola del Suolo della Regione Campania suddivide il territorio in aree omogenee in termini di tipi d'uso. Essa è stata realizzata a diversi livelli gerarchici. A un livello gerarchico più alto sono state separate 11 classi. Le prime tre riguardano: "ambiente urbanizzato e superfici artificiali" (classe U), "acque" (A) e "colture protette (serre)" (classe S); le altre otto classi, riguardano: aree agricole (classe 1 "seminativi", classe 2 "colture permanenti", classe 3 "foraggere permanenti"; classe 4 "zone agricole omogenee"), "superfici boscate" (classe 5), "coperture vegetali prevalentemente arbustive e/o erbacee di evoluzione" (classe 6), "zone coperte da vegetazione rada o assente" (Classe 7) e "zone umide" (classe 8). All'interno delle classi principali, la Cuas realizza ulteriori suddivisioni della copertura del suolo ad uno o più livelli gerarchici inferiori, in base ad un numero crescente di elementi presi in considerazione. Così, ad esempio, i "seminativi" sono suddivisi, in relazione alla durata del ciclo della coltura, in "seminativi autunno-vernini" e "seminativi primaverili-estivi". A loro volta, i primi sono ulteriormente suddivisi, in base al tipo di coltura, in "cereali da granella", "ortive", "legumi secchi", "piante da tubero", "colture industriali", ecc..

Fase 2 - Primo rilevamento (autunno 2009)

Identificazione dei siti e campionamento dei suoli

I siti di campionamento sono stati identificati integrando le informazioni cartografiche esistenti (Fase 1) con osservazioni dirette di campo. La posizione dei siti (georeferita rispetto al sistema di coordinate UTM33-WGS84) è stata prima acquisita in campo, con l'ausilio di un GPS, poi corretta al computer, in ambiente ArcView, operando sulle ortofoto a colori a grande scala della regione Campania (Fase 1).

In corrispondenza di ciascun sito sono stati prelevati due campioni di suolo alle profondità di 0-30 cm (*top-soil*[5]) e 30-60 cm (*sub-soil*). La scelta della profondità di campionamento è scaturita dalla considerazione che gran parte delle principali colture praticate nell'area di studio sviluppa lo strato radicale di massima estrazione di acqua (e di nutritivi) a profondità comprese tra 35-40 e 60 cm (Mannini, 2004).

In totale, sono stati campionati 51 siti[6], ricadenti (in gran parte) nell'area di rischio di salinizzazione riportata nell'Atlante CRA-INEA (Fig. 7)[7], suddivisi tra i due grandi sistemi di terre della pianura alluvionale e della pianura costiera del basso Volturno (Tav. I) e tra i seguenti sistemi e sottosistemi (Tav II): a) aree relativamente rilevate, prossime alla costa (I2.2.) e aree bordiere (I2.3) della piana alluvionale; b) depressioni retrudunari (L1.1) e apparati dunari (L3.1) della pianura costiera; c) aree morfologicamente depres-

[5] A rigore, i termini *top-soil* e *sub*-soil fanno rispettivamente riferimento all'orizzonte A del suolo, arricchito di sostanza organica e al sottostante strato ma non a specifiche profondità. Quando il suolo è lavorato, lo stato naturale dei primi 12-25 cm è modificato. In questo caso il top-soil corrisponde allo strato lavorato (Brady e Weil, 2002). In questa sede è stato ipotizzato un strato lavorato medio 30 cm che, pertanto, è stato fatto coincidere con il *top-soil*, considerando i sottostanti 30 cm com *sub-soil*.

[6] il disciplinare d'indagine prevedeva 30 siti. Si è però preferito aumentare il numero di osservazioni (fino a 51) per migliorare la conoscenza sulla distribuzione spaziale e le relazioni con il paesaggio dei suoli affetti da salinità.

[7]Per problemi logistici e/o difficoltà di eccesso ai fondi, è rimasta non coperta da osservazioni la parte più a nord dell'area di studio

se della pianura alluvionale (I4.1). Solo pochi siti ricadono nella parte bassa dei versanti esterni dell'Archicaldera Flegrea (F4.2).

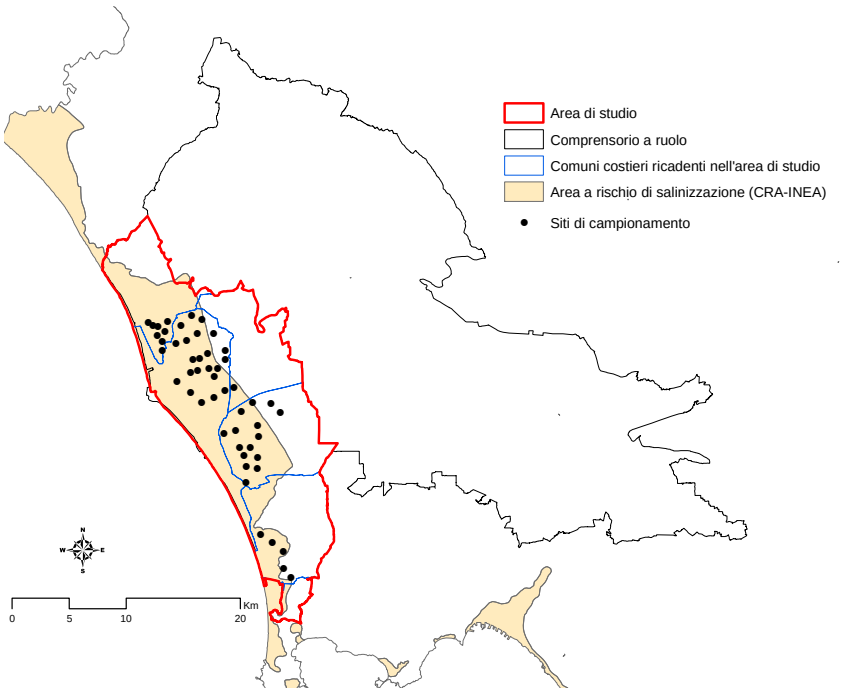


FIG. 7 – Distribuzione dei siti di campionamento nell'area di studio

L'uso agricolo del suolo del territorio interessato dal rilevamento (Tav. III) è dominato da colture ortive, erbai, cereali, frutteti e prati avvicendati.

I campioni di suolo raccolti sono stati essiccati all'aria, macinati, setacciati e suddivisi in tre sub-campioni: uno destinato alle analisi chimiche e fisiche convenzionali, uno alle misure idrologiche, uno alle misure spettroradiometriche.

Proprietà chimiche e fisiche dei suoli

Analisi convenzionali di laboratorio

Sono state analizzate le seguenti proprietà: contenuti di sabbia, limo e argilla, pH (in H_2O), carbonati totali (espressi come $CaCO_3$), carbonio organico (OC), conducibilità elettrica in soluzione acquosa 1:5 (ECw), capacità di scambio cationico (CEC), basi di scambio (sodio, Na^+, potassio, K^+, calcio+magnesio Ca^{2+}+Mg^{2+}). Per ciascuna delle proprietà analizzate, fatta eccezione per i parametri della tessitura, le analisi sono state ripetute tre volte, al fine di migliorare l'accuratezza della misura.

Il Na^+ è stato rapportato percentualmente alla CEC per ottenere il valore dell'ESP. L'ECw è stata moltiplicata per un fattore di conversione, per ottenere il corrispondente valore di conducibilità elettrica in pasta satura (ECe).[8]

Analisi statistica

Le singole proprietà sono state statisticamente descritte in termini di valori minimi (Min), massimi (Max) e medi (Mean) e di coefficiente di variazione (CV)[9]. I risultati delle analisi sono riportati nella tabella 4. La stessa tabella riporta valori del *t- test* di *Student*, utiliz-

[8] I coefficienti utilizzati per la conversione dell'ECw in ECe sono basati sul contenuto di argilla (Tab. 3). Il fattore di conversione aumenta con l'aumentare della tessitura poiché, per unità di peso del suolo, l'argilla contiene più acqua, alla saturazione, della sabbia: l'effetto della diluizione nella soluzione del suolo è, pertanto, relativamente più piccola nei suoli argillosi.

TABELLA 3 - Fattori di conversione dei valori di ECw in accordo con la tessitura del suolo*

Texture grade	Clay content (%)	Conversion factor
Sand (S)	< 10	15
Sandy loam (SL)	10-20	12
Loam (L)	20-30	10
Clay loam (CL)	30-35	9
Light clay (LC)	35-45	8
Heavy clay (HC)	> 45	6

* da Northcote K.H., 1979. *A Factual Key for the Recognition of Australian Soils*. 4th Edn. (Rellim Tech. Publ.:Glenside, S.A.).

[9] Il CV è definito dal rapporto percentuale tra la deviazione *standard* (SD) e la media. In accordo con Ameyan (1984), la variabilità delle proprietà considerate è considerata bassa, moderata o alta quando il CV è, rispettivamente, < 20%, 20÷50% o > 50%.

zato per la valutazione della significatività delle differenze tra i valori medi del *top-soil* e del *sub-soil* per le diverse proprietà.

TABELLA 4 - Statistica descrittiva delle proprietà dei suoli e significatività statistica delle differenze (*t-student*) tra *top-soil* e *sub-soil*.

Proprietà			Mean	Min	Max	CV%
pH	*Top-soil*		8.20	6.78	8.69	4.45
	Sub-soil		8.32	6.99	8.92	4.32
		t-student	*Valore*		*-4.294*	
			Significatività		*0.000 (S)*	
Sabbia	*Top-soil*		42.47	9.00	94.00	49.49
(%)	*Sub-soil*		41.08	7.00	95.00	58.93
		t-student	*Valore*		*0.232*	
			Significatività		*0.818 (NS)*	
Limo	*Top-soil*		20.00	1.00	42.00	46.00
(%)	*Sub-soil*		21.06	3.00	45.00	42.68
			Valore		*-0.739*	
		t-student	*Significatività*		*0.464 (NS)*	
				Valore		
				Significatività		
Argilla	*Top-soil*		37.50	5.00	73.00	43.70
(%)	*Sub-soil*		37.87	1.00	77.00	50.54
		t-student	*Valore*		*0.315*	
			Significatività		*0.740 (NS)*	
OC	*Top-soil*		21.44	6.72	121.39	87.40
(g kg^{-1})	*Sub-soil*		15.11	2.84	87.36	100.66
		t-student	*Valore*		*3.843*	
			Significatività		*0.000 (S)*	
$CaCO_3$	*Top-soil*		66.40	3.90	181.30	70.72
(g kg^{-1})	*Sub-soil*		84.51	9.64	175.98	64.03
		t-student	*Valore*		*-4.239*	
			Significatività		*0.000 (S)*	
ECw	*Top-soil*		0.25	0.08	1.43	79.20
(dS m^{-1})	*Sub-soil*		0.26	0.06	1.06	71.53
		t-student	*Valore*		*6.956*	
			Significatività		*0.000 (S)*	
ECe	*Top-soil*		1.94	0.88	8.57	65.25
(dS m^{-1})	*Sub-soil*		2.02	0.94	6.36	59.30
		t-student	*Valore*		*-1.286*	
			Significatività		*0.205 (NS)*	
CEC	*Top-soil*		33.66	9.00	72.40	38.44
($cmol_c$ kg^{-1})	*Sub-soil*		32.66	7.40	75.50	36.65
		t-student	*Valore*		*0.750*	
			Significatività		*0.458 (NS)*	

Continua →

Proprietà			Mean	Min	Max	CV%
Na^+	*Top-soil*		0.65	0.01	4.74	155.53
($cmol_c\ kg^{-1}$)	*Sub-soil*		0.93	0.01	4.18	122.04
		t-student	*Valore*		*-1.951*	
			Significatività		*0.058 (NS)*	
K^+	*Top-soil*		2.26	0.10	6.40	77.38
($cmol_c\ kg^{-1}$)	*Sub-soil*		1.19	0.10	8.00	140.92
		t-student	*Valore*		*1.527*	
			Significatività		*0.134 (NS)*	
Ca^{2+}+Mg^{2+}	*Top-soil*		30.75	8.60	70.80	37.95
($cmol_c\ kg^{-1}$)	*Sub-soil*		29.76	6.80	73.20	38.54
		t-student	*Valore*		*0.750*	
			Significatività		*0.458 (NS)*	
ESP	*Top-soil*		1.83	0.01	15.40	155.68
	Sub-soil		2.93	0.01	17.80	134.53
		t-student	*Valore*		**-2.009**	
			Significatività		**0.05 (S)**	

NS = differenza non significativa tra le medie; S = differenza significativa tra le medie.

Le proprietà dei suoli, misurate e calcolate, sono state attribuite a specifiche classi, in accordo con la letteratura tecnico-scientifica esistente (Annesso A).

La reazione (pH) è, in media, moderatamente alcalina (pH 8.20, 8.32), con estremi che vanno dal neutro (pH 6.78 e 6.99) al fortemente alcalino (pH 8.69 e 8.92). La sua variabilità è bassa, sia per il *top-soil* sia per il *sub-soil*. La differenza nei valori medi tra *top-soil* e *sub-soil* è significativa.

Le proporzioni relative delle tre principali frazioni tessiturali, tutte comprese in ampi intervalli (min 9.00, 1.00, 5.00 %; max 94.00, 42.00, 73.00%), si attestano intorno a medie di 42.47% (*top-soil*) e 41.08% (*sub-soil*) per la sabbia, 20.00 e 21.06% per il limo, 37.50 e 37.87% per l'argilla. Il coefficiente di variabilità, per ciascuna delle tre frazioni, è medio-alto, le differenze tra *top-soil* e *sub-soil* sono sempre non significative.

In accordo con la dominanza, nella terra fine, delle particelle delle dimensioni dell'argilla e della sabbia, la tessitura fondamentale (Fig. 8) è: argillosa (A), franca argillosa (FA), franca sabbiosa argillosa (FSA), franca (F), franca sabbiosa (FS), sabbiosa franca (SF), sabbiosa (S) e argillosa sabbiosa (AS), con una netta prevalenza delle classi tessiturali A, FA e FSA.

Le classi tessiturali fondamentali, raggruppate in classi generali, evidenziano la prevalenza di suoli fini (argillosi) e moderatamente fini (franchi).

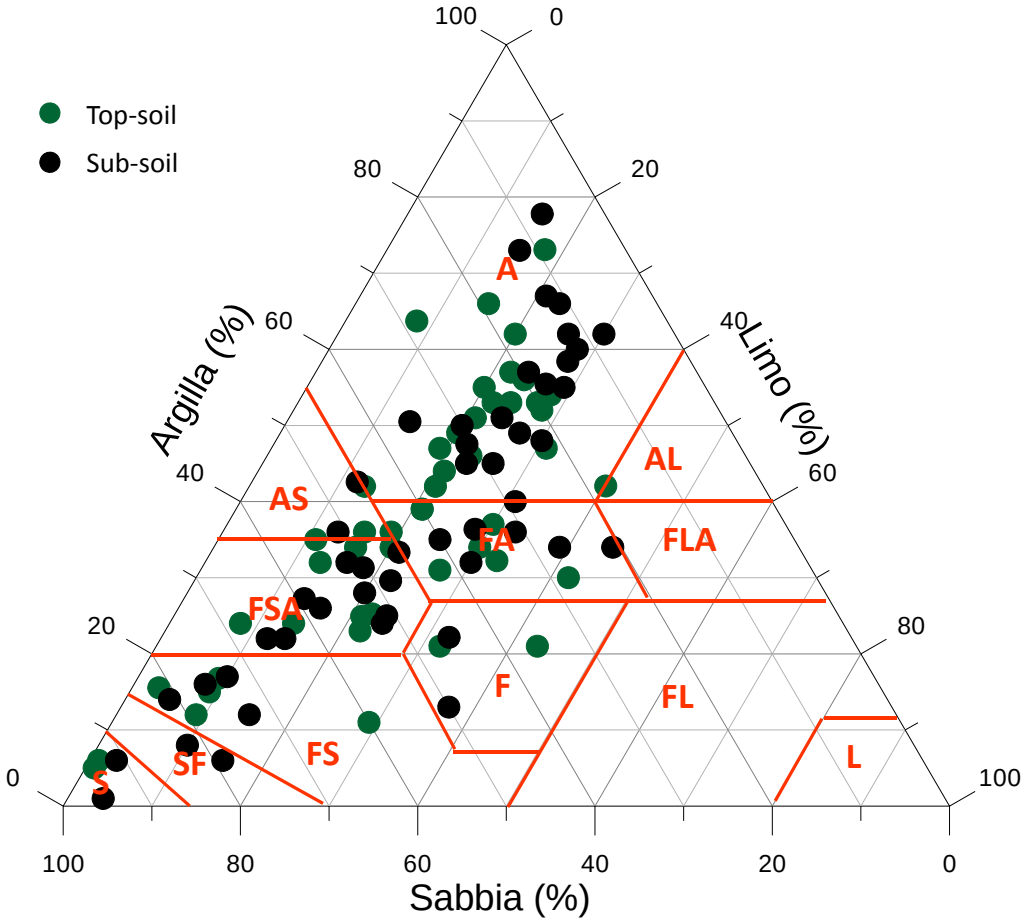


FIG. 8 – Distribuzione dei suoli (distinti per *top-soil* e *sub-soil*) nel triangolo delle tessiture USDA (*United State Department of Agriculture*).
Classi di tessitura: A = argillosa, AL = argillosa limosa, AS = argillosa sabbiosa, , FA = franca argillosa, FLA = franca argillosa limosa; FSA = franca argillosa sabbiosa, F = franca, FL = franca limosa, S = sabbiosa, SF = sabbiosa franca, FS = franca sabbiosa, FL = franca limosa, L = limosa.

I suoli esaminati sono rispettivamente ben forniti o forniti di carbonio organico (OC) nel *top-soil* (21.44 g kg^{-1}) e nel *sub-soil* (15.11g kg^{-1}). I valori estremi variano tra 6.72-2.84 g kg^{-1} (val. minimi) e 121.39-87.26 g kg^{-1} (val. massimi). Il coefficiente di variazione è alto. La differenza nei valori medi tra *top-soil* e *sub-soil* è significativa.

Il contenuto di carbonati oscilla tra valori minimi di 3.90 e 9.64 g kg^{-1} (suoli non calcarei) e massimi di 181.30 e 175.98 g kg^{-1} (suoli molto calcarei), con una media di 66.40 e 84.51 g kg^{-1} (suoli moderatamente calcarei). Il CV è elevato e la differenza tra *top-soil* e *sub-soil* è statisticamente significativa.

In accordo con quanto riportato nelle Linee Guida dei Metodi di Rilevamento e Informatizzazione dei Dati Pedologici (Costantini, 2007), del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, la conducibilità elettrica in soluzione acquosa (ECw) è mediamente forte-moderata (0.25 e 0.26 dS m^{-1}) e compresa tra valori minimi di conducibilità trascurabile (0.08 e 0.06 dS m^{-1}) e valori massimi di conducibilità molto forte (1. 43 e 1.06 dS m^{-1}), con una differenza significativa nei valori medi di ECw tra *top-soil* e del *sub-soil*.

La variabilità dell'ECw è evidente nella figura 9. La quasi totalità dei suoli ricade al disotto della soglia 0.5 dS m^{-1}; tuttavia, una parte non trascurabile di essi presenta valori di ECw inclusi nella classe di salinità forte-moderata (0.25 ÷ 0.5 dS m^{-1}), in grado di influenzare negativamente la crescita delle piante più sensibili. Solo un numero limitato di campioni di suolo mostra valori di ECw superiori a 0.5 dS m^{-1}, soglia di rischio per le piante moderatamente sensibili alla salinità.

La conducibilità elettrica in estratto saturo (ECe) presenta valori medi di 1.94 dS m^{-1} (nel *top-soil*) e 2.02 dS m^{-1} (nel *sub-soil*), ricadenti in intervalli di variazione compresi tra 0.88-8.57 dS m^{-1} e 0.94-6.36 dS m^{-1}. In questo caso la differenza tra *top-soil* e *sub-soil* non è significativa.

Come atteso, la variabilità dell'ECe (Fig. 10) è strettamente correlata a quella dell'ECw. Gran parte dei suoli analizzati presenta valori di ECe compresi nella classe di salinità trascurabile (< 2.0 dS m^{-1}); una buona parte di essi presenta, invece, valori di ECe compresi nella classe di salinità leggera (2.0 ÷ 4.0 dS m^{-1}), in grado, quindi, di influenzare la crescita e la produzione di piante sensibili alla salinità (Fig. 11).

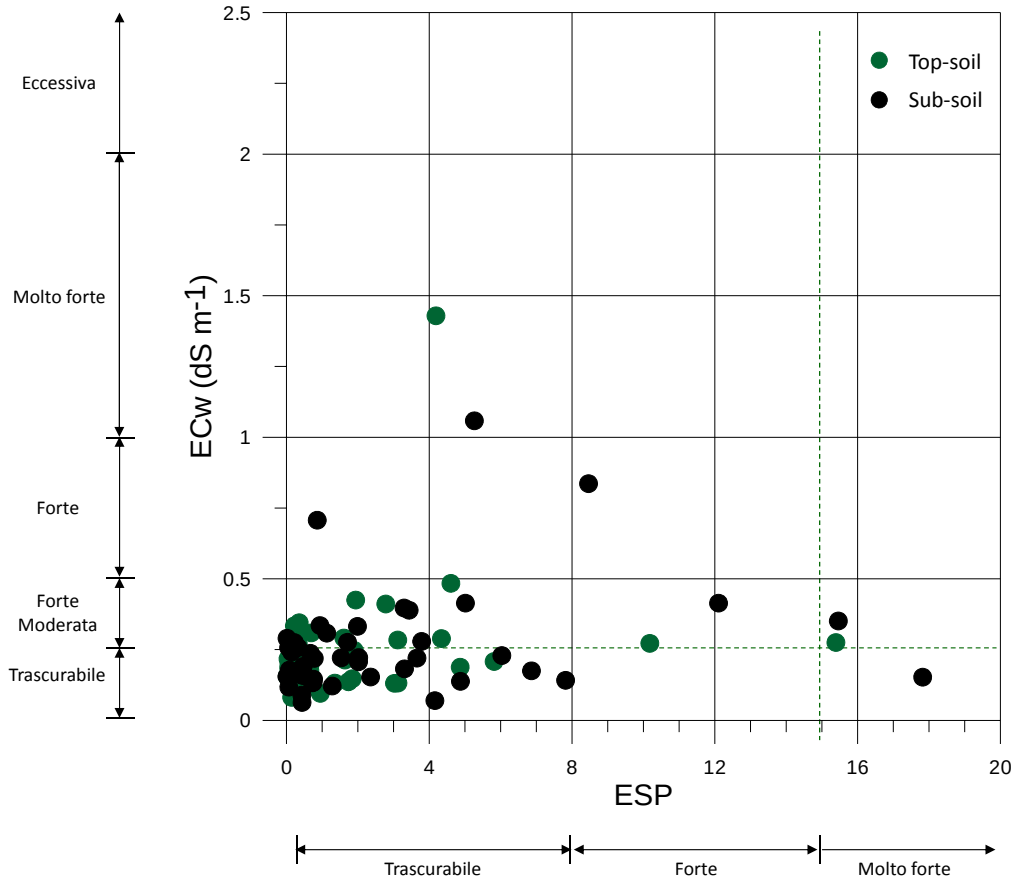


FIG. 9 – Distribuzione dei suoli (distinti per *top-soil* e *sub-soil*) nel piano definito dalla conducibilità elettrica in soluzione acquosa 1:5 (ECw) e dalla dall'*Exchangeable Sodium Percentage* (ESP). Le classificazioni dell'ECw e dell'ESP riportate a sinistra e in basso nella figura, rispettivamente, fanno riferimento alle "Linee Guida dei Metodi di Rilevamento e Informatizzazione dei dati Pedologici (Costantini, 2007)" del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali.

La capacità di scambio cationico (CEC) è mediamente alta (33.66 e 32.66 $cmol_c\ kg^{-1}$) e variabile da bassa (min. 9.00 e 7.40 $cmol_c\ kg^{-1}$) a molto alta (max 72.40 e 75.50 $cmol_c\ kg^{-1}$). Il CV è moderato; la differenza tra *top-soil* e *sub-soil* non è significativa.

Calcio+magnesio scambiabili (Ca^{2+}+Mg^{2+}) dominano le basi di scambio, con valori medi di 30.75 e 29.76 $cmol_c\ kg^{-1}$, valori minimi di 8.60 e 6.80 $cmol_c\ kg^{-1}$ e valori massimi di

70.80 e 73.20 $cmol_c\ kg^{-1}$. La loro variabilità è moderata; la differenza tra *top-soil* e *sub-soil* non è significativa.

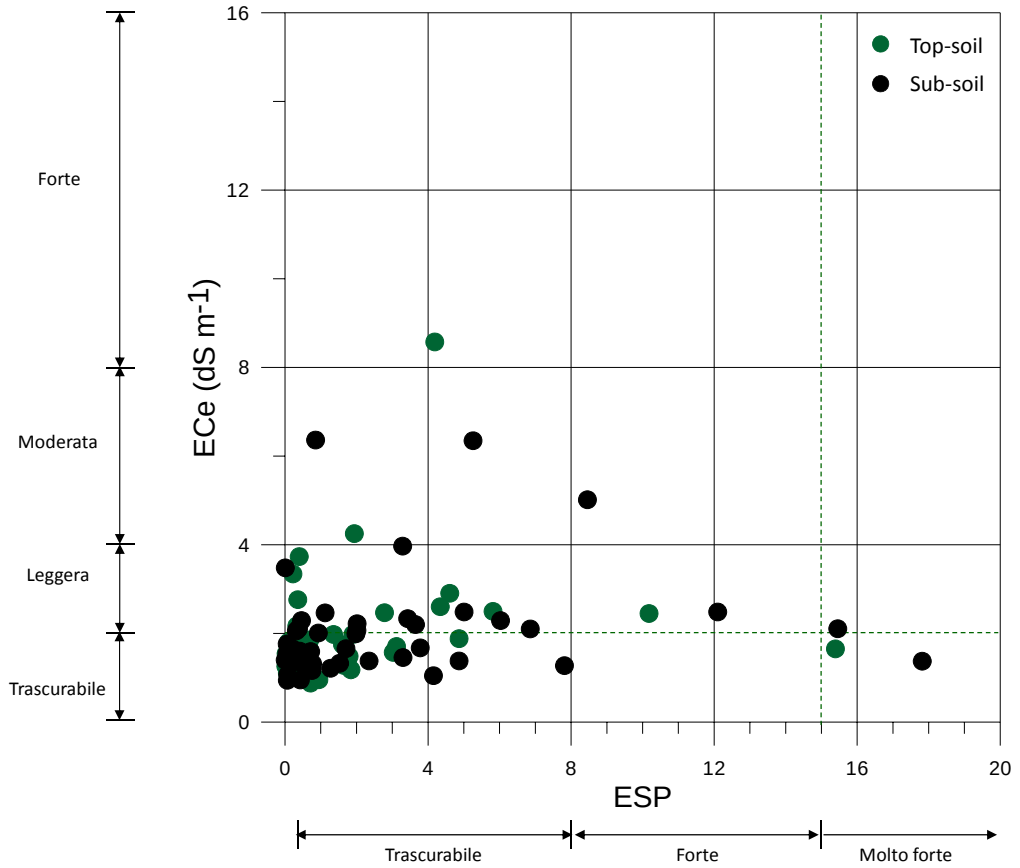


FIG. 10 – Distribuzione dei suoli (distinti per *top-soil* e *sub-soil*) nel piano definito dalla conducibilità elettrica in estratto saturo (ECe) e dall'*Exchangeable Sodium Percentage* (ESP). La classificazione dell'ECe (riportata a sinistra della figura) è basata sulle categorie dell'*US Salinity Laboratory Staff,* 1954 (concordanticon Chhabra, 1986). La classificazione contempla anche un'altra classe, per valori di ECe > 16 (salinità "molto forte") non riportata nella figura. La classificazione dell'ESP (riportata in basso nella figura) fa riferimento alle "Linee Guida dei Metodi di Rilevamento e Informatizzazione dei dati Pedologici (Costantini, 2007)" del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali.

Il contenuto di potassio scambiabile (K^+) è molto alto sia nei valori medi (2.26 e 1.19 $cmol_c\ kg^{-1}$) sia in quelli massimi (6.40 e 8.00 $cmol_c\ kg^{-1}$). I valori minimi sono, invece,

molto bassi (0.10 $cmol_c\ kg^{-1}$). La variabilità di questa base di scambio è molto alta; la differenza tra *top-soil* e *sub-soil* non è significativa.

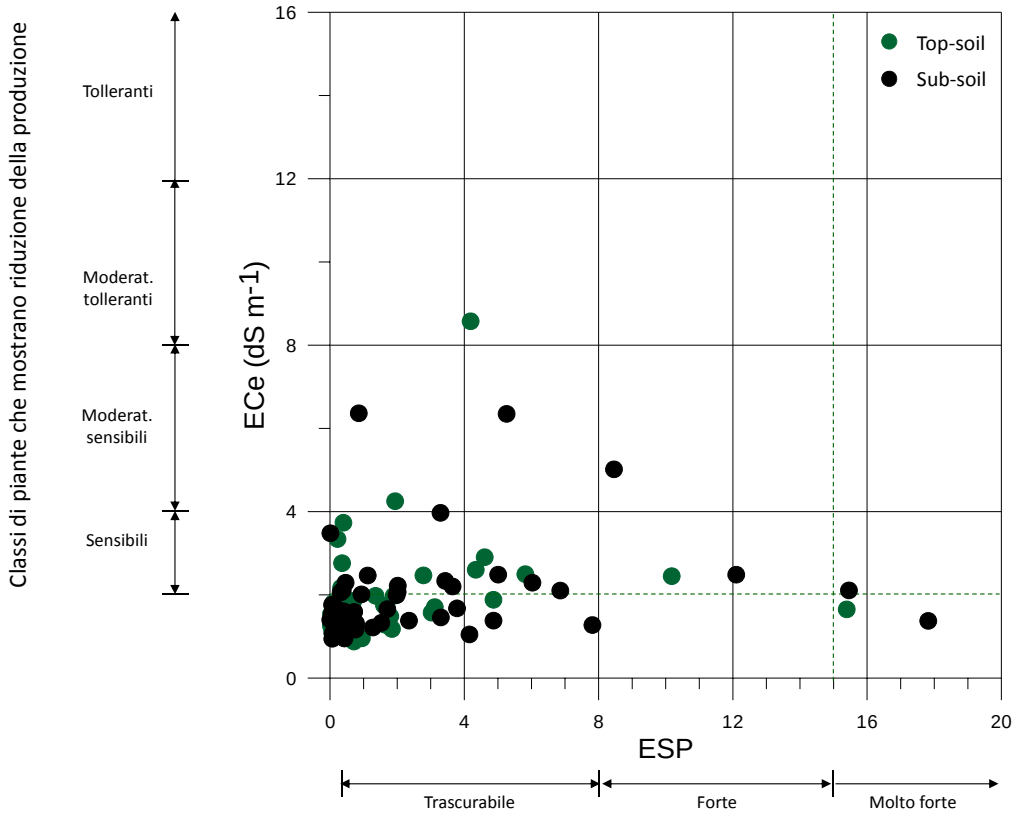


FIG. 11 – Come figura 10, con indicazione delle classi che mostrano riduzione della produzione in relazione al livello di salinità (da Brady and Weil, 2002. *The Nature and Properties of Soils*,. Prentice Hall, mod.).

Il sodio scambiabile (Na^+) è classificato normale nei suoi valori medi (0.65 e 0.93 $cmol_c\ kg^{-1}$) e minimi (0.01 $cmol_c\ kg^{-1}$); è invece classificato molto alto nei suoi valori massimi (4.74 e 4.18 $cmol_c\ kg^{-1}$). Il CV di variazione è sempre molto alto; la differenza tra *top-soil* e *sub-soil* non è significativa.

L'ESP è trascurabile nei suoi valori medi (1.83-2.93) e minimi (0.01), è molto forte (15.40 e 17.80) nei suoi valori massimi ed aumenta significativamente con la profondità.

Il CV è molto elevato. Pochi campioni di suolo superano, tuttavia, le soglie di 8 dS m^{-1} e 15 dS m^{-1} (Figg. 9, 10 e 11) e sono, pertanto, classificati a sodicità forte o molto forte.

Distribuzione spaziale (cartografia) delle proprietà dei suoli[10]

La variabilità spaziale delle proprietà dei suoli è stata analizzata in relazione ai sistemi e ai sottosistemi di terre (di Gennaro *et al*, 2002). Particolare attenzione è stata rivolta alle proprietà utilizzate per la valutazione dello stato di salinità/alcalinità dei suoli. I risultati dell'analisi sono di seguito discussi.

Il pH (Tav IVa e IVb) è maggiormente variabile nei suoli della depressione retrodunare (L1.1) e in quelli vulcanici della parte bassa dell'Archicaldera dei Campi Flegrei (F2.4). I valori più alti (reazione fortemente alcalina) (Tab. 5) si rinvengono nei *sub-soil* delle aree prossime all'asta fluviale (I2.2), in quelli delle aree morfologicamente depresse (I4.1) e in quelli dell'apparato dunare (L3.1). La variabilità del pH è ricollegabile ai contenuti di OC e di $CaCO_3$. Sono state, infatti, trovate correlazioni significative (dati non mostrati) tra pH e $CaCO_3$ ($r = 0.522$, $p< 0.01$) e tra pH e OC ($r = - 0.523$, $p< 0.01$)[11].

Il contenuto di argilla (Tav. Va e Vb) è molto variabile nei suoli della depressione retrodunare (L1.1) e in quelli dell'apparato dunare (L3.1). Esso presenta i valori mediamente più bassi (Tab. 5) nei suoli dell'Archicaldera dei Campi Flegrei (F2.4) e i valori mediamente più alti nei suoli delle aree prossime all'asta fluviale (I2.2), in quelli delle aree relativamente depresse (I4.1) e nei *sub-soil* delle aree bordiere (I2.3).

Il contenuto di argilla è negativamente correlato (dati non mostrati) al contenuto di sabbia ($r = -0.917$, $p < 0.001$). Pertanto, la variabilità spaziale della sabbia (Tav VIa e VIb) mostra un comportamento opposto a quello dell'argilla, con i valori più alti (Tab. 5) nei suoli vulcanici dell'Archicaldera (F2.4) e in quelli dell'apparato dunare (L3.1)..

[10] In alcuni casi, per un numero minimo di siti, mancano informazioni relative ad alcune proprietà, a causa della quantità ridotta di suolo prelevato in campo o della perdita accidentale di materiale durante la fase di trasporto in laboratorio.

[11] La correlazione(lineare) aumenta notevolmente ($r = - 0.78$) eliminando pochi campioni con valori estremi molto bassi di OC.

Anche il contenuto di limo (Tav VIIa e VIIb) è negativamente correlato ($r = -0.575$; $p < 0.001$) al contenuto di sabbia. I suoli più poveri di limo (Tab. 5) si rinvengono nell'apparato dunare (L3.1) e net *top-soil* della parte bassa del versante dell'Archicaldera (F2.4). I suoli mediamente più ricchi di limo si rinvengono, invece, nella depressione retrodunare (L1.1) e nelle aree relativamente depresse (L4.1).

In conseguenza della variabilità spaziale dei contenuti relativi di sabbia, limo e argilla, la tessitura[12] (Tav VIIIa e VIIIb) è (Tab. 5) tendenzialmente franca sabbiosa nei suoli vulcanici dell'Archicaldera (F2.4), franca sabbiosa argillosa nei suoli degli apparati dunari (L3.1), argillosa nei suoli delle aree prossime all'asta fluviale (I2.2), in quelli delle aree relativamente depresse (I4.1) e nei *sub-soil* delle aree bordiere (I2.3); è franca o franca argillosa negli altri casi.

La variazione del contenuto di carbonio organico (OC) (Tav Xa e Xb) ricalca molto, come già accennato, quella del pH (Tav IVa e IVb), data la correlazione negativa tra le due variabili. Pertanto, i suoli più ricchi di OC (Tab. 5) si rinvengono nella depressione retrodunare (L1.1), con valori medi di 53.74 g kg^{-1} (*top-soil*) e 40.56 g kg^{-1} (*sub-soil*); i suoli più poveri di OC si rinvengono, invece, nell'apparato dunare (L3.1).

Anche la variazione del contenuto di carbonati ($CaCO_3$)[13] (Tav XIa e XIb) ricalca, entro certi limiti quella del pH, al quale, come già detto, esso è positivamente correlato. I suoli

[12] La tessitura influenza notevolmente il comportamento dei suoli sodici. In particolare, il contenuto di argilla contribuisce in modo significativo a determinare la risposta dei suoli alle condizioni di sodicità, attraverso i suoi effetti sulla distribuzione dimensionale dei pori, (Levi e Shainberg, 2004). La sensibilità della conducibilità idraulica a condizioni sodiche è generalmente maggiore per i suoli con contenuti medi o elevati di argilla. Quando il contenuto di argilla è alto, il rigonfiamento, o *swelling*, (dell'argilla) può ridurre significativamente la dimensione dei pori che conducono acqua, con conseguente contrazione della conducibilità idraulica. Similmente, in condizioni disperdenti, le particelle di argilla (disperse) ostruiscono i pori, causando una riduzione della conducibilità. Per contro, nei suoli sabbiosi, a causa del basso contenuto di argilla, il rigonfiamento ha soltanto un limitato effetto sulla conducibilità idraulica.

[13] Il contenuto di $CaCO_3$ influenza il comportamento dei suoli sodici. Suoli sodici contenenti $CaCO_3$ e altri minerali primari che rilasciano prontamente elettroliti solubili, non si disperdono velocemente quando lisciviati con acqua di buona qualità a moderati valori di ESP, poiché può essere mantenuta una concentrazione elettrolitica sufficientemente elevata, capace di prevenire la dispersione delle argille. Inoltre, in presenza di concentrazioni elevate di $CaCO_3$, il livello di ESP diminuisce in quanto il catione Ca^{2+} (libera-

più calcarei (Tab. 5) caratterizzano le aree morfologicamente depresse (I4.1) e le aree bordiere relativamente rilevate (I2.3); i suoli meno calcarei si rinvengono, invece, nel sottosistema dell'Archicaldera Flegrea (F2.4).

La variazione della capacità di scambio cationico (CEC) (Tav XIIa e XIIb) risente particolarmente delle variazioni del carbonio organico e, in misura meno rilevante, del contenuto di argilla, per effetto delle relazioni positive (dati non mostrati) esistenti tra CEC e OC ($r = 0.78$, $p < 0.001$) e tra CEC e argilla ($r = 0.42$, $p < 0.001$). Di conseguenza, i suoli con più elevati valori di CEC (Tab. 5) prevalgono nella depressione retrodunare (L1.1), quelli con più bassi valori di CEC prevalgono, invece, nell'apparato dunare (L3.1).

Altamente correlata alla CEC ($r = 0.98$, $p < 0.001$) è la somma del calcio e del magnesio scambiabili (Ca^{+2} + Mg^{2+}). Per questo, le carte della variabilità del Ca^{+2}+Mg^{2+} (Tav. XIIIa e XIIIb) ricalcano quelle della variabilità della CEC.

Il contenuto di potassio scambiabile (K^+) (Tav. XIVa e XIVb), mediamente molto alto (Tab. 5), è distribuito irregolarmente all'interno dei sistemi e sottosistemi di terre e tra i stessi sistemi e sottosistemi. In assoluto, i valori medi più alti di K^+ si rinvengono nei suoli delle aree prossime all'asta fluviale (I2.2), quelli più bassi nei suoli dell'apparato dunare (L3.1).

Anche il sodio scambiabile (Na^+) mostra una distribuzione spaziale piuttosto irregolare (Tav. XVa e XVb), ma in modo meno rilevante rispetto a quella del K^+. I valori medi più alti Na^+ (Tab. 5) si rinvengono nei suoli della depressione retrodunare (L1.1) e delle aree prossime all'asta fluviale (I2.2); quelli più bassi si rinvengono, come per il potassio, nei suoli dell'apparato dunare (L3.1).

Cartografia dello stato di salinità/alcalinità dei suoli

to dalla dissoluzione del $CaCO_3$) è bivalente, quindi in grado di sostituire facilmente il catione Na^+ sul complesso di scambio.

Come detto in precedenza, la valutazione dello stato di salinità/sodicità dei suoli è comunemente realizzata in accordo con le classi definite dall'*US Salinity Laboratory Staff* (!954), (Tab. 1) basate sui valori di ESP, ECe e pH. Le Tav XVIa e XVIb mostrano la variabilità delle predette classi nel *top-soil* e nel *sub-soil*, rispettivamente. L'analisi delle due tavole evidenzia chiaramente che, in accordo con il sistema di classificazione considerato, i suoli oggetto d'indagine sono in gran parte classificati normali (*normal soils*), cioè non affetti da salinità/alcalinità. Solo tre campioni di *top-soil* (Tav. XVIa) e cinque di *sub-soil* (Tav XVIb) sono classificati salini o sodici. Tuttavia, come più volte ripetuto, alcune piante sensibili (Tab. 2) subiscono effetti sulla crescita e sulla produttività anche a valori di ECe inferiori a 4 dS m^{-1} (e superiori a 2 dS m^{-1}). Inoltre, anche al disopra del limite di 4 dS m^{-1}, la risposta delle piante alla salinità varia in funzione della specie (e della *cultivar*, in taluni casi). Le Tav XVIIa e XVIIb mostrano la distribuzione spaziale dei siti campionati in relazione alle classi di ECe definite sulla base della diversa sensibilità delle colture alla salinità. L'analisi delle due tavole evidenzia la presenza di numerosi siti con valori di ECe in grado di influenzare negativamente la crescita e la produzione delle piante più sensibili.

Le Tav XVIIa e XVIIb sono sostanzialmente sovrapponibili alle Tav. XVIIIa e XVIIIb, riguardanti la distribuzione delle classi di ECw (conducibilità elettrica misurata in estratto acquoso 1:5) definite in accordo con le Linee Guida dei Metodi di Rilevamento e Informatizzazione dei dati Pedologici (Costantini, 2007) del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. Quest'aspetto è rilevante, da un punto di vista pratico, considerato che la misura dell'ECw è notevolmente più rapida e agevole rispetto alla misura ECe o alla sua stima, basata sulla conversione dell'ECw in base alle tessiture.

TABELLA 5 - Medie e coefficienti di variazione delle proprietà chimiche e fisiche dei suoli per singoli sottosistemi di terre.

Sottosistema		pH		Argilla (%)		Sabbia (%)		Limo (%)		Tessitura (classi generali)
		Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV	
F2.4	*Top-soil*	7.67	10.66	15.40	34.94	67.01	16.94	17.29	57.27	Franca sabbiosa
	Sub-soil	7.81	8.92	9.75	33.89	71.00	20.41	19.25	62.68	Franca sabbiosa
I2.2	*Top-soil*	8.23	3.91	45.00	22.44	35.00	41.99	20.00	24.15	Argillosa
	Sub-soil	8.58	5.40	42.20	27.45	34.60	48.43	23.40	25.57	Argillosa
I2.3	*Top-soil*	8.31	2.28	38.55	42.44	40.55	46.36	20.89	36.16	Franca argillosa
	Sub-soil	8.36	2.44	41.91	41.47	38.55	55.75	19.64	35.52	Argillosa
I4.1	*Top-soil*	8.35	1.51	45.41	26.16	32.65	41.75	21.94	22.94	Argillosa
	Sub-soil	8.45	1.51	44.91	33.11	31.09	56.60	24.00	32.49	Argillosa
L1.1	*Top-soil*	7.91	7.56	36.55	48.82	38.91	54.05	24.46	58.06	Franca argillosa
	Sub-soil	8.14	4.51	25.13	55.05	36.64	65.06	25.13	40.23	Franca
L3.1	*Top-soil*	8.32	1.32	31.26	60.49	56.07	52.60	12.67	85.95	Franca sabbiosa argillosa
	Sub-soil	8.42	1.40	26.54	71.76	61.53	44.4	12.09	73.35	Franca sabbiosa argillosa

Continua →

Sottosistema		Tessitura (classi fondamentali)	OC (g kg^{-1})		$CaCO_3$ (g kg^{-1})		CEC ($cmol_c$ kg^{-1})		$Ca_{+2}+Mg^{2+}$ ($cmol_c$ kg^{-1})	
			Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
F2.4	*Top-soil*	Moder. grossolana	14.80	40.28	13.19	34.82	29.31	18.92	26.77	21.19
	Sub-soil	Moder. grossolana	11.26	71.43	12.45	32.72	27.22	26.44	24.72	30.36
I2.2	*Top-soil*	Fine	22.64	24.88	69.76	53.09	35.01	23.62	29.09	29.31
	Sub-soil	Fine	13.28	23.48	84.36	48.73	33.25	21.70	29.10	22.13
I2.3	*Top-soil*	Moderatamente fine	19.11	36.48	96.63	46.53	30.04	33.90	27.96	35.65
	Sub-soil	Fine	12.55	52.68	114.41	39.18	30.15	23.26	28.13	24.52
I4.1	*Top-soil*	Fine	16.42	39.32	80.26	50.49	30.97	15.53	28.38	10.98
	Sub-soil	Fine	9.74	34.09	111.88	34.96	28.42	22.92	25.02	24.19
L1.1	*Top-soil*	Moderatamente fine	53.74	117.30	51.27	99.72	47.57	31.68	43.61	34.96
	Sub-soil	Media	40.56	102.41	52.85	98.61	47.14	32.88	43.45	34.95
L3.1	*Top-soil*	Moderatamente fine	11.63	30.34	48.46	76.76	24.05	37.10	22.53	37.52
	Sub-soil	Moderatamente fine	8.82	22.14	73.53	86.38	24.63	37.39	23.17	38.92

Continua →

Sottosistema		K^+ ($cmol_c\ kg^{-1}$)		Na^+ ($cmol_c\ kg^{-1}$)		ECw ($dS\ m^{-1}$)		ECe ($dS\ m^{-1}$)		ESP	
		Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
F2.4	*Top-soil*	1.50	68.81	1.04	66.77	0.15	24.96	1.75	28.84	3.43	50.05
	Sub-soil	1.70	73.26	0.80	113.07	0.12	40.21	1.52	29.39	3.04	100.67
I2.2	*Top-soil*	4.65	25.58	1.27	161.16	0.25	27.52	1.72	20.68	4.37	169.05
	Sub-soil	3.00	77.87	1.16	117.23	0.26	37.73	1.82	28.07	3.89	123.16
I2.3	*Top-soil*	1.85	46.40	0.23	131.15	0.24	23.59	2.05	40.29	0.88	149.42
	Sub-soil	1.63	39.19	0.39	115.45	0.24	31.85	1.99	46.42	1.28	104.14
I4.1	*Top-soil*	2.19	85.71	0.39	137.32	0.32	116.54	2.14	101.57	1.13	132.09
	Sub-soil	1.89	74.75	1.51	110.38	0.27	76.84	1.84	61.56	5.36	118.51
L1.1	*Top-soil*	2.68	86.66	1.29	109.45	0.24	53.25	2.03	50.65	2.81	107.96
	Sub-soil	2.45	108.38	1.24	76.91	0.49	95.54	3.77	93.09	2.69	82.21
L3.1	*Top-soil*	1.37	81.26	0.14	56.61	0.16	52.27	1.31	30.48	0.56	50.40
	Sub-soil	1.32	82.34	0.13	52.08	0.16	33.56	1.57	33.98	0.53	33.58

Spettrometria V-NIR

Su una parte dei campioni di suolo sono state realizzate misure di riflettanza spettrale[14] nel dominio visibile-infrarosso vicino (350-2500 nm)[15] (Fig. 12), in laboratorio, in condizioni controllate d'illuminazione (vedi Fase 4).

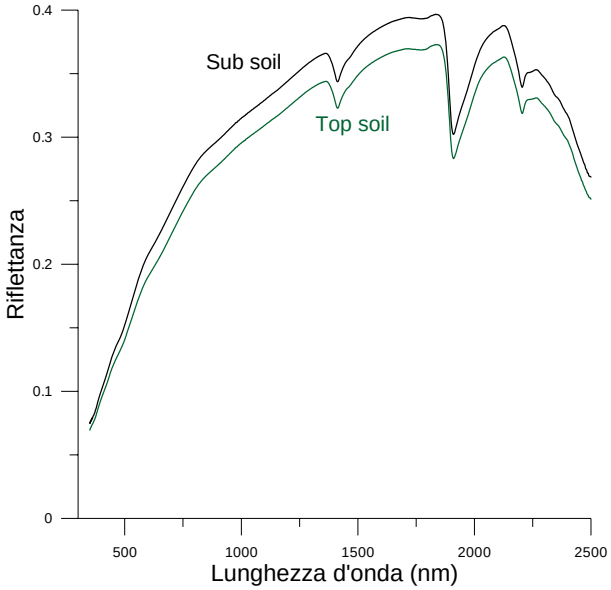


FIG. 12 – Spettri medi di riflettanza (R) del *top-soil* e del *sub-soil* dei suoli analizzati.

Le misure sono state processate per estrarre informazioni riguardanti le caratteristiche mineralogiche dei suoli[16] e i parametri del colore Munsell e per la predizione delle pro-

[14] La riflettanza è definita dal rapporto tra la luce riflessa da un oggetto (il suolo, nel nostro caso) e quella su di esso incidente.

[15] Alcuni autori suddividono l'intervallo di lunghezza d'onda compresa tra 350 e 2500 nm in due principali domini: il visibile (*visible*, VIS), compreso tra 350 e 770 nm e l'infrarosso vicino (*near infrared*, NIR), compreso tra 770 e 2500 nm. Altri autori, differenziano l'intervallo 770-2500 nm in infrarosso vicino (NIR, 770 - 1300 nm) e onde corte infrarosse (*short-wave infrared*, SWIR, 1300 - 2500 nm). Nel presente lavoro sarà utilizzata la prima suddivisione, indicata con la sigla V-NIR.

[16] La mineralogia influenza la risposta del suolo (e delle colture) alla salinità/sodicità. Gli ossi-idrossidi di ferro migliorano la stabilità del suolo, attraverso la loro azione cementante e riducono sostanzialmente la sua suscettibilità a condizioni di sodicità. Suoli con elevati contenuti di minerali argillosi espandibili, del gruppo della smectite, sono i più labili, mentre quelli con elevati valori di caolinite sono i meno labili (Levy e Shainberg, 2004). Pertanto, l'identificazione di bande di assorbimento associate alla presenza di specifici minerali del suolo, la misura della loro intensità, correlabile all'abbondanza relativa dei minerali e la

prietà dei suoli. Di quest'ultimo aspetto si parlerà dettagliatamente alla Fase 4 nel presente lavoro. Per approfondimenti in materia di spettrometria dei suoli si rimanda a lavori specifici (es., Leone, 2000 e bibliografia citata).

Per l'estrazione delle informazioni riguardanti la mineralogia dei suoli, gli spettri di riflettanza (R) sono stati trasformati nei relativi spettri di assorbanza (A = log 1/R) (Fig. 13).

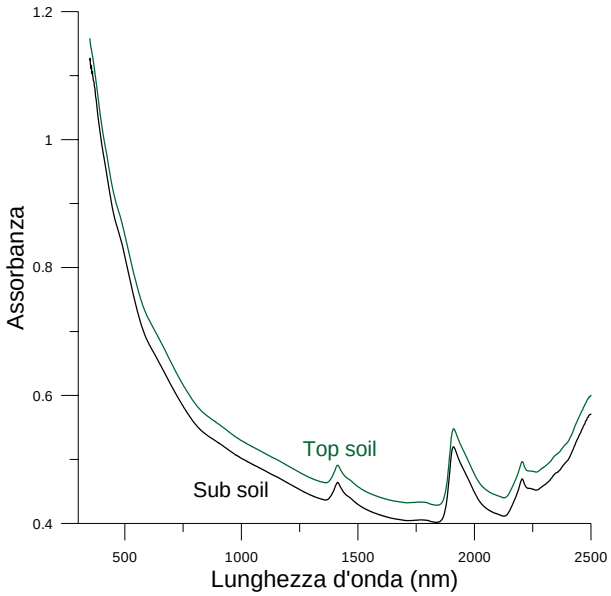


FIG. 13 – Spettri medi di assorbanza (A = log 1/R) del *top-soil* e del *sub-soil*.

Gli spettri di assorbanza sono stati assoggettati ad una procedura di *filtering* (utilizzando algoritmo Savitzky-Golay), per ridurre il rumore strumentale al alta frequenza, prima della loro trasformazione in derivata seconda (Fig. 14).

Sugli spettri di derivata seconda (Fig. 14) sono state individuate le posizioni (lunghezza d'onda del picco di minima) delle principali bande diagnostiche (Fig. 15) di minerali individuali e di gruppi di minerali del suolo. Di ciascuna banda è stata misurata l'intensità (differenze tra il valore del picco di minima e quello del successivo picco di massima) (Fig. 15).

mappatura della loro distribuzione spaziale rappresentano utili elementi di valutazione dei potenziali effetti della salinità/sodicità sul suolo.

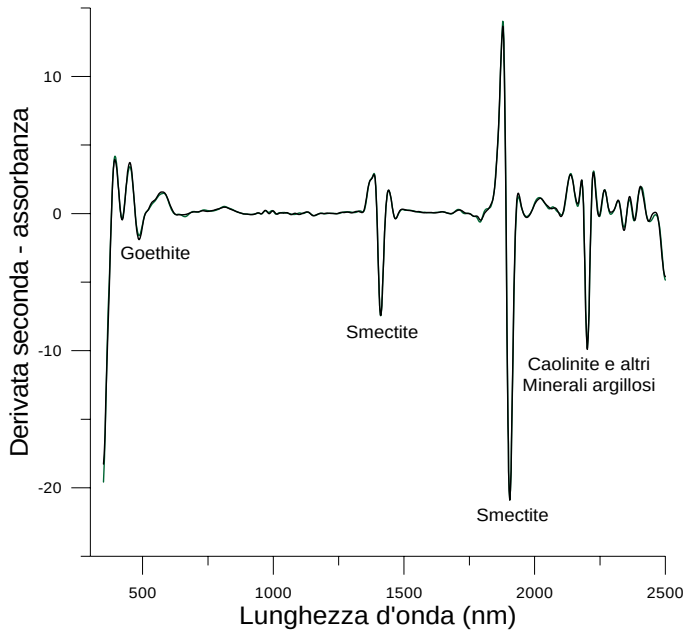


FIG. 14 – Derivate seconde degli spettri di assorbanza del *top-soil* e del *sub-soil* dei suoli analizzati. Sono riportate le posizioni delle principali bande di assorbimento dei minerali e gruppi di minerali del suolo.

Le principali bande individuate sugli spettri di derivata seconda sono quelle della goethite (intorno a 486 nm), della smectite (intorno a 1411 e 1905 nm) e della caolinite (intorno a 2201 nm, con *doublet* intorno a 2164 nm[17]).

La banda a 1411 nm è stata esclusa dalle successive analisi, essendo altamente correlata alla principale banda della smectite, a 1905 nm. Sono state individuate anche bande "minori" (non considerate nelle successive analisi) oltre i 2200 nm, associabili alla presenza di minerali argillosi e una banda a 2340 nm, determinata dalla presenza di carbonati. Anche quest'ultima banda non è stata considerata, essendo i carbonati già stati determinati attraverso analisi chimiche convenzionali. Neanche la banda dell'ema-

[17] La banda centrata intorno a 2201 nm, oltre che dalla caolinite, è influenzata anche dalla presenza di altri minerali argilllosi. La *boublet* a 2164 nm, associata alla banda principale a 2201 nm, è invece diagnostica (quando presente) della presenza e abbondanza della sola caolinite.

tite (intorno a 530 nm), identificata solo in pochissimi campioni, è stata considerata, a per il valore trascurabile della sua intensità.

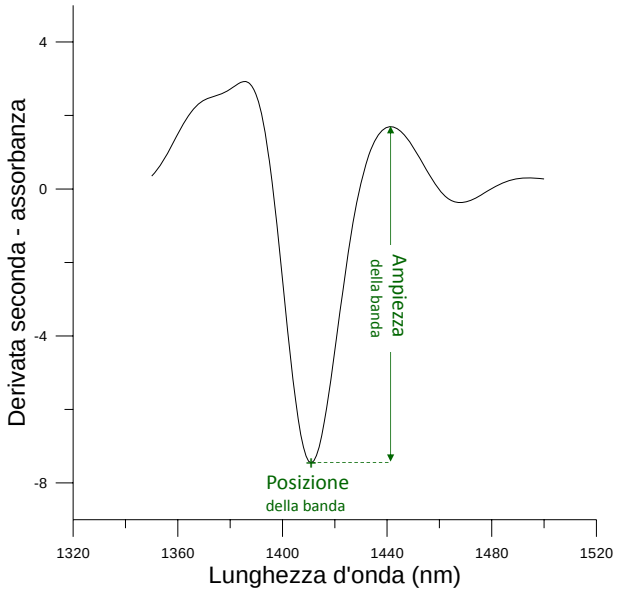


FIG. 15 – Posizione e ampiezza di una banda di assorbimento sulla derivata seconda di uno spettro di assorbanza.

Il *processing* spettrale è stato realizzato utilizzando due software dedicati: SPEX, *Spectral Explorer* (Loercher, 1996) e SpecPro (Calabrò e Tosca, 2009).

Gli spettri di riflettanza sono stati successivamente trasformati in notazioni colorimetriche Munsell[18].

[18] Il colore è uno degli attributi maggiormente utilizzati per caratterizzare i suoli (Torrent e Barrón, 1993). Il colore in sé ha uno scarso significato; la sua importanza dipende dal fatto che molte proprietà utilizzate per classificare e interpretare i suoli sono ad esso strettamente correlate (Post *et al*., 1993). In genere, il colore di un suolo è determinato dall'ammontare e dallo stato del ferro e/o della sostanza organica (FitzPatrick, 1986). Suoli scuri sono generalmente indicativi di elevati contenuti di sostanza organica, anche se il manganese può produrre una colorazione scura. In suoli con bassi contenuti di sostanza organica, gli ossidi di ferro secondari sono i principali agenti pigmentanti. Tra gli ossidi di ferro che possono essere rinvenuti nel suolo, la goethite impartisce alla matrice un colore bruno-gialliccio. Tuttavia, quando è presente anche l'ematite, il suolo diventa rossiccio, poiché il rosso di quest'ossido di ferro è molto efficace a mascherare il giallo della goethite (Torrent *et al*., 1993). La presenza del ferro in forma ridotta (o stato ferroso), che normalmente si verifica in suoli molto umidi (per esempio in presenza di una falda) conferisce al materiale pedologico un colore grigio, oliva o blu (FitzPatrick, 1986). Anche i carbonati e l'umidità

Il colore del suolo è comunemente determinato per confronto visivo con le carte colorimentriche Munsell (Munsell Color Company, 1975). Il sistema Munsell è basato su tre coordinate: Hue, che si riferisce alla lunghezza d'onda dominante, Chroma, che esprime la saturazione del colore e Value, che rappresenta la brillanza totale (Escadafal, 1993).

Accuratezza e precisione della determinazione visuale del colore Munsell di un suolo dipendono da diversi fattori, includenti la luce incidente, le condizioni del campione e l'abilità della persona che realizza il confronto. Una determinazione più accurata e precisa è basata sulle misure di riflettanza (Fernandez and Schulze, 1987).

In accordo con le leggi della colorimentria, il dominio spettrale della percezione del colore è ristretto alla luce visibile, definita come l'intervallo spettrale della sensibilità umana (Wyszecki and Stiles, 1982). Pertanto, ai fini del presente studio, le curve spettrali originali sono state ricampionate nell'intervallo 350 - 770 nm (dominio visibile). A partire da ciascuna curva (ricampionata) sono stati calcolati i valori di tristimolo (X, Y, Z), in accordo con il metodo CIE (Commission International de l'Eclairage, 1931). Questi ultimi sono stati convertiti in valori di Hue, Value e Chroma.

La trasformazione delle riflettanza in valori di tristimolo è stato realizzata utilizzando il software SpecPro (Calabrò e Tosca, 2009). Il calcolo delle notazione Munsell, Hue, Value e Chroma è stato realizzato utilizzando il software *Munsell Conversion Program* (http://Walkill.com).

Analisi statistica

Le singole proprietà derivate dalla trasformazione degli spettri di riflettanza sono state statisticamente descritte in termini di valori minimi (Min), massimi (Max) e medi (Mean)

influenzano il colore del suolo. Carbonati e solfati di calcio impartiscono al suolo un colore chiaro (Couralt *et al*., 1998), mentre l'aumento del contenuto di umidità abbassa l'intensità del colore (Ellis e Mellor, 1995)

e di coefficiente di variazione (CV). I risultati dell'analisi statistica sono riportati nella tabella 6. La stessa tabella riporta valori del *t-test* di *Student*, calcolati per valutare, per ciascuna proprietà, la significatività delle differenze tra *top-soil* e *sub-soil*.

TABELLA 6 - Statistica descrittiva dei principali parametri spettrali dei suoli e significatività statistica delle differenze (*t-student*) tra *top-soil* e *sub-soil*.

Proprietà			Mean	Min	Max	CV%
Banda* goethite (485 nm)	*Top-soil*		1.76	0	4.04	64.67
	Sub-soil		2.12	0	6.48	68.40
		t-student	*Valore*		*-3.137*	
			Significatività		*0.000 (S)*	
Banda smectite* (1905 nm)	*Top-soil*		22.45	10.11	37.85	25.48
	Sub-soil		23.22	9.64	30.01	25.32
		t-student	*Valore*		*-1.65*	
			Significatività		*0.10 (NS)*	
Banda caolinite• (2164 nm)	*Top-soil*		2.14	0.22	6.53	53.27
	Sub-soil		2.03	0	5.82	54.19
		t-student	*Valore*		*1.67*	
			Significatività		*0.24 (NS)*	
Banda caolinite♦ (2101 nm)	*Top-soil*		13.14	5.2	18.75	27.02
	Sub-soil		13.36	0	24.59	33.38
			Valore		*-0.56*	
			Significatività		*0.57 (NS)*	
Hue**	*Top-soil*		1.47 Y	9.65 YR	3.59 Y	6.69
	Sub-soil		1.59 Y	9.64 YR	4.98 Y	7.96
		t-student	*Valore*		*-1.39*	
			Significatività		*0.17 (NS)*	
Value	*Top-soil*		4.66	3.57	5.47	9.93
	Sub-soil		4.89	3.62	5.91	8.85
		t-student	*Valore*		*-6.475*	
			Significatività		*0.000 (S)*	
Chroma	*Top-soil*		1.76	0.61	2.79	23.80
	Sub-soil		1.88	0.71	3.27	24.09
		t-student	*Valore*		*-4.519*	
			Significatività		*0.000 (S)*	

* L'intensità della banda è espressa in valori della derivata seconda dell'assorbanza (valori compresa tra o e 1).

• più precisamente, si tratta della *doublet* della banda della caolinite a 2201 nm.

♦ la banda a 2201 nm, oltre che dalla caolinite, è influenzata anche da altri minerali argillosi

**ai fini dell'analisi statistica, la notazione Munsell Hue è stata trasformata in valore numerico continuo operando come segue: per valori ≤ 10YR è stato considerato il numero precedete la sigla YR (es. 8.50 YR = 8); per valori >10YR è stata addizionata al numero precedente la sigla Y il valore 10 (es.: 2.5Y = 12.5).

NS = differenza non significativa tra le medie; S = differenza significativa tra le medie.

Trascurando il valore assoluto dell'intensità delle bande, in quanto non riferibile ad un preciso schema di classificazione (come, invece, nel caso delle proprietà chimiche e fisiche convenzionali dei suoli), è possibile osservare (Tab. 7) una variabilità media delle bande della smectite e della caolinite e una variabilità elevata della banda della goethite e della *doublet* della caolinite. È altresì possibile osservare un aumento significativo dell'intensità della banda della goethite con la profondità, presumibilmente ricollegabile alla maggiore concentrazione di sostanza organica nel *top-soil* (Tab. 4) e alla sua influenza sui processi di formazione degli ossi-idossidi di ferro (Huang *et al*., 2004).

Il colore (descritto in base alle *Munsell Soil Colour Charts*, 1994) è tendenzialmente bruno grigiastro (1.47Y 4.66/1.76 nel *top-soil* e 1.59 Y 4.89/1.88 nel *sub-soil*), con oscillazioni tra il grigio molto scuro (9.65 YR 3.57/0.61 nel *top-soil* e 9.64 YR 3.62/0.71 nel *sub-soil*) e il griglio oliva e oliva (3.59Y 5.47/2.79 nel *top-soil* e 4.98 Y 5.91/3.27 nel *sub-soil*). La variabilità è bassa per lo Hue ed il Value, moderata, ma tendente a bassa, per il Chroma.

Le differenze nei valori medi dello Hue, tra *top-soil* e *sub-soil*, non sono statisticamente significative. È, invece, altamente significativa ($p < 0.001$) la differenza nei valori medi del Value e in quelli del Chroma. Entrambi questi parametri aumentano, mediamente, con la profondità, in conseguenza della diminuzione del contenuto di carbonio organico e dell'aumento di carbonati (Tab. 4). Value e Chroma sono, infatti, negativamente correlati (dati non mostrati) al contenuto di CO ($r = - 0.45$, $p< 0.001$ ed $r = - 0.50$, $p< 0.001$, rispettivamente); il Chroma è, invece, positivamente correlato al contenuto di $CaCO_3$ ($r = 0.416$, $p< 0.001$).

Distribuzione spaziale (cartografia) delle proprietà spettrali

La distribuzione spaziale della banda della goethite (485 nm) (Tav. XIXa e XIXb) ricalca, in modo evidente, quella del contenuto di OC (Tav. Xa e Xb). Pertanto, i contenuti medi più bassi di goethite si rinvengono (Tab. 7) nei suoli della depressione retrodunare

(L1.1); i contenuti medi più alti si rinvengono, invece, nei suoli vulcanici dell'Archicaldera Flegrea (F2.4).

Il confronto tra le Tavole XIXa e XIXb evidenzia chiaramente quanto già discusso in precedenza riguardo la maggiore ampiezza della banda della goethite nel *sub-soil*, dove il contenuto di OC è più basso, rispetto al *sub-soil*. In accordo con Huang *et al*. (2004), la sostanza organica gioca un ruolo vitale nella formazione degli ossi-idrossidi di ferro. In ambienti pedologici dove la quantità di sostanza organica è bassa, come ad esempio nei *top-soil*, il ferro prodotto dai processi di alterazione (o *weathering*) formerà goethite o ematite. Quando il contenuto di sostanza organica aumenta, gran parte del ferro complessa con la sostanza organica e il contenuto di ossi-idrossidi di ferro diminuisce. Non si forma assolutamente ematite in condizioni di elevata sostanza organica. Questo aspetto necessita, tuttavia, di essere approfondito.

Le Tav. XXa e XXb, XXIa e XXIb XXIIa e XXIIb mostrano, rispettivamente, le distribuzioni spaziali dell'ampiezza della bande della smectite (1905 nm), della *doublet* della caolinite (2164 nm) e della caolinite e altri minerali argillosi (2201 nm). Tali distribuzioni evidenziano una sostanziale corrispondenza (confermata dall'analisi statistica delle correlazioni[19]) con quelle dei contenuti di argilla (Tav Va e Vb), precedentemente discusse. L'influenza dei diversi minerali argillosi e del contenuto di argilla sul comportamento dei suoli affetti da salinità è stata già discussa in precedenza.

Le Tav. XXIIIa e XXIIIb mostrano la distribuzione spaziale del colore del suolo (ottenuto dalla combinazione RGB corrispondente al colore Munsell), così come realmente appare all'osservazione di campo. Le Tav. XXIVa e XXIVb mostrano, invece, la distribuzione spaziale della tinta dominante (Munsell-Hue), la quale risente, entro differenti limiti, della variabilità di altre proprietà del suolo correlate allo Hue, in particolare dei contenuti di CO ($r = - 0.527$, $p< 0.001$), di argilla ($r = -473$, $p< 0.001$) e di $CaCO_3$ ($r =$

[19] coefficienti di correlazione tra argilla e bande dei minerali argillosi: $r = 0.704$, $p< 0.001$ per la banda a 1905 nm; $r = 0.671$; $r = 0.664$, $p< 0.001$ per la banda a 2201 nm; $r = 0.671$ $p< 0.001$ per la banda a 2164 nm.

309, p< 0.01). Le Tav. XXVa e XXVb mostrano la distribuzione spaziale dell'intensità (Munsell-Value) del colore, che, come atteso, ricalca fortemente il contenuto di CO (Tav. Xa e Xb): i suoli con i più elevati valori di CO presentano i valori più bassi di Value (sono, cioè, più scuri). Anche la distribuzione del Chroma (Tav. XXVIa e XXVIb) risente del contenuto di CO, oltre che dei contenuti di argilla e sabbia, per effetto delle sue correlazioni con queste tre variabili (r = -396, -378 e 375, rispettivamente; p sempre < 0.001).

Nella tabella 8 sono riportati i valori medi ed i coefficienti di variazione delle notazioni Munsell (Hue, Value e Chroma) distinti per sottosistemi di terre.

Idrologia del suolo

Una parte dei campioni di suolo è stata destinata a misure idrologiche di laboratorio per la determinazione dei contenuti di acqua alla capacità di campo (*field capacity*, FC) e al punto di appassimento (*wilting point*, WP)[20].

[20] La capacità di campo corrisponde al volume di acqua rimasto nei micro-pori (o pori capillari, diametro < 10 μm) del suolo, una volta che esso ha perso, per gravità, l'acqua contenuta nei macro-pori (diametro < 10 μm) (acqua gravitazionale). Alla capacità di campo, l'acqua è trattenuta dalla matrice del suolo con una forza (potenziale matriciale) approssimativamente corrispondente a -0.33 bar.

Capacità di campo è un termine molto utile, poiché fa riferimento ad un livello di umidità in corrispondenza del quale alcune importanti proprietà del suolo sono in "fase di transizione". Alla capacità di campo:

- un suolo contiene la quantità massima di acqua utile per le piante;
- è prossimo al limite di plasticità. Un suolo si comporta come un solido friabile al disotto della capacità di campo e come un materiale che facilmente diventa fango ad un contenuto di acqua superiore alla capacità di campo. Pertanto, la capacità di campo si avvicina al livello di umidità ottimale per le lavorazioni e per gli scavi;
- un sufficiente volume di pori è occupato da una quantità tale di aria che consente lo svolgimento di molte attività microbiche e la crescita di molte piante.

L'acqua contenuta nei micropori viene progressivamente persa dal suolo per evapotraspirazione (evaporazione dalla superficie del suolo + traspirazione attraverso le piante). Man mano che il contenuto di acqua si riduce, aumenta (in valore assoluto) il potenziale matriciale, fino ad una soglia (circa -15 bar) in corrispondenza della quale la maggior parte delle piante coltivate non è più in grado di estrarre acqua dal suolo. Si dice, allora, che il suolo ha raggiunto il suo "punto di appassimento".

La differenza tra la capacità di campo e il punto di appassimento definisce la capacità (quantità massima) di acqua disponibile (*available water capacity*, AWC) per le piante.

TABELLA 7 - Medie e coefficienti di variazione delle profondità delle principali bande di assorbimento dei minerali identificate sulle derivate seconde degli spettri di assorbanza dei suoli per singoli sottosistemi di terre

Sottosistema		Banda goethite (486 nm)		Banda smectite (1905 nm)		Banda caolinite (2164 nm)		Banda caolinite (2201 nm)	
		Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
F2.4	*Top-soil*	3.00	27.29	18.74	23.55	1.00	59.48	8.94	30.28
	Sub-soil	4.05	45.51	23.00	24.83	1.72	46.28	11.81	38.29
I2.2	*Top-soil*	2.74	7.18	20.39	29.93	2.09	42.04	13.31	22.42
	Sub-soil	2.88	25.13	21.58	24.60	2.05	32.69	14.26	16.79
I2.3	*Top-soil*	1.82	61.25	22.09	27.39	2.08	33.63	12.93	25.45
	Sub-soil	2.12	64.70	23.79	26.44	2.21	36.61	13.85	24.82
I4.1	*Top-soil*	2.16	46.99	25.00	18.53	3.01	41.74	15.61	15.06
	Sub-soil	2.70	32.56	25.65	14.60	2.78	48.34	16.21	22.37
L1.1	*Top-soil*	0.41	128.52	22.66	23.72	1.63	63.85	11.48	31.98
	Sub-soil	0.46	130.44	22.34	28.12	1.37	80.10	9.81	57.56
L3.1	*Top-soil*	2.12	22.30	20.75	36.93	2.21	52.52	14.27	21.28
	Sub-soil	2.23	40.29	19.78	38.19	1.66	49.27	13.21	17.65

TABELLA 8 - Medie e coefficienti di variazione dei parametri del colore Munsell per singoli sottosistemi di terre

Sottosistema		Value Hue		Value Munsell		Chroma Munsell	
		Media	Media	CV	CV	Media	CV
F2.4	*Top-soil*	1.24Y	1.77	4.66	2.33	2.33	13.42
	Sub-soil	1.27Y	1.48	4.87	2.65	2.65	16.82
I2.2	*Top-soil*	1.63Y	2.33	4.64	1.93	1.93	6.42
	Sub-soil	1.63Y	2.95	4.84	1.98	1.98	9.26
I2.3	*Top-soil*	1.74Y	5.92	4.84	1.78	1.78	17.61
	Sub-soil	2.00Y	8.87	4.98	1.87	1.87	22.01
I4.1	*Top-soil*	1.70Y	2.86	4.77	1.84	1.84	18.51
	Sub-soil	1.67Y	2.81	5.09	2.00	2.00	12.67
L1.1	*Top-soil*	1.08Y	12.58	4.38	1.32	1.32	31.42
	Sub-soil	1.23Y	14.33	4.54	1.41	1.41	25.44
L3.1	*Top-soil*	0.95Y	4.37	4.37	1.85	1.85	9.86
	Sub-soil	0.87Y	4.20	4.58	1.90	1.90	13.13

La misura della quantità di acqua contenuta nel suolo alla capacità di campo e al punto di appassimento rappresenta una condizione essenziale per una corretta valutazione della disponibilità di acqua utilizzabile dalle piante e, quindi, per la scelta delle colture e per la gestione sostenibile dell'irrigazione.

Le misure sono state realizzate utilizzando il metodo dell'apparato di *Richards* (o della camera a pressione) (Tuller e Or, 2004)[21].

L'apparato di *Richards* comprende una camera a pressione includente una piastra porosa satura d'acqua, che consente all'acqua stessa, ma non all'aria, di attraversare i pori. La parte bassa della piastra è alla pressione atmosferica, mentre la parte alta della superficie è alla pressione applicata alla camera.

Per la misura, i campioni di suolo, essiccati e setacciati a 2 mm, sono stati sistemati in anelli di ritenzione a contatto con la piastra porosa e saturati per immersione in acqua. La piastra con i campioni di suolo saturati di acqua è stata adagiata nella camera alla quale è stata applicata una pressione di 0.33 bar. Tale pressione ha determinato la fuoriuscita di acqua che è continuata fino a quando è stato raggiunto l'equilibrio tra il potenziale matriciale del suolo e la pressione applicata alla camera. A questo punto, i campioni di suolo sono stati rimossi dall'apparato e pesati (peso, Pw1), quindi rimessi nella camera. Tutta l'operazione è stata ripetuta, applicando questa volta una pressione di 15 bar. Raggiunto l'equilibrio, i campioni sono stati rimossi, pesati (Pw2) ed essiccati a 105°C per poi essere ripesati (Pd). La differenza tra Pw1 e Pd, rapportata a Pd ha fornito il contenuto percentuale (in peso) dell'acqua alla capacità di campo (FC). La differenza tra Pw2 e Pd, rapportata a Pd, ha fornito il contenuto percentuale (in peso) dell'acqua al punto di appassimento (WP). I valori della FC e del WP espressi in peso, sono stati convertiti negli equivalenti valori in volume, moltiplicando gli stessi per la densità apparente (*bulk density*) (Db) di ciascun campione.

[21] Le misure idrologiche, non previste dal disciplinare, sono state realizzate per migliorare il livello delle conoscenze riguardanti i suoli dell'area di studio. Tuttavia, considerati i tempi molto lunghi del procedimento, esse sono state limitate ai soli campioni di *top-soil*.

In aggiunta alle misure dirette di laboratorio, le proprietà idrologiche sono state stimate utilizzando una funzione di *pedontransfer*. Le stessa funzione è stata utilizzata per la predizione della densità apparente[22] (*bulk density*, Db) (essenziale per il calcolo dell'AWC) e della conducibilità idraulica satura[23] (*hydraulic conductivity*, Ks).

Il termine "*pedotransfer function*" (PTF) è generalmente definito come la traslazione di dati grezzi del suolo in altre informazioni (particolarmente) utili (Odeh e McBratney, 2004). Esso può anche essere definito come una funzione predittiva di alcune proprietà del suolo da altre proprietà più facilmente, *routinariamente* ed economicamente misurate.

La predizione delle proprietà idrologiche dei suoli domina la ricerca nel campo delle *pedotransfer functions.* (Wösten, 2006). Sono numerose le proprietà dei suoli utilizzate nello sviluppo delle diverse funzioni di *pedotransfer*. In quasi tutte le PTF è utilizzata la distribuzione dimensionale delle particelle (tessitura). L'approccio più comune è basato sull'uso delle classi sabbia, limo e argilla. Anche la sostanza organica è frequentemente utilizzata come predittore delle proprietà idrologiche.

Ai fini del presente studio, le proprietà idrologiche dei suoli sono state predette utilizzando una PTF basata sul *soil database* HYPRESS (Wösten *et al*., 1999), che stima i parametri idraulici della funzione di van Genuchten (van Genuchten, 1980) a partire dai contenuti di sabbia, limo, argilla e sostanza organica.

Statistica descrittiva

[22] la densità apparente definisce la massa di suolo secco per unità di volume, includente lo spazio occupato dall'aria.

[23] La conducibilità idraulica è un'espressione della rapidità con la quale un liquido, come l'acqua, defluisce attraverso un solido, come il suolo, in risposta ad un determinato gradiente di potenziale. Il flusso di acqua può essere misurato in condizioni di saturazione o di insaturazione idrica del suolo. Nel nostro caso, la conducibilità idraulica è stata valutata in condizioni di saturazione (*saturated hydraulic conductivity*, Ks).

Le variabili idrologiche misurate o predette sono state statisticamente descritte in termini di valori minimi (Min), massimi (Max), medi (Mean) e di coefficiente di variazione (CV). I risultati dell'analisi statistica sono riportati nella tabella 9. La stessa tabella riporta i valori del *t-test* di *Student*, calcolati per valutare, per ciascuna proprietà, la significatività delle differenze tra *top-soil* e *sub-soil*.

TABELLA 9 - Statistica descrittiva delle proprietà idrologiche dei suoli e significatività statistica delle differenze * (*t-student*) tra *top-soil* e *sub-soil.*

Proprietà			Mean	Min	Max	CV%
AWC lab (mm/30 cm)	*Top-soil*		48.11	14.04	108.00	29.72
AWC PTF	*Top-soil*		49.55	10.65	79.23	22.89
(mm/30cm)	*Sub-soil*		52.30	23.32	88.17	21.87
		t-student	*Valore*			*-1.792*
			Significatività			*0.08 (NS)*
Db PTF	*Top-soil*		1.22	0.68	1.60	18.61
(mg/m^3)	*Sub-soil*		1.28	0.68	1.69	17.73
		t-student	*Valore*			*-4.532*
			Significatività			*0.000 (S)*
Ks PTF	*Top-soil*		87.51	33.94	374.94	79.96
(cm/giorno)	*Sub-soil*		66.80	28.09	171.96	45.36
		t-student	*Valore*			*2.411*
			Significatività			*0.022 (S)*

* la significatività delle differenze è riportata per le sole variabili idrologiche calcolate attraverso la funzione di *pedotransfer* (PTF). Non è riportata per i valori di AWC basata su misure di laboratorio (lab), determinate sui soli campioni di *top-soil*.
NS = differenza non significativa tra le medie; S = differenza significativa tra le medie.

I valori di AWC riportati nella tabella 9 sono riferiti allo spessore degli strati di campionamento dei suoli (30 cm). I valori di AWC basati sulle misure di laboratorio (AWC-lab) si riferiscono al solo *top-soil*, essendo stati determinati esclusivamente sui campioni prelevati in corrispondenza di questo strato. Quelli predetti attraverso la funzione di *pedotransfer* (AWC-PTF) si riferiscono, invece, sia al *top-soil* che al *sub-soil*.

L'AWC-lab è risultata mediamente alta[24] e compresa tra valori minimi molto bassi e valori massimi molto alti, con una variabilità moderata. Anche l'AWC-PTF del *top-soil* è risultata mediamente alta e sostanzialmente corrispondente a quella dell'AWC-lab. L'AWC-PTF aumenta con la profondità ma in modo non significativo.

La corrispondenza tra AWC-lab e AWC-PTF è ricollegabile alle significative relazioni tra i valori di FC e WP misurati in laboratorio e quelli stimati attraverso la funzione di *pedo-transfer* (Fig. 16 e 17).

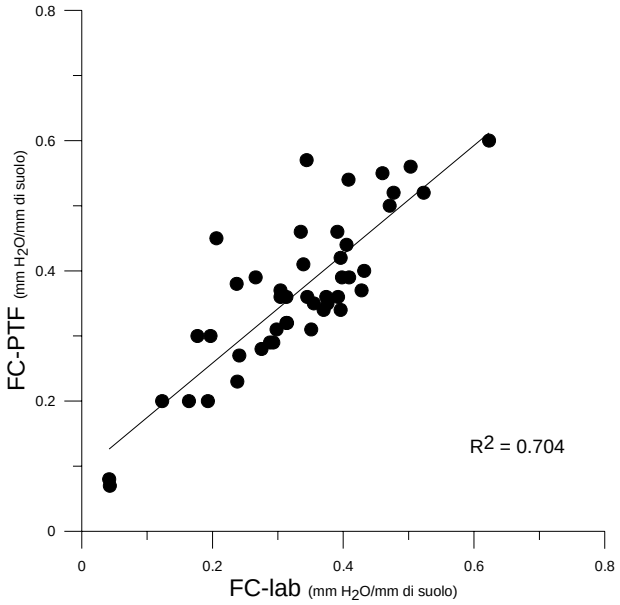


FIG. 16 – Relazione tra contenuto predetto (FC-PTF) e misurato (FC-Lab) di acqua alla capacità di campo.

La densità apparente (Db) è tendenzialmente media (1.22 nel *top-soil* e 1.28 nel *sub-soil*) e variabile tra valori bassi (0.68) e alti (1.60 e 1.69). Il valore della Db aumenta in modo statisticamente significativo con la profondità.

[24] La classificazione dei valori di AWC (lab e ETP) è stata realizzata dopo aver rapportato a 30 cm i valori delle classi riportate in allegato A, riferite ad una profondità di 100 cm.

La conducibilità satura (Ks) è in media alta, con valori minimi di conducibilità moderatamente alta e valori massimi molto alti. La variabilità di questo parametro è alta nel *top-soil* e moderata nel *sub-soil*. La differenza tra le medie dei valori di Ks del *top-soil* (87.51 cm giorno^{-1}) e del *sub-soil* (66.80 cm giorno^{-1}) è statisticamente significativa.

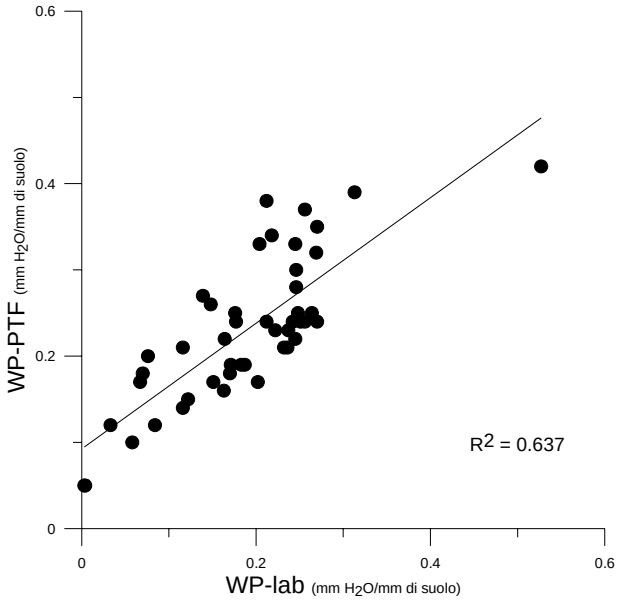


FIG. 17 – Relazione tra contenuto predetto (WP-PTF) e misurato (WP-Lab) di acqua al punto di appassimento.

Le variazioni della Ks riflettono in modo particolare quelle della frazione limosa del suolo, alla quale la Ks è relazionata (Fig. 18). La relazione negativa tra limo e Ks è nota dalla letteratura (Brady, 1989): suoli a tessitura più fine conducono meglio l'acqua di quelli a tessitura più grossolana. Tuttavia, i suoli con più elevati contenuti di limo nella terra fine presentano una più bassa conducibilità idraulica satura rispetto ai suoli con più elevati contenuti di argilla, ciò perché il limo ostruisce i pori piccoli ma anche quelli più larghi, riducendo, in tal modo, il flusso idrico.

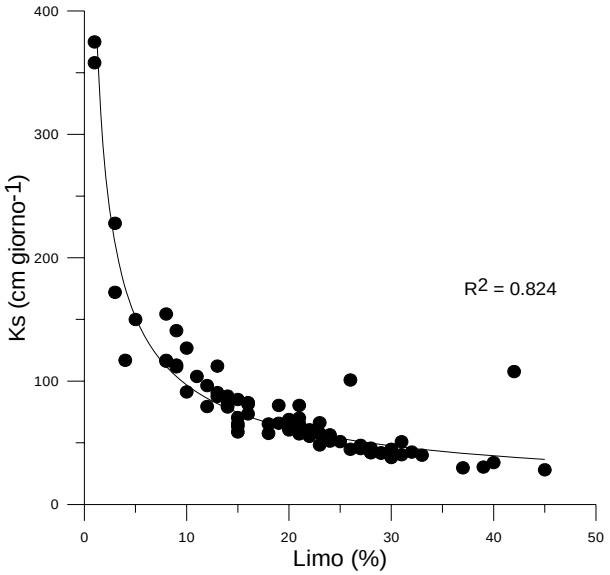


FIG. 18 – Relazione tra conducibilità idraulica (Ks) e contenuto di limo

Distribuzione spaziale (cartografia) delle proprietà idrologiche

I valori AWC derivati da misure di laboratorio (AWC-lab) o predetti attraverso la funzione di pedotransfer (AWC-PTF) sono stati spazializzati (Tav XXVII, e XXVIIIa e XXVIIIb) e la loro distribuzione è stata analizzata in rapporto alle caratteristiche dei sistemi e sotto-sistemi di terra.

L'AWC-lab (Tav XXVII) mostra i valori medi più alti (Tab. 10) nei suoli della depressione retrodunare (L1.1) e dell'Archicaldera (F2.4) e quelli più bassi nei suoli dell'apparato durane (L3.1). In tutte e tre i sottosistemi di terre, la variabilità del contenuto di acqua disponibile è moderata. Nei rimanenti sottosistemi l'AWC-Lab è moderata, aggirandosi intorno ai 40 mm/30 cm di suolo (133 mm/100 cm) e poco variabile (CV < 20%).

L'AWC-PTF del top-soil (Tav. XXVIII) mostra una distribuzione spaziale comparabile con quella dell'AWC-Lab, salvo situazioni particolari, come quella dei suoli vulcanici dell'Archicaldera, in cui i valori dell'AWC-PTF sono mediamente molto più bassi e molto meno variabili (Tab. 10) di quelli dell'AWC-Lab.

TABELLA 10 - Medie e coefficienti di variazione delle proprietà idrologiche per singoli sottosistemi di terre.

Sottosistema		AWC lab (mm/30 cm suolo)		AWC ptf (mm/30 cm suolo)		dB (mg/m^3)		Ks ptf (cm/giorno)	
		Media	CV	Media	CV	Media	CV	Media	CV
F2.4	*Top-soil*	49.92	34.32	36.67	7.39	1.40	6.95	87.68	53.72
	Sub-soil			34.13	16.23	1.48	10.04	71.43	56.92
I2.2	*Top-soil*	40.10	7.43	43.15	6.70	1.14	5.78	73.93	35.51
	Sub-soil			40.92	9.91	1.28	7.74	57.46	29.38
I2.3	*Top-soil*	40.85	19.22	44.56	30.31	1.23	12.29	67.56	31.55
	Sub-soil			43.88	33.10	1.28	13.76	67.34	34.44
I4.1	*Top-soil*	41.63	14.92	44.18	19.62	1.23	13.28	61.68	26.88
	Sub-soil			44.67	27.86	1.30	11.95	53.31	29.99
L1.1	*Top-soil*	46.33	39.21	43.71	44.51	1.06	33.08	106.28	95.02
	Sub-soil			48.84	47.69	1.12	30.80	63.54	40.78
L3.1	*Top-soil*	28.22	43.62	32.28	37.37	1.38	11.37	149.15	81.44
	Sub-soil			32.55	34.98	1.45	10.36	104.53	45.64

Questo risultato non sorprende, essendo nota la difficoltà di stimare valori di AWC con funzioni di *pedotransfer*, soprattutto a causa dell'incertezza nella determinazione accurata della frazione sabbiosa di questi suoli con i metodi convenzionali.

La distribuzione spaziale dell'AWC-PTF del sub-soil segue, sostanzialmente, quella del *top-soil*.

La densità apparente (Db-PTF) (Tav. XXIXa e XXIXb) è alta (Tab. 10) nei suoli vulcanici dell'Archicaldera Flegrea (F2.4) e in quelli dell'apparato dunare (L3.1), soprattutto per effetto dei contenuti più elevati di sabbia e più bassi di argilla e OC che caratterizzano i suoli di questi paesaggi (Tab. 5). Per contro, essa è bassa nei suoli della depressione retrodunare (L1.1), per effetto soprattutto del carbonio organico. La variabilità della dB è prevalentemente bassa, fatta eccezione per i suoli della depressione retrodunare (L1.1), nei quali essa è moderata.

La conducibilità satura (Ks-PTF) (Tav. XXXa e XXXb) è in prevalenza moderatamente alta (Tab. 10), con valori alti (> 86.4 cm giorno^{-1}) nei suoli dell'apparato dunare (L3.1) e nei *top soil* della depressione retrodunare e (L1.1) e del versante esterno dell'Arcicaldera Flegrea (F2.4). La variabilità nei predetti suoli è comunque elevata, più raramente moderata.

Fase 3 - Secondo rilevamento (estate 2010)

I suoli, campionati e analizzati nel corso del primo rilevamento, sono stati raggruppati al fine di identificare un numero di siti rappresentativi in corrispondenza dei quali realizzare lo studio di dettaglio dei profili pedologici.

Identificazione dei siti di rilevamento

Il raggruppamento dei suoli è stato realizzato applicando l'analisi statistica dei *cluster* (*cluster analysis*) agli spettri di riflettanza. Si è preferito utilizzare le misure spettrali, invece che i dati riguardanti le proprietà chimiche e fisiche ottenute da analisi convenzionali di laboratorio, per due motivi: a) la risposta spettrale dei suoli riflette non solo le caratteristiche chimiche e fisiche dei suoli ma anche quelle mineralogiche; b) le misure di riflettanza (come si dirà meglio in seguito) sono più precise, accurate (e stabili) di quelle chimiche e fisiche convenzionali (Naes et al., 2002).

Gli spettri di riflettanza dei suoli possono essere visualmente analizzati e raggruppati sulla base delle loro caratteristiche (es., brillanza, forma, bande di assorbimento) (Valeriano *et al.*, 1995). L'analisi visuale dei dati spettroscopici è tuttavia lunga, soprattutto quando il numero di dati è elevato (come nel nostro caso) e molto soggettiva. Un approccio statistico multivariato può fornire un comodo strumento analitico, riducendo il tempo necessario per l'analisi oggettiva dei dati di relazioni multiple tra parametri spettrali (de Jong, 1992). Ai fini del presente studio è stata utilizzata, come già detto, l'analisi dei *cluster*. Gli spettri sono stati classificati sulla base della distanza euclidea, la misura più comune della distanza nell'analisi tra i *cluster*, utilizzando il procedimento del '*complete linkage*' (Hair *et al.*, 1995, Leone e Sommer, 2000).

Prima dell'analisi, gli spettri sono stati ricampionati a 10 nm. Per ogni sito sono stati considerati contemporaneamente i valori spettrali del *top-soil* e del *sub-soil*.

Il risultato dell'analisi dei *cluster* (Fig. 19) ha costituito la base di riferimento per una preselezione dei siti di rilevamento. La selezione finale è stata realizzata in campo ed è ri-

sultata condizionata da una serie di impedimenti, includenti: a) l'impossibilità di rintracciare i proprietari dei fondi per l'autorizzazione allo scavo del profilo, b) la difficoltà/impossibilità di accesso a alcuni fondi da parte dell'escavatore, c) la presenza di colture in campo, che sarebbero state danneggiate dal movimento dell'escavatore.

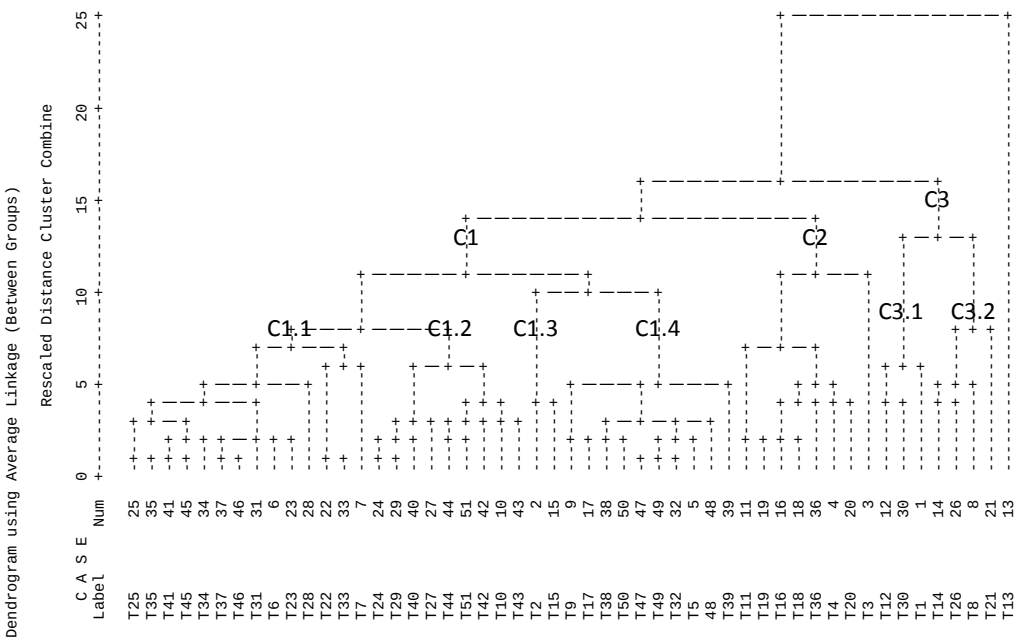


FIG. 19 – Dendrogramma risultante dall'applicazione dell'analisi dei *cluster* agli spettri di riflettanza dei *top-soil* e dei *sub-soil* campionati durante il primo rilevamento. Sono indicati i principali gruppi e sotto-gruppi spettrali.

Alla fine, sono stati selezionati quattro siti (Tav I). In aggiunta è stato considerato un quinto profilo, rilevato (ma non analizzato) in un periodo precedente (settembre 2009). Tutti i cinque siti ricadono all'interno dell'area a rischio di salinizzazione definita dal CRAA-INEA (Fig. 20).

Scavo e rilevamento dei profili

La posizione dei siti di rilevamento è stata identificata in campo con l'ausilio di un GPS e corretta definitivamente sulle ortofoto a grande scala. L'errore di posizionamento con

il GPS è risultato comunque molto basso. I punti georeferiti sono stati acquisiti in formato *shape-file* e plotttati su base cartografica.

In corrispondenza di ciascuno dei quattro siti identificati *ex-novo* è stato aperto un profilo con l'ausilio di un escavatore. Ciascun profilo è stato accuratamente preparato per l'identificazione, la descrizione e il campionamento dei principali orizzonti diagnostici.

I campioni prelevati sono stati essiccati, setacciati ed assoggettati ad analisi chimiche e fisiche convenzionali di laboratorio e a misure spettroradiometriche. Le analisi e le misure sono state realizzate anche sui campioni di suolo del quinto profilo. Tutti i profili considerati sono stati, infine, descritti in accordo con il sistema FAO-WRB (*World Reference Base*, 2006).

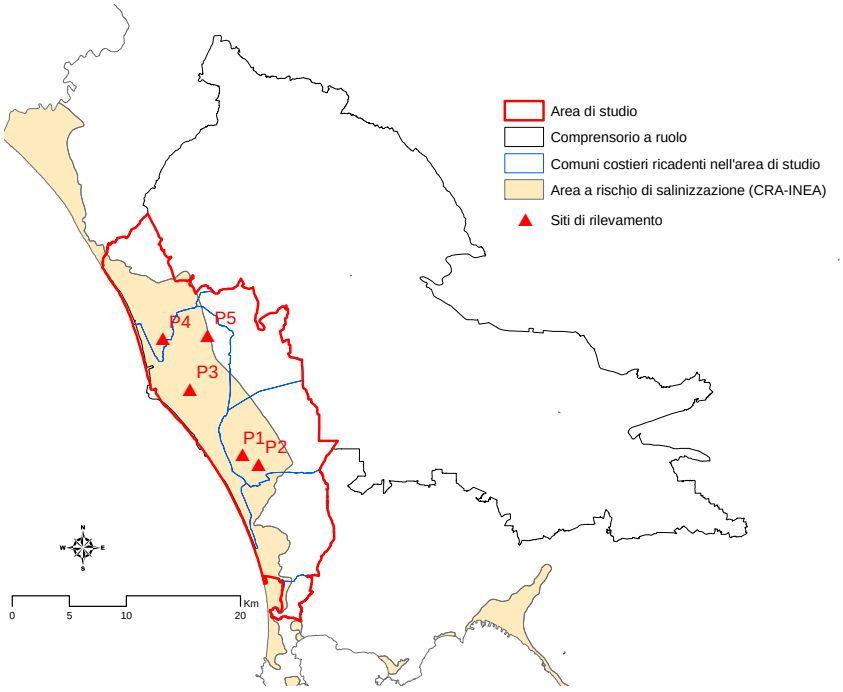


FIG. 20 – Distribuzione dei siti di rilevamento dei profili pedologici nell'area di studio

Descrizione e classificazione dei profili

Profilo P1

Il profilo P1 (Fig. 21), ricadente all'interno della depressione retrodunare della pianura costiera del fiume Volturno, mostra quattro orizzonti con distinte proprietà chimiche, fisiche e cromatiche (Tab. 11) e una falda affiorante alla profondità di circa 130 cm dalla superficie.

Il colore varia dal grigio molto scuro (notazione Munsell 1.24Y 3.02/1.11) dell'orizzonte lavorato più superficiale, al grigio scuro/bruno grigiastro scuro (9.29YR 4.38/1.28) del primo orizzonte sub-superficiale, al grigio molto scuro (8.80 YR 2.66/1,46) del terzo orizzonte, fino al grigio/grigio oliva (4.22Y 4.61/1.11) dell'orizzonte più profondo, sovrastante la falda.

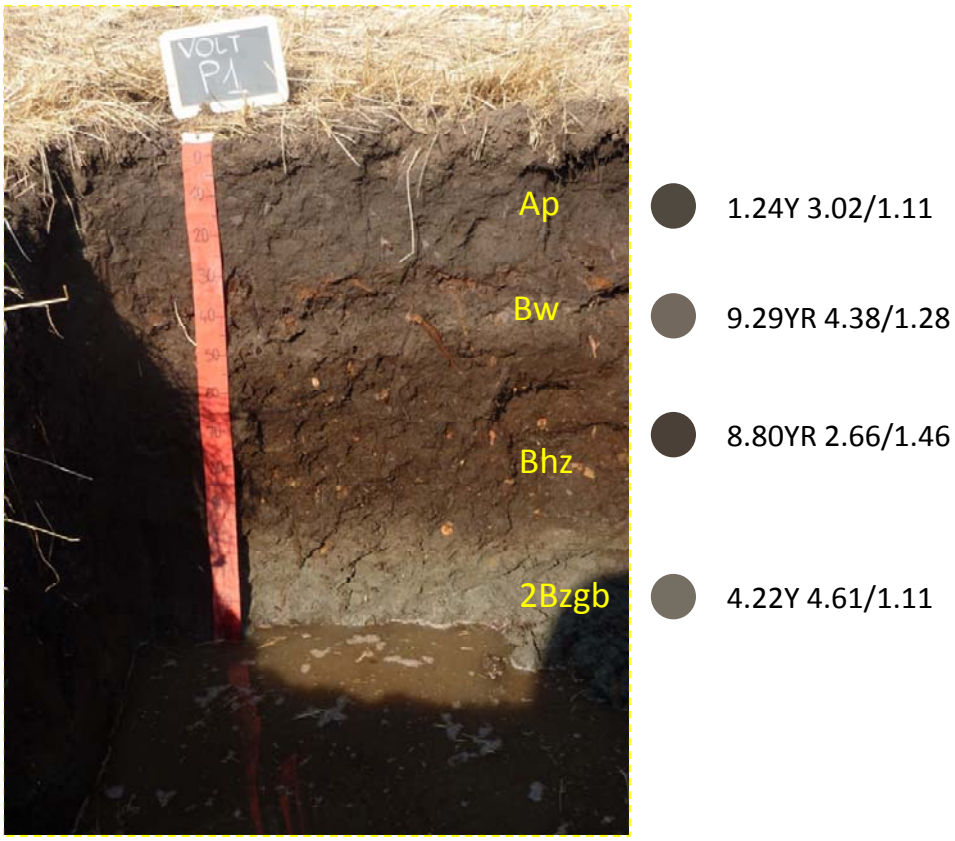


FIG. 21 – Profilo P1. Sono riportate le notazioni Munsell e le composizioni RGB del colore dei diversi orizzonti.

Il colore più scuro del primo e del terzo orizzonte è influenzato dall'elevato contenuto di carbonio organico. Il colore "riduttimorfico"[25] del quarto orizzonte riflette condizioni di prolungata umidità, causata dalla presenza della falda per lunghi periodi dell'anno. Occorre precisare che tutti gli orizzonti (non solo quello più profondo) hanno un Chroma basso (< 2), indicatore della presenza di ferro chimicamente ridotto, per effetto di periodi più o meno prolungati di condizioni anaerobiche (Brady e Weil, 2002).

La tessitura è argillosa nei primi tre orizzonti e franca sabbiosa nell'orizzonte più profondo. Il cambiamento netto dei contenuti di sabbia e argilla dal terzo al quarto orizzonte evidenzia una chiara discontinuità nei materiali da cui i due orizzonti si sono formati.

TABELLA 11 - Proprietà degli orizzonti del profilo P1

Orizzonte	Prof	Colore Munsell			Sabbia	Limo	Argilla	pH	OC
	(cm)	Hue	Value	Chroma	(%)	(%)	(%)		(g kg^{-1})
Ap	0-35	1.24Y	3.02	1.11	41	19	40	7.6	124.02
Bw	35-55	9.29YR	4.38	1.28	39	18	43	7.5	101.87
Bhz	55-90	8.80YR	2.66	1.46	41	15	44	6.0	219.72
2Bzgb	90-130+	4.22Y	4.61	1.11	66	21	13	7.4	5.99

		$CaCO_3$	ECw	ECe	Complesso di scambio ($cmol_c$ kg^{-1})				ESP
		(g kg^{-1})	(dS m^{-1})	(dS m^{-1})	CEC	Na^+	K^+	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	
Ap	0-35	3.75	0.67	5.41	79.84	6.74	0.70	72.4	8.44
Bw	35-55	11.34	2.84	17.04	68.19	0.28	1.04	66.9	0.41
Bhz	55-90	11.32	105.50	633.00	81.32	1.00	1.14	79.2	1.23
2Bzgb	90-130+	7.22	32.50	390.00	18.32	0.38	1.16	18.8	2.10

[25] Il sistema FAO-WRB comprende, tra le proprietà diagnostiche utilizzate per la classificazione dei suoli, il *gleyic colour pattern*. In accordo con tale sistema, i materiali pedologici sviluppano un *gleyic colour pattern* (dal russo *gley*, massa di suolo fangoso) se sono saturati con acqua di falda, salvo che essi non siano drenati, per un periodo che consente che si verifichino condizioni riducenti.... Come criteri diagnostici, un *gleyic colour pattern* mostra una o entrambe le seguenti condizioni:

1. 90 percento o più di colori riduttimorfici, variabili dal bianco neutro al nero (Munsell N1/ a N8/), o dal bluastro al verdastro (Munsell 2.5Y, 5Y, 5G, 5B); oppure
2. 5 percento o più di screziature di colore isomorfico, che comprendono qualsiasi colore, ad esclusione di quelli riduttimorfici"

Il contenuto di carbonio organico (OC) è molto alto nel primo (12.4 %) e nel terzo orizzonte (21.9 %) e, in misura minore, nel secondo orizzonte (11.1%). Tenuto conto contemporaneamente del contenuto di OC e di quello di argilla (40%), il terzo orizzonte è stato classificato *istico*[26].

[26] Il sistema FAO-WRB classifica istico (*histic*, dal greco *histos*, tessuto) un orizzonte superficiale o subsuperficiale costituito da materiale organico scarsamente areato. Come criteri diagnostici, un orizzonte istico consiste di materiale *organico* che:

1. è saturato con acqua per trenta giorni consecutivi o più in molti anni e
2. ha uno spessore di 10 cm o maggiore....

Un materiale *organico* consiste di una grande quantità di residui organici che si accumulano in superficie in condizioni umide o secche e nel quale la componente minerale non influenza significativamente le proprietà del suolo. I criteri diagnostici di un materiale *organico* sono:

1. 20 percento o più di carbonio organico nella terra fine, oppure
2. se saturato con acqua per 30 giorni consecutivi o più in molti anni, una o entrambe delle seguenti proprietà:
    a. (12 + [percentuale di argilla della frazione minerale *0.1]) percento o più di carbonio organico nella terra fine, oppure
    b. 18 percento o più di carbonio organico

Galligani (2000), riporta un semplice diagramma (Fig. 22) per la classificazione di un orizzonte Istico, tenuto conto dei contenuti di CO e argilla.

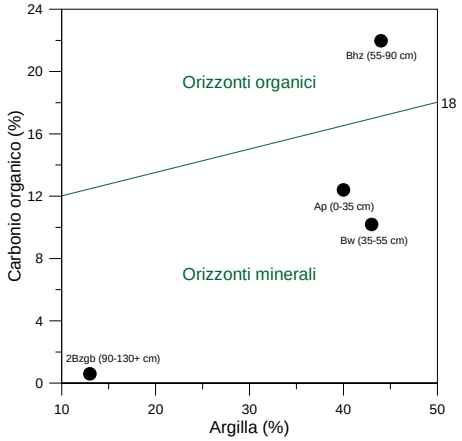


FIG. 22 – Elementi distintivi dei materiali organici e minerali. Rielaborato da Galligani U., 2000. *I suoli organici: gli istosuoli*. In Sanesi G., Elementi di pedologia. Calderini Edagricole , Bologna. Sono riportati i punti corrispondenti ai quattro orizzonti del profilo P1.

Sia che si usino i criteri FAO-WRB sia che si usi il diagramma di Fig. 22, il terzo orizzonte del profilo P1 è classificato Istico.

L'orizzonte superficiale è "non calcareo", quello profondo è scarsamente calcareo, gli orizzonti intermedi sono, invece, debolmente calcarei. I contenuti di carbonati (espressi come $CaCO_3$) e di OC (soprattutto) sono correlati in modo negativo e positivo, rispettivamente, al pH. Inoltre, il contenuto di OC è positivamente correlato alla CEC.

Particolarmente rilevante, per le finalità del presente studio, è l'analisi della variazione lungo il profilo dei valori di ECe. Negli orizzonti sub-superficiali, essi raggiungono livelli tali da consentire la loro classificazione come orizzonti "salici"[27]. Con la disidratazione del suolo, i sali solubili presenti in questi orizzonti precipitano in quantità rilevanti, formando evidenti "efflorescenze" saline (Fig. 23).

FIG. 23 – Efflorescenza salina su *ped* essiccato dell'orizzonte Bhz del profilo P1

Alla luce di quanto sopra detto e delle osservazioni dirette di campo, gli orizzonti del profilo P1 sono stati classificati (dall'alto verso il basso) come Ap, Bw, Bhz e 2Bzgb[28].

[27] in accordo con il FAO-WRB, un orizzonte salico (*salic*, dal latino *sal*, sale) è un orizzonte superficiale o sub-superficiale poco profondo che contiene un arricchimento secondario di sali prontamente solubili .... I criteri diagnostici prevedono che "un orizzonte salico abbia:

1. ... una conducibilità elettrica dell'estratto saturo (ECe) di 15 dS m^{-1} o maggiore ..., e
2. ... un prodotto del (suo) spessore (in cm) per la ECe (in dS m^{-1}) di 450 o maggiore, e
3. uno spessore di 15 cm o maggiore.

[28] Le lettere maiuscole A e B indicano due orizzonti principali (*master horizons*) superficiale e sub-superficiale. Le lettere minuscole indicano caratteristiche subordinate all'interno degli orizzonti principali. In particolare, le lettere "p", "h", "z", "b" e "w" designano, rispettivamente, un orizzonte: lavorato, istico,

Nell'orizzonte Bhz e, in misura minore negli altri orizzonti, è apparsa evidente la presenza di materiali organici costituiti da tessuti riconoscibili di piante (*sapric materials*). Di conseguenza, il suolo è stato classificato come *Sapric Histosol* (*Thapto*[29]*-Salic Gleyic*).

Profilo P2

Il profilo P2 (Fig. 24), anch'esso ricadente all'interno della depressione retrodunare, è caratterizzato dalla sequenza di cinque orizzonti, le cui proprietà sono riportate nella tabella 12.

La tessitura è franca nel primo orizzonte e franca sabiosa nei rimanenti quattro orizzonti. È interessante osservare che, nonostante il contenuto di argilla sia sempre molto basso, negli ultimi tre orizzonti esso aumenta leggermente con la profondità. Tale aumento è associato ad un incremento molto evidente della profondità della banda della smectite (a 1905 nm) (Fig. 25) e di quella della caolinite e degli altri minerali argillosi (a 2201 nm). È quindi ragionevole ipotizzare un processo di eluviazione dei minerali argillosi influenzato dai contenuti elevati di Na^+ scambiabile.

Il contenuto di carbonio organico è alto/molto alto nel primo e nel terzo orizzonte; è basso o molto basso nei rimanenti orizzonti. Il valore alto nel terzo orizzonte, combinato con le altre osservazioni di campo, ha portato a diagnosticare la presenza di un orizzonte A di un suolo sepolto. Il contenuto di carbonati è debole nell'orizzonte superficiale e diminuisce ulteriormente con la profondità.

La reazione (pH) è debolmente alcalina in tutti gli orizzonti ad eccezione del secondo orizzonte, dove è moderatamente alcalina. La CEC è sempre alta. La conducibilità elettrica in estratto saturo (ECe) supera la soglia critica per le colture sensibili (2 dS m^{-1}) nei

salico, sepolto (*buried*), cambico. La lettera "g" denota un orizzonte "gleyizzato" (*Gleyed*). Normalmente il suffisso "h" non è utilizzato con i suffissi "z" e "g", a meno che (come nel nostro caso) ciò non sia necessario per scopi chiarificatori. Il numero prefisso 2 indica discontinuità tra gli orizzonti.

[29] Gli strati sepolti possono essere indicati con lo "specificatore" "*Thapto-*", il quale può essere utilizzato con qualsiasi altro "qualificatore" (es. *Thapto-salic gleyc*", indica uno strato sepolto "salico" e "*gleyzzato*")

tre orizzonti più profondi. Come già accennato, la percentuale di sodio scambiabile (ESP) è elevata e cresce costantemente con la profondità. L'ESP supera il valore 15 nei due orizzonti più bassi.

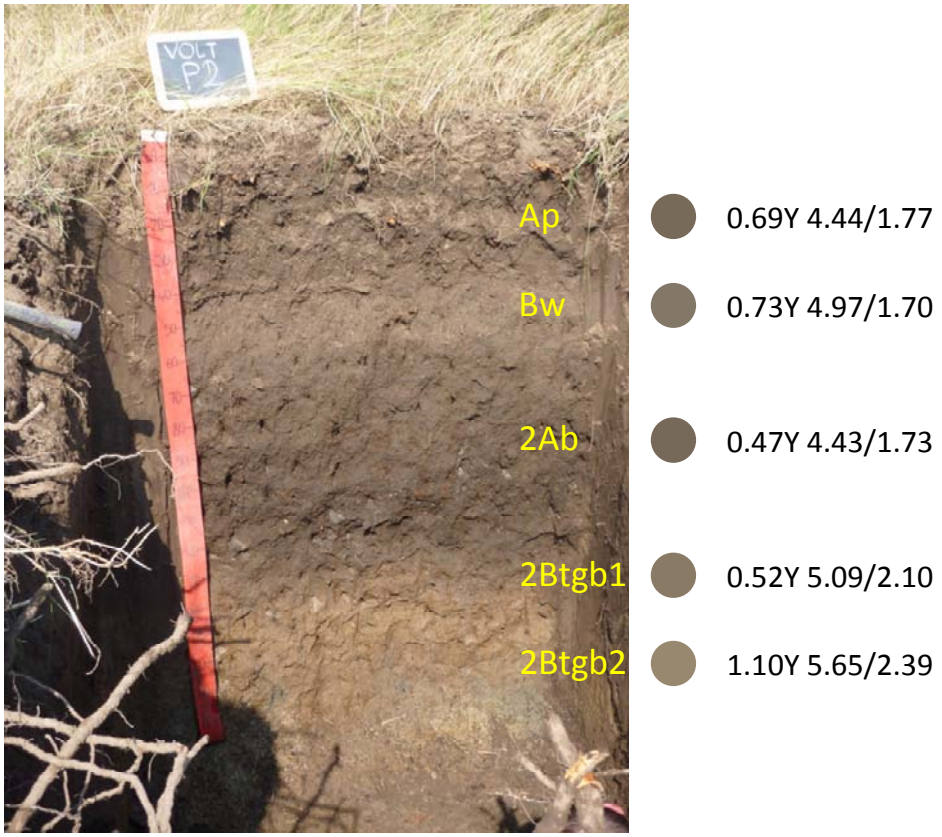


FIG. 24 – Profilo P2. Sono riportate le notazioni Munsell e le composizioni RGB del colore dei diversi orizzonti

Tenuto conto di quanto sopra detto e delle osservazioni dirette di campo, gli orizzonti del profilo P2 sono classificati come Ap, Bw, 2Ab, 2Btgb1, 2Btgb2. Di conseguenza, il suolo è stato classificato come *Haplic Cambisol* (*Thapto-Sodic Gleyic*)[30].

[30] Un *Cambisol* è un suolo moderatamente sviluppato, con almeno un'incipiente formazione di un orizzonte di sub-superficie. Il prefisso *Haplic* indica che si tratta dell'espressione tipica del gruppo di riferimento (*Cambisol*, in questo caso). I termini *tapto* e *gleyic* sono stati già spiegati in precedenza. La lettera "t" indica eluviazione di argilla. Il qualificatore *Sodic* indica che l'orizzonte ha una percentuale di sodio scambiabile del 15 percento o maggiore. Il valore di ESP > 15 e l'eluviazione di argilla rappresentano

TABELLA 12 - Proprietà degli orizzonti del profilo P2

Orizzonte	Prof (cm)	Colore Munsell			Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	pH	OC (g kg^{-1})
		Hue	Value	Chroma					
Ap	0-40	0.69Y	4.44	1.77	50	29	21	7.7	26.65
Bw	40-75/80	0.73Y	4.97	1.70	70	21	9	8.0	6.43
2Ab	75/80-130	0.47Y	4.43	1.73	69	26	5	7.5	17.02
2Btgb1	130-145	0.52Y	5.09	2.10	63	29	8	7.6	7.69
2Btgb2	145-180+	1.10Y	5.65	2.39	69	20	11	7.6	2.13

		$CaCO_3$ (g kg^{-1})	ECw (dS m^{-1})	ECe (dS m^{-1})	Complesso di scambio (cmol$_c$ kg^{-1})				ESP
					CEC	Na^+	K^+	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	
Ap	0-40	15.13	0.10	1.01	38.40	2.29	0.4	35.7	5.96
Bw	40-75/80	7.03	0.13	1.94	35.42	2.79	0.5	32.2	7.87
2Ab	75/80-130	7.29	0.17	2.55	53.38	4.96	0.6	47.9	9.30
2Btgb1	130-145	3.48	0.16	2.40	46.44	7.49	0.7	38.2	16.12
2Btgb2	145-180+	3.50	0.15	2.28	30.37	5.82	0.6	23.9	19.15

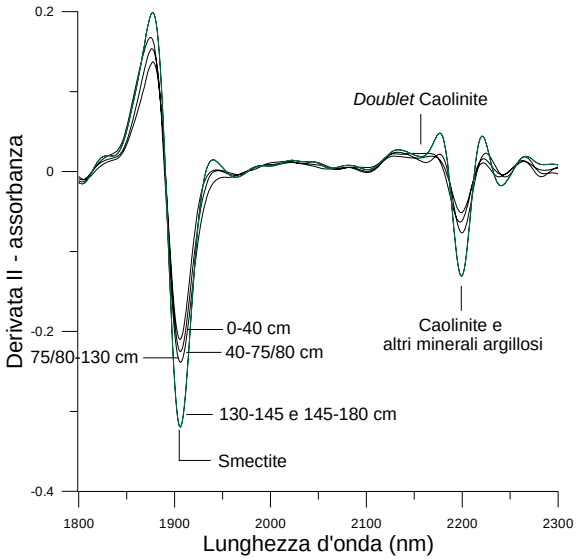


FIG. 25 – Derivata seconda degli spettri di assorbanza degli orizzonti del profilo P2

condizioni essenziali, ma non sufficienti per la definizione di orizzonti natrici (dall'arabo *bnaroon*, sale). Altri elementi sono necessari a tal fine, soprattutto lo sviluppo di una caratteristica struttura colonnare o prismatica grossolana, arrotondata e biancastra al top, che però non è stata osservata in campo (evidentemente anche per i bassissimi contenuti di argilla totale). Per questa ragione, i due orizzonti più profondi non sono stati classificati natrici.

Nel suolo P2, come negli altri suoli (profili e trivellate) indagati, non è da escludere la presenza di proprietà vitriche (*vitric*, dal latino *vitrum*, vetro), legate a materiale vetroso vulcanico o altri minerali vulcanici primari. La classificazione di questo suolo e degli altri suoli potrebbe pertanto richiedere nuovi approfondimenti.

Profilo P3

Il profilo P3 (Fig. 26) ricade in un'area relativamente depressa della pianura alluvionale del fiume Volturno a contatto con l'apparato dunare. Il rilevamento di campagna ha consentito di differenziare sei orizzonti le cui proprietà sono riportate nella tabella 13 e la presenza di una falda affiorante a circa 200 cm dalla superficie del suolo.

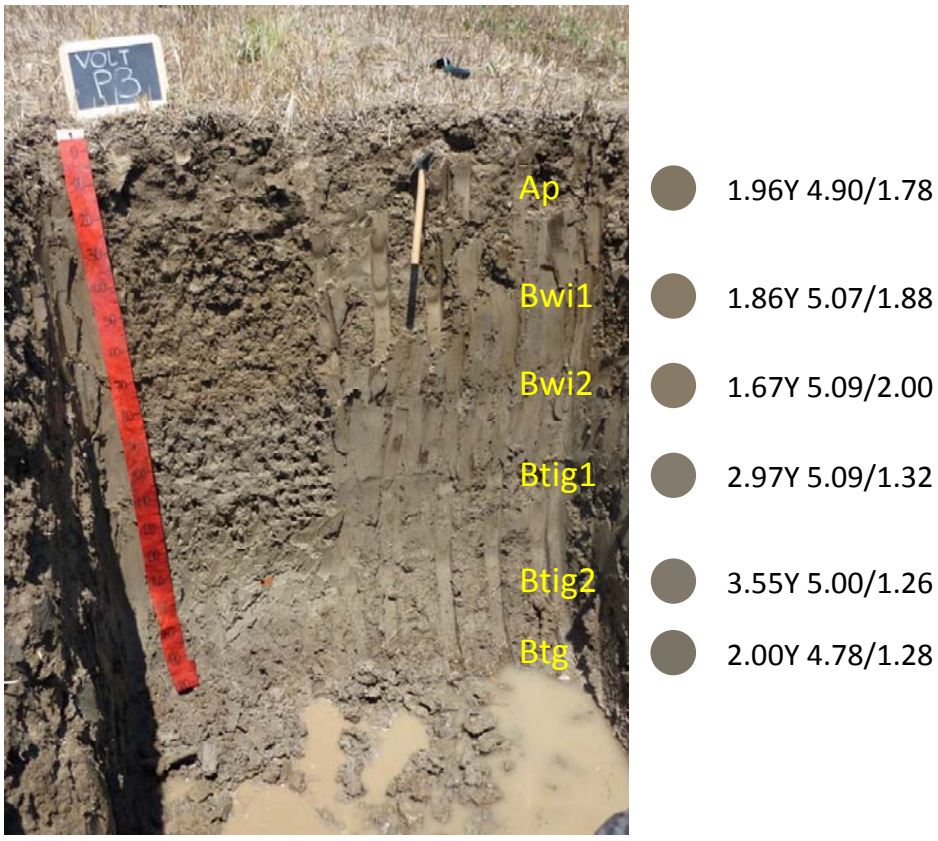


FIG. 26 – Profilo P3. Sono riportate le notazioni Munsell e le composizioni RGB del colore dei diversi orizzonti.

TABELLA 13 - Proprietà degli orizzonti del profilo P3

Orizzonte	Prof (cm)	Colore Munsell			Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	pH	OC (g kg^{-1})
		Hue	Value	Chroma					
Ap	0-25	1.96Y	4.90	1.78	16	32	52	8.9	15.17
Bwi1	25-65	1.86Y	5.07	1.88	23	24	53	8.7	12.29
Bwi2	65-80	1.67Y	5.09	2.00	12	30	58	8.6	9.21
Btig1	80-130	2.97Y	5.05	1.32	15	18	67	8.5	10.13
Btig2	130-155	3.55Y	5.00	1.26	25	8	67	8.8	4.78
Btg	155-200+	2.00Y	4.78	1.28	53	5	42	8.6	3.10

		$CaCO_3$ (g kg^{-1})	ECw (dS m^{-1})	ECe (dS m^{-1})	Complesso di scambio (cmol$_c$ kg^{-1})				ESP
					CEC	Na^+	K^+	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	
Ap	0-25	115.06	0.22	1.34	38.58	4.50	0.9	33.1	11.67
Bwi1	25-65	108.04	0.32	1.93	39.13	7.29	0.7	31.1	18.64
Bwi2	65-80	73.00	0.43	2.59	35.17	8.92	0.4	25.8	25.37
Btig1	80-130	56.18	0.57	3.42	42.09	8.00	0.5	33.6	19.00
Btig2	130-155	49.29	0.58	3.47	39.64	7.25	1.1	31.3	18.29
Btg	155-200+	39.20	0.44	2.64	26.03	7.55	0.9	20.5	26.03

La tessitura è argillosa, salvo nell'orizzonte più basso dove è argillosa sabbiosa[31]. Nei primi cinque orizzonti il contenuto di argilla aumenta progressivamente con la profondità. I due orizzonti compresi tra 80 e 155 cm presentano contenuti più elevati di minerali argillosi, soprattutto di smectiti, rispetto agli orizzonti sovrastanti (Fig. 27). L'aumento di minerali argillosi è attribuibile ai processi di eluviazione favoriti dagli elevati contenuti di Na^+ sul complesso di scambio[32]. Il valore della banda della smectite è relativamente alto anche nell'orizzonte più profondo, nonostante i contenuti più bassi di particelle argillose.

[31] Secondo il FAO-WRB, le stratificazioni comuni nei suoli formati da un *alluvium* non sono designate come discontinuità. Per questa ragione, le differenze nei contenuti di sabbia, limo e argilla tra il quinto ed il sesto orizzonte non sono state considerate come discontinuità.

[32] In accordo con Breemen e Buurman (1998), i minerali a grana fine, come la smectite, sono più mobili rispetto a quelli a grana più grossolana, come la caolinite. Inoltre, la smectite è il minerale argilloso più propenso (all'espansione e) alla dispersione, mentre la caolinite è sicuramente quello meno propenso a tale processo.

L'elevato contenuto di argilla e la dominanza di smectiti hanno determinano la formazione di *slikenside*[33], osservate in campo lungo gran parte del profilo.

Il contenuto di carbonio organico diminuisce progressivamente con la profondità: è relativamente alto nei primi due orizzonti, basso nel terzo e quarto orizzonte, molto basso nei due orizzonti più profondi. Per contro, il contenuto di carbonati aumenta progressivamente dal basso verso l'alto del profilo, probabilmente a causa del trasporto di bicarbonati solubili nell'acqua capillare e della loro successiva deposizione come carbonati insolubili in seguito alla perdita di acqua per evapotraspirazione. In accordo con gli elevati valori di carbonati, la reazione (pH) è sempre fortemente alcalina.

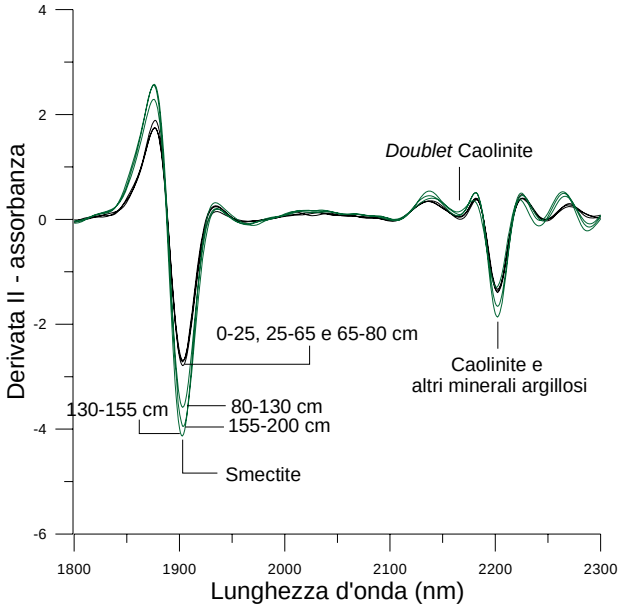


FIG. 27 – Derivata seconda degli spettri di assorbanza degli orizzonti del profilo P3.

La conducibilità elettrica dell'estratto saturo (ECe) è sempre al disotto della soglia di 4 dS m^{-1}; tuttavia, essa supera i 2 dS m^{-1} (soglia di allerta per le piante più sensibili) nei

[33] Le *slikensides* (indicate con la lettera "i") sono facce di scivolamento, lisce e striate, prodotte dal movimento di una massa di suolo su un altro. Superfici analoghe possono essere prodotte anche da pressioni interne al suolo e sono dette "facce di pressione". Le *slikensides* sono frequenti nei suoli vertici, caratterizzati da abbondanti contenuti di smectiti, assai dilatabili allo stato umido.

quattro orizzonti più profondi, avvicinandosi a 4 dS m^{-1} nel quarto e nel quinto orizzonte. La CEC è alta in tutti gli orizzonti. La percentuale di sodio scambiabile (ESP) è sempre > 15, fatta eccezione per il primo orizzonte dove, comunque, si attesta su un valore piuttosto alto (11.67).

Le caratteristiche descritte in campo e analizzate in laboratorio portano alla seguente successione di orizzonti diagnostici: Ap, Bwi1, Bw2, Btig1 Btig2, Btg. Di conseguenza, il suolo è stato classificato come *Gleyic Sodic Vertisol* (*Calcaric)*[34]

Profilo P4

Il profilo P4 (Fig. 28) ricade all'interno dell'apparato dunare, a contatto con un'area relativamente depressa e un'area bordiera della pianura alluvionale del fiume Volturno. In campo sono stati identificati cinque orizzonti diagnostici, le cui proprietà chimiche, fisiche e colorimetriche sono riportate nella tabella 14 ed una falda affiorante ad una profondità di circa 125 cm dalla superficie del suolo.

Il colore varia dal bruno grigiastro dei primi tre orizzonti (notazione Munsell 1.90Y 4.98/1.89, 2.17Y 5.25/1.93 e 2.19Y 5.13/1.80, rispettivamente), al grigio scuro del quarto orizzonte (2.55Y 4,49/1.03), al grigio (2.59Y 5.83/1.21) dell'orizzonte più profondo. I valori dello Hue (<2.5) e del Chroma (<2.0) dei due orizzonti più profondi consentono di diagnosticare condizioni riducenti, legate alla permanenza della falda per periodi prolungati.

---

[34] In accordo con il FAO-WRB, il profilo P3 è stato classificato nel gruppo di riferimento (Reference group) dei Vertisuoli (*Vertisosl*, dal latino *vertere*, rivoltare) in quanto presenta:

1. (almeno) un orizzonte vertico nei 100 cm di suolo più superficiali; e
2. 30 percento o più di argilla tra la superficie del suolo e l'orizzonte *vertico*

un orizzonte vertico contiene 30 percento o più di argilla; ha aggregati strutturali cuneiformi con un asse lungitudinale inclinato da 10° a 60° rispetto al piano orizzontale, *slikensides* e uno spessore di almeno 25 cm.

il suffisso "*calcaric*" è stato utilizzato in quanto il profilo P3 presenta materaile calcareo > al 2% in tutti gli orizzonti.

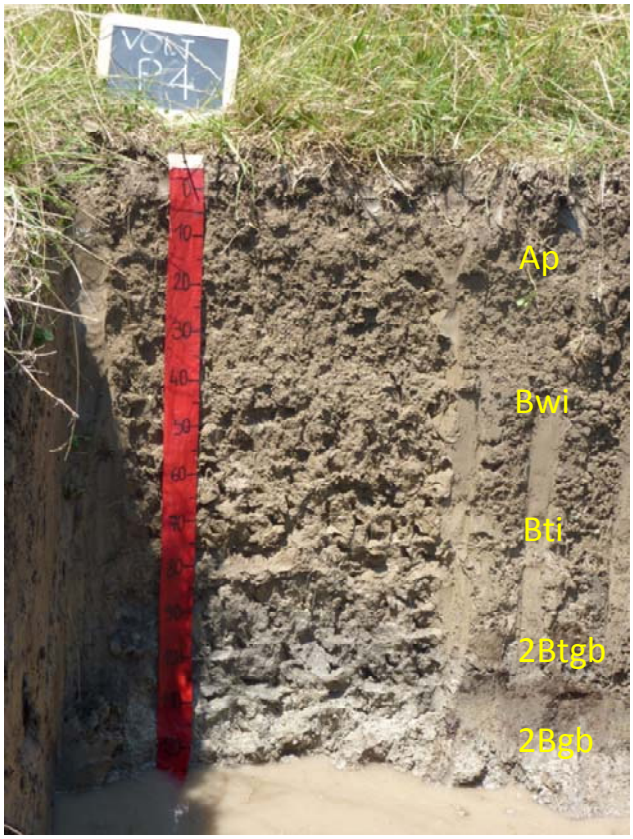


FIG. 28 – Profilo P4. Sono riportate le notazioni Munsell e le composizioni RGB del colore dei diversi orizzonti.

La tessitura è argillosa nei primi quattro orizzonti e franca sabbiosa argillosa nel quinto orizzonte. Dall'analisi della tabella 14 è evidente una chiara discontinuità nel contenuto di sabbia tra i tre orizzonti più superficiali e i due più profondi.

Durante il rilevamento di campo, nel secondo e terzo orizzonte, particolarmente ricchi di argilla, è stata osservata la presenza diffusa di *slikensides*.

Le variazioni del contenuto di argilla e dell'ampiezza della banda di assorbimento della smectite (Fig. 29) rivelano processi di eluviazione ricollegabili ai contenuti più o meno elevati di Na^+ scambiabile.

TABELLA 14 - Proprietà degli orizzonti del profilo P4

Orizzonte	Prof (cm)	Colore Munsell			Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	pH	OC (g kg^{-1})
		Hue	Value	Chroma					
Ap	0-30	1.90	4.98	1.89	23	32	45	8.4	14.09
Bwi	30-55	2.17	5.25	1.93	17	31	52	8.5	11.66
Bti	55-85	2.19	5.13	1.80	6	26	68	8.7	11.49
2Btgb	85-110	2.55	4.49	1.03	42	10	48	8.4	12.52
2Bgb	110-125+	2.59	5.83	1.21	65	12	23	8.6	3.71

		$CaCO_3$ (g kg^{-1})	ECw (dS m^{-1})	ECe (dS m^{-1})	Complesso di scambio (cmol$_c$ kg^{-1})				ESP
					CEC	Na^+	K^+	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	
Ap	0-30	130.02	0.15	0.87	34.45	0.67	2.2	31.5	1.96
Bwi	30-55	56.34	0.17	1.04	35.33	2.48	0.4	32.4	7.01
Bti	55-85	86.50	0.43	2.60	38.07	8.20	0.8	29.1	21.54
2Btgb	85-110	40.85	0.93	5.56	39.21	0.24	0.7	38.2	0.62
2Bgb	110-125+	111.41	0.60	6.00	29.31	0.03	1.1	28.1	0.11

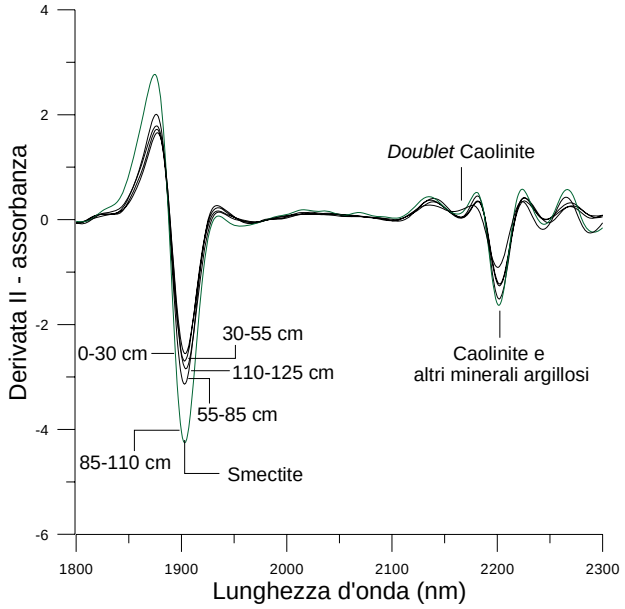


FIG. 29 – Derivata seconda degli spettri di assorbanza degli orizzonti del profilo P4.

La reazione (pH) è sempre fortemente alcalina, per effetto degli elevati contenuti di carbonati. Il primo, il secondo e il quarto orizzonte sono ben forniti di carbonio organico; la

dotazione di questo costituente è leggermente più bassa nel terzo orizzonte e molto bassa nell'ultimo orizzonte.

La conducibilità elettrica in estratto saturo (ECe) supera abbondantemente di 4 dS m^{-1} nei due orizzonti più profondi; supera invece la soglia di tolleranza delle piante sensibili (2 dS m^{-1}) nel terzo orizzonte. La CEC è sempre alta. La percentuale di sodio scambiabile, relativamente alta nel secondo orizzonte, è > 15 nel terzo orizzonte.

Tenuto conto delle osservazioni di campo e delle analisi di laboratorio, gli orizzonti del profilo P4 sono stati classificati come Ap, Bwi, Bti, 2Btgb, 2Bgb. Di conseguenza il suolo è stato classificato come *Endo-Sodic Vertisol* (*Calcaric*) (*Thapto- Hyposalic Gleyic*).

Profilo P5

Il profilo P5 (Fig. 30) ricade in un'area bordiera della pianura alluvionale del fiume Volturno, al margine con un'area relativamente depressa. Presenta cinque orizzonti diagnostici, le cui proprietà sono riportate nella tabella 15.

Il colore è grigio brunastro nei primi due orizzonti (notazione Munsell 1.72Y 5.00/1.94 e 2.00Y 5.00/1.87, rispettivamente). Il valore Chroma (< 2.00) indica, come detto in precedenza, la presenza di ferro chimicamente ridotto, per effetto di periodi più o meno prolungati di condizioni anaerobiche (Brady e Weil, 2002). Tuttavia, esso non consente di classificare una tipica colorazione riduttimorfica che, in accordo con il FAO-WRB, richiede un valore dello Hue > 2.5Y. Anche il colore del quarto e del quinto orizzonte è bruno grigiastro (1.90Y 5.44/2.29 e 1.87Y 5.36/2.46); il colore del terzo e del sesto orizzonte è invece bruno grigiastro/bruno oliva chiaro (1.65Y 5.42 e 1.63Y 5.47/2.80).

Durante il rilevamento di campo, al disotto dei 50 cm, sono state rinvenute screziature (*mottles*) evidenti in quantità variabili tra il 5 ed il 15%, indicatrici di alternanza di processi di ossidazione e riduzione legati alle variazioni del livello di falda.

Il Value Munsell risente del contenuto di carbonio organico: molto basso nei quattro orizzonti più profondi, basso nell'orizzonte sub-superficiale, moderato nell'orizzonte superficiale lavorato.

La tessitura è franca argillosa nel primo, nel secondo e nel quarto orizzonte, è franca sabbiosa nel terzo orizzonte e franca sabbiosa argillosa nei due orizzonti più profondi.

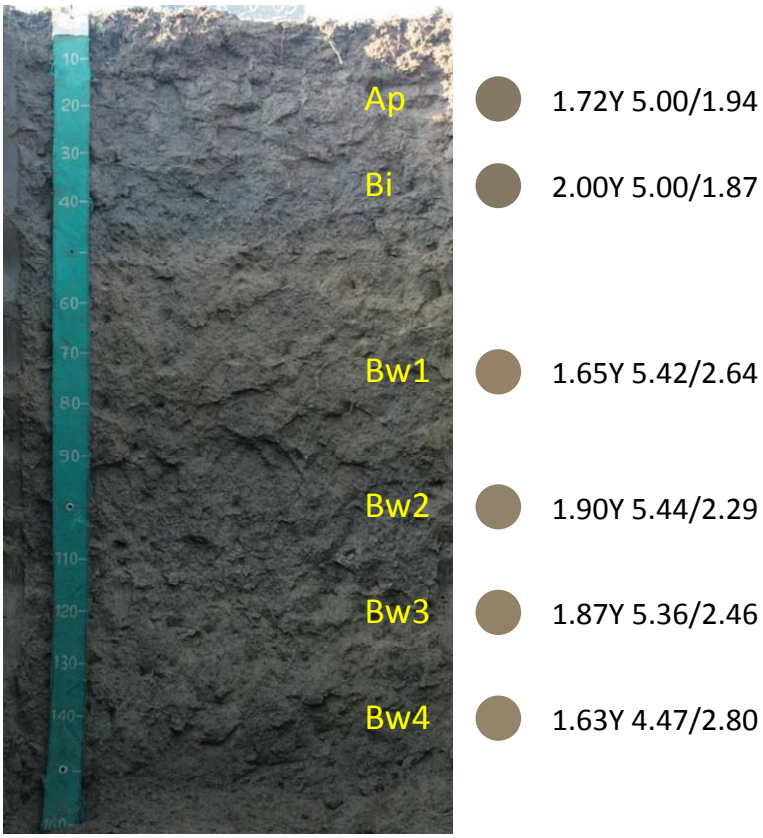


FIG. 30 – Profilo P5. Sono riportate le notazioni Munsell e le composizioni RGB del colore dei diversi orizzonti.

Durante il rilevamento di campo, nei due orizzonti superficiali, più ricchi di argilla, sono state rinvenute facce di pressione tra gli aggregati, nello spessore di suolo compreso tra 12 e 50 cm[35].

Il contenuto di carbonati ($CaCO_3$) è moderato nei due orizzonti di superficie, molto alto nei rimanenti orizzonti. La reazione varia da neutra (nei due orizzonti superficiali) a de-

[35] I contenuti di argilla > 30% e presenza di facce di pressione sono criteri diagnostici per la definizione di proprietà vertiche (*vertic properties*).

bolmente alcalina (nel terzo e quarto orizzonte), a moderatamente alcalina (nei due orizzonti più profondi). Il pH è significativamente correlato al contenuto di carbonati.

TABELLA 15 - Proprietà degli orizzonti del profilo P5

Orizzonte	Prof (cm)	Colore Munsell			Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	pH	OC (g kg^{-1})
		Hue	Value	Chroma					
Ap	0-30	1.72	5.00	1.94	41	27	32	6.9	15.37
Bwi	30-50	2.00	5.00	1.87	43	26	31	7.1	10.20
Bw1	50-90	1.65	5.42	2.64	65	13	22	7.5	4.37
Bw2	90-110	1.90	5.44	2.29	32	34	34	7.5	4.17
Bw3	110-130	1.87	5.36	2.46	63	14	23	7.9	2.18
Bw4	130-160+	1.63	5.47	2.80	65	15	20	7.9	1.71

		$CaCO_3$ (g kg^{-1})	ECw (dS m^{-1})	ECe (dS m^{-1})	Complesso di scambio (cmol$_c$ kg^{-1})				ESP
					CEC	Na^+	K^+	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$	
Ap	0-30	70.49	0.17	1.57	26.60	0.04	0.19	26.38	0.15
Bi	30-50	75.33	0.09	0.81	20.48	0.04	0.05	20.48	0.20
Bw1	50-90	171.39	0.08	0.78	13.79	0.04	0.07	13.79	0.29
Bw2	90-110	155.31	0.12	1.04	20.17	0.37	0.56	20.17	1.82
Bw3	110-130	177.06	0.10	0.98	8.37	0.32	0.69	8.37	3.86
Bw4	130-160+	168.75	0.10	1.02	8.38	0.22	0.58	8.38	2.65

La CEC è alta a moderatamente alta nei due orizzonti superficiali e nel quarto orizzonte, moderatamente bassa nel terzo orizzonte e bassa negli orizzonti più profondi. Le variazioni della CEC sono significativamente correlate a quelle del carbonio organico.

I valori di ECe di ESP sono normali.

Tenuto conto dei rilievi di campo e delle analisi di laboratorio, gli orizzonti del profilo P5 sono classificati come Ap, Bwi, Bw1÷Bw4 ed il suolo come *Vertic Endogleyic Cambisol* (*Calcaric*).

Fase 4 - Spettrometria V-NIR applicata alla predizione delle proprietà dei suoli.

Nel presente studio la spettrometria della riflettanza (*reflectance spectrometry*, RS) nel dominio visibile-infrarosso vicino (*visible-near infrared*, V-NIR) oltre che per il calcolo del colore Munsell e per l'analisi mineralogica qualitativa (di cui si è parlato in precedenza), è stata utilizzata per la calibrazione multivariata di modelli di predizione delle proprietà dei suoli (**chemiometria** o, più specificamente, **pedometria**).

Background

La spettrometria V-NIR è una tecnica non distruttiva per la caratterizzazione di materiali basata sull'interazione della luce visibile-infrarossa vicina con la materia (Shephered e Walsh, 2006). Questa tecnica è oggi utilizzata "routinariamente" per l'analisi rapida di un'ampia gamma di materiali in molti laboratori e processi di controllo in agricoltura, agro-industria, geologia e biomedicina. Negli ultimi decenni, una crescente attenzione è stata rivolta allo studio della RS per la predizione delle proprietà dei suoli (es., Scheinost *et al.*, 1998; Kooistra *et al*., 2003; Viscarra Rossel *et al*., 2006a e b; Shepherd e Walsh, 2006; Leone *et al*., 2008; Calabrò *et al*., 2010).

Basi fisiche

I campioni di suolo sono illuminati con una sorgente di luce artificiale e la luce riflessa dal campione è raccolta e canalizzata attraverso cavi di fibra ottica verso un *detector* di luce. Il *detector* misura la quantità di luce ricevuta in bande strette di lunghezza d'onda come segnale elettrico. Il segnale elettrico in ciascuna lunghezza d'onda è espresso in relazione a quello di uno *standard* di riferimento. L'insieme delle riflettanze relative in ciascuna lunghezza d'onda definisce lo spettro di riflettanza di un campione (es., Fig. 12).

La forma dello spettro dipende dall'insieme dei gruppi strutturali di atomi che assorbono la luce visibile e infrarossa-vicina. I gruppi di atomi sono a loro volta correlati ai principali componenti chimici e fisici del suolo. Quando la luce interagisce con il campione, essa è assorbita in differenti proporzioni in ciascuna lunghezza d'onda, a causa di transizioni elettroniche e processi vibrazionali (*stretching* e *bending*) dei gruppi strutturali degli atomi che formano le molecole e i cristalli. *Features* fondamentali negli spettri di riflettanza si verificano a livelli di energia che consentono alle molecole di innalzarsi a stati vibrazionali più alti. Per esempio, le *features* fondamentali correlate a vari componenti della sostanza organica (es., *stretching* simmetrico C-H) si verificano generalmente nell'infrarosso medio e termico (2.5-25 μm), ma i loro ipertoni (a metà, un terzo, un quarto ecc., della lunghezza d'onda della *feature* fondamentale) si trovano nell'infrarosso vicino (700 - 2500 nm). I minerali del suolo quali i differenti tipi di argille hanno firme spettrali molto distinte nell'infrarosso vicino a causa del forte assorbimento degli ipertoni SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, OH^-, e combinazioni di *features* fondamentali di H_2O e CO_3^{2-} (Clark, 1999). Assorbimenti dovuti a trasferimento di carica e effetti del campo cristallino nel Fe^{2+} e Fe^{3+} sono particolarmente evidenti nell'intervallo 350-1000 nm (Clark, 1999). Poiché gli spettri del suolo sono il prodotto di molte *feature* di assorbimento sovrapposte di materiali organici e minerali, essi hanno generalmente pochi elementi diagnostici distinti. Ciò rende difficile l'interpretazione qualitativa delle *feature* individuali. Tuttavia, anche sottili differenze nella forma degli spettri possono contenere informazioni quantitative sulle proprietà del suolo.

Da un punto di vista teorico, la spettrometria nel medio-infrarosso (*Fourier transform spectroscopy*) potrebbe essere superiore alla spettrometria V-NIR poiché essa individua *feature* fondamentali opposte ai loro ipertoni ed è sensibile al quarzo. Tuttavia, gli strumenti di spettroscopia V-NIR sono: a) più semplici e più trasportabili; b) capaci di scansire i campioni di suolo più rapidamente; c) commercialmente meglio supportati rispetto agli strumenti operanti nell'infrasso-medio.

Chemiometria

L'estrazione di informazioni riguardanti le proprietà del suolo d'interesse dagli spettri di riflettanza richiede tecniche specializzate di calibrazione e classificazione (chemometria, *chemiometrics*) (Naes *et al*., 2002). Lo scopo generale è quello di trovare relazioni tra le misure realizzate in laboratorio (o in campo) e gli spettri di riflettanza. Per ottenere robuste calibrazioni occorre minimizzare le informazioni spettrali non rilevanti ai fini della predizione della variabile *target*. Varie trasformazioni di dati possono essere realizzate per minimizzare informazioni irrilevanti prodotte dagli effetti dello *scattering* della luce, dalla variazione delle condizioni del campione (spessore, compressione, dimensione delle particelle) e del *set-up* ottico e problemi statistici di multicollinearità (correlazioni tra bande di diversa lunghezza d'onda) e non-collinearità (Naes *et al*., 2002). Le trasformazioni ottimali dipendono dal *data-set* individuale; tuttavia, la trasformazione in derivata prima è quella più comunemente utilizzata per gli spettri del suolo nel V-NIR (Shephered e Walsh, 2006).

Metodi di calibrazione multivariati sono utilizzati per correlare le proprietà misurate del suolo ai valori di riflettanza in un numero di bande di differente lunghezza d'onda. I più comuni metodi di calibrazione sono basati su regressioni lineari, specificamente *stepwise multiple linear regresion* (SMLR) (Ben-Dor e Banin, 1995; Dalal e Henry, 1986) *principal component regression* (PCR) e *partial least squares regression* (PLSR). La principale ragione per utilizzare la SMLR è l'inadeguatezza di tecniche di regressione più convenzionali, come la regressione lineare multipla (*multiple linear regression*, MLR) e la mancanza di consapevolezza tra gli studiosi del suolo dell'esistenza di tecniche di compressione di dati di un intero spettro, come la PCR e PLSR. Entrambe queste tecniche possono far fronte a dati contenenti un grande numero di variabili predittive altamente collineari. La PCR e la PLSR sono tecniche correlate e, in molte situazioni, i loro errori di predizione sono simili. Tuttavia, la PLSR è spesso preferita dagli analisti poiché correla le variabili di risposta e di predizione in modo tale che il modello spieghi più della varianza nella risposta con un minor numero di componenti; inoltre, essa è più inter-

pretabile e l'algoritmo è più veloce nel calcolo. L'uso di tecniche di *data-meaning* come *artificial neural networks* (ANN) (es., Leone *et al*., 2007; Daniel *et al*., 2003; Fidencio *et al*., 2002), *multivariate adaptive regression splines* (MARS) (Shepherd e Walsh, 2002) e *boosted regression trees* (Brown *et al*., 2006) sono in aumento. Viscarra Rossel (2007) ha combinato PLSR e *bootstrap aggregation* (*bagging*-PLSR) per migliorare la robustezza dei modelli PLSR e per produrre predizioni con maggiore accuratezza. La MLR, la PCR e la PLSR sono modelli lineari, mentre le tecniche di *data-meaning* possono manipolare dati non lineari.

Meriti e limitazioni

I meriti principali della spettroscopia V-NIR sono la ripetibilità e la velocità, in confronto alle analisi convenzionali dei suoli (Shephered e Walsh, 2006). La RS può fornire migliore precisione e accuratezza delle attuali misure di riferimento (Naes *et al.*, 2002), particolarmente quando l'errore di queste ultime è ampio. Pertanto, la ripetibilità è maggiore con la RS che con i metodi convenzionali di analisi. La velocità di analisi e l'abilità della stima delle diverse proprietà del suolo da una singola misura affidabile sono i maggiori vantaggi della SR, specialmente per quelle proprietà del suolo che richiedono molto tempo di misura con i metodi convenzionali. Le principali limitazioni della RS sono la necessità di costruire librerie di calibrazione per una determinata popolazione di suoli per tutte le proprietà d'interesse e la complessità dell'analisi dei dati che essa implica. Lo sviluppo di librerie globali di calibrazioni in laboratori centralizzati e lo sviluppo di *software* per l'analisi automatica dei dati potrebbero aiutare a ridurre tali limitazioni.

Applicazione ai suoli dell'area di studio

Misura della riflettanza

Le misure di riflettanza spettrale sui campioni di suoli raccolti nel corso della prima e della seconda fase di rilevamento sono state realizzate in laboratorio, in condizioni di

luce artificiale (alogena), utilizzando uno spettroradiometro mod. ASD FieldSpec Pro. Questo strumento combina tre spettrometri per coprire la porzione riflessa dello spettro compresa tra 350 e 2500 nm, con una distanza di campionamento spettrale $\leq$ 1.5 nm nella regione 350-1000 nm e 2 nm nella regione 1000-2500 nm. L'ottica dello spettroradiometro è stata montata ad un'altezza di 10 cm (rispetto alla superficie del campione). Di conseguenza il *footprint* è risultato di 4.5 cm di diametro. Ciascun campione di suolo è stato sistemato in una capsula circolare nera di 5 cm di diametro e 0.5 cm di profondità e livellata con il dorso di una spatola, per ottenere una superficie liscia, ma non pressata (in modo da evitare la riflessione speculare). I campioni di suolo sono stati illuminati con due lampade alogene di 100 W, posizionate nello stesso piano, con un angolo d'illuminazione di 30 gradi. Le misure spettrali sono state realizzate al *nadir* (osservazione verticale). La radianza di ciascun campione è stata convertita in riflettanza spettrale dividendo la radiazione riflessa dal *target* (suolo) per quella *standard* di un pannello bianco di riferimento ('*spectralon*'), misurata nelle stesse condizioni d'illuminazione del *target*. Per ridurre il rumore strumentale, sono state mediate quattro misure di uno stesso campione.

Chemiometria

Per calibrare i dati spettrali con i dati di riferimento (proprietà del suolo) è stata utilizzata la *Partial Least Squares Regression* (PLSR) con la *leave-one-out cross-validation*.

Partial least-squares regression (PLSR)

La PLSR (Thenenhaus, 1998) è una nota tecnica di modellizzazione, molto utilizzata in chemiometria e nell'analisi spettrale quantitativa per costruire modelli predittivi quando ci sono molte variabili predittrici altamente collineari. La tecnica è strettamente correlata alla regressione delle componenti principali (*principal component regression*, PCR). Tuttavia, contrariamente alla PCR, l'algoritmo PLSR seleziona fattori ortogonali successivi che massimizzano la covarianza tra variabili predittrici (*X*, spettri di riflettanza) e va-

riabili risposta (Y, proprietà dei suoli). Fittando un modello di PLSR, si spera di trovare pochi fattori PLSR che spieghino la maggior parte della variazione dei predittori e delle risposte. Brevemente, la PLSR scompone X e y in fattori di punteggi (*scores*) (T) e fattori di pesi (*loading*) (P e q) in accordo con:

$$X = TP' + E \qquad \text{e} \qquad y = Tq + f$$

X e *y* sono centrati rispetto alla media prima della scomposizione. Quest'ultima è realizzata simultaneamente e in modo tale che i primi pochi fattori spieghino la maggior parte della variazione di *X* e *y*. I rimanenti fattori rappresentano un "rumore" e possono essere pertanto ignorati, da cui l'aggiunta dei residui *E* e *f*. Generalmente, le matrici e i vettori risultanti hanno una dimensione molto minore di *X* e *y*. Pertanto, dato uno spettro *x*, la proprietà del suolo *y* può essere stimata come una combinazione (bi)lineare dei fattori di punteggi e dei fattori di pesi di *x*. Per maggiori dettagli sull'algoritmo PLSR si rimanda a Martens e Næs (1989).

Manipolazione dei dati spettrali

Prima della calibrazione PLSR, gli spettri "grezzi" di riflettanza (R) sono stati ricampionati, selezionando i valori di lunghezza d'onda ogni 10 nm, al fine di ridurre il volume dei dati da analizzare. Per migliorare le correlazioni con le concentrazioni dei campioni, gli spettri ricampionati sono stati trasformati in unità di densità ottica (assorbanza, $A = \log_{10} 1/R$) (Viscarra Rossel *et al.*, 2006.a). Per rimuovere la *base line* additiva ("*offset*") e migliorare le caratteristiche spettrali, gli spettri di assorbanza sono stati "filtrati" utilizzando uno *smoothing* polinomiale di secondo ordine Savitzky-Golay (Fearn, 2000) e trasformati in derivata prima. Per ridurre il rumore strumentale causato dalla diffusione della luce, agli spettri di derivata prima è stata applicata una *multiplicative scatter correction* (MSC) (Wise *et al*., 2003).

Selezione del modello ottimale di calibrazione PLSR

Per determinare il numero di fattori da considerare nei modelli di calibrazione è stato utilizzato il metodo *della leave-one-out cross-validation* (Efron e Tibshirani, 1994). In particolare, sono stati testati trenta fattori bilineari. Per selezionare il modello di calibrazione ottimale è stata calcolata la radice dell'errore quadratico me*dio (root mean suared error*, RMSE) delle predizioni. Il modello selezionato è stato quello con il più basso RMSE. La *performance* della predizione del modello è stata valutata attraverso il coefficiente di determinazione (R^2) tra valori predetti e misurati delle proprietà del suolo considerate. Il coefficiente di determinazione misura la proporzione della variazione totale spiegata dal modello; la rimanente variazione è attribuita all'errore casuale. Per rendere il modello più comparabile con altri modelli aventi differenti numeri di parametri, è stato calcolato l'R^2 aggiustato (R^2_{adj})[36]. Per ciascun modello sono stati inoltre calcolati l'errore medio (*mean error*, ME), la deviazione *standard* della distribuzione dell'errore (*standard deviation of the error distribution*, SDE) e la deviazione percentuale relativa (*relative percent deviation*, RPD), data dal rapporto tra la deviazione standard dei dati misurati in laboratorio (riferimento) e l'RMSE della *cross-validation*. In accordo con Viscarra-Rossel *et al*. (2006.b), il valore dell'RPD è stato classificato come segue:

RPD < 1.0	modello scadente. Il suo uso non è raccomandabile
RPD 1.0 ÷ 1.4	modello in cui solo i valori alti e bassi sono distinguibili
RPD 1.4 ÷ 1.8	modello accettabile che può essere utilizzato per valutazioni e correlazioni
RPD 1.8 ÷ 2.0	modello buono, utilizzabile per predizioni quantitative
RPD 2.0 ÷ 2.5	modello molto buono di predizione qualitativa e quantitativa
RPD > 2.5	modello eccellente di predizione.

A causa del numero relativamente ridotto di campioni, la capacità predittiva del modello PLSR non è stata validata con un *set* indipendente di dati. Ciò potrà essere fatto in futuro, quando si disporrà di un numero aggiuntivo di osservazioni relative all'area di studio.

Software utilizzato

[36] L'R^2 adj, nel suo calcolo, tiene conto dei gradi di libertà.

La manipolazione dei dati spettrali e la calibrazione dei modelli di predizione delle proprietà del suoli sono state realizzate utilizzando il software ParLeS ver. 3.1 (Viscarra Rossel, 2008).

Risultati e discussione

La tabella 16 riporta i risultati delle *cross-validation* dei modelli di predizione delle proprietà dei suoli.

Il migliore modello di calibrazione è risultato quello del carbonio organico (OC), con un valore di R^2_{adj} di 0.943 e un RPD di 4.16. La relazione tra valori predetti e misurati di OC è evidente nella figura 30. Per la calibrazione del modello, sono stati necessari 12 fattori (F). Tuttavia, il risultato della predizione è rimasto ancora eccellente (RPD > 2.5) utilizzando modelli di calibrazione più parsimoniosi in termini di numero di fattori (Viscarra Rossel et al., 2006), con F = 9, R^2_{adj} = 0.908, RPD = 3.29; con F = 6, R^2_{adj} = 0.847, RPD = 2.57.

Sono risultati eccellenti anche i modelli di predizione dell'argilla (R^2_{adj} = 0.851, RPD = 2.59) e del contenuto di acqua al punto di appassimento (*wilting point*, WP) (R^2_{adj} = 0.840, RPD = 2.55). Le relazioni tra valori predetti e misurati di argilla e WP sono illustrate nelle Fig. 31 e 32. Il numero di fattori necessari per ottenere il valore più basso di RMSE nel modello di predizione dell'argilla e del WP può essere ridotto, per ottenere risultati ancora buoni (argilla: con F = 7, R^2_{adj} = 0.811, RPD = 2.31; WP: con F = 9, R^2_{adj} = 0.777, RPD = 2.15).

Sono risultati molto buoni i modelli di predizione riguardanti la capacità di scambio cationico *(cation exchange capa*city, CEC) (R^2_{adj} = 0.829, RPD = 2.44), la capacità di campo (*field capacity*, FC) (R^2_{adj} = 0.826, RPD = 2.44), il contenuto di sabbia (R^2_{adj} = 0.824, RPD = 2.37), la somma del calcio e del magnesio scambiabili (Ca^{2+}+Mg^{2+}) (R^2_{adj} = 0.798, RPD = 2.23) e il contenuto di carbonati ($CaCO_3$) (R^2_{adj} = 0.763, RPD = 2.05). Le rappresentazioni grafiche delle relazioni tra valori predetti e quelli misurati delle pro-

prietà in discussione sono riportate nelle figure 31÷38. Anche per queste proprietà (dati non mostrati) è possibile utilizzare modelli con un minor numero di fattori, senza conseguenze rilevanti sui coefficienti di determinazione (R^2) e sulla deviazione percentuale relativa (RDP).

TABELLA 16 - Risultati della *cros-validation* dei modelli di predizione delle proprietà dei suoli utilizzando la *partial least squares regression* (PLSR) e la risposta spettrale nel visibile-infrarosso vicino (V-NIR). Sono riportati soltanto le proprietà i cui modelli sono stati classificati almeno "accettabil" (RPD > 1.4)

Proprietà del suolo	Statistica per i modelli selezionati di *cross-validation*						
	F	R^2	R^2adj	RMSE	ME	SDE	RPD
Sabbia	11	0.824	0.822	9.271	0.164	9.307	2.37
Argilla	10	0.851	0.849	6.902	0.119	6.930	2.59
OC	12	0.943	0.943	8.180	-0.274	8.209	4.16
$CaCO_3$	14	0.765	0.763	26.615	0.674	25.715	2.05
CEC	8	0.831	0.829	5.618	0.034	5.641	2.44
Ca^{2+}+Mg^{2+}	14	0.798	0.796	5.639	0.009	5.663	2.23
FC	13	0.830	0.826	0.057	-0.004	0.057	2.44
WP	13	0.844	0.840	0.040	-0.003	0.041	2.55
AWC	11	0.678	0.670	0.028	0.002	0.028	1.77

F = numero di fattori, R^2 = coefficiente di determinazione; R^2_{adj} = coefficiente di determinazione aggiustato; RMSE = errore quadratico medio (*root mean square error*); ME = errore medio (*mean error*); SDE = deviazione standard della distribuzione dell'errore (*standard deviation of the error distribution*); RPD = deviazione percentuale relativa (*relative percent deviation*).

Infine, è risultato accettabile il modello di predizione della capacità dell'acqua disponibile (AWC) (R^2_{adj} = 0.678, RPD = 1.77). Le rappresentazioni grafiche delle relazioni tra valori predetti e misurati di questa variabile sono riportate nella figura 39.

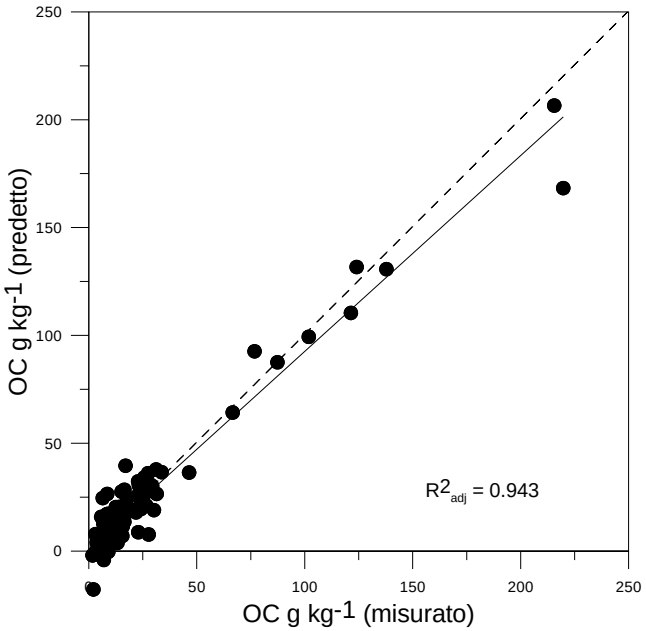


FIG. 31 – Carbonio organico predetto vs carbonio organico misurato in laboratorio

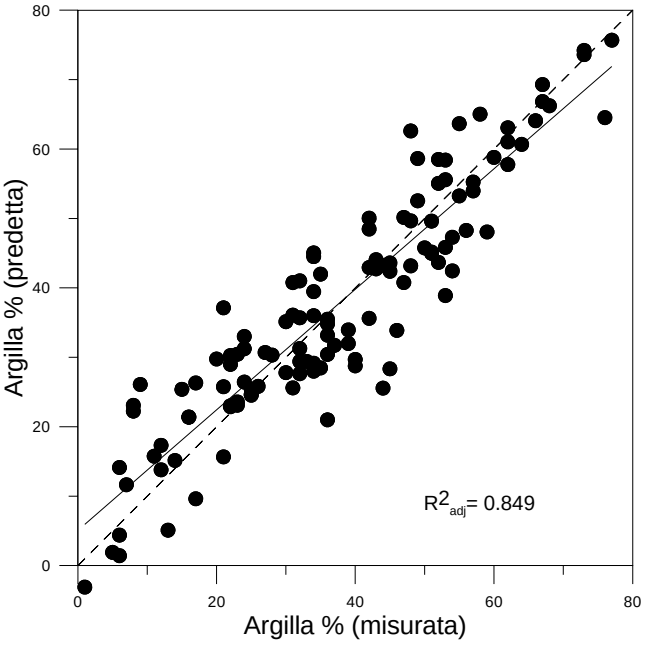


FIG. 32 – Argilla predetta vs argilla misurata in laboratorio

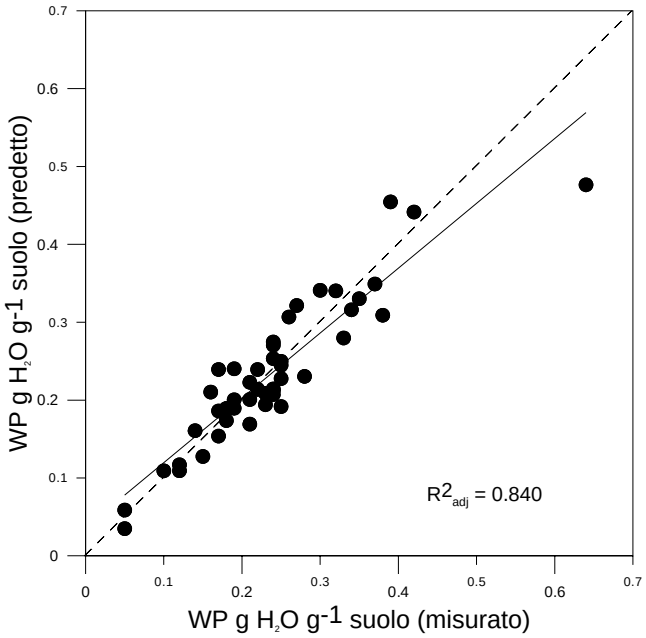


FIG. 33 – Punto di appassimento predetto vs punto di appassimento misurato in laboratorio

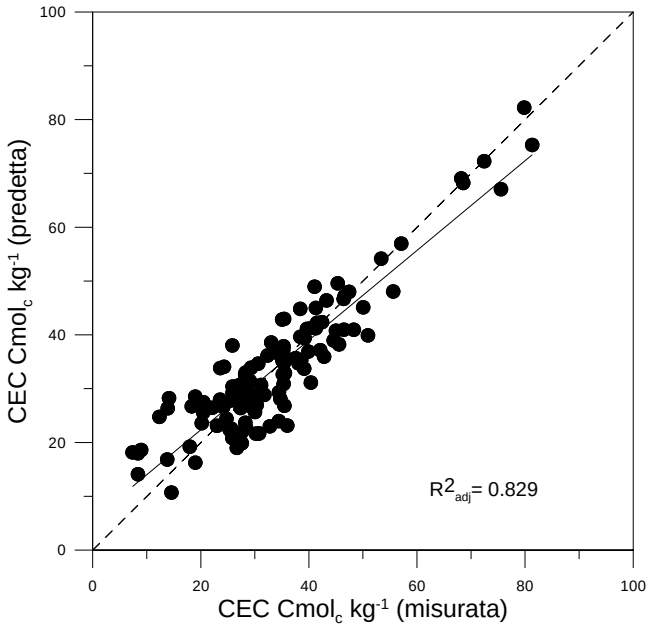


FIG. 34 – Capacità di scambio cationico predetta vs capacità di scambio cationico misurata in laboratorio

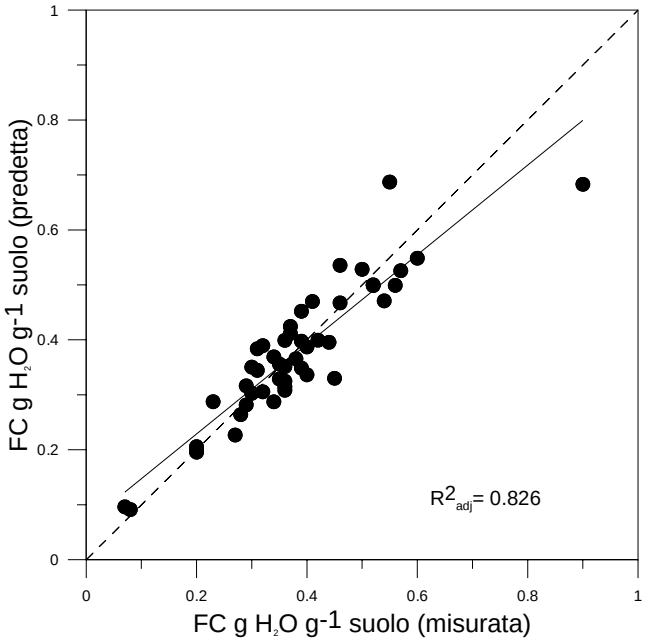


FIG. 35 – Capacità di campo predetta vs capacità di campo misurata in laboratorio

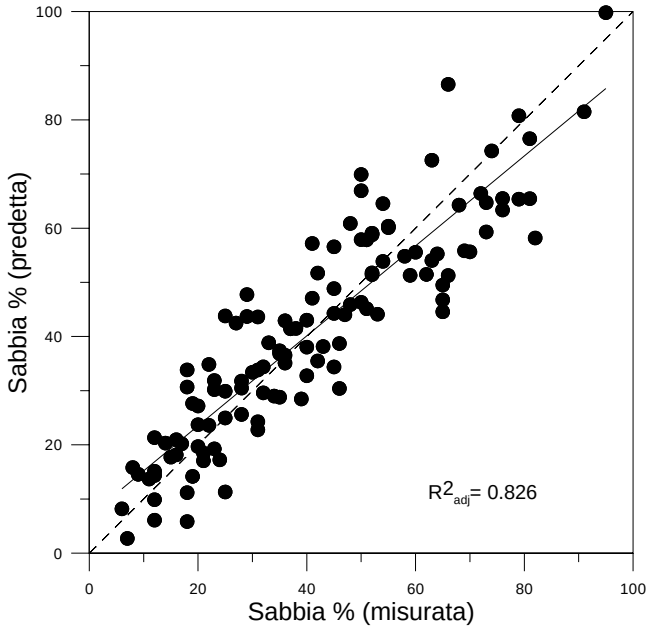


FIG. 36 – Sabbia predetta vs sabbia misurata in laboratorio

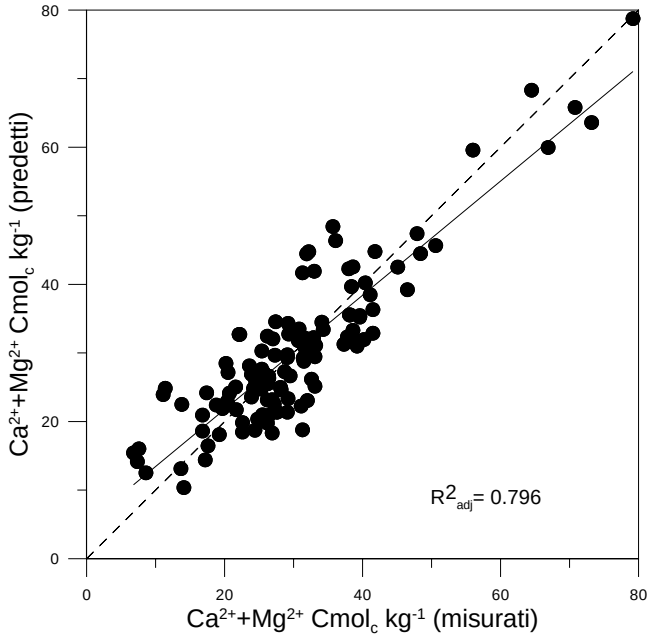


FIG. 37 – Calcio + magnesio di scambio predetti vs calcio + magnesio di scambio misurati in laboratorio

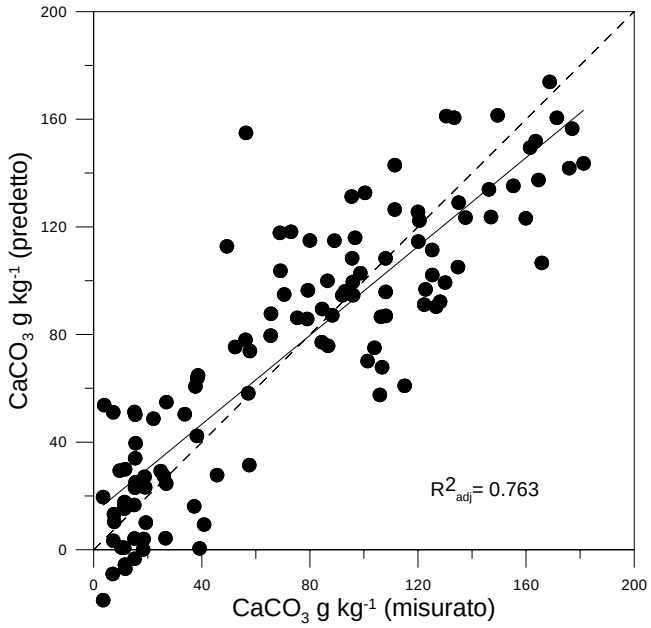


FIG. 38 – Carbonati predetti vs carbonati misurati in laboratorio

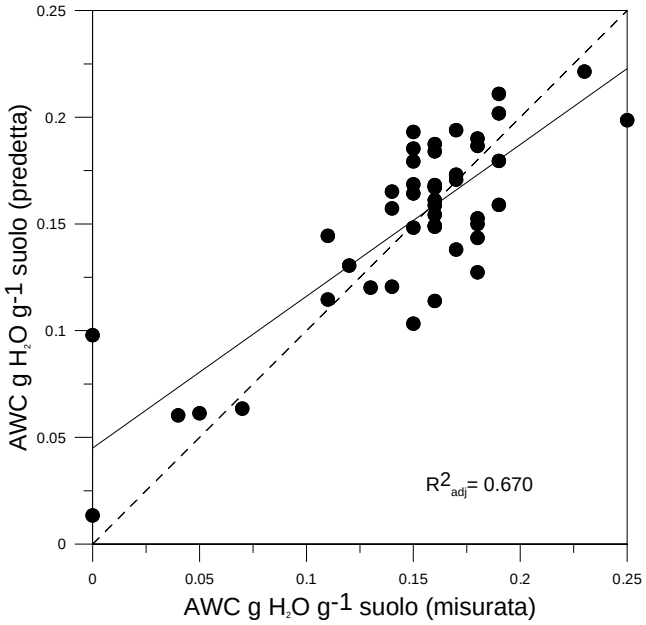


FIG. 39 – Capacità per l'acqua disponibile predetta vs capacità per l'acqua disponibile misurata

Fase 5 - Bilancio idrico delle colture

In accordo con Mannini (2004), "una delle maniere più efficaci per evitare di sprecare acqua è quella di irrigare le colture in base alle reali esigenze della pianta e nel giusto momento. Nonostante la buona esperienza degli agricoltori del nostro territorio, le irrigazioni decise sulla base di semplici osservazioni della coltura e del terreno, portano spesso ad uno spreco d'acqua per la modesta efficacia di queste valutazioni empiriche, viceversa, una precisa valutazione dei volumi d'acqua di irrigazione e dell'esatto momento di intervento irriguo, rendono l'uso dell'acqua molto efficiente e corretto, minimizzando i volumi necessari per il raggiungimento delle migliori produzioni.

La ricerca irrigua ha individuato nel calcolo del **bilancio idrico delle colture** durante la stagione di coltivazione, il metodo più preciso, economico e semplice [per ottimizzare l'uso dell'acqua irrigua, n.d.a.]: la quantità d'acqua irrigua è, infatti, quella necessaria a colmare la differenza tra l'acqua consumata dalle colture per evapotraspirazione e quella che giunge alle piante con le piogge e dalle falde superficiali, per risalita capillare nel terreno".

Ai fini del presente studio, sono stati realizzati i bilanci idrici delle principali colture dell'area d'indagine, considerando soltanto i sotto-sistemi maggiormente interessati dal rilevamento pedologico. In totale, sono stati realizzati 30 bilanci idrici (sei tipi di coltura x cinque sotto-sistemi di terre) .

Metodologia

Per la realizzazione dei bilanci idrici delle colture d'interesse è stato necessario acquisire una serie d'informazioni riguardanti il clima (pioggia, P ed evapotraspirazione potenziale, ETo[37]), il suolo (acqua disponibile, AWC) e la pianta (coefficienti colturali, Kc).

[37] Notoriamente, di tutta l'acqua assorbita dalle piante, solo una piccola parte viene impegnata nel metabolismo e nella crescita, la rimanente viene traspirata. L'acqua ceduta all'atmosfera dalle piante per traspirazione sommata a quella persa direttamente dal terreno per evaporazione viene indicata come evapotraspirazione. Essa rappresenta il "consumo idrico" di una coltura.

Le informazioni riguardanti i parametri climatici (P ed ETo) sono state acquisite attraverso l'elaborazione di dati registrati nel periodo 1993-2006 dalla stazione meteo del CNR-ISAFoM, installata nel campo sperimentale di Vitulazio, nei pressi di Capua. In particolare, da misure giornaliere, sono stati calcolati i valori mediani delle P e dell'ETo[38]. La mediana è stata preferita alla media in quanto statisticamente più robusta (più "resistente" a eventuali valori anomali).

Le differenze mensili tra P ed ETo, nel periodo in cui P < ETo, definiscono l'entità (mensile e totale) del **deficit idrico climatico**.

Come detto nella nota, l'evapotraspirazione potenziale è valutata rispetto ad una coltura di riferimento. Tuttavia, nella realtà agricola le condizioni della vegetazione sono diverse da quelle *standard* sulle quali ci si basa per la definizione dell'ETo. Di conseguenza, l'evapotraspirazione potenziale delle colture (ETc) non corrisponde all'ETo. I valori di ETo necessitano, pertanto, di essere corretti mediante l'adozione di coefficienti colturali (Kc) specifici delle colture e delle loro fasi fenologiche.

$$ETc = ETo \times Kc$$

Ai fini del presente studio, i valori di Kc sono stati ottenuti dalla rielaborazione di dati estratti dalla letteratura, con particolare attenzione al quaderno 56 della FAO (1998) e ad un lavoro di Ravelli e Rota (2002).

La quantità di acqua consumata da una coltura foraggera sfalciata di frequente che, in condizioni ottimali di umidità del suolo, può mantenere costante il massimo consumo idrico e, quindi, un elevato ritmo di crescita, viene definita evapotraspirazione potenziale o, più correttamente, evapotraspirazione potenziale di riferimento (ETo). Così intesa, l'ETo dipende unicamente dalle condizioni meteorologiche (temperatura, umidità dell'aria, radiazione solare, velocità del vento) e diventa, pertanto, un parametro climatico (MAF, 1983).

[38] I valori di ETo considerati derivano da misure di evaporato da evaporimetro di Classe A (o di Pan), moltiplicati per un coefficiente di correzione (Kp o coefficiente di Pan) calcolato in base ai valori registrati di radiazione netta, velocità del vento e umidità relativa dell'aria ed al fattore temperatura-latitudine della stazione (Landi, 1999).

In precedenza, nel calcolo del *deficit climatico*, si è fatto riferimento alle precipitazioni (P). In effetti, la pianta è in grado di utilizzare solo una frazione di acqua di pioggia, definita pioggia efficace (o, in inglese, *effective rainfall*) o pioggia utile (Pu) o utilizzabile (Landi, 1999). La Pu è quella rilevata dal pluviometro meno quella che bagna la vegetazione, quella che è perduta per ruscellamento superficiale, quella che percola nel sottosuolo e quella che è ancora disponibile dopo la raccolta delle colture.

Sono stati proposti numerosi metodi per il calcolo della pioggia utile; alcuni si avvalgono di misure dirette, altri applicano tecniche statistiche o si avvalgono di certi caratteri delle precipitazioni; altri tengono conto della natura e dell'umidità del suolo, altri fanno riferimento alla coltura, ecc. In alcuni casi è applicata una relazione empirica basata sulla piovosità mensile. Nel presente studio è stata utilizzata la relazione suggerita dal *Bureau of Reclamation* degli Stati Uniti (USBR):

$$Pu = P \times (125 - 0.2 \times P)/125$$

Le differenze mensili tra Pu e ETc, nel periodo in cui Pu < ETc, rappresentano il **deficit idrico di una coltura**.

Il calcolo del *deficit*, così definito, non tiene conto della riserva idrica del suolo (o capacità per l'acqua disponibile, AWC). Tale riserva si esaurisce gradualmente nel tempo, se non compensata da apporti idrici di pioggia e/o dall'irrigazione. Se considerata, l'AWC consente di valutare il **deficit idrico effettivo di una coltura** vale a dire, la richiesta di acqua da fornire attraverso la pratica irrigua per compensare i consumi per evapotraspirazione.

L'AWC è normalmente valutata con riferimento alla profondità del suolo esplorata dalle radici delle piante. L'importanza della profondità delle radici non deve essere tuttavia sopravvalutata (Mannini, 2004). Le radici più profonde, infatti, hanno spesso una prevalente funzione di ancoraggio al suolo, mente la maggioranza delle radici assorbenti si trova nello strato di suolo lavorato.

Per un buon rifornimento idrico la profondità utile risulta in pratica molto più limitata; la corretta valutazione della capacità della pianta di estrarre acqua e resistere alla siccità

va fatta considerando la densità radicale. Le piante con poche radici, anche se profonde, sono più sensibili alla siccità rispetto alle piante con radici più superficiali, ma molto dense e quindi con un maggiore contatto tra radici e suolo. Lo strato di massima estrazione dell'acqua dal suolo risulta molto più limitato dalla profondità massima delle radici. Ai fini del presente studio, per la valutazione della profondità di massima estrazione è stato fatto riferimento alle informazioni riportate nel quaderno 24 della FAO (Doorembos e Pruitt, 1977), modificate da Mannini (2004).

I valori riportati da Mannini (2004), fanno riferimento ad un suolo franco. Pertanto, tenuto conto che nei suoli più sciolti le radici tendono ad approfondirsi di più e che nei suoli più fini e compatti gli apparati radicali tendono ad essere più superficiali, è stato necessario correggere tali valori in base alla tessitura dei suoli dei sotto-sistemi di terre considerati. In particolare, in accordo con quanto riportato da Marano *et al*., le profondità sono state aumentate del 15% nel caso di suoli sabbiosi e ridotti del 15% nel caso di suoli argillosi.

L'AWC è stata calcolata facendo riferimento alle misure idrologiche di laboratorio (espresse in mm H_2O cm^{-1} di suolo)[39].

Tenuto conto di quanto sopra detto, sono stati realizzati i bilanci idrologici per le colture e i sotto-sistemi di terre considerati. Per ciascun sotto-sistema sono stati calcolati i valori mediani dell'AWC e dei contenuti di sabbia, limo e argilla, utilizzati per correggere le profondità degli strati di massima esplorazione radicale. La tabella 17 riporta le profon-

[39] Come detto in precedenza (Fase 3 - idrologia del suolo), le misure idrologiche di laboratorio sono state realizzate sui soli campioni di *top-soil*. Per una valutazione rigorosa dell'AWC dello spessore di massima espansione radicale, sarebbe stato necessario disporre anche di misure riguardanti gli strati più profondi del suolo. Tuttavia, considerata la non significatività statistica delle differenze tra *top-soil* e del *sub-soil* nei valori medi delle frazioni tessiturali (Tab. 4) - le cui proporzioni relative influenzano in modo rilevante la capacità di acqua disponibile (Brady e Weil, 2002) - è stato ritenuto ragionevole estendere il valore dell'AWC misurato sui campioni di *top-soil* all'intero strato di suolo di massima espansione radicale. La scelta di utilizzare i soli valori di AWC del *top-soil* è stata giustificata anche dalla non significatività statistica delle differenze nei valori medi di AWC tra *top-soil* e del *sub soil* stimati utilizzando la funzione di *pedotransfer* (Tab. 9).

dità dei suoli e i corrispondenti valori di AWC, distinti per colture e sotto-sistema di terre.

TABELLA 17 - Valori mediani della profondità di massima estrazione di acqua dalle radici e dei corrispondenti valori di AWC per i diversi sottosistemi di paesaggio e le colture più rappresentative.

Sottosistema di terre	Ortive, erbai, cereali primaverili estivi		Colture industriali		Frutteti, prati avvicendati	
	Prof. radici (cm)	AWC (mm)	Prof. radici (cm)	AWC (mm)	Prof. radici (cm)	AWC (mm)
I2.2	51.00	85.40	42.50	71.17	68.00	113.87
I2,3	60.00	108.57	50.00	90.47	80.00	144.76
I4.1	51.00	103.56	42.50	86.30	68.00	138.08
L1.1	55.50	81.98	46.25	68.31	74.00	109.30
L3.1	52.50	93.41	43.75	77.85	70.00	124.55

I.2.2: Aree della pianura alluvionale del fume Volturno prossime all'asta fluviale; I2.3: Aree bordiere della pianura alluvionale del fiume Volturno; I4.1: Aree relativamente depresse della pianura alluvionale del fiume Volturno; L1.1: Depressioni retrodunari della pianura costiera del fiume Volturno; L3.1: Apparati dunari e spiagge

Risultati e discussione

La figura 40 riporta, in forma grafica, un esempio di bilancio idrico. Come detto in precedenza, la differenza tra ETc e Pu definisce il *deficit* idrico della coltura. Quest'ultimo è in parte compensato dalla riserva idrica del suolo[40], fino all'esaurimento della stessa (fine giugno, nell'esempio). La differenza tra ETc e la riserva idrica rappresenta il *deficit* idrico effettivo della coltura. Quando tutta la riserva idrica utilizzabile si è esaurita, il *deficit* idrico e il *deficit* idrico effettivo coincidono.

I bilanci idrologici realizzati hanno consentito di definire, per ciascun sotto-sistema di terre: a) inizio, fine e durata dei *deficit* idrici delle colture, b) entità dei *deficit* (area trat-

[40] Quando ETc = Pu, la riserva idrica eguaglia l'AWC. Quando ETc < Pu, la riserva idrica del suolo, progressivamente consumata per evapotraspirazione, è inferiore all'AWC.

teggiata nella figura 40), c) mese di massima intensità del *deficit* (ed entità del *deficit* del mese). I risultati sono riportati nella tabella 18.

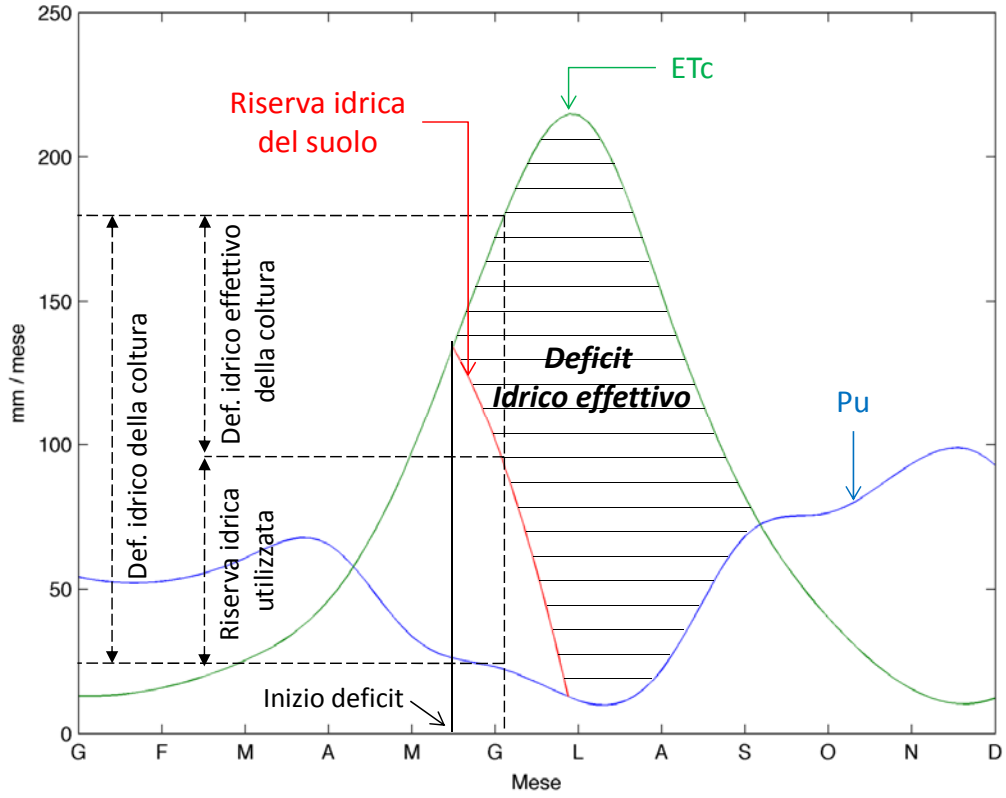


FIG. 40 – Esempio di bilancio idrico (da: *Quaglietta Chiarandà et al.1986, mod.*)

L'entità totale del *deficit* corrisponde alla quantità di acqua necessaria per ottenere il massimo della produzione. Occorre però tener conto che il massimo di produzione, per quasi tutte le colture, non corrisponde alla produzione di massima convenienza economica. La dotazione irrigua da adottare è allora quella che, nella curva della produttività dell'acqua irrigua (Fig. 41) contemperi una contrazione delle dotazioni irrigue massime con una contenuta diminuzione della produzione massima. In generale, il più conveniente rapporto tra dotazione e livello qualitativo e quantitativo di produzione è da ritenere assimilabile ad un abbattimento del 30% del fabbisogno irriguo netto.

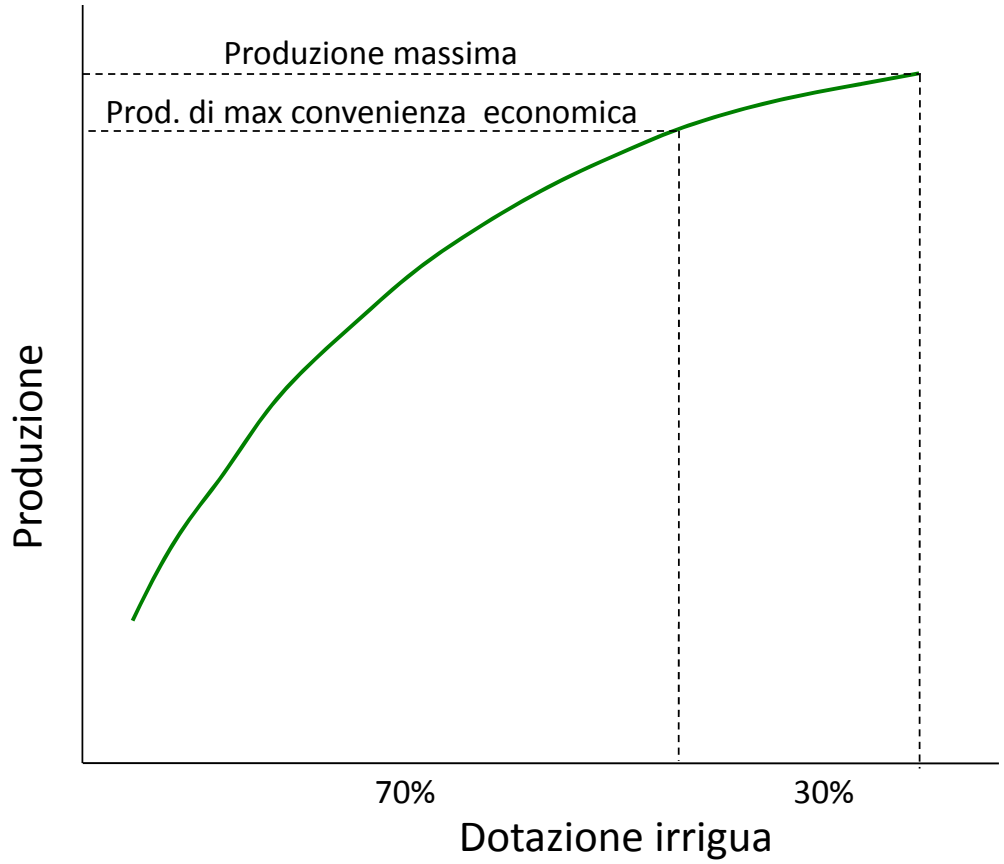


FIG. 41 – Variazione della produzione in funzione della dotazione irrigua (da Morano *et al*, *Progettazione opere irrigue in sinistra regi lagni. Studio economico- agrario*. Consorzio Generale di Bonifica del Bacino Inferiore del Volturo, Caserta, *mod.*)

Dall'analisi della tabella 18 risulta che:

a) i cereali primaveril-estivi[41], mostrano i valori di *deficit* effettivo totale più elevato, in media 719.4 mm, cui corrisponde una richiesta irrigua di massima convenienza economica di 503.3 mm. L'entità del *deficit* totale dipende non tanto dalla durata del periodo di *deficit*, quanto dagli elevati coefficienti colturali (Kc) (Fig. 42) nel periodo compreso tra la levata (seconda metà di giugno) e l'emissione del pennacchio-inizio fioritura (luglio) della coltura. I predetti valori di *deficit*/richiesta irrigua sono coerenti

[41] Per i cereali primaverili-estivi si fa soprattutto riferimento al mais

con quelli riportati da Giardini e Vecchiettini (2000) e i risultati di un Progetto Operativo Nazionale (PON) per l' "*Ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche, convenzionali e non, in sistemi colturali sostenibili*" (OTRIS) (Tarantino, 1999).

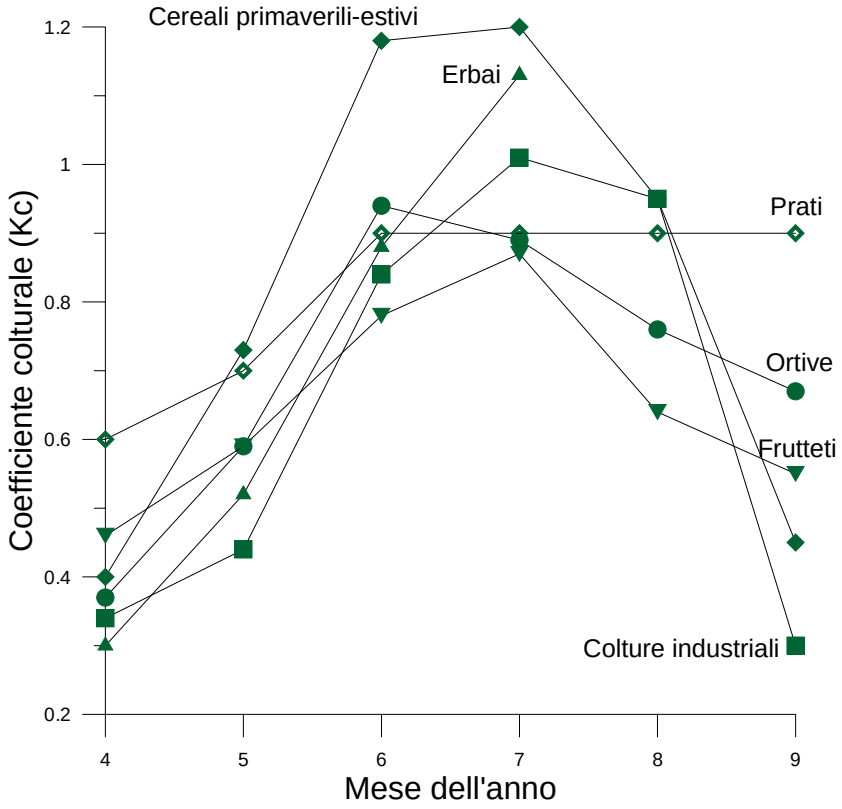


FIG. 42 – Coefficienti colturali (Kc) delle colture più rappresentative dei sotto-sistemi di paesaggio maggiormente investigati.

b) gli erbai[42] mostrano i valori di *deficit*/richiesta irrigua più bassi (media 396.1/277.3 mm), soprattutto per effetto del loro minore periodo di permanenza sul terreno (15 aprile - 31 luglio, *Fonte*: Consorzio di Bonifica del Basso Volturno). I valori della richiesta irrigua sopra riportati concordano sostanzialmente con quelli riportati nel già citato lavoro di Morano *et al*.

[42] Per gli erbai si fa soprattutto riferimento al mais a maturazione cerosa

c) relativamente bassi (con riferimento alle colture considerate) sono anche i valori di *deficit*/richiesta irrigua dei frutteti (media 433.6/303.5 mm), sia per effetto della maggiore disponibilità di AWC (Tab. 17), sia per i valori più bassi di Kc nel periodo estivo (Fig.42). Anche in questo caso, l'ammontare del *deficit* e la conseguente richiesta di acqua irrigua sono leggermente sovrastimati rispetto a quanto riportato nel lavoro di Morano *et al.* e sostanzialmente coerenti con Ravelli e Rota (2002).

d) coerenti con la letteratura tecnica e scientifica (Morano *et al.*, Ravelli e Rota, 2002) sono i valori di *deficit*/richiesta irrigua delle ortive[43] (media 5675.2/390.0 mm) e delle colture industriali[44] (media 564.3/395.0 mm);

e) leggermente sovrastimati, rispetto ai dati riportati da Marano *et al*., ma sostanzialmente coerenti con Ravelli e Rota (2002), sono i valori medi di *deficit*/richiesta irrigua dei prati[45]

f) i valori dei *deficit*/richiesta irrigua di ciascuna coltura differiscono tra i diversi sottosistemi. I valori più alti si rinvengono nelle aree bordiere della pianura alluvionale del fiume Volturno (I2.3), quelli più alti nelle depressioni retrodunari (L1.1). In ogni caso, le differenze nei valori di *deficit*/richiesta irrigua tra le diverse unità sono sostanzialmente trascurabili.

I risultati sopra riportati e discussi, oltre che con la letteratura tecnico-scientifica citata, sono coerenti con un recente studio pedo-agronomico (Leone *et al*., 2009), realizzato nell'ambito di un' "Indagine di base per l'ampliamento dell'impianto irriguo collettivo in sinistra Regi Lagni".

[43] Per le ortive si fa soprattutto riferimento al pomodoro

[44] Per le colture industriali si fa soprattutto riferimento al tabacco

[45] Per i prati si fa soprattutto riferimento alla medica

TABELLA 18 - Risultati dei bilanci idrici per le colture più rappresentative dei sotto-sistemi di paesaggio maggiormente investigati

Sotto-sistema I2.2 - Aree della pianura alluvionale del fume Volturno prossime all'asta fluviale							
				Deficit idrico			
Coltura	Inizio (g. giuliano)	Fine (g. giuliano)	Durata (n. giorni)	Entità (mm)	Entità 70% (mm)	Mese di punta	Entità (mm)
Ortive	114	255	141	576.4	403.5	luglio	208.1
Erbai	121	212	91	405.3	283.7	luglio	267.3
Cereali primaverili-estivi	106	243	137	725.7	508.0	luglio	284.5
Colture industriali	121	239	118	571.9	400.4	luglio	237.7
Frutteti	124	252	127	445.8	312.1	luglio	203.2
Prati avvicendati	121	269	148	644.3	451.0	luglio	210.6
Sotto-sistema I2.3 - Aree bordiere della pianura alluvionale del fiume Volturno							
				Deficit idrico			
Coltura	Inizio (g. giuliano)	Fine (g. giuliano)	Durata (n. giorni)	Entità (mm)	Entità 70% (mm)	Mese di punta	Entità (mm)
Ortive	122	255	133	553.2	387.3	luglio	208.1
Erbai	125	212	87	382.2	267.6	luglio	267.3
Cereali primaverili-estivi	115	243	128	704.3	493.0	luglio	284.5
Colture industriali	124	239	115	552.6	386.8	luglio	237.7
Frutteti	130	252	121	414.9	290.4	luglio	203.2
Prati avvicendati	126	269	143	613.4	429.4.9	luglio	210.6

Continua →

Sotto-sistema I4.1 - Aree relativamente depresse della pianura alluvionale del fiume Volturno							
Coltura	Deficit idrico						
	Inizio (g. giuliano)	Fine (g. giuliano)	Durata (n. giorni)	Entità (mm)	Entità 70% (mm)	Mese di punta	Entità (mm)
Ortive	121	255	134	558.2	390.8	luglio	208.1
Erbai	124	212	88	387.2	271.0	luglio	267.3
Cereali primaverili-estivi	114	243	129	709.3	496.5	luglio	284.5
Colture industriali	123	239	116	556.8	389.8	luglio	237.7
Frutteti	129	252	122	421.6	295.1	luglio	203.2
Prati avvicendati	125	269	144	620.1	434.1	luglio	210.6
Sotto-sistema L1.1 - Depressioni retrodunari della pianura costiera del fiume Volturno							
Coltura	Deficit idrico						
	Inizio (g. giuliano)	Fine (g. giuliano)	Durata (n. giorni)	Entità (mm)	Entità 70% (mm)	Mese di punta	Entità (mm)
Ortive	113	255	142	579.8	405.9	luglio	208.1
Erbai	118	212	94	408.7	286.1	luglio	267.3
Cereali primaverili-estivi	106	243	137	725.7	508.0	luglio	284.5
Colture industriali	117	239	122	574.8	402.4	luglio	237.7
Frutteti	123	252	128	450.4	315.3	luglio	203.2
Prati avvicendati	117	269	152	648.9	454.2	luglio	210.6

Continua →

Sotto-sistema L3.1 - Apparati dunari e spiagge							
Coltura	Deficit idrico						
	Inizio (g. giuliano)	Fine (g. giuliano)	Durata (n. giorni)	Entità (mm)	Entità 70% (mm)	Mese di punta	Entità (mm)
Ortive	118	255	137	568.4	397.9	luglio	208.1
Erbai	122	212	90	397.3	278.1	luglio	267.3
Cereali primaverili-estivi	110	243	133	719.4	503.6	luglio	284.5
Colture industriali	122	239	117	565.2	395.7	luglio	237.7
Frutteti	126	252	125	435.2	304.7	luglio	203.2
Prati avvicendati	122	269	147	633.6	443.5	luglio	210.6
Media sotto-sistemi							
Coltura	Deficit idrico						
	Inizio (g. giuliano)	Fine (g. giuliano)	Durata (n. giorni)	Entità (mm)	Entità 70% (mm)	Mese di punta	Entità (mm)
Ortive	118	255	137	567.2	397.0	luglio	208.1
Erbai	122	212	94	396.1	277.3	luglio	267.3
Cereali primaverili-estivi	110	243	133	716.9	501.8	luglio	284.5
Colture industriali	121	239	118	564.3	395.0	luglio	237.7
Frutteti	126	252	126	433.6	303.5	luglio	203.2
Prati avvicendati	122	269	147	632.1	444.4	luglio	210.6

Conclusioni

Lo studio realizzato ha consentito di acquisire informazioni rilevanti per la valutazione dello stato di salinità e sodicità dei suoli dell'area costiera del basso Volturno e del suo potenziale impatto sulla produzione primaria.

Stato di salinità/sodicità dei suoli

I risultati delle analisi sui campioni di suolo distribuiti sull'intera area di studio, raccolti alla fine del 2009 hanno evidenziato che:

a. gran parte dei campioni ha un valore di conducibilità in estratto saturo (ECe) inferiore alla soglia di 4 dS m^{-1}, normalmente utilizzata per la classificazione di un suolo salino e una percentuale di sodio scambiabile (*exchangeable sodium percentage*, ESP) inferiore alla soglia 15, normalmente utilizzata per la classificazione di un suolo sodico. Tuttavia, un certo numero di campioni, presenta
b. un valore di ECe superiore alla soglia di tolleranza delle piante sensibili (2 dS m^{-1}) o
c. un valore di ESP "forte" (8-15), in accordo con le Linee Guida dei Metodi di Rilevamento e Informatizzazione dei Dati Pedologici del MIPaF.

I risultati del rilevamento pedologico realizzato all'inizio dell'estate 2010, su profili di suoli rappresentativi delle differenti unità di pedo-paesaggio, hanno evidenziato condizioni di elevata salinità e/o sodicità, ricollegabili al contatto più o meno prolungato del suolo con le acque salate di falda e/o all'uso dell'acqua irrigua.

La salinità è risultata elevata, soprattutto negli orizzonti più profondi (al disotto dei 55 cm), del primo profilo (P1), un *Histosol* (suolo ad elevatissimo contenuto di carbonio organico) della depressione retrodunare della bassa piana del fiume Volturno. La sodicità è invece risultata:

a. forte (ESP $\geq$ 5.90 e $\leq$ 9.30) negli orizzonti superficiali e molto forte (ESP > 15) negli orizzonti più profondi (al disotto dei 130 cm) del secondo profilo (P2), un *Cambisol* della predetta depressione retrodunare;

a. forte (ESP = 11.67) nell'orizzonte superficiale (0-20 cm) e molto forte (ESP > 15) nei rimanenti orizzonti del terzo profilo (P3), un *Vertisol* rappresentativo di un'area relativamente depressa della bassa piana del Volturno;
b. molto forte (> 15) in un orizzonte relativamente profondo (55 - 85 cm) e argilloso del quarto profilo, un *Vertisol* rappresentativo dell'apparato dunare, in destra Volturno. Questo suolo presenta anche valori di salinità elevata negli strati più profondi, al disotto degli 85 cm.

Sodicità e salinità sono risultate assenti nel quinto profilo (P5), un *Vertisol* ricadente ad una distanza maggiore dalla linea di costa, rispetto agli altri suoli, in un'area relativamente rilevata in destra Volturno.

Potenziale impatto dei suoli affetti da salinità sulle produzioni

I valori di salinità misurati negli strati più superficiali dei suoli investigati indicano, per una buona parte degli stessi, condizioni di criticità per la coltivazione di specie sensibili, come ad esempio il pesco, l'albicocco, la carota, la fragola, il pero. A causa degli effetti osmotici e ionici (tossici) dei sali presenti nel suolo, per queste colture sono attese riduzioni della produzione dell'ordine del 10% (Fig. 3).Tali riduzioni potranno aumentare linearmente e drasticamente con l'aumentare della salinità: per valori di ECe di 4 dS m^{-1} è prevedibile una contrazione del 50% della produzione; per valori di l'ECe di 8 dS m^{-1}, non sarà più possibile la produzione delle piante sensibili. A partire da valori di 4 dS m^{-1} (attualmente riscontrati in pochi orizzonti superficiali ed in alcuni orizzonti più profondi dei suoli investigati) sono probabili contrazioni della produzione anche per le colture moderatamente sensibili, come mais, pomodoro, medica, patata.

I valori di sodicità rinvenuti in una parte degli strati superficiali (0-60 cm) dei suoli campionati alla fine del 2009 e in buona parte degli strati superficiali e/o profondi dei profili rilevati nell'estate 2010 evidenziano condizioni di rischio di degrado fisico (dispersione degli aggregati), con effetti negativi attesi sulla crescita e sulla produzione delle colture, a causa della riduzione della disponibilità di ossigeno e dell'infiltrazione e percolazione dell'acqua.

Gestione agricola dei suoli affetti da salinità

Le condizioni attuali e potenziali di salinità/sodicità impongono una gestione attenta dei suoli coltivati, soprattutto attraverso il controllo della pratica irrigua.

Il pre-requisito di base per una corretta gestione dei suoli affetti da salinità è la conoscenza del bilancio dei sali (Brady e Weil, 2002). Per raggiungere un bilancio salino, la quantità di sali che arriva al suolo deve eguagliare quella rimossa (dal suolo). Mettere insieme queste condizioni è una sfida fondamentale per la sostenibilità di lungo termine dell'agricoltura irrigua del Basso Volturno. Ciò significa, principalmente, gestire la qualità e la quantità dell'acqua fornita attraverso l'irrigazione e la qualità e la quantità di acqua rimossa attraverso il drenaggio.

La tabella 19 fornisce alcune linee guida per la valutazione della qualità dell'acqua per l'irrigazione. Il confronto di queste linee guida con le caratteristiche dell'acqua (Tab. 20) di alcuni pozzi ricadenti nell'area oggetto di studio (Fig. 43), rivela (Tab. 21) che:

a. la concentrazione totale di sali solubili (*total dissoved salts*, TDS) in tutti i pozzi analizzati è tale (TDS > 450 mg l^{-1}, corrispondente ECw > 0.7 dS m^{-1}) da causare effetti negativi più o meno rilevanti sulle colture (effetti osmotici). Di conseguenza, il grado di restrizione dell'irrigazione con le acque di questi pozzi è da moderata a severa;
b. I valori del SAR (*sodium adsorption ratio*) e della conducibilità elettrica (ECw), considerati insieme, solo in un caso (pozzo 4) sono tali (SAR 6-12; ECw 1.9-0.5 dS m^{-1}) da determinare una restrizione moderata dell'irrigazione, per i possibili effetti negativi dell'acqua sulle caratteristiche fisiche del suolo (rottura della struttura e infiltrazione dell'acqua);
c. i valori di SAR, da soli, sono tali da determinare una restrizione moderata a severa dell'uso dell'acqua, se distribuita con metodi d'irrigazione superficiale (per scorrimento, infiltrazione laterale, sommersione), a causa degli effetti del Na^+ su colture sensibili a questo catione (fagiolo, mais, pisello, pesco,...). Il conte-

nuto elevato di Na^+ (sempre > 3 meq l^{-1}) limita moderatamente anche l'irrigazione per aspersione (o a pioggia);

d. il contenuto elevato di Cl^- (sempre > 3 meq l^{-1}) limita in modo severo l'irrigazione superficiale e in modo moderatamente severo quella per aspersione, per gli effetti negativi di questo anione sulle colture a esso sensibili (agrumi, vite, fragola, ...).

TABELLA 19 - Linee guida per la qualità dell'acqua d'irrigazione

Si noti che, riguardo agli effetti sulla struttura fisica dei suoli, l'elevata salinità totale (ECw) nell'acqua d'irrigazione compensa, in qualche modo, l'aumentato rischio da sodio (SAR). In aggiunta, si noti che l'acqua con bassi valori di sale (bassa ECw) mentre da un lato evita i problemi di carenza di disponibilità idrica per le piante, dall'altro può peggiorare le proprietà fisiche, soprattutto se il SAR è alto.

Potenziali problemi irrigui	Unità	Restrizione nell'uso		
		Nessuna	Leggera a moderata	Severa
Salinità (influenza la disponibilità di acqua per le colture)				
ECw	dS m^{-1}	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
TDS	mg l^{-1}	< 450	450 - 2000	> 2000
Struttura fisica e infiltrazione idrica (valutare utilizzando ECw e SAR insieme)				
SAR = 0 - 3 e ECw =	dS m^{-1}	> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
SAR = 3 - 6 e ECw =	dS m^{-1}	> 1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
SAR = 6 - 12 e ECw =	dS m^{-1}	> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
SAR = 12 - 20 e ECw =	dS m^{-1}	> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
SAR = 20 - 40 e ECw =	dS m^{-1}	> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Tossicità specifica dello ione sodio (Na) (influenza le colture sensibili)				
Irrigazione superficiale	SAR	< 3	3 - 9	> 9
Irrigazione per aspersione	mmol l^{-1}	< 3	> 3	
Tossicità specifica dello ione cloro (Cl) (influenza le colture sensibili)				
Irrigazione superficiale	mmol l^{-1}	< 4	4 - 10	> 10
Irrigazione per aspersione	mmol l^{-1}	< 3	> 3	

da: Abrol I.P., Yadov J.S.P., Massoud F.I, 1998. *Salt affected soils and their management*. FAO Soil Bulletin, 39. Rome: Food and Agriculture Organisation of the UNited Nations, Mod.

Per il miglioramento delle condizioni attuali di salinità/sodicità sono possibili anche interventi di bonifica, secondo i criteri ampiamente discussi nella parte introduttiva del presente lavoro.

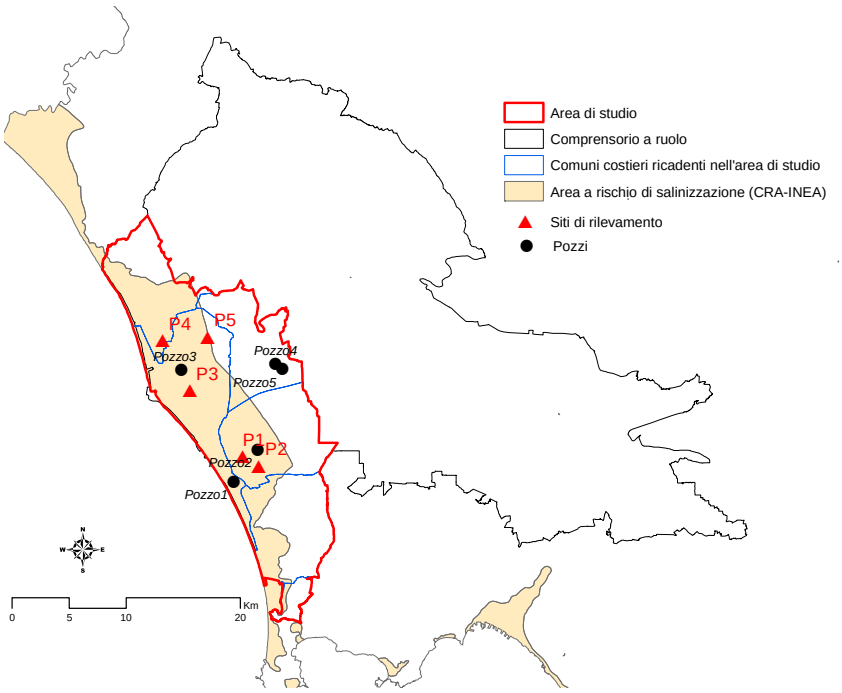


FIG. 43 - Localizzazione dell'area di studio con indicazione dei pozzi.

Lo studio realizzato ha inoltre consentito di calibrare modelli affidabili, rapidi e a basso costo, su base spettrometrica, di predizione delle proprietà dei suoli e di valutare l'entità dei *deficit* idrici delle principali colture.

La calibrazione dei modelli predittivi, basati sull'uso della spettrometria V-NIR e del metodo statistico multivariato PLSR, è risultata particolarmente efficace per carbonio organico, i contenuti di argilla e sabbia, la capacità di scambio cationico, le variabili idrologiche. I risultati ottenuti potranno avere ricadute pratiche importanti sulla gestione agricola, soprattutto in quanto esse permettono di ampliare la base di conoscenze dei suoli, consentendo l'applicazione di tecniche di agricoltura di precisione, rilevanti per l'ottimizzazione delle pratiche agronomiche, quindi per il miglioramento del rapporto costi/benefici e della risposta ambientale all'uso del suolo.

La spettrometria V-NIR non ha, tuttavia, consentito di calibrare modelli efficaci di predizione delle variabili diagnostiche della salinità/sodicità dei suoli. A tal fine, saranno necessarie ulteriori indagini, eventualmente basate sulla valutazione quantitativa di bande di assorbimento di specifici sali solubili e/o sull'uso di altri metodi di *spectral processing* (es. *spectral unmixing*). Saranno inoltre necessari altri studi di validazione dei modelli già calibrati, utilizzando *set* più ampi di campioni di suolo, rispetto a quello utilizzato ai fini del presente studio.

Infine, la valutazione dell'entità, dei periodi d'inizio e fine e della durata dei *deficit* idrici per le principali colture dell'area, per ciascun specifico paesaggio, potranno essere agevolmente utilizzati da produttori e Enti di gestione territoriale per la progettazione e la gestione irrigua, dalla scala aziendale a quella comprensoriale.

TABELLA 20 - Caratteristiche dell'acqua di pozzi ricadenti nell'area di studio.

	ECw dS m^{-1}	pH	Na^+ mg l^{-1} (meq l^{-1})	K^+ mg l^{-1} (meq l^{-1})	Ca^{2+} mg l^{-1} (meq l^{-1})	Mg^{2+} mg l^{-1} (meq l^{-1})	Cl^- mg l^{-1} (meq l^{-1})	SO_4^{2-} mg l^{-1} (meq l^{-1})	HCO_3^- mg l^{-1} (meq l^{-1})	NO_3^- mg l^{-1} (meq l^{-1})	SAR
Pozzo1	2.52	6.89	470.0 (20.43)	32.1 (0.82)	85.7 (4.29)	40.2 (3.31)	321.7 (9.07)	96.2 (6.01)	1055.6 (13.30)	0.18 (0.01)	10.49
Pozzo2	2.27	7.65	380.8 (16.56)	37.3 (0.95)	91.7 (4.49)	34.6 (2.85)	337.4 (9.52)	179.3 (11.21)	634.1 (10.39)	46.59 (3.33)	8.59
Pozzo3	4.43	7.14	528.8 (22.99)	167.2 (4.28)	209.6 (10.48)	104.8 (8.63)	965.0 (27.22)	59.1 (3.70)	51.5 (0.84)	0.14 (0.01)	7.44
Pozzo5	1.25	7.46	209.6 (9.11)	39.1 (1.00)	49.8 (2.49)	20.7 (1.70)	133.7 (3.77)	5.2 (0.33)	569.2 (9.33)	1.11 (0.08)	6.29
Pozzo5	2.16	7.35	331.6 (14.42)	118.5 (3.03)	76.1 (3.81)	27.9 (2.30)	245.0 (6.91)	167.4 (10.46)	700.3 (11.48)	41.45 (2.93)	8.25

Fonte: Enea – Università degli studi di Napoli, 2002- Progetto Regi Lagni

TABELLA 21 - Quadro riassuntivo del confronto tra le analisi delle acque dei pozzi e le linee guida per l'irrigazione per la valutazione del grado di restrizione per l'uso irriguo delle acque.

Pozzo	Salinità (effetti sulla disponibilità di acqua)		Struttura fisica e infiltrazione di. acqua	Tossicità specifica degli ioni (effetti sulle colture sensibili)			
				Tossicità specifica Na^+		Tossicità specifica Cl^-	
	ECw	TDS*	SAR+ECw	Irrigazione Superf.	Irrigazione Aspers.	Irrigazione Superf.	Irrigazione Aspers.
1	LM	LM	N	**S**	LM	LM	LM
2	LM	LM	N	LM	LM	LM	LM
3	**S**	LM	LM	LM	LM	**S**	LM
4	LM	LM	N	LM	LM	N	LM
5	LM	LM	N	LM	LM	**S**	LM

Restrizioni: N = nessuna restrizione; LM = leggera a moderata; S = severa

* I dati analitici disponibili comprendono solo una parte (rilevante) degli ioni presenti nel suolo. Questo giustifica la discrepanza tra ECw e TDS nel pozzo tre. In accordo con le stime accettate di TDS a partire da ECw [TDS (mg l^{-1})= ECw (dS m^{-1}) x 640], il valore di TDS del pozzo 3 dovrebbe essere 2835.2 mg l-1, contro i 1557.34 mg l-1 calcolati dalla tabella x. In tal caso la restrizione sarebbe severa (S), e quindi coerente con l'ECw, anziché leggera a moderata (LM).

Bibliografia

Ameyan, O., 1984. Surface soil variability of a map unit on Niger river alluvium. Soil Sci. Soc. Am. J., vol 50,: 1289-129

Ben-Dor E., Banin A., 1995. *Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties*. Soil Sci. Soc. Am. J. 59, 364–372.

Brady N.C., Weil R.R., 2002. *The nature and properties of soils*. Printice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 960.

Brown D. J., Shepherd K. D., Walsh M. G., Mays M. D., Reinsch, T. G., 2006. *Global soil characterization withVNIRdiffuse reflectance spectroscopy*. Geoderma 132, 273–290

Calabrò G., **Leone A.P.**, Amenta P., 2010. *Prediction of soil properties from reflectance spectroscopy using multivariate statistical analysis and artificila intelligence methods. A comparative study.* Proceedings of 11th Smposium on Statistical Methods for Food Industry. Benevento, 23-26 February, 2010. 89-98. ISBN n. 88-901015-8-X

Calabrò G., Tosca M., 2009. *SpecPro release a 2.95, Software per il processing di dati spettroradiometrici*. Report CNR-ISAFoM

C.I.E., 1931. *Commission Internationale de l'Eclairage*, Proc. 8th session, Cambrige, England, 1931, Bureau Central de la CIE, Paris, France

Clark R.N., 1999. *Spectroscopy of roks and minerals, and principles of spectroscopy*. http://speclab.cr.usgs.gov

Costantini E.A.C., Urbano F., Bonati G., Nino P., Fais A., 2007- *Atlante nazionale delle aree a rischio di desertificazione*. CRA - INEA, pp. 108

Courault D., Girard M.C. e Escadafal R., 1988. *Modélisation de la couleur des soils par télédétection*, Actes du 4° Coll. Int. "Signatures spectrales d'objects en télédétection", Aussois, Janvier (1988), pp 357-362.

Dalal R. C., Henry R. J., 1986. *Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry*. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 120–123.

de Jong S., 1992. *The analysis of spectroscopical data to map soil types and soil crusts of Mediterranean eroded soils*. Soil technology. No 5, pp 199-211

di Gennaro A., 2002. *I sistemi di terra della Campania*. SELCA, Firenze. pp 63

Doorembos J. e Pruitt W.O. 1977. Guidelines for predicting Crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper n.24

Efron B., Tibshirani R.J., 1993. *An introduction to the bootstrap*. Monographs on Statistics and Applied Probability, vol. 57. Chapman & Hall, London, UK.

Ellis S. e Mellor, A., 1995. *Soils and environments*. Routledge, London.

Escadafal R., 1993. *Remote sensing of soil color: principles and applications*. Remote Sensing Reviews. No 7, pp 261-279.

FAO, Food and Agriculture Organisation on the United Stations, 2006. World Reference Base for Soil Resources. *A framework for international classification, correlation and communication*. World Soil Resources Reports, 103.

FAO, 1998. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop requirements*. FAO Irrigation and Drainage paper 56. pp 299

Galligani U., 2000. *I suoli organici: gli Istosuoli*. In G. Sanesi "Elementi di pedologia. I suoli, loro proprietà, gestione e relazioni con l'ambiente". Calderini-Edagricole, 229-240

Giardini A., Vecchiettini M., 2000. *Mais o Granturco (Zea mays L.)*. In R. Baldoni e L. Giardini "Coltivazioni erbacee". Pàtron Editore, Bologna. 155-199

Fearn, T., 2000. *Savitzky-Golay filters*. NIR News 11 (6), 14–15.

Fernandez R.N., Schultze D.G., 1987. *Calculation of soil color from reflectance spectra*. Soil Sci. Soc. Am. J., No 51, pp. 1277-1282

Fitzpatrick, E.A., 1986. *An introduction to soil science*. *Longman Scientific & Technical,* London. 255 pp

Hair J.F. Jr., Anderson R.E., Tatham R.L., Black W.C., 1995. *Multivariate data analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

Hillel D., 1998. *Environmental soil physics*. Elsevier. pp 494

Huang P.M., Wang M.C., Wang M.K., 2005. *Mineral-organic-microbial interactions*. In "Encyclopedia of Soil in the Environment", (D. Hill, , ed). Academic Press, Vol Two 486-499

Isabel R.F., 1998. *The Australian soil classification*. Callingwood, Australia. CSIRO Publishing, 84-89

Kooistra L. Wanders J., Epema G.F., Leuven R.S.E.W., Wehrens R., Buydens L.M.C., 2003. *The potential of field spectroscopy for the assessment of sediment properties in river floodplains*. GAnalytica Chimica Acta 484, 189–200

Landi R., 1999. *Agronomia e ambiente*. Edagricole, Bologna. pp 655

Leone A.P., 2000. *Spettrometria e valutazione della riflettanza spettrale dei suoli nel dominio ottico 400 – 2500 nm*. Rivista Italiana di Telerilevamento, n. 19, 1-26.

Leone A.P., Calabrò G., Coppola E., Maffei C., Menenti M., Tosca M., Vella M., Buondonno A., 2008. *Prediction of soil properties with VIS-NIR-SWIR reflectance spectroscopy and artificial neural networks. A case study*. Advances in GeoEcology, 39, 689-702

Leone A.P., Sommer S., 2000. *Multivariate analysis of laboratory spectra for assessment of soil development and soil degradation in southern Apennines (Italy)*. Remote Sensing of Environment, 72: 346-359

Leone A.P., Steduto P, 1998. Proceedings of the First Trans-National Meeting on '*Salinity as a limiting factor for agricultural productivity in the Mediterranean basin*'. Naples, 24-25 March 1997, pp 228

Levy G.J., Shainberg I, 2004. Sodic soils. In "Encyclopedia of Soil in the Environment", (D. Hill, , ed). Academic Press, Vol Three, 504-513

Loercher G., 1996. *Investigation of Data Processing Model for Integrating Hyperspectral Data Sets into GIS*. In: Proc. Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco, California, 24-27 June 1996, Vol. 3, pp 112-117.

Maas E.V., 1986. *Salt tolerance of plants*. Applied Agricultural Research 1, 12–25

MAF, Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste, Direzione Generale della Produzione Agricola, 1983. *Proposta metodologica di classificazione attitudinale del territorio*. Supplemento degli Annali dell'Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, Vol, XIV. pp 55

Mannini P., 2004. *Le buone pratiche agricole per risparmiare acqua.* I supplementi di agricoltura, n. 18.

Martinez-Beltran J, Manzur C.L., 2005. *Overview of salinity problems in the world and FAO strategies to address the problem*. Proceedings of the international salinity forum, Riverside, California, April 2005, 311–313.

Morano N., *Progettazione opere irrigue in sinistra regi lagni. Studio economico- agrario*. Consorzio Generale di Bonifica del Bacino Inferiore del Volturo, Caserta. pp 193

Munsell Color Company, 1975. *Munsell Soil Color Charts*. Macbeth Division of Kollmorgen, Baltimore, MD

Naes T., Isaksson T., Feam T., Davies T., 2002. *A User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and Classification*; NIR Publications: Chichester, UK.

Nothcote K.H., Shene J.K.M., 1972. *Australian soils with saline and sodic properties*. CSIRO Australia Soil Publication, n. 27.

Odeh I.O.A, McBrateney A.B., 2004. *Pedometrics*. in Encyclopedia of soils in the environment (D. Hillel, ed.) - Vol. III, 166-175. Elsevier.

Post D.F., Bryant R.B., Batchily A.K., Huete A.R., Levine S.J., Mays M.D., Escadafal R., 1993. C*orrelations between field and laboratory measurements of soil color*. In: Bigham J.M., C iolkosz E.J.Eds "Soil Color". SSSA Special Publication Number 31, 35-49.

Regione Campania, Assessorato all'Agricoltura, Settore SIRCA, 2004. *Progetto CUAS, Carta dell'Utilizzazione Agricola del Suolo*

Rengasamy P., 2006. *World salinization woth emphasis on Australia*. Journal of Experiemtal Botany, 5, 1017-1023

Shainberg I., Levy G.J., 2004. *Salination processes*. In "Encyclopedia of Soil in the Environnment", (D. Hill, , ed). Academic Press, Vol Three, 429-435

Scheinost A.C., Chavernas A., Barrón V., Torrent J., 1998. *Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soils*. Clays and Clay Miner., 5, pp 528 – 536.

Shepherd K. D., Walsh M. G., 2002. *Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties*. Soil Sci. Soc. Am. J. 66, 988–998.

Shepherd K.D., Walsh M.G., 2006. *Diffuse Reflectance Spectroscopy for Rapid Soil Analysis*. In Encyclopedia of Soil Science. Taylor and Francis. 480-484

Soil Survey Staff, 1990. *Soil Taxonomy*, 4th edn. SMSS Technical Monograph, n.6, Virgina: Balcksburg, 114-115

Talsma T., 1963. *The control of saline groundwater*. Thesis for the degree of Doctor in Land technology, University of Wageningen. Reprint of Bulletin of University of Wageningen 63, 1–68.

Tenenhaus M., 1998. *La régression PLS, théorie et Pratique*, Technip, Paris.

Torrent J., Barrón V., 1993. *Laboratory measurement of soil color: theory and practice*. In: Bigham J.M., C iolkosz E.J.Eds "Soil Color". SSSA Special Publication Number 31, 21-33

Tuller M., Or D, 2004. Water retention and characteristic curve. In . In "Encyclopedia of Soil in the Environnment", (D. Hill, , ed). Academic Press, Vol Four 278-289

Ravelli F., Rota P., 2002. *Research on crop water requirements and water production functions in the context of the irrigation programme of the southern Italy Development Found (Cassa per lo Sviluppo del Mezzogiorno) (1950-1980)*. In, A.P. Leone and A. Basile eds, Proceedings of the Trans-national Workshop on "Managing water demand in agricolture through pricing. Research issues and lessons learned", Telese Terme, May 24-25 2001, 136-149.

Tarantino E. (a cura di), 1999. *Le acque salmastre come risorsa idrica: limiti e prospettive*. POM, Misura 2, Progetto 'OTRIS'Foggia, 5 Maggio 1999

United States Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 60. Washington: US Government Printer

Valeriano, M.M., Epiphanio, J.C.N., Formaggio, A.R., Oliveira, J.B., 1995. *Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil*. Int. J. Remote Sens. 1: 113-128

van Genuchten, M.Th. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892–898

Viscarra Rossel R.A., 2008. *ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 90, 72–83

Viscarra-Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik. L.J., Skjemstad J.O., 2006.a. *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. Geoderma, 131, 59-75

Viscarra Rossel R.A., McGlynn R.N, McBratney A.B., 2006.b. *Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-visNIR diffuse reflectance spectroscopy*. Geoderma, 137, 70-72

Wild A., 2003. *Soils, land and food: managing the land during the twenty-first century*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

White R.E., 2003. *Soils for fine wines*. Oxford University Press. pp. 279

Wise B.M., Gallagher N.B., Cro R., Shaver J.M., 2003. *PLS Toolbox Version 3.0 for use with Matlab*. Eigenvector Research Inc., 171 pp.

Wösten J.H.M., 2006. *Pedotransfer functions*. in Encyclopedia of Soil Science. Taylor and Francis. 1257-1261

Wösten J.H.M.; Lilly, A.; Nemes, A.; Le Bas, C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma 90, 169–185.

Wyszecki G., Stiles W.S., 1982. *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. John Wiley and Sons, New York, pp 950.

Annesso A

Classificazione delle proprietà del suolo (da: Costanti, 2007. *Linee Guida dei Metodi di Rilevamento e Informatizzazione dei Dati Pedologici*. SELCA, Firenze, *mod.* e altre fonti)

Classi	Descrizione
Reazione (pH)	
< 4.5	Estremamente acida
≥ 4.5 e < 5.0	Fortemente acida
≥ 5.0 e < 6.0	Moderatamente acida
≥ 6.0 e < 6.5	Debolmente acida
≥ 6.5 e < 7.3	Neutra
≥ 7.3 e < 7.8	Debolmente alcalina
≥ 7.8 e < 8.4	Moderatamente alcalina
≥ 8.4 e < 9.0	Fortemente alcalina
≥ 9.0	Estremamente alcalina
Carbonio organico (OC) (g kg^{-1})	
> 17.4	Suolo ben fornito di sostanza organica*
≥ 11.6 e <17.4	Suolo fornito di sostanza organica
≥ 5.8 e <11.6	Sostanza organica bassa
< 5.8	Sostanza organica molto bassa
*sostanza organica (OM) = OC x 1.724. Con riferimento al contenuto di OM, le classi diventano:	
> 30	Suolo ben fornito di sostanza organica*
≥ 20 e < 30	Suolo fornito di sostanza organica
≥ 10 e < 20	Sostanza organica bassa
< 10	Sostanza organica molto bassa
Carbonati ($CaCO_3$) (g kg^{-1})	
< 5	Non calcareo
≥ 5 e < 10	Scarsamente calcareo
≥ 10 e < 50	Debolmente calcareo
≥ 50 e < 100	Moderatamente calcareo
≥ 100 e < 200	Molto calcareo
≥ 200 e < 400	Fortemente calcareo
≥ 400	Estremamente calcareo
Conducibilità elettrica in estratto 1:5 (ECw) (dS m^{-1})	
> 2	Eccessiva
> 1 e ≤ 2	Molto forte
> 0.5 e ≤ 1	Forte
> 0.25 e ≤ 0.5	Forte moderata
≤ 0.25	Trascurabile

Percentuale di sodio scambiabile (ESP)	
> 15	Molto forte
> 8 e ≤ 15	Forte
≤ 8	Trascurabile
Capacità di scambio cationico (CEC) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	
< 5	Molto bassa
≥ 5 e <10	Bassa
≥ 10 e <15	Moderatamente bassa
≥ 15 e <24	Moderatamente alta
≥ 24 e <50	Alta
≥ 50	Molto alta
Contenuto di potassio scambiabile (K^+) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	
< 0.13	Molto basso
≥ 0.13 e < 0.26	Basso
≥ 0.26 e < 0.39	Medio
≥ 0.39 e < 0.52	Alto
≥ 0.52	Molto alto
Contenuto di sodio scambiabile (Na^+) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	
< 1	Normale
≥ 1 e < 2	Leggermente alto
≥ 2 e < 3	Alto
≥ 3	Molto alto
Capacità di acqua disponibile (AWC) (mm/ profondità di 100 cm di suolo)	
< 50	Molto bassa
≥ 30 e < 100	Bassa
≥ 100 e < 150	Moderata
≥ 150 e < 200	Alta
≥ 200	Molto alta
Conducibilità satura (Ks) (cm $giorno^{-1}$)	
< 0.0864	Molto bassa
≥ 0.0864 e < 0.864	Bassa
≥ 0.864 e < 8.64	Moderatamente bassa
≥ 8.64 e < 86.4	Moderatamente alta
≥ 86.4 e < 864	Alta
≥ 864	Molto alta
Densità apparente (Db)	
< 1.2	Bassa
≥ 1.2 e < 1.4	Media
≥ 1.4	Alta

Termini utilizzati per la descrizione della tessitura del suolo

Nomi comuni	Termini generali	Classi fondamentali
Suoli sabbiosi	Grossolana	Sabbiosa
		Sabbiosa franca
	Moderatamente grossolana	Franca sabbiosa
		Franca
	Media	Franca limosa
Suoli franchi		Limosa
		Franca sabbiosa argillosa
	Moderatamente fine	Franca limosa argillosa
		Franca argillosa
		Argillosa sabbiosa
Suoli argillosi	Fine	Argillosa limosa
		Argillosa

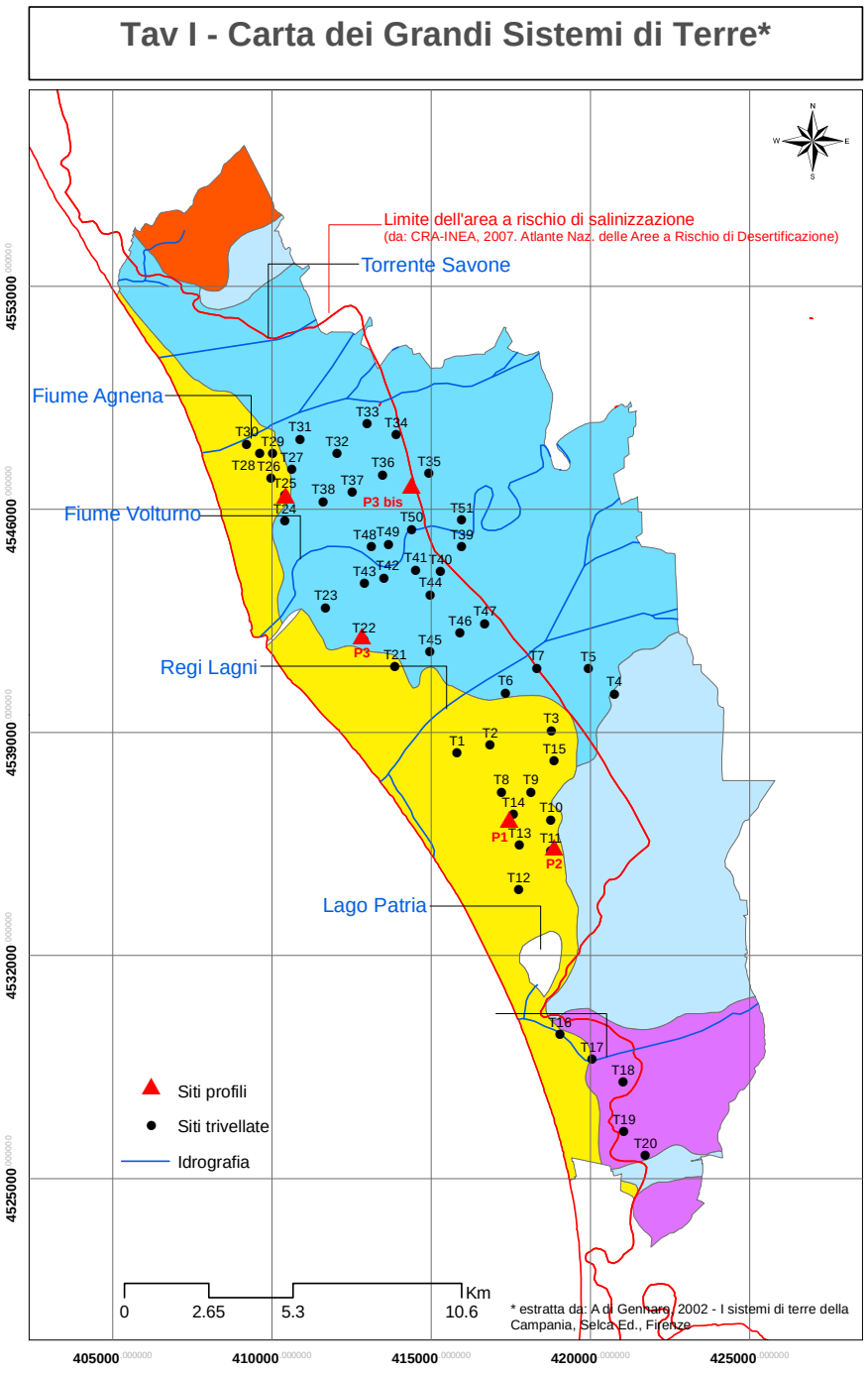
(da Brady and Weil, 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall. mod.)

TAVOLE

Elenco delle Tavole

Tavola	
I	Carta dei grandi sistemi di terre
II	Carta dei sistemi e sottosistemi di terre
III	Carta dell'uso del suolo
IVa	Carta della reazione (top-soil)
IVb	Carta della reazione (sub-soil)
Va	Carta del contenuto di argilla (top-soil)
Vb	Carta del contenuto di argilla (sub-soil)
VIa	Carta del contenuto di sabbia (top-soil)
VIb	Carta del contenuto di sabbia (sub-soil)
VIIa	Carta del contenuto di limo (top-soil)
VIIb	Carta del contenuto di limo (sub-soil)
VIIIa	Carta della tessitura (top-soil) - Termini generali
VIIIb	Carta della tessitura (sub-soil) - Termini generali
IXa	Carta della tessitura (top-soil) - Classi fondamentali
IXb	Carta della tessitura (sub-soil) - Classi fondamentali
Xa	Carta del carbonio organico (top-soil)
Xb	Carta del carbonio organico (sub-soil)
XIa	Carta dei carbonati (top-soil)
XIb	Carta dei carbonati (sub-soil)
XIIa	Carta della capacità di scambio cationico (top-soil)
XIIb	Carta della capacità di scambio cationico (sub-soil)
XIIIa	Carta del Ca+Mg scambiabili (top-soil)
XIIIb	Carta del Ca+Mg scambiabili (sub-soil)
XIVa	Carta del K scambiabile (top-soil)
XIVb	Carta del K scambiabile (sub-soil)
XVa	Carta del Na scambiabile (top-soil)
XVb	Carta del Na scambiabile (sub-soil)

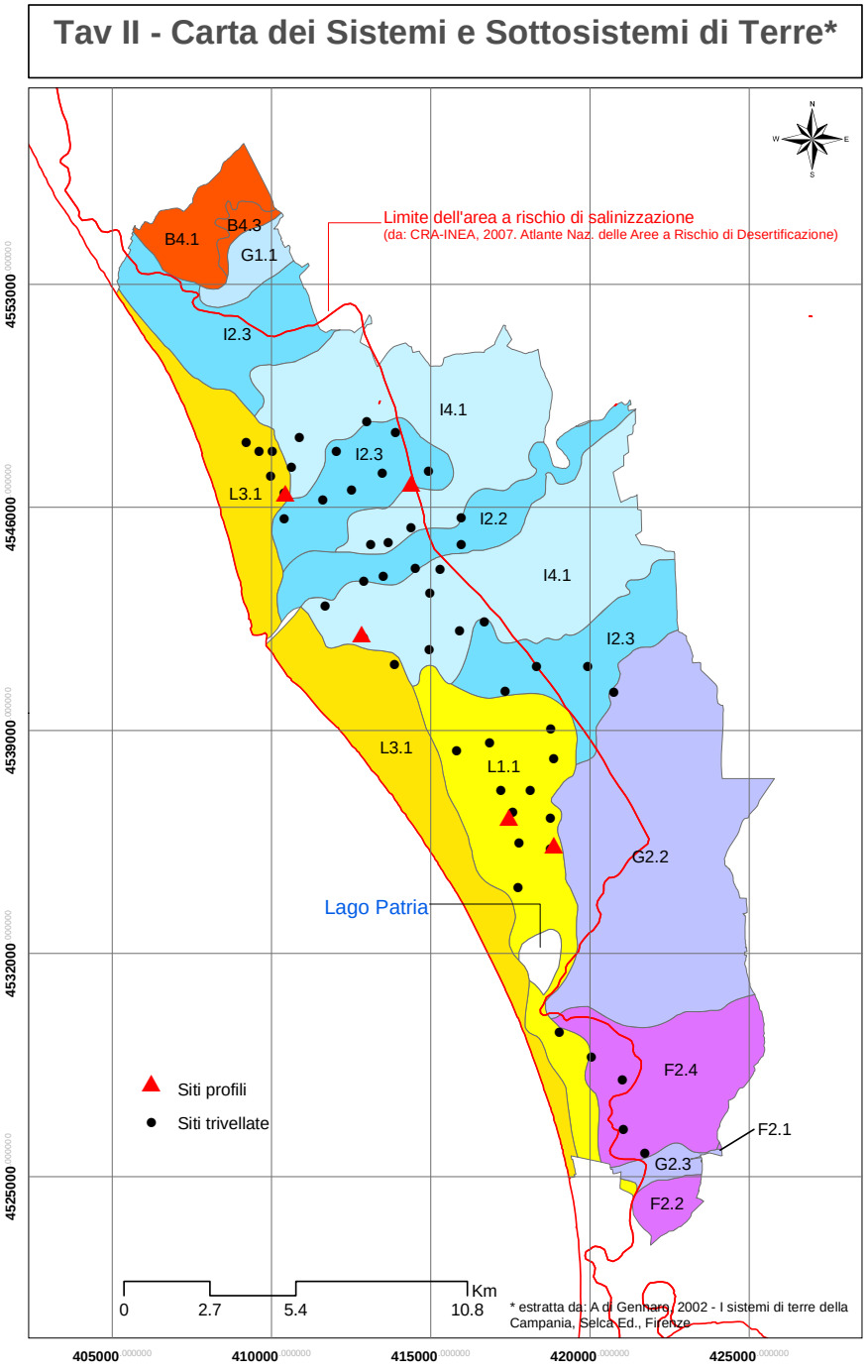
XVIa	Carta della salinità/sodicità (top-soil)
XVIb	Carta della salinità/sodicità (sub-soil)
XVIIa	Carta della limitazione per le colture (top-soil)
XVIIb	Carta della limitazione per le colture (sub-soil)
XVIIIa	Carta dell'ECW 1:5 (top-soil)
XVIIIb	Carta dell'ECW 1:5 (sub-soil)
XIXa	Carta della goethite (top-soil)
XIXb	Carta della goethite (sub-soil)
XXa	Carta della smectite (top-soil)
XXb	Carta della smectite (sub-soil)
XXIa	Carta della caolinite 2164 nm (top-soil)
XXIb	Carta della caolinire 2164 nm (sub-soil)
XXIIa	Carta della caolinite 2201 nm (top-soil)
XXIIb	Carta della caolinire 2201 nm (sub-soil)
XXIIIa	Carta del colore del suolo (top-soil)
XXIIIb	Carta del colore del suolo (sub-soil)
XXIVa	Carta dello Hue Munsell (top-soil)
XXIVb	Carta dello Hue Munsell (sub-soil)
XXVa	Carta del Value Munsell (top-soil)
XXVb	Carta del Value Munsell (sub-soil)
XXVIa	Carta del Chroma Munsell (top-soil)
XXVIb	Carta del Chroma Munsell (sub-soil)
XXVII	Carta dell'AWC lab. (top-soil)
XXVIIIa	Carta dell'AWC-PTF (top-soil)
XXVIIIb	Carta dell'AWC-PTF (sub-soil)
XXIXa	Carta della Db-PTF (top-soil)
XXIXb	Carta della Db -PTF (sub-soil)
XXXa	Carta della Ks-PTF (top-soil)
XXXb	Carta della Ks -PTF (sub-soil)


Tav I - Carta dei Grandi Sistemi di Terre*
Limite dell'area a rischio di salinizzazione
(da: CRA-INEA, 2007. Atlante Naz. delle Aree a Rischio di Desertificazione)
Torrente Savone
Fiume Agnena
Fiume Volturno
Regi Lagni
Lago Patria
P1
P2
P3
P3 bis
Siti profili
Siti trivellate
Idrografia
0
2.65
5.3
10.6
Km
* estratta da: A di Gennaro, 2002 - I sistemi di terre della Campania, Selca Ed., Firenze
4553000
4546000
4539000
4532000
4525000
405000
410000
415000
420000
425000

LEGENDA della Carta dei Sistemi e Sottosistemi di Terre

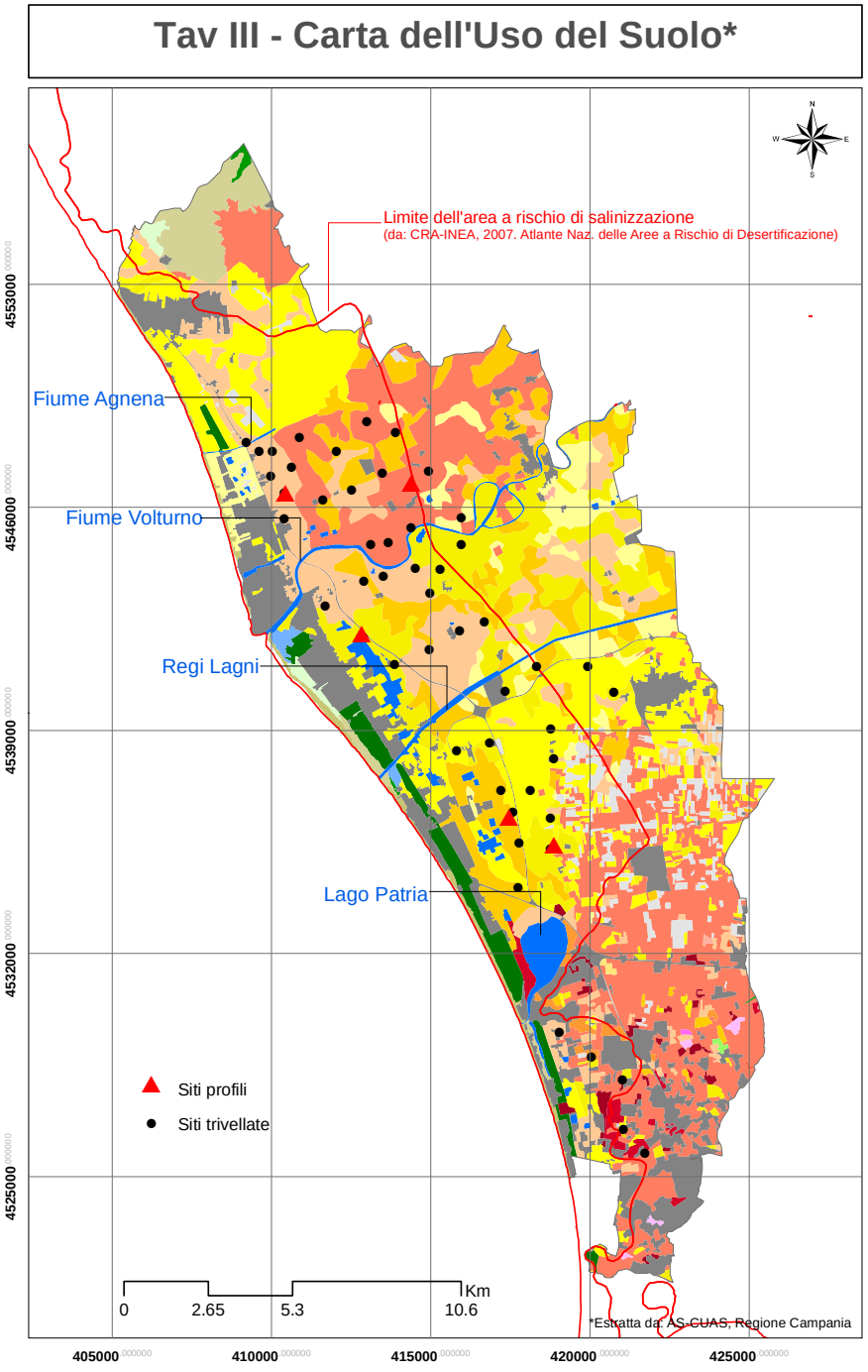
GRANDE SISTEMA	DEFINIZIONE SINTETICA	Unità cartografica
Montagna calcarea	Aree della media e bassa montagna calcarea a interferenza climatica* da forte a moderata	B
Complessi vulcanici	Sommità e versanti degli apparati vulcanici, ad interferenza climatica bassa, con elevato rischio di deficit idrico estivo	F
Pianura pedemontana	Aree della pianura pedemontana, morfologicamente rilevate rispetto al livello di base della pianura alluvionale, ad interferenza climatica da assente a lieve, con rischio di deficit idrico estivo da moderato a elevato	G
Pianura alluvionale	Aree della pianura alluvionale, ad interferenza climatica assente o lieve, con rischio di deficit idrico estivo da moderato a elevato	I
Pianura costiera	Aree della pianura costiera, ad interferenza climatica assente o lieve, con elevato rischio di deficit idrico estivo	L

*classi di interferenza climatica: lieve = diminuzione apprezzabile delle potenzialità produttive delle colture più sensibili; moderata = diminuzione significativa delle potenzialità produttive per alcune colture, tali da sconsigliarne l'impianto; forte = diminuzione elevata delle potenzialità produttive per tutte le colture comuni; molto forte = impossibilità di praticare agricoltura; esistenza di limitazioni più o meno intense anche per la selvicoltura (da A. di Gennaro, 2002).


Tav II - Carta dei Sistemi e Sottosistemi di Terre*
Limite dell'area a rischio di salinizzazione
(da: CRA-INEA, 2007. Atlante Naz. delle Aree a Rischio di Desertificazione)
B4.1
B4.3
G1.1
I2.3
I4.1
I2.3
L3.1
I2.2
I4.1
I2.3
L3.1
L1.1
G2.2
Lago Patria
F2.4
F2.1
G2.3
F2.2
Siti profili
Siti trivellate
0
2.7
5.4
10.8
Km
* estratta da: A di Gennaro, 2002 - I sistemi di terre della Campania, Selca Ed., Firenze
4553000
4546000
4539000
4532000
4525000
405000
410000
415000
420000
425000

LEGENDA della Carta dei Sistemi e Sottosistemi di Terre

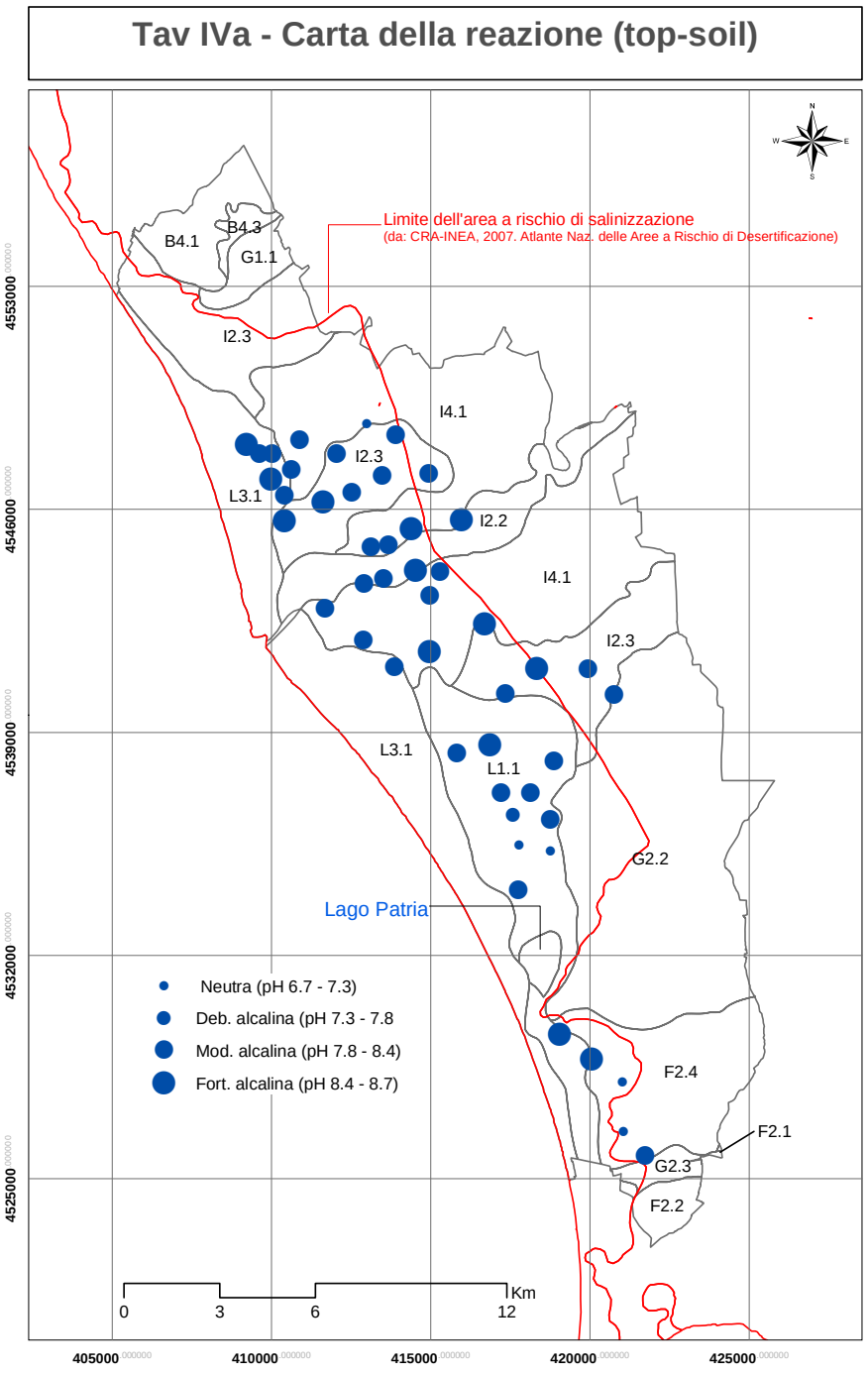
Grande sistema (B): Montagna calcarea		
SISTEMA	SOTTOSISTEMA	Unità cartografica
Rilievi calcarei appenninici con coperture piroclastiche (B4)	Rilievi preappenninici a moderata energia, con coperture piroclastiche	B4.1
	Versanti bassi dei rilievi preappenninici su tufo grigio campano e depositi di versante	B4.3
Grande sistema (F): Complessi vulcanici		
Rilievi vulcanici dei Campi Flegrei (F2)	Colline flegree su tufo giallo con coperture di ceneri e pomici, a energia di rilievo moderata o elevata	F2.1
	Colline flegree su tufo giallo con copertura di ceneri e pomici, a bassa energia di rilievo	F2.2
	Versanti esterni dell'Archicaldera flegrea	F2.4
Grande sistema (G): Pianura pedemontana		
Pianura pedemontana dei rilievi calcarei (G1)	Pianura pedemontana dei monti Massico, Maggiore e Tifatini	G1.1
Pianura pedemontana dei rilievi vulcanici (G2)	Pianura pedemontana flegrea	G2.2
	Conche flegree	G2.3
Grande sistema (I): Pianura alluvionale		
Aree relativamente rilevate della piana alluvionale del basso corso del fiume Volturno (I2)	Aree della pianura alluvionale del fume Volturno prossime all'asta fluviale	I2.2
	Aree bordiere della pianura alluvionale del fiume Volturno	I2.3
Aree morfologicamente depresse della pianura alluvionale del basso corso dei fiume Volturno (I4)	Aree relativamente depresse della pianura alluvionale del fiume Volturno	I4.1
Grande sistema (L): Pianura costiera		
Depressioni retrodunari (L1)	Depressioni retrodunari della pianura costiera del fiume Volturno	L1.1
Apparati dunari e spiagge (L3)	Apparati dunari e spiagge	L3.1


Tav III - Carta dell'Uso del Suolo*
Limite dell'area a rischio di salinizzazione
(da: CRA-INEA, 2007. Atlante Naz. delle Aree a Rischio di Desertificazione)
Fiume Agnena
Fiume Volturno
Regi Lagni
Lago Patria
Siti profili
Siti trivellate
0
2.65
5.3
10.6
Km
*Estratta da: AS-CUAS, Regione Campania
4553000
4546000
4539000
4532000
4525000
405000
410000
415000
420000
425000

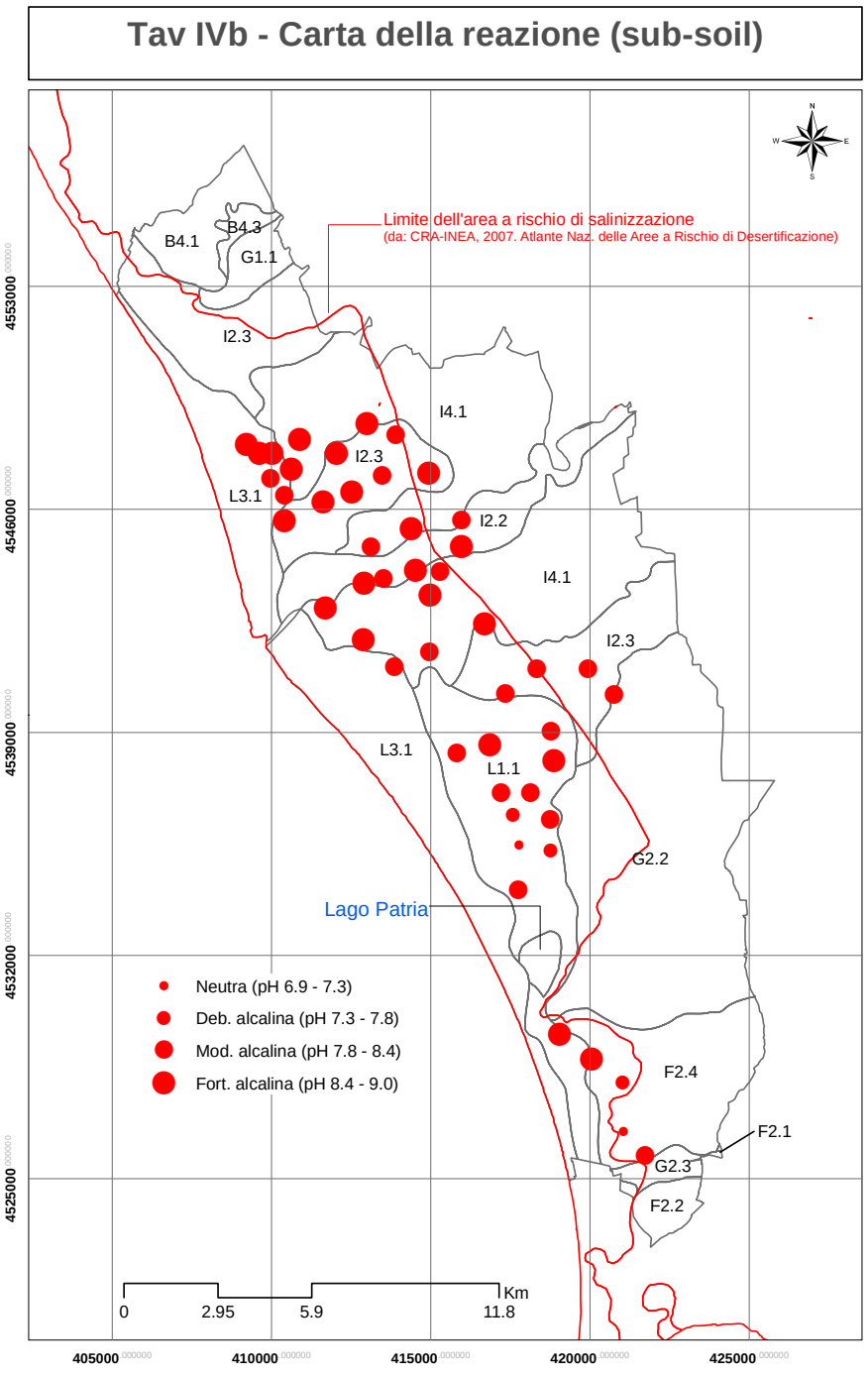
LEGENDA della Carta dell'Uso del Suolo

CLASSE		DESCRIZIONE
91	**(U)**	**Ambiente urbanizzato e superfici artificiali Insediamenti residenziali**. insediamenti produttivi, dei servizi pubblici e privati, delle reti e delle aree infrastrutturali. Aree estrattive, cantieri, discariche e terreni artefatti ed abbandonati. Le superfici ricoperte artificialmente occupano più del 50% della superficie totale
92	**(A)**	**Acque**. Acque interne e costiere, specchi e corsi d'acqua, naturali ed artificiali
	(S)	**Colture protette** Le superfici ricoperte da strutture serricole occupano più del 50% della superficie totale
931	(S1)	Orticole e frutticole
932	(S2)	Floricole, piante ornamentali e vivai
	(1)	**Seminativi** Superfici coltivate, regolarmente arate e generalmente sottoposte ad un sistema di rotazione (cereali, leguminose, piante da tubero, coltivazioni industriali, oleifere, ortive, piante ornamentali, colture foraggere avvicendate). Sono comprese superfici ricoperte artificialmente che occupano meno del 50% della superficie totale
	(1.1)	**Seminativi autunno-vernini**
111	(1)	Cereali da granella. Sono comprese superfici utilizzate a frumento, orzo, avena, mais, sorgo, cereali minori. Non sono comprese superfici utilizzate per erbai o a maturazione cerosa.
114	(4)	Piante da tubero
	(1.2)	**Seminativi primaverili-estivi**
121	(1)	Cereali da granella. Sono comprese superfici utilizzate a frumento, orzo,avena, mais, sorgo, cereali minori. Non sono comprese superfici utilizzate per erbai o a maturazione cerosa
122	(2)	Ortive
125	(5)	Colture industriali. Sono comprese superfici utilizzate a barbabietola da zucchero, tabacco, altre industriali (piante tessili, medicinali, aromatiche)
	(1.3)	**Foraggere avvicendate** Sono comprese superfici utilizzate a colture foraggere in rotazione che occupano il terreno non più di 5 anni
131	(1.3.1)	Prati avvicendati. Sono comprese superfici utilizzate ad erba medica (in purezza o in miscugli) ed altri prati avvicendati (lupinella, sulla, trifoglio spp., prati di graminacee), che occupano il terreno fra 2 e 5 anni.
132	(1.3.2)	Erbai. Sono comprese superfici utilizzate a mais a maturazione cerosa, erbai di cereali in purezza, altri erbai (fava, favino, trifoglio spp., loglio, veccia, colza, cavolo, polifiti di graminacee e leguminose), che occupano il terreno per non più di un anno.
	(2)	**Colture permanenti** Colture non soggette a rotazione che forniscono più raccolti e che occupano il terreno per un lungo periodo prima dello scasso e della ripuntatura: si tratta per lo più di colture legnose. Sono esclusi i prati, i pascoli e le foreste
21	(2.1)	Vigneti
22	(2.1)	Frutteti e frutti minori. Impianti di alberi o arbusti fruttiferi. Colture pure o miste di specie produttrici di frutta o alberi da frutto in associazione con superfici stabilmente erbate. I frutteti con presenza di diverse associazioni di alberi sono da includere in questa classe. Sono comprese i noccioleti da frutto.
23	(2.3)	Oliveti
	(3)	**Foraggere permanenti** Colture foraggere erbacee fuori avvicendamento che occupano il terreno per un periodo superiore a 5 anni
31	(3.1)	Prati permanenti, prati pascoli e pascoli.

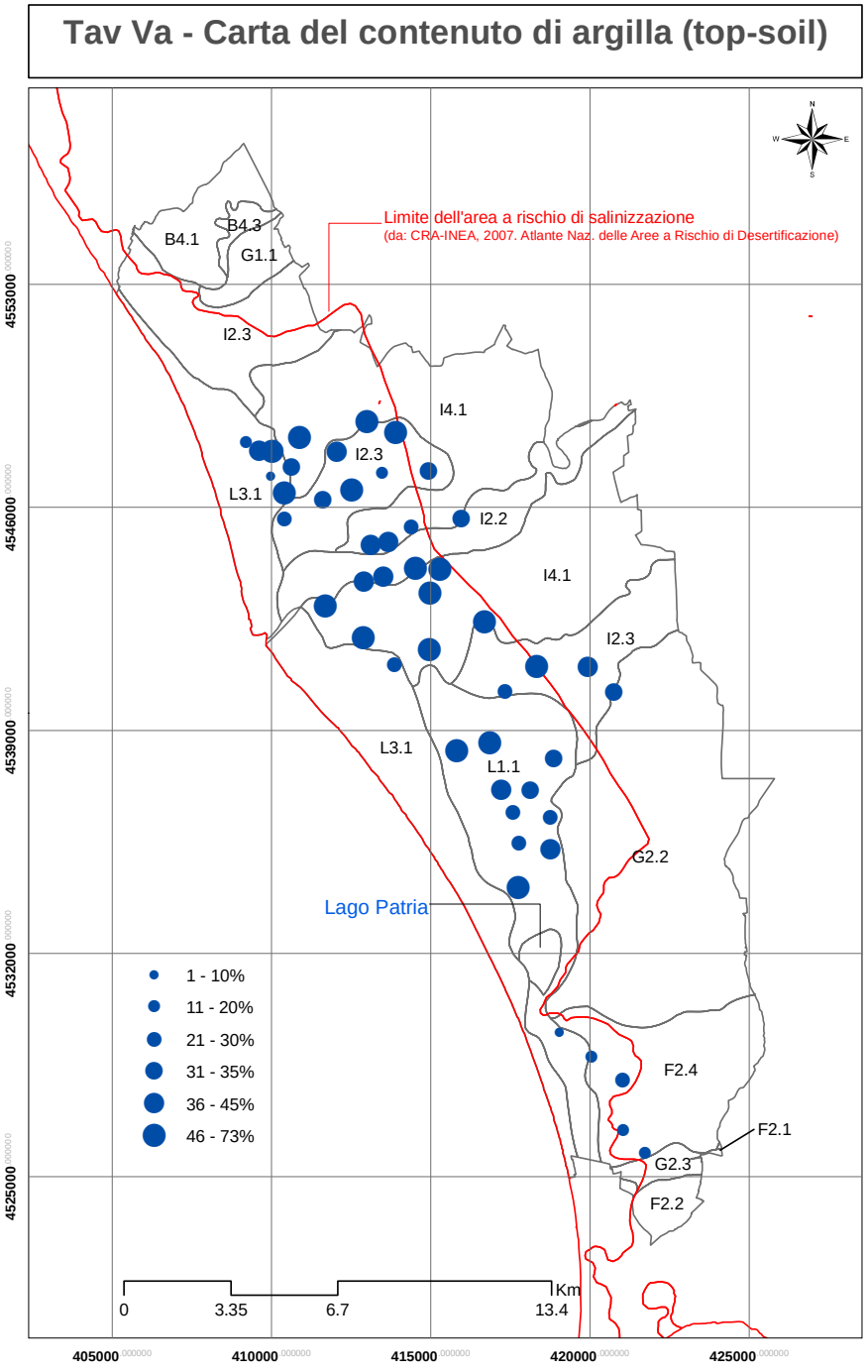
		Sono comprese superfici destinate a foraggere permanenti che vengono utilizzate esclusivamente mediante falciatura e successivo pascolo o utilizzate esclusivamente a pascolo.
32	(3.2)	Pascoli non utilizzato o di incerto utilizzo
	(4)	**Zone agricole eterogenee** Aree con presenza di almeno tre differenti classi d'uso
41	(4.1)	Colture temporanee associate a colture permanenti. Colture temporanee (seminativi e foraggere) in associazione con colture permanenti sulla stessa superficie. Vi sono comprese aree miste, ma non associate, di colture temporanee e permanenti quando queste ultime comprendono almeno il 25% della superficie totale.
42	(4.2)	Sistemi colturali e particellari complessi. Mosaico di appezzamenti singolarmente non cartografabili con varie colture temporanee, prati stabili e colture permanenti occupanti ciascuno meno del 50% della superficie dell'elemento cartografato.
	(5)	**Superfici Boscate**
51	(5.1)	Boschi di latifoglie. Formazioni vegetali, costituite principalmente da alberi, ma anche da cespugli e arbusti, nelle quali dominano le specie forestali latifoglie. La superficie a latifoglie deve costituire almeno il 75% della componente arborea forestale. Sono comprese in tale classe le formazioni boschive ripariali.
52	(5.2)	Boschi di conifere. Formazioni vegetali, costituite principalmente da alberi, ma anche cespugli e arbusti, nelle quali dominano specie forestali conifere. La superficie a conifere deve costituire almeno il 7% della componente arborea forestale. Sono comprese in tale classe le formazioni boschive ripariali.
	(6)	**Copertura vegetale prevalentemente arbustiva e/o erbacea in evoluzione naturale**
61	(6.1)	Aree a pascolo naturale e praterie di alta quota. Aree foraggere a bassa produttività. Sono spesso situate in zone accidentali e/o montane. Sulle aree interessate della classe sono di norma presenti limiti di particelle (siepi, muri, recinti), intesi a circoscriverne e localizzarne l'uso.
62	(6.2)	Cespuglieti e arbusteti. Formazioni vegetali basse e chiuse, stabili, composte principalmente da cespugli, arbusti e piante erbacee (eriche, rovi, ginestre).
	(7)	**Zone aperte con vegetazione rada o asente**
71	(7.1)	Spiagge, dune e sabbie
73	(7.3)	Aree con vegetazione rada
	(8)	**Zone umide**
82	(8.2)	Zone umide marittime



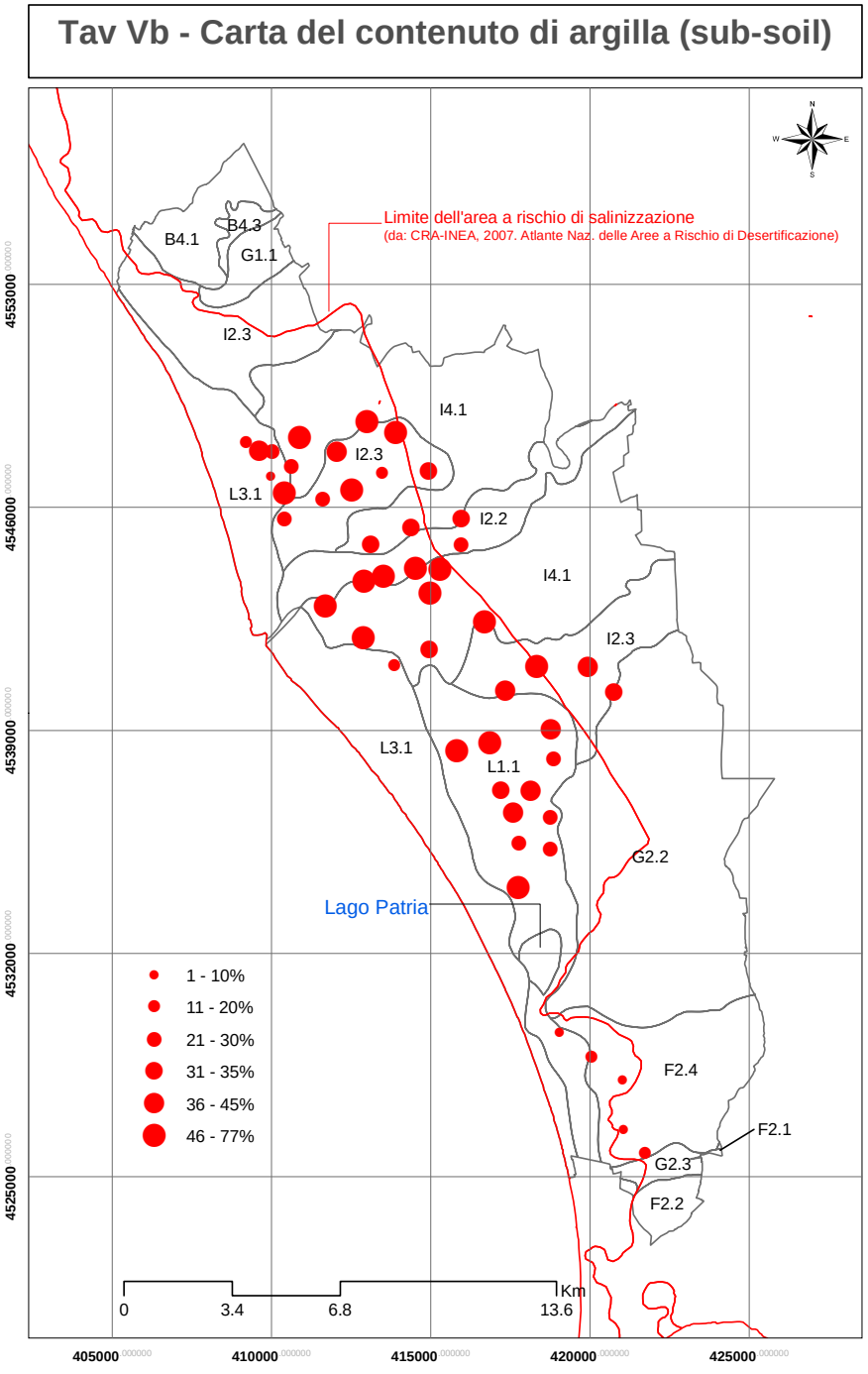
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



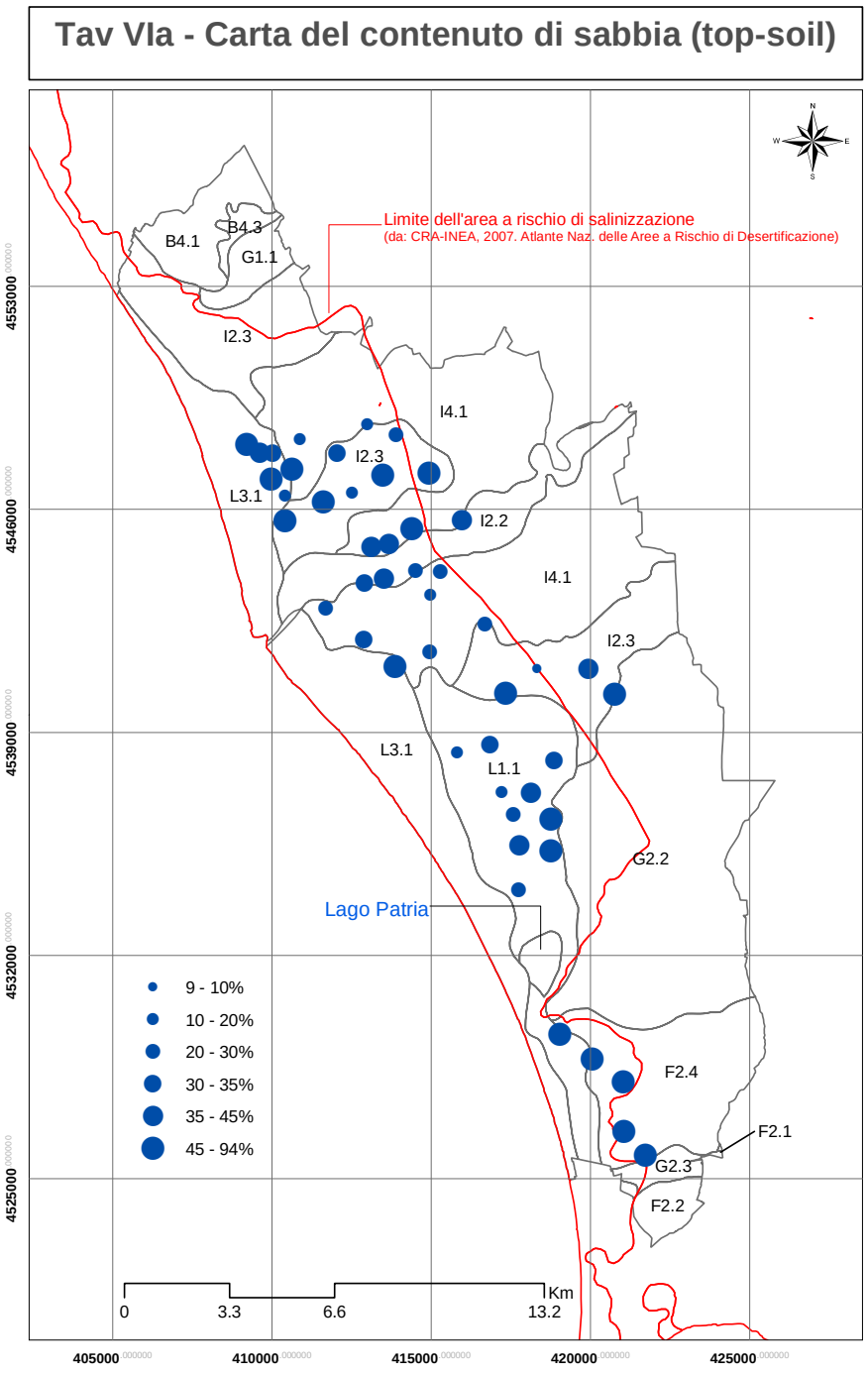
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



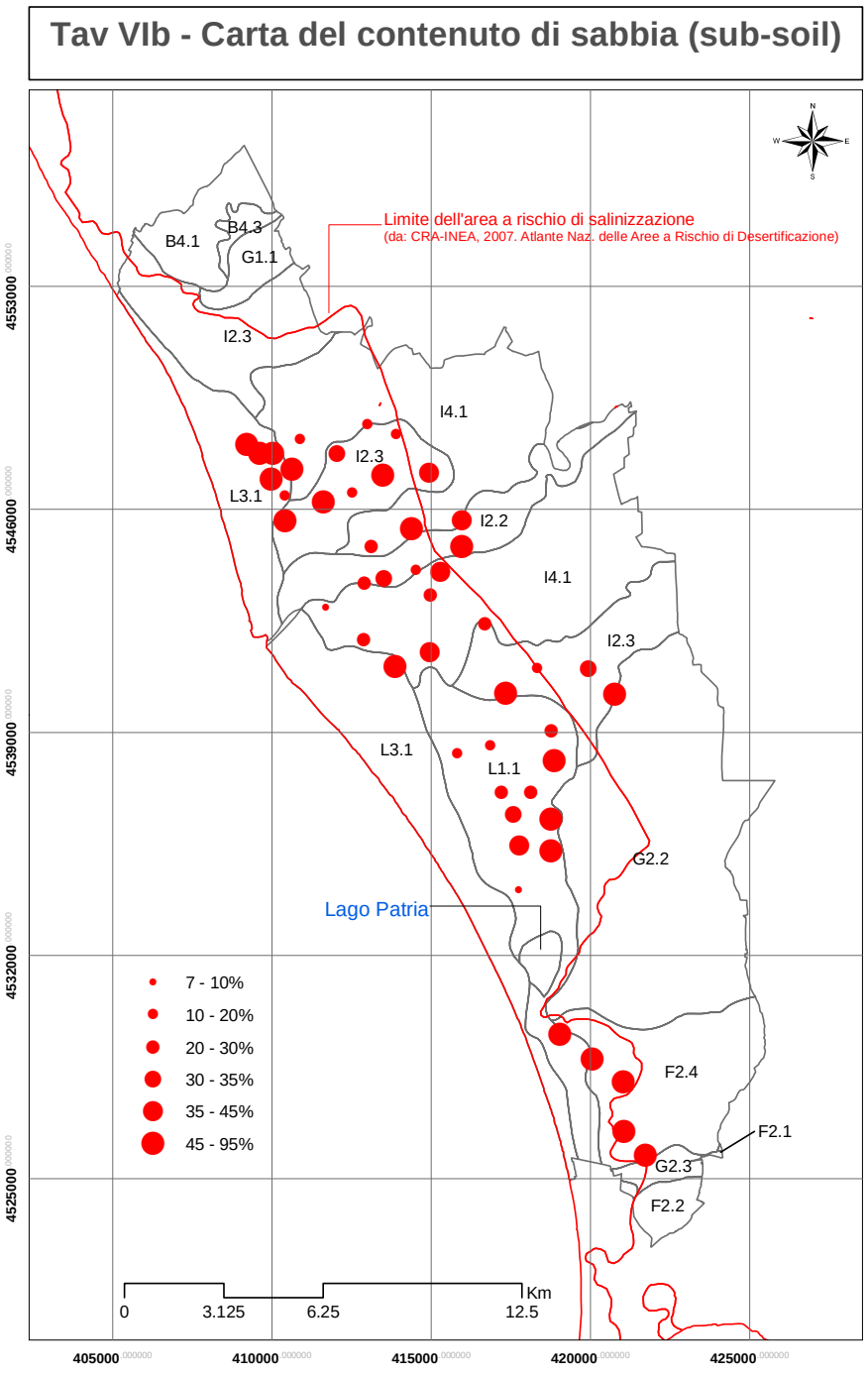
Le classi dei contenuti di argilla sono le stesse riportate nella Tab. 2, utilizzate per convertire i valori di ECw in ECe. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



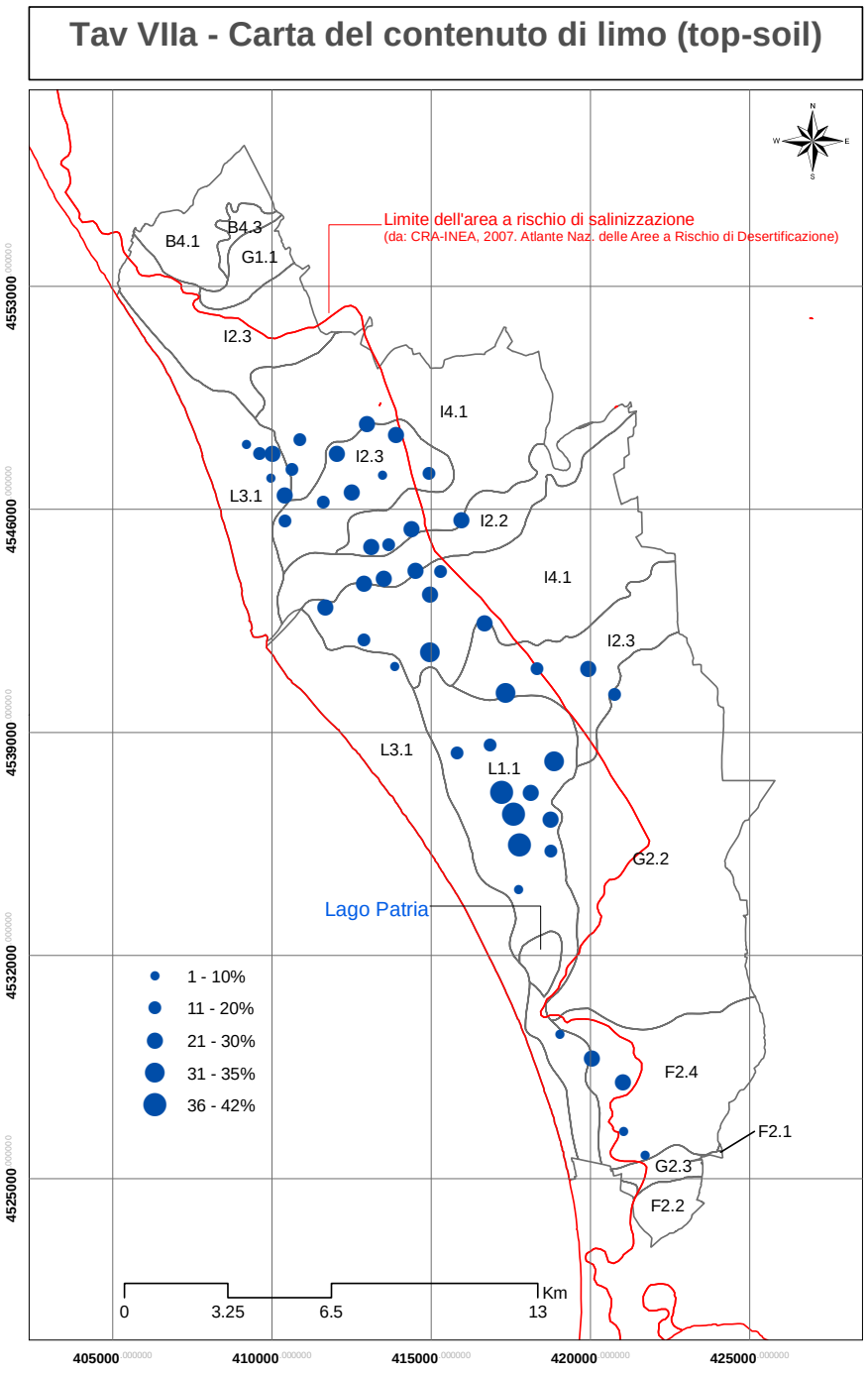
Le classi dei contenuti di argilla sono le stesse riportate nella Tab. 2, utilizzate per convertire i valori di ECw in ECe. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



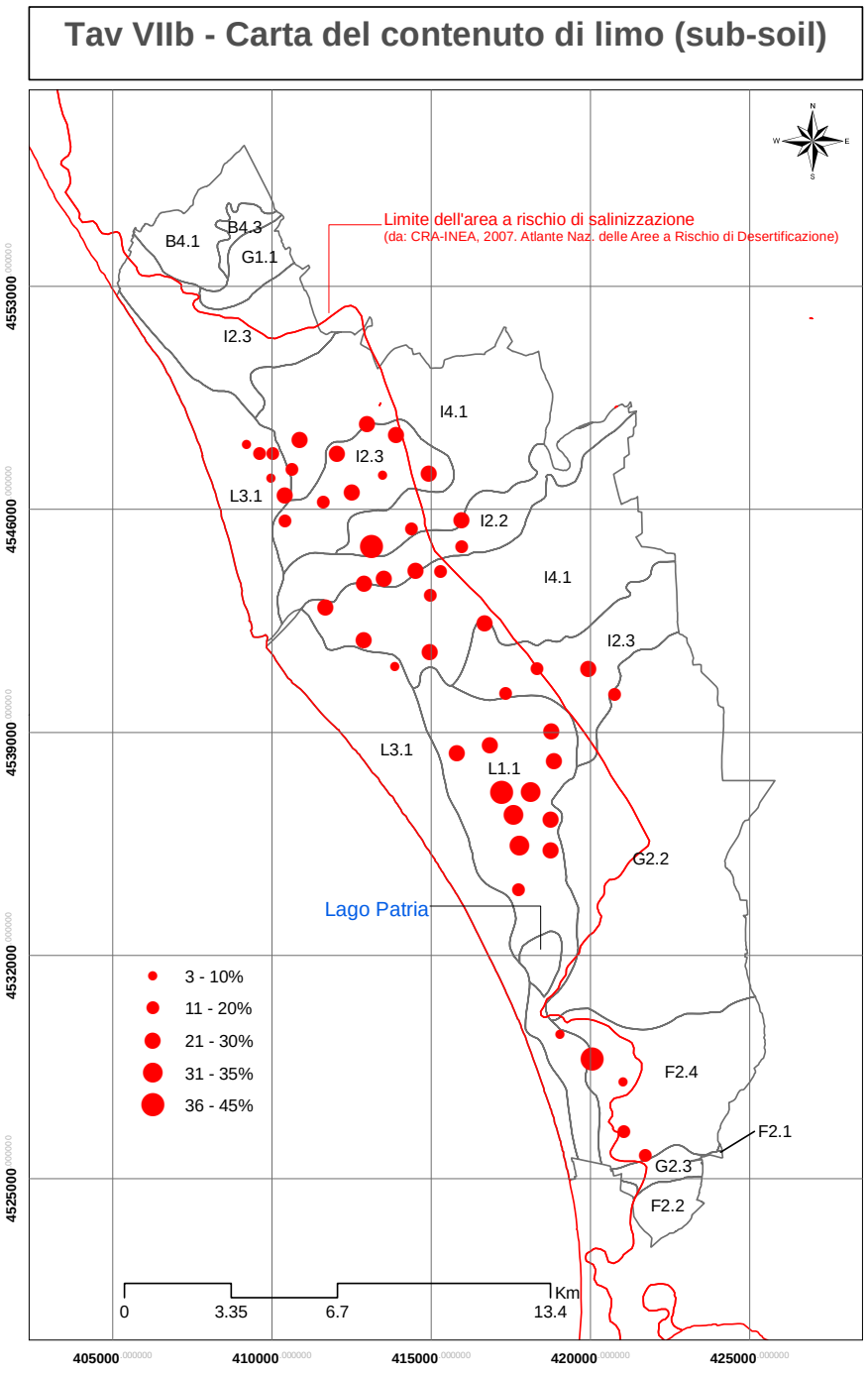
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



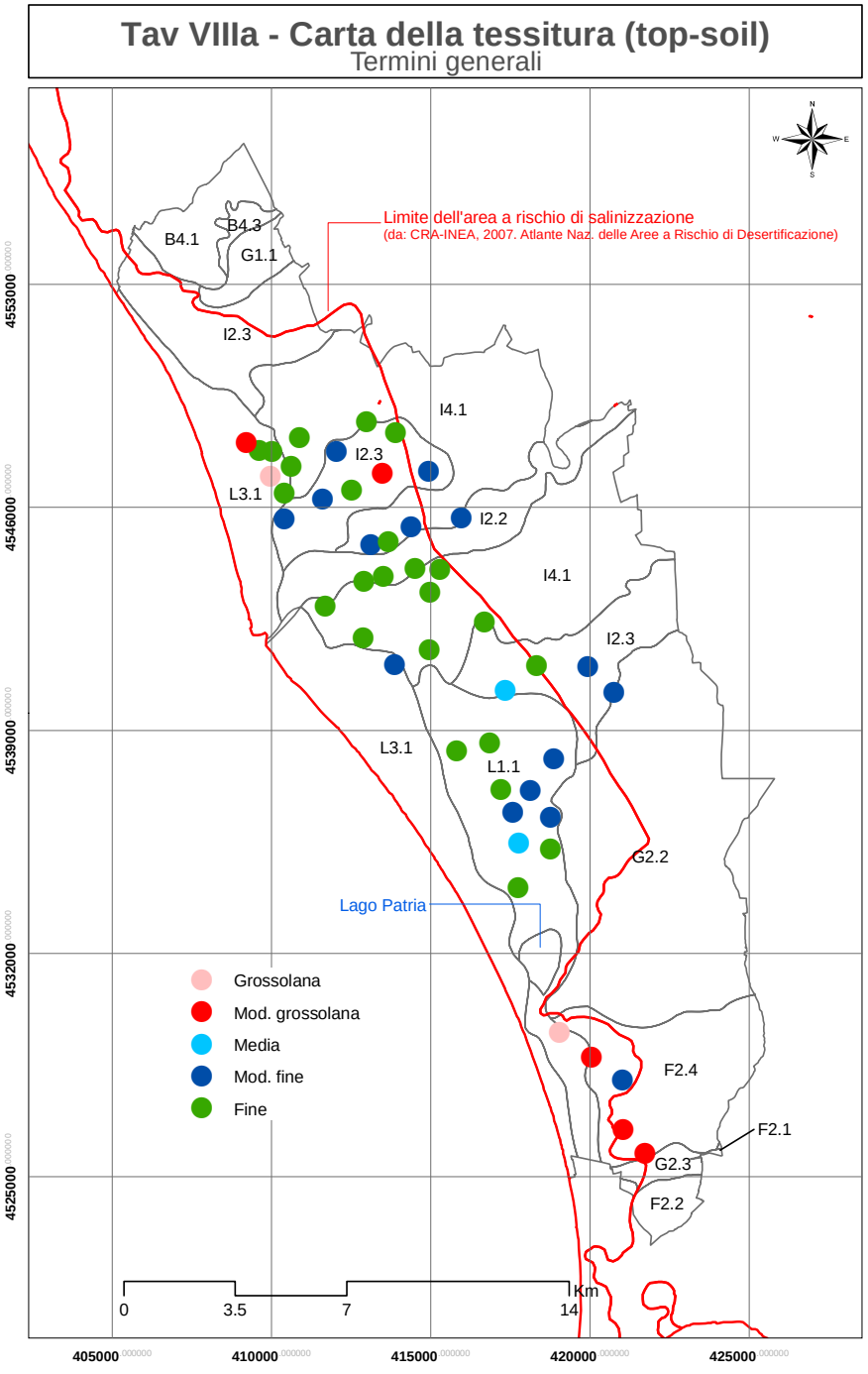
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



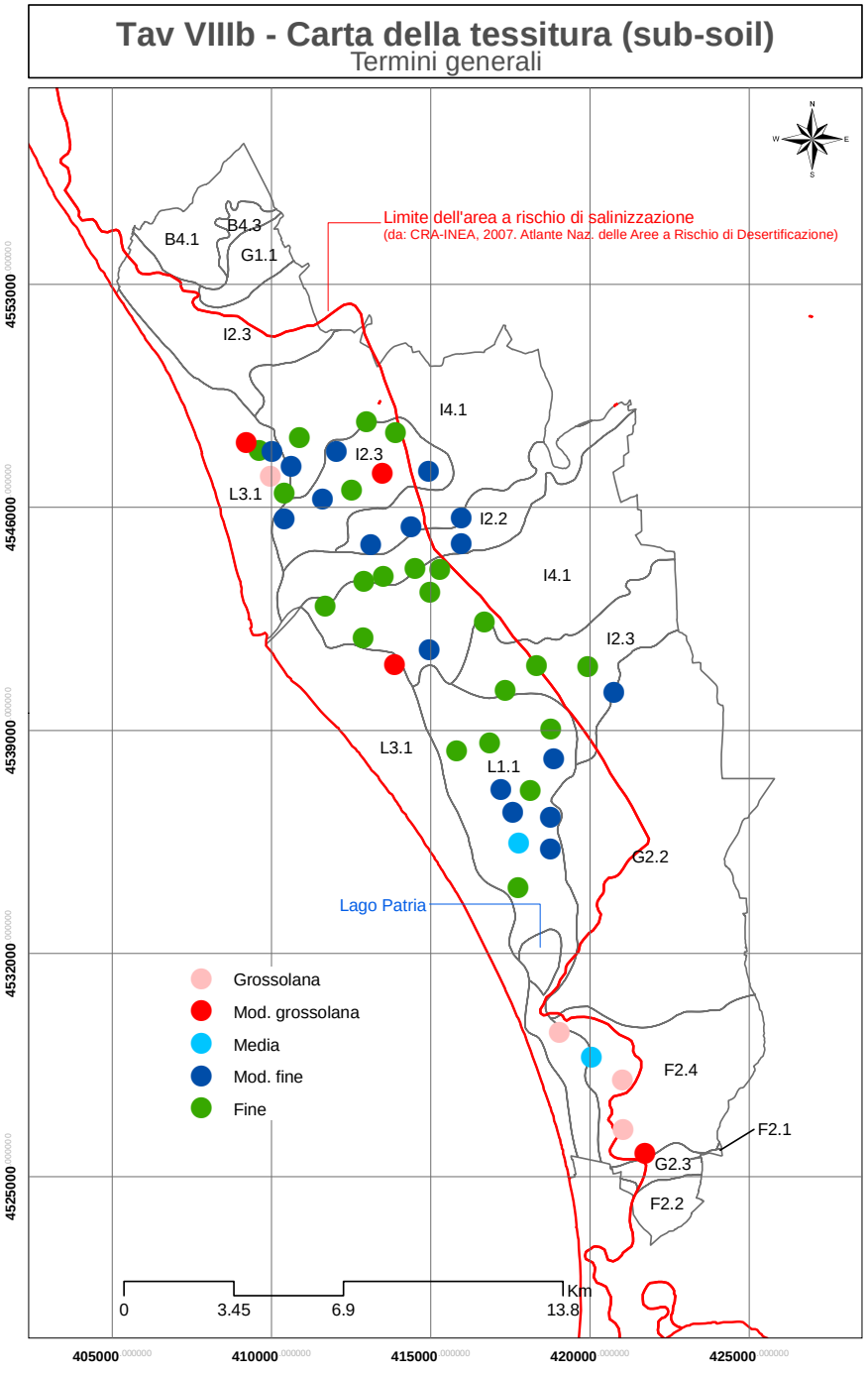
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



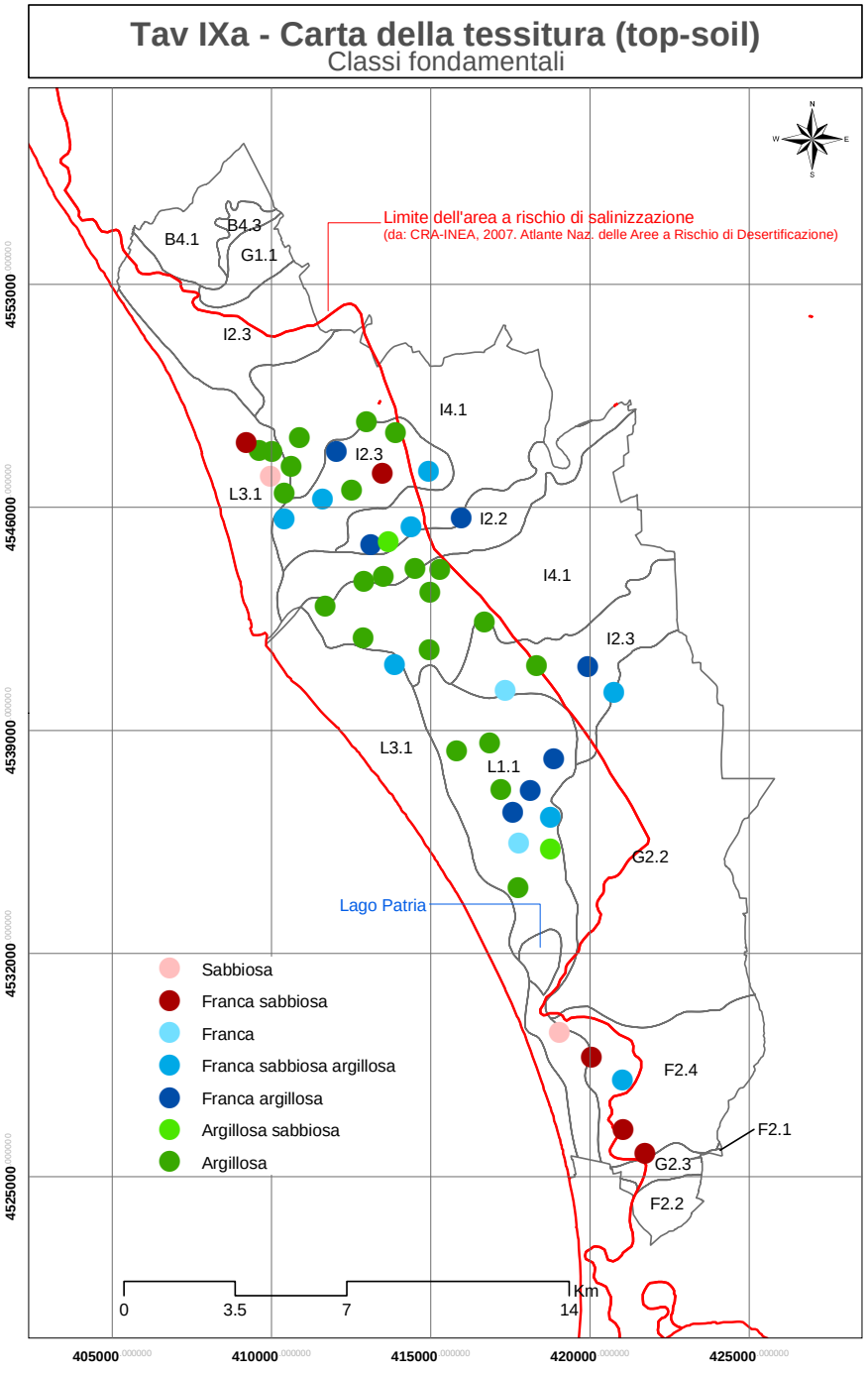
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



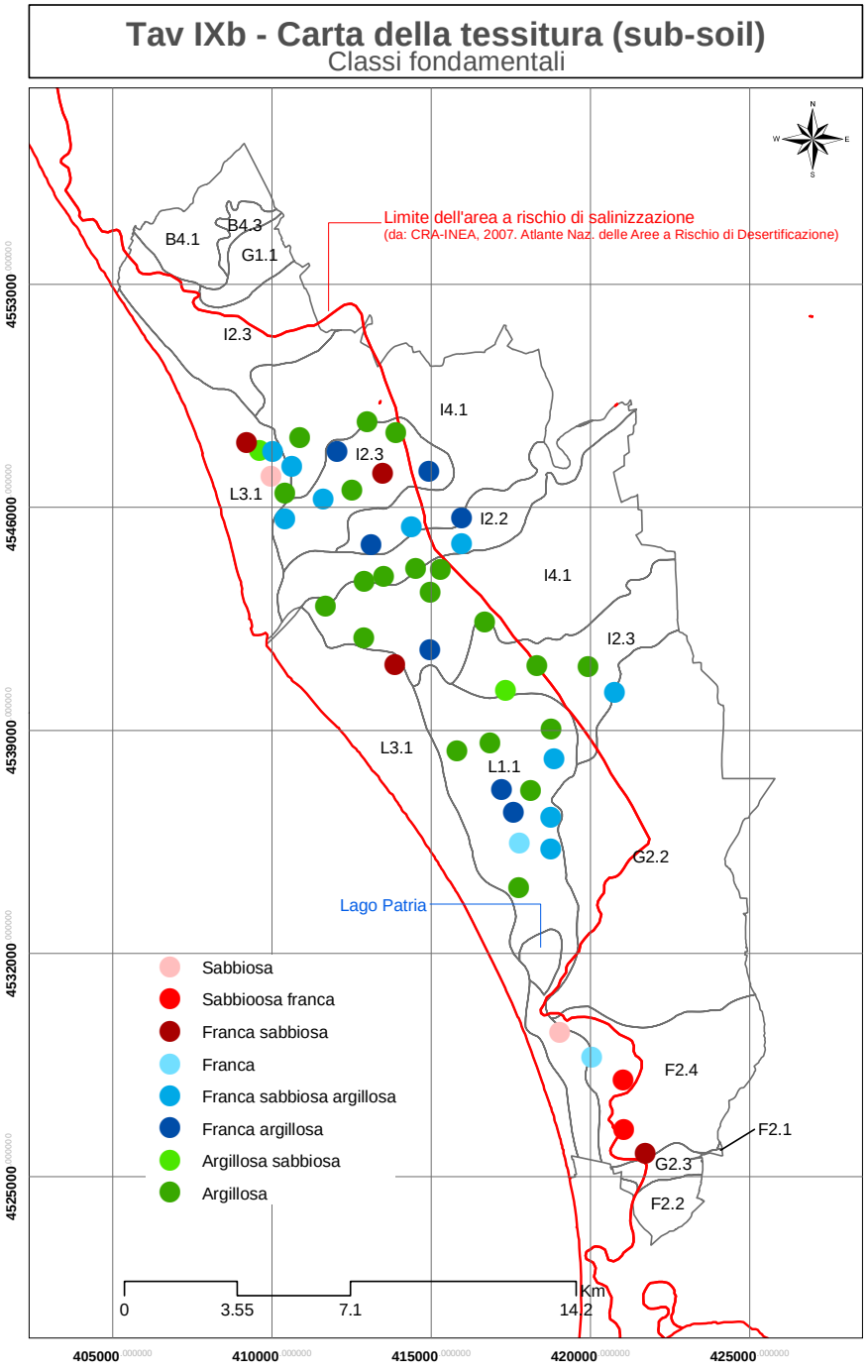
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



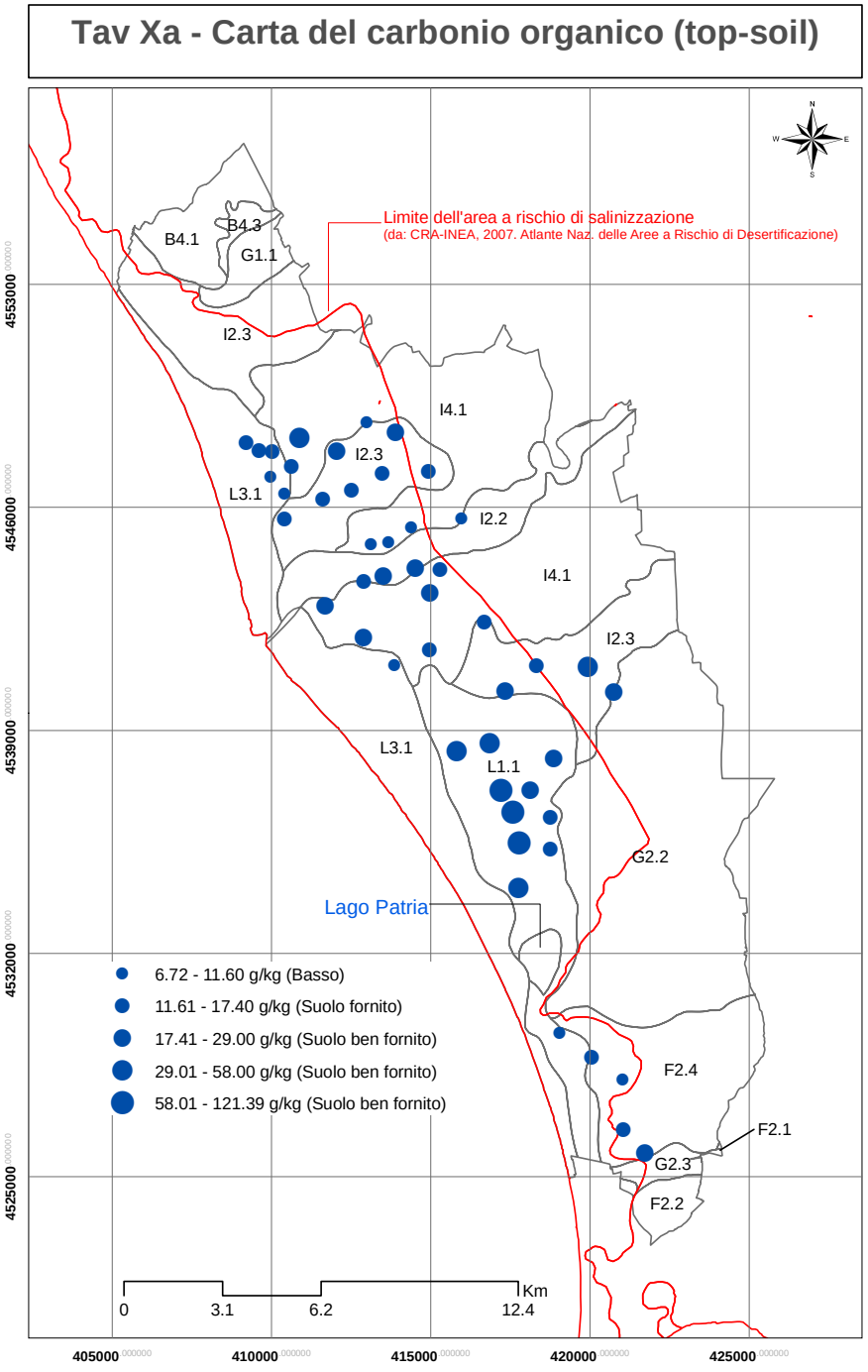
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



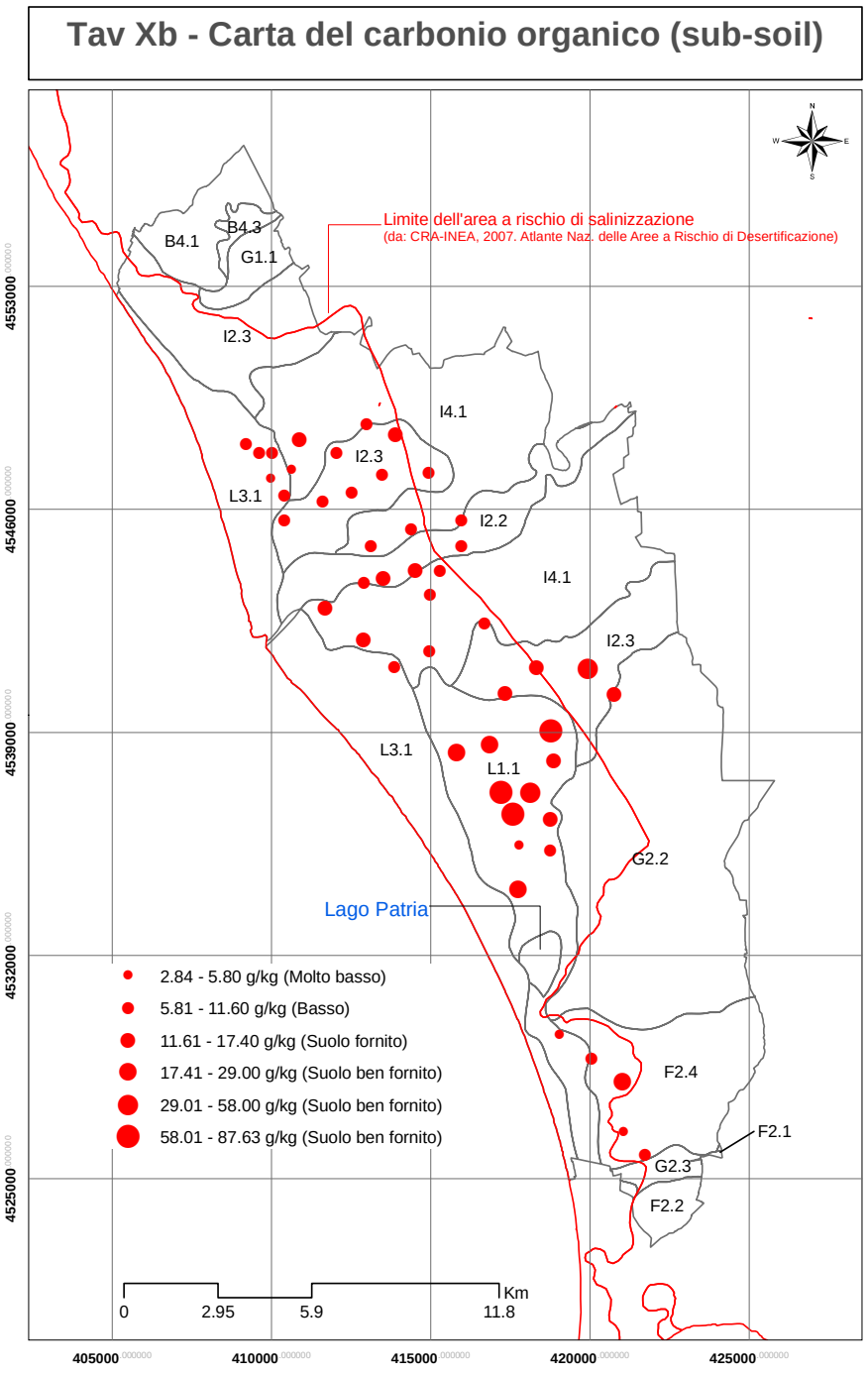
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



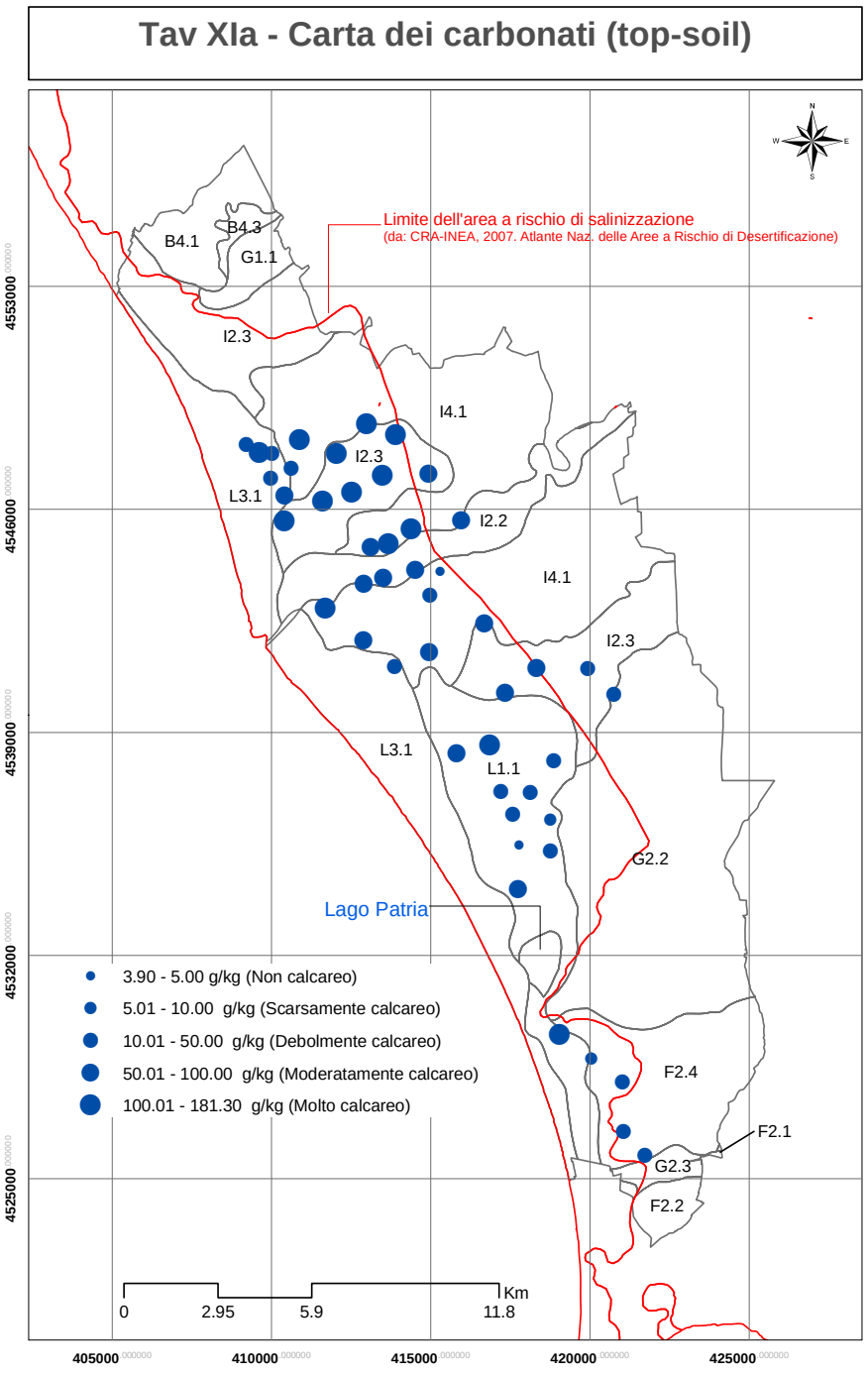
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



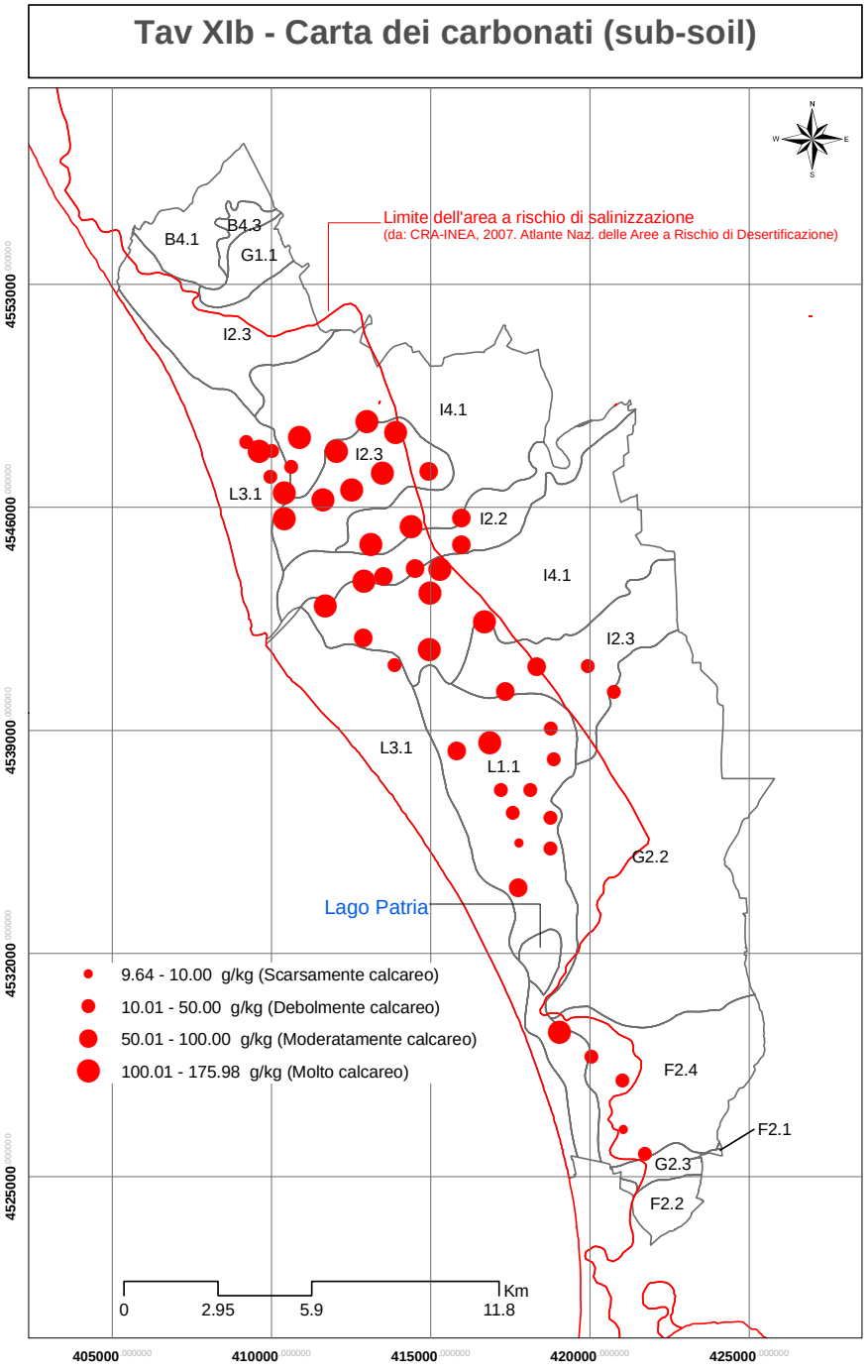
Per meglio valutare la variabilità spaziale dei contenuti di OC, la classe "suoli ben forniti" (OC > 17.4 g kg^{-1}) è stata suddivisa in tre sottoclassi: 17-4 - 29.0, 29.0 - 58.0 e > 58.0 g kg^{-1}. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



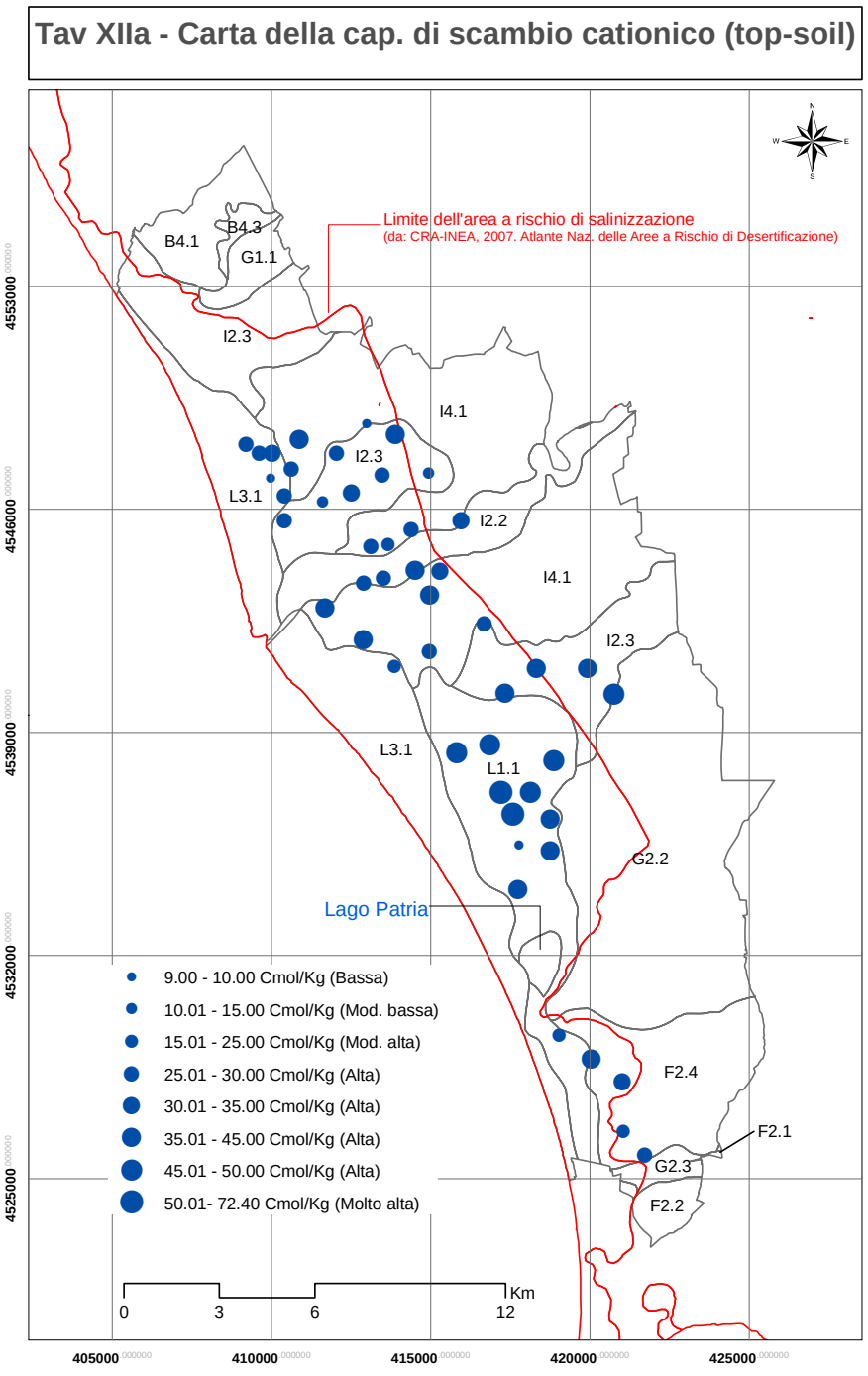
Per meglio valutare la variabilità spaziale dei contenuti di OC, la classe "suoli ben forniti" (OC > 17.4 g kg^{-1}) è stata suddivisa in tre sottoclassi: 17-4 - 29.0, 29.0 - 58.0 e > 58.0 g kg^{-1}. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



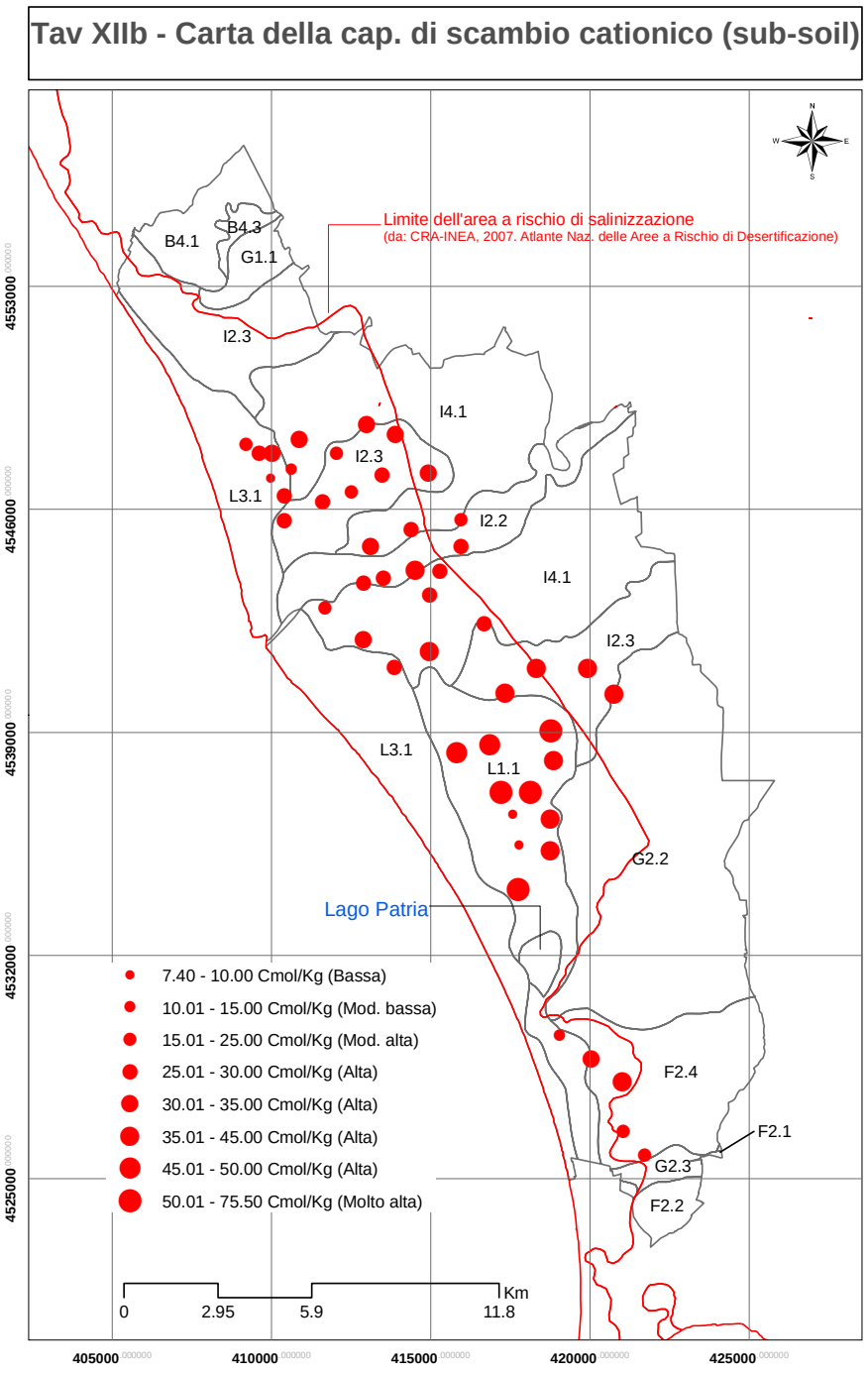
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



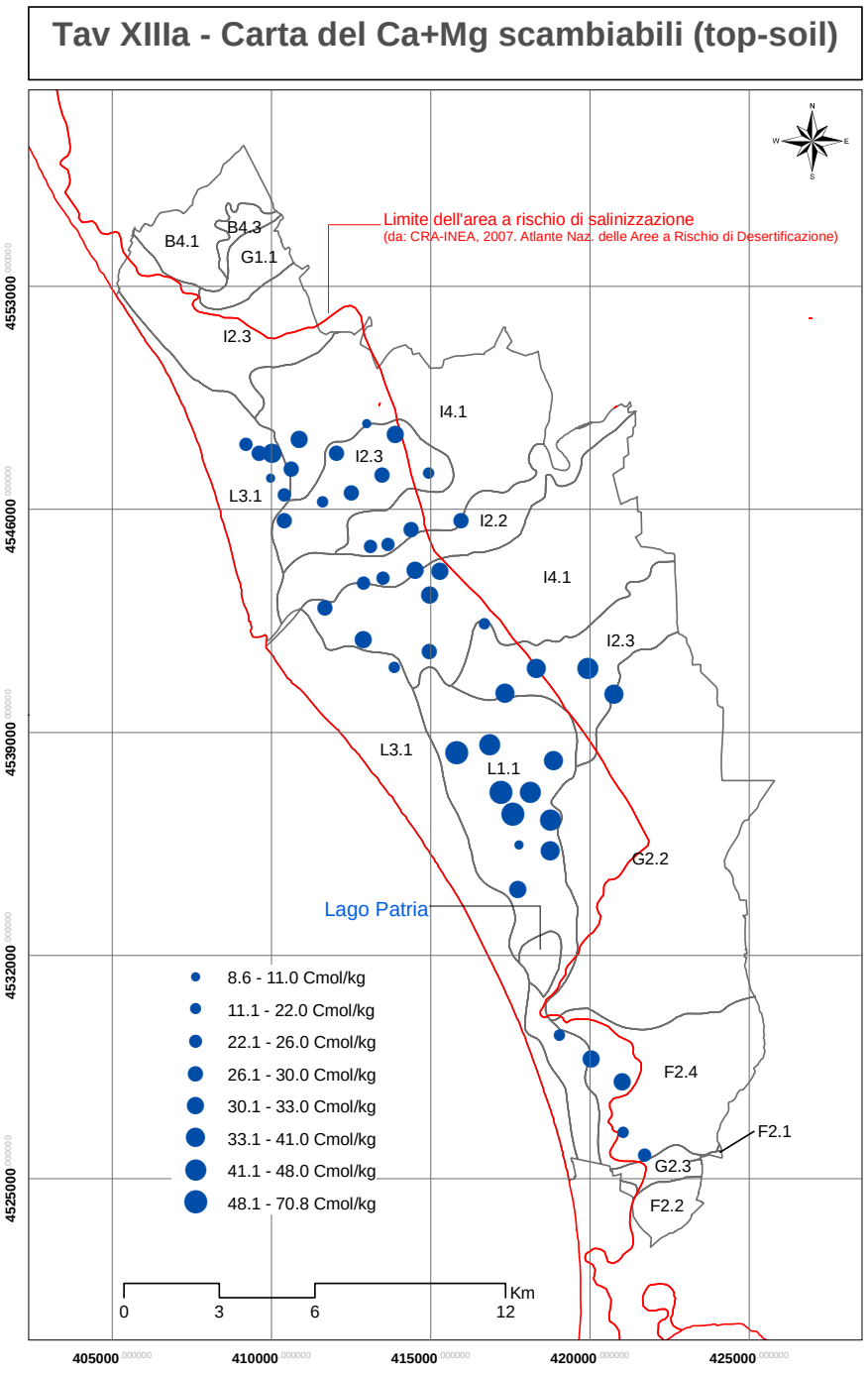
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



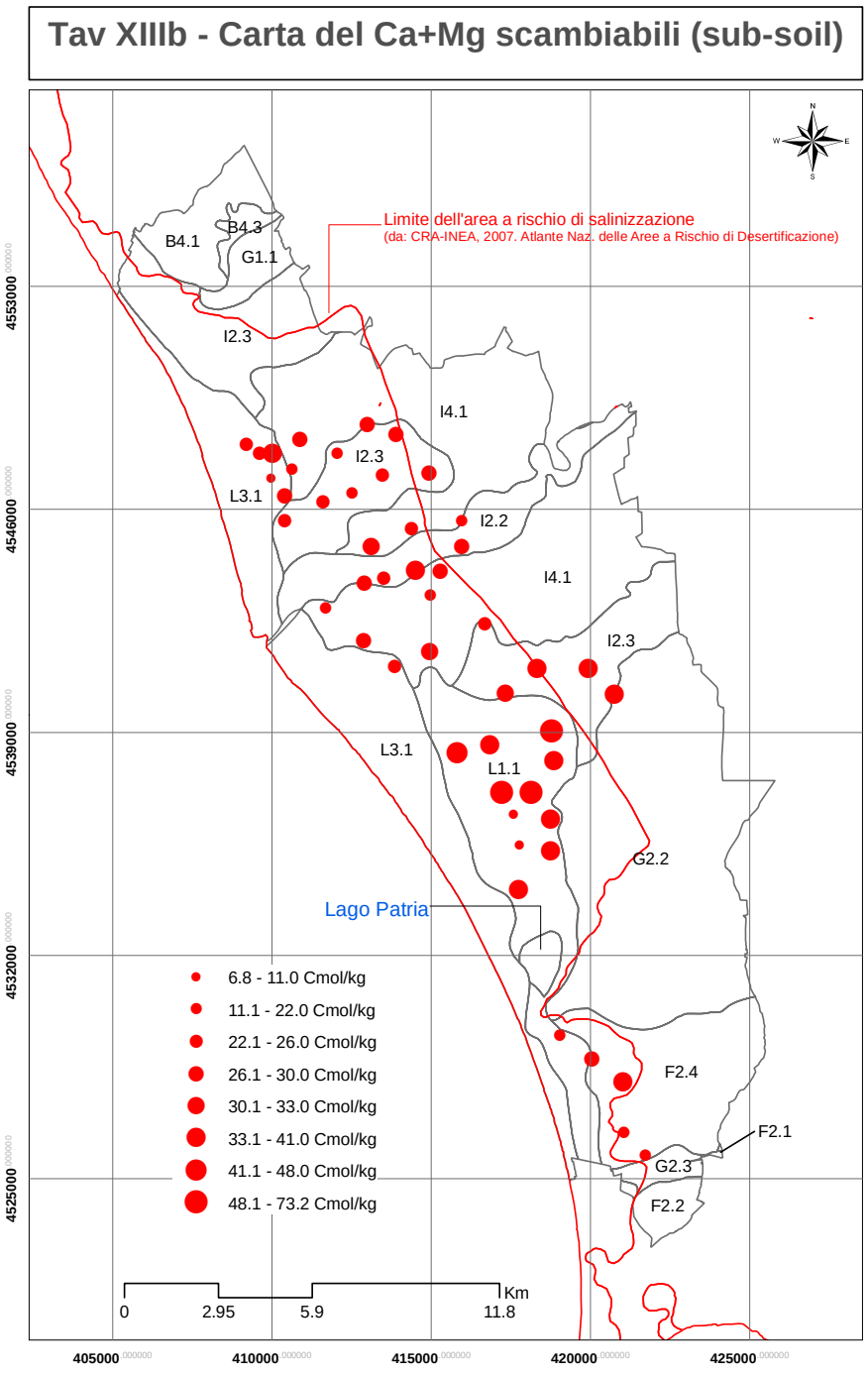
Per meglio valutare la variabilità spaziale della CEC, la classe "alta" (25 < CEC< 50 Cmo kg^{-1}) è stata suddivisa in quattro sotto-classi: 25-30 - 30 - 35, 35-45 e 45-50 Cmol kg^{-1}. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



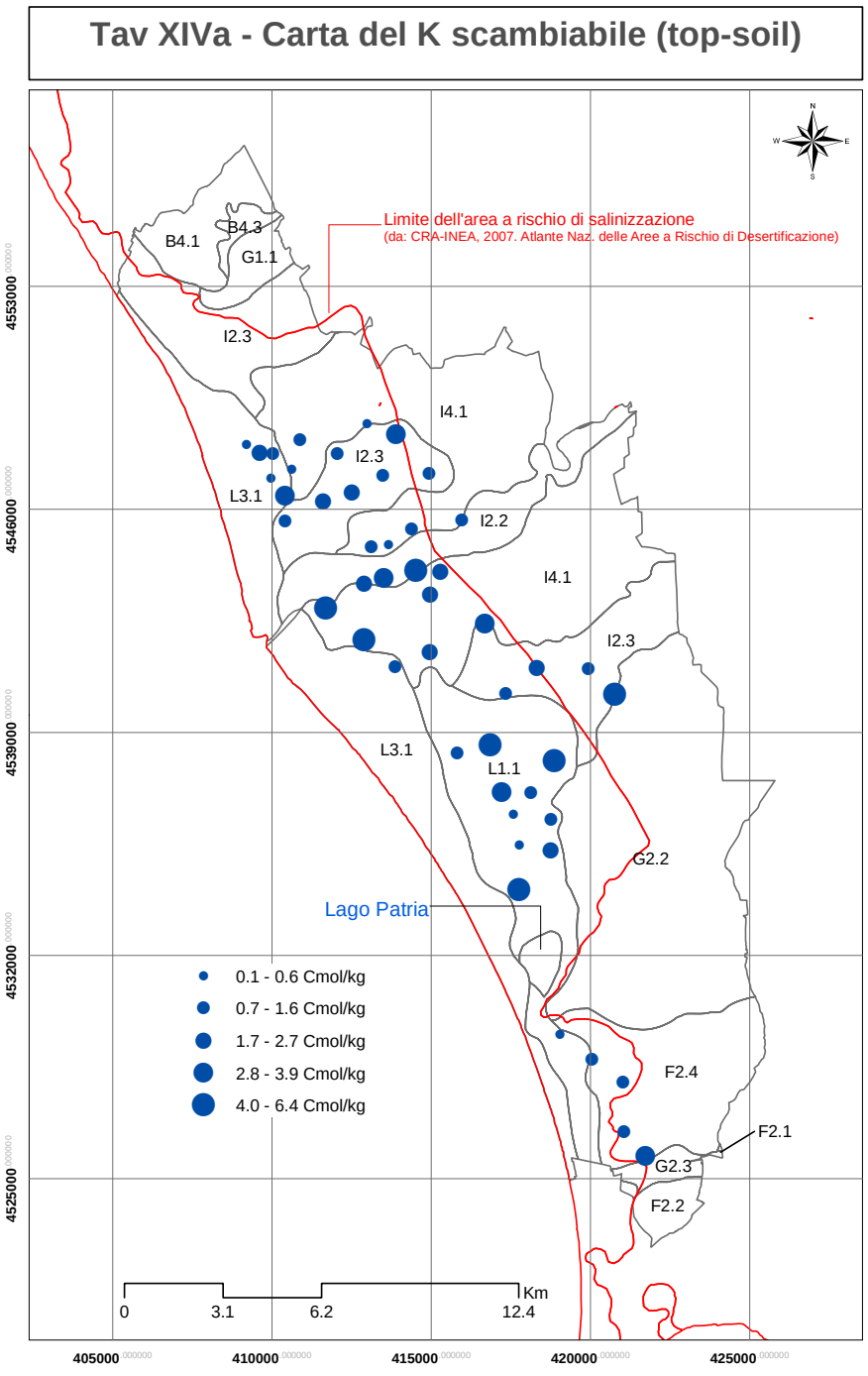
Per meglio valutare la variabilità spaziale della CEC, la classe "alta" (25 < CEC< 50 Cmo kg^{-1}) è stata suddivisa in quattro sotto-classi: 25-30 - 30 - 35, 35-45 e 45-50 Cmol kg^{-1}. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



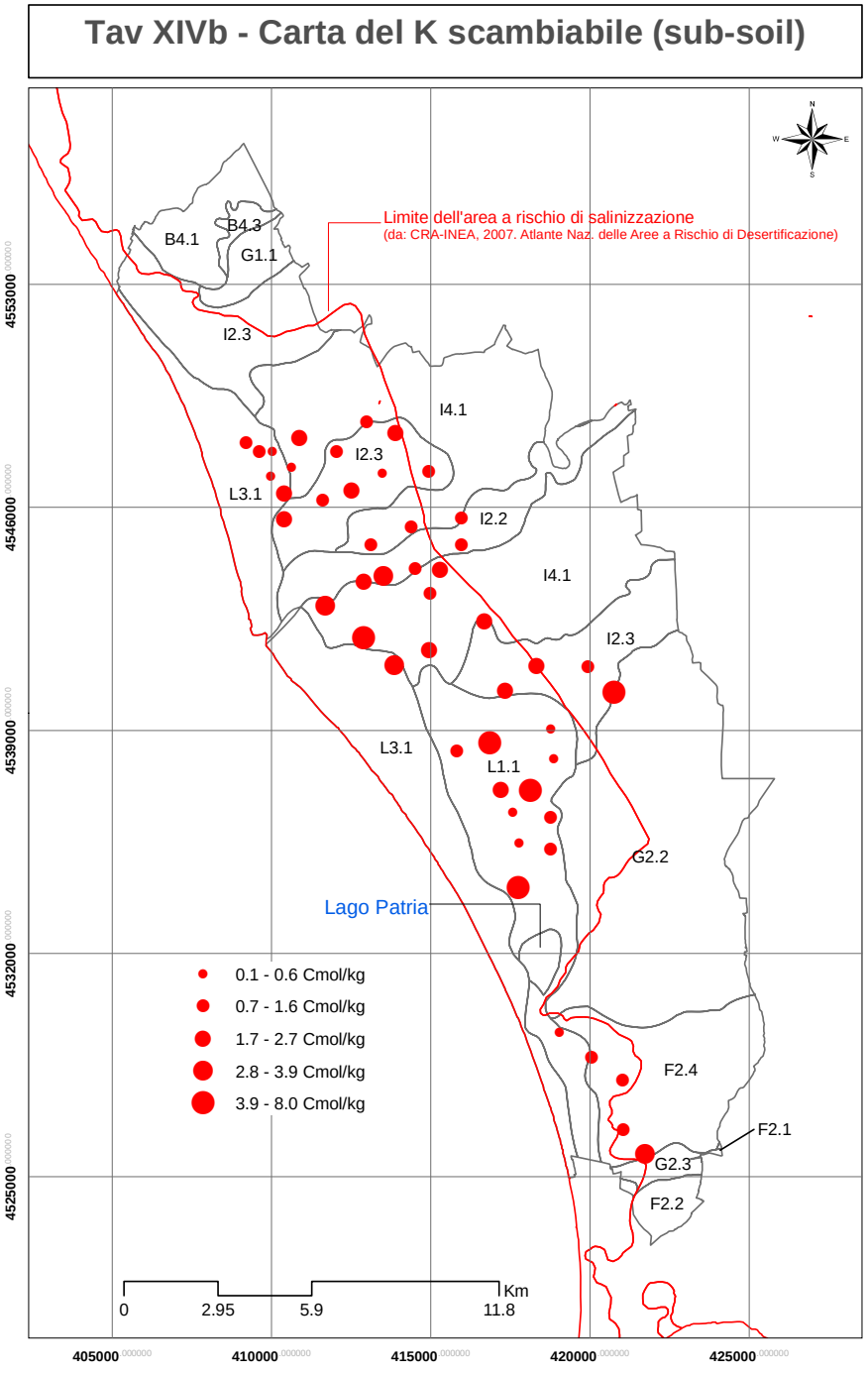
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i valori di $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



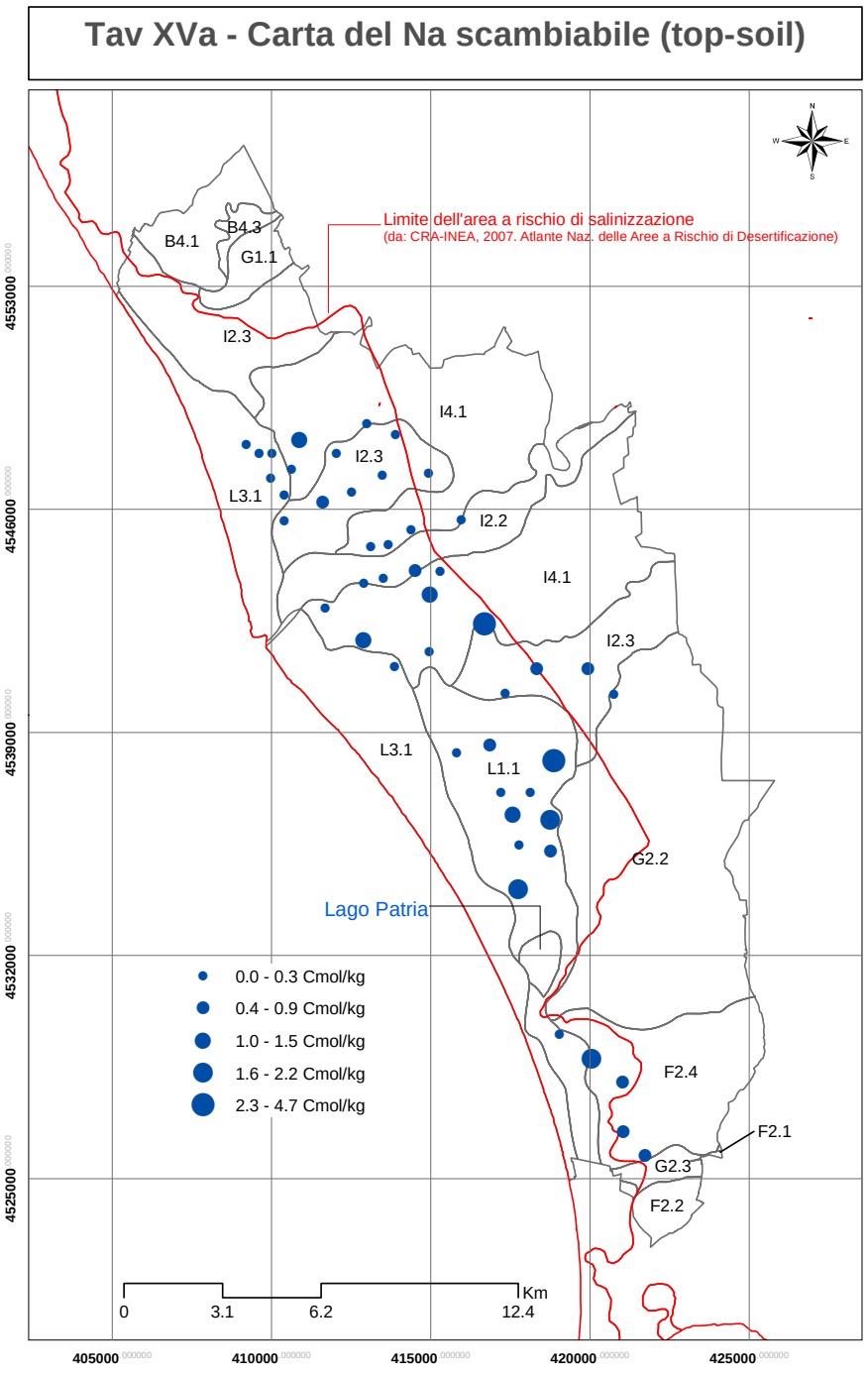
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i valori di $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



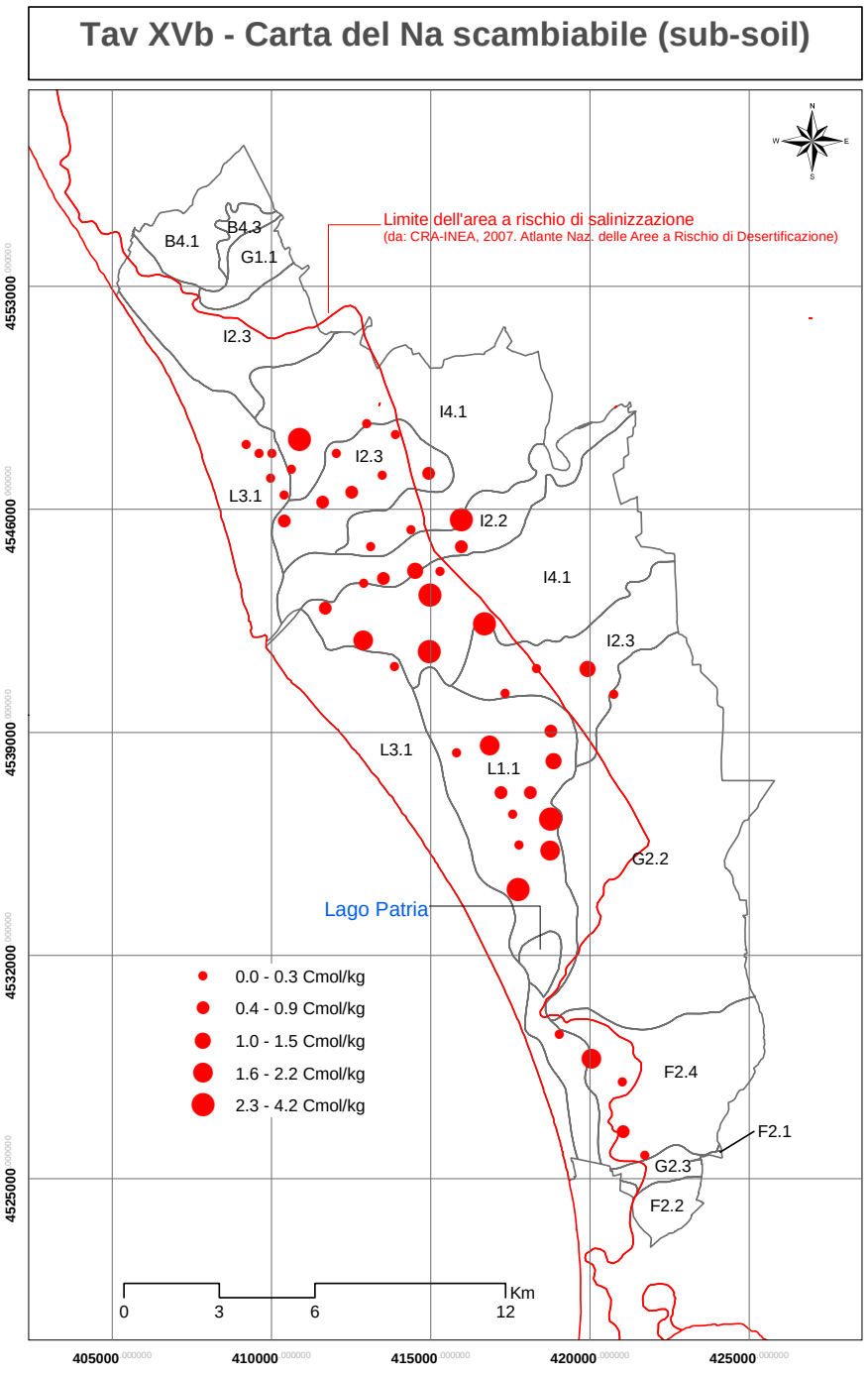
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i valori di K^+, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II



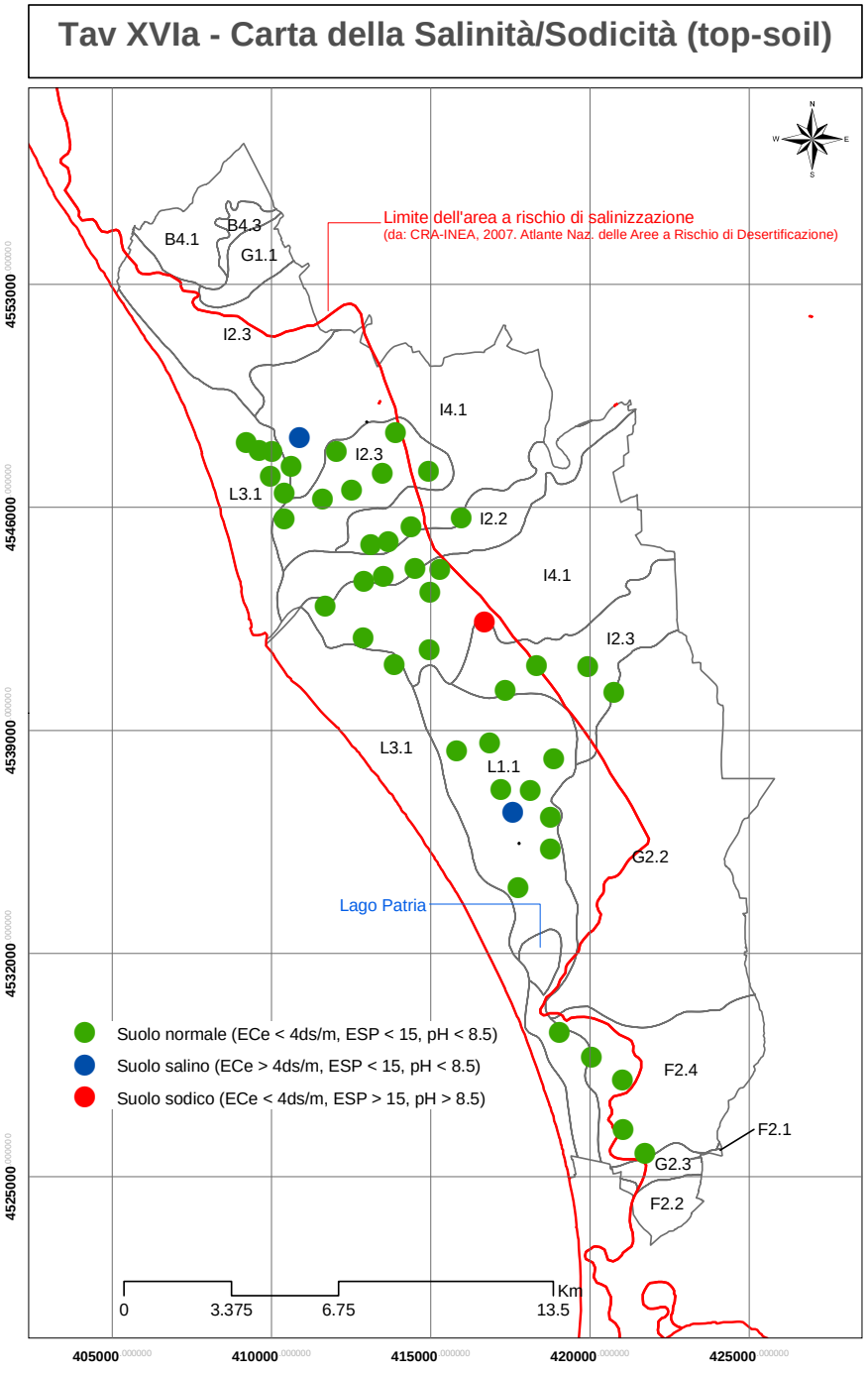
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i valori di K^+, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II



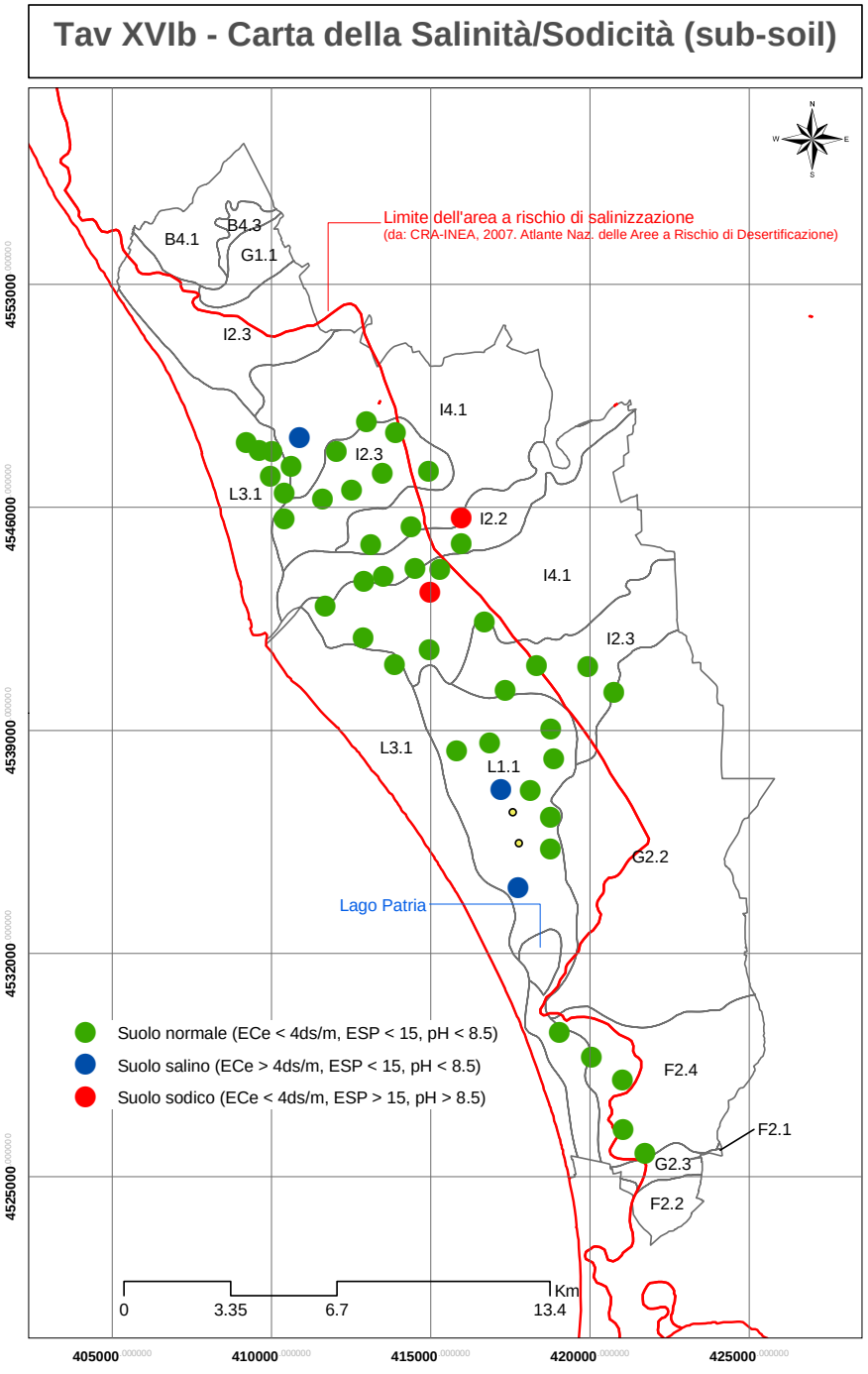
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i valori di Na^+, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II



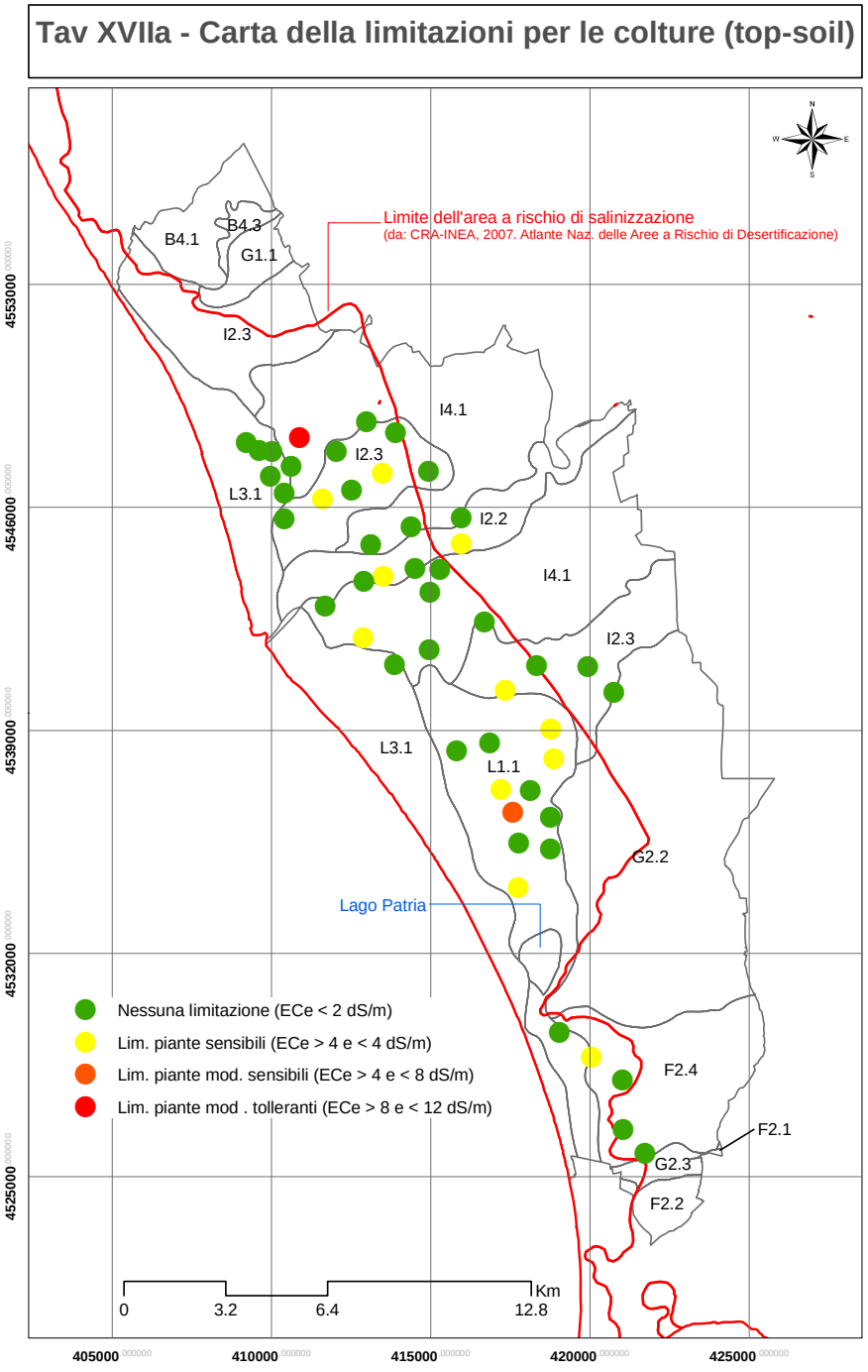
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i valori di Na^+, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II



Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II

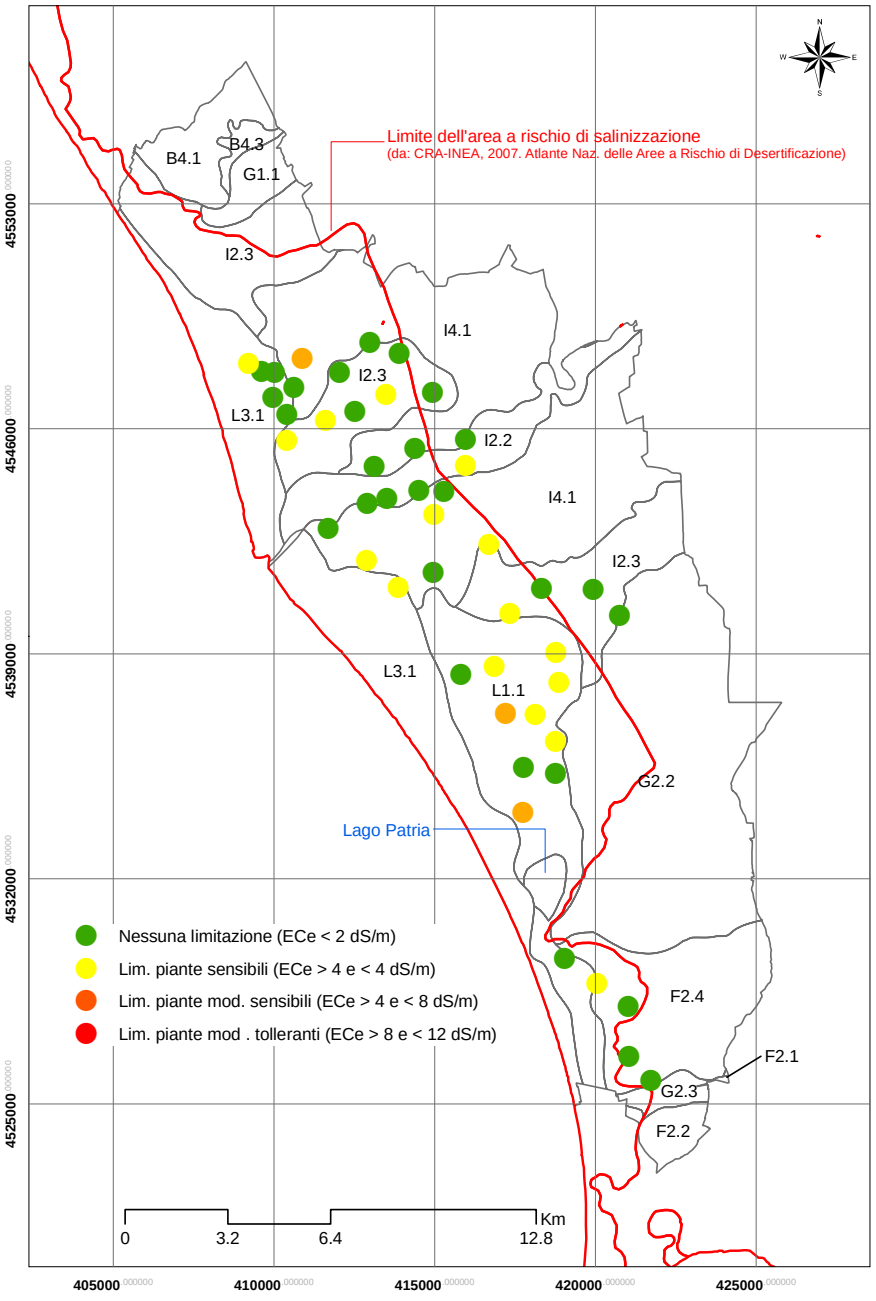


Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II

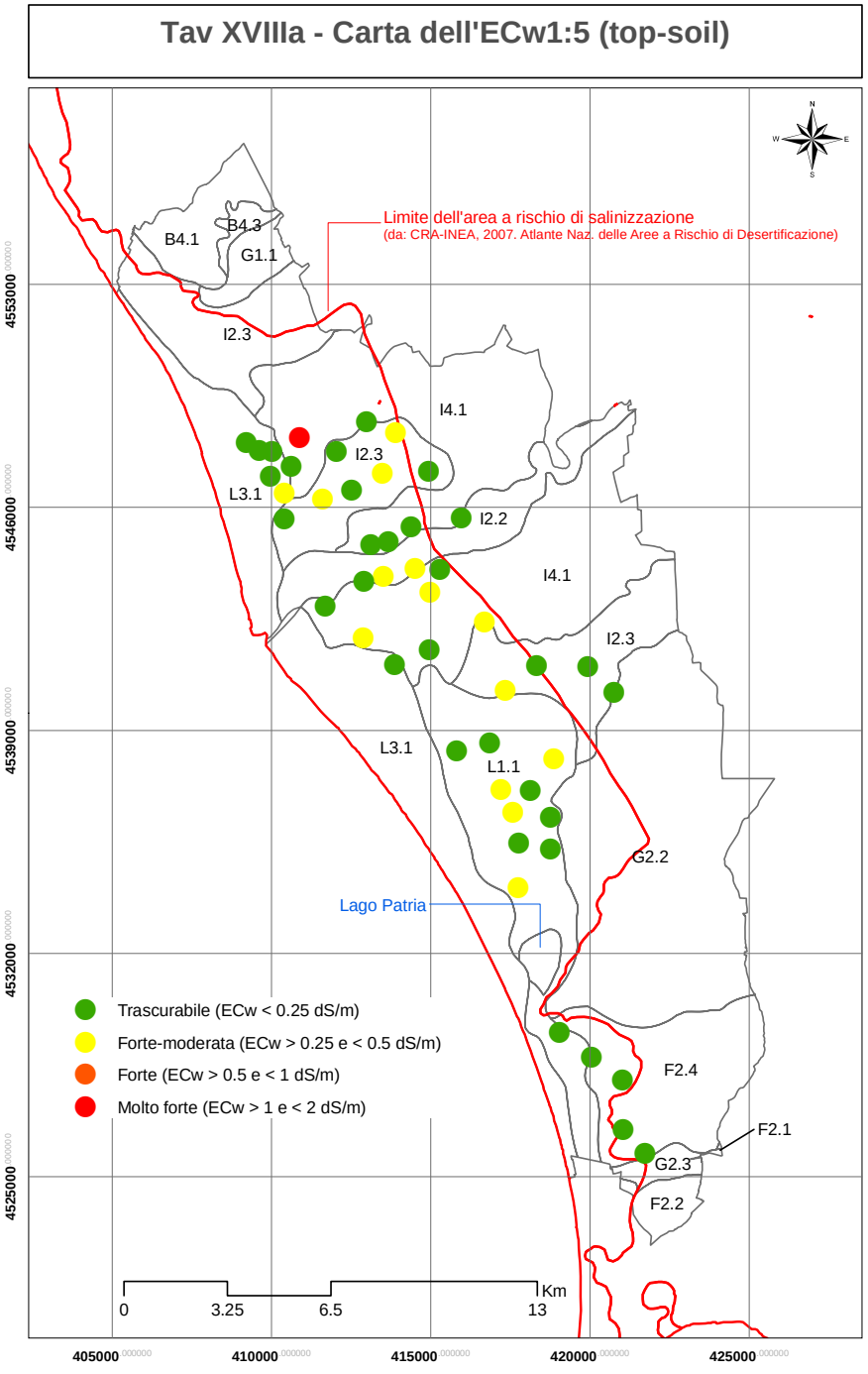


Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II

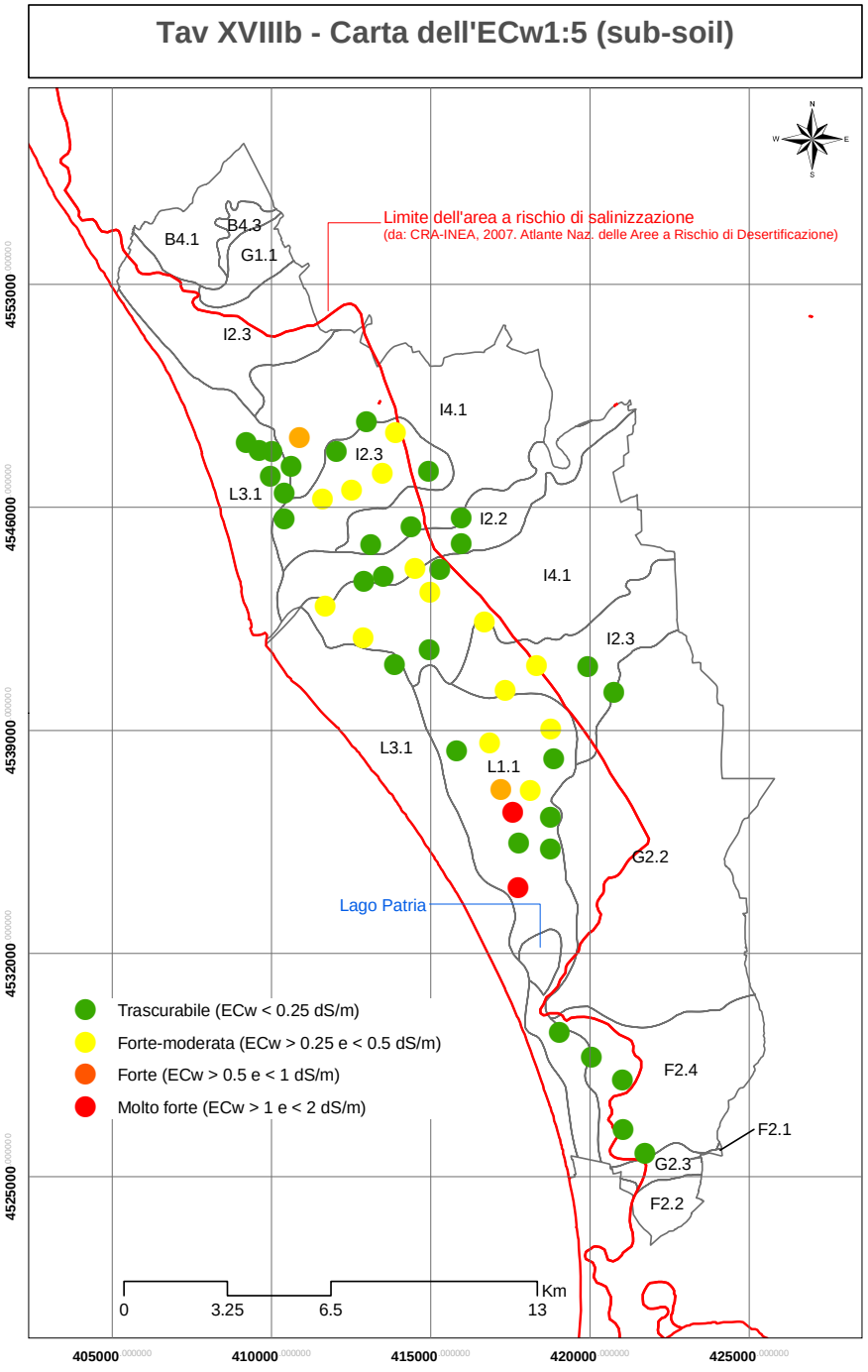
Tav XVIIb - Carta della limitazioni per le colture (sub-soil)



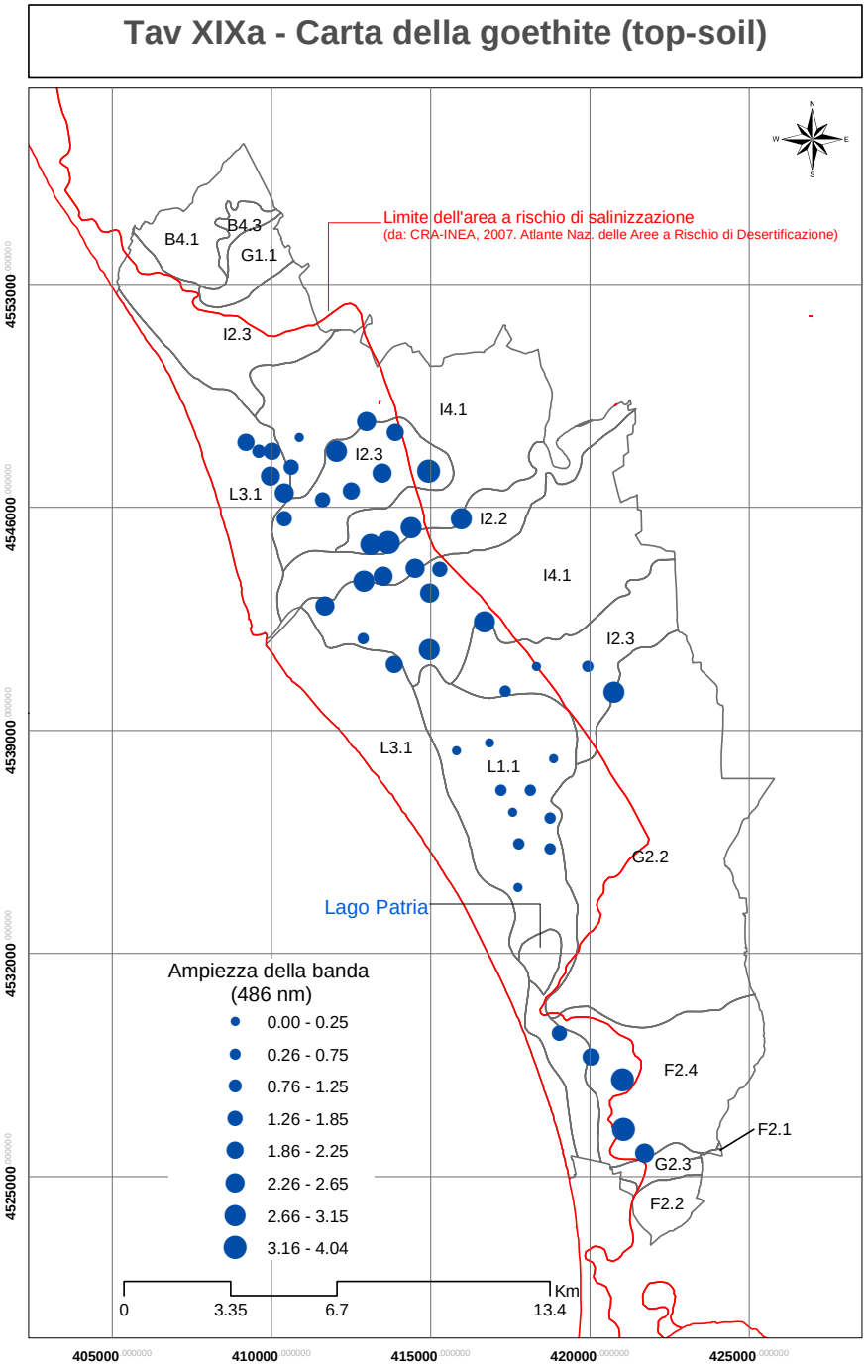
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II



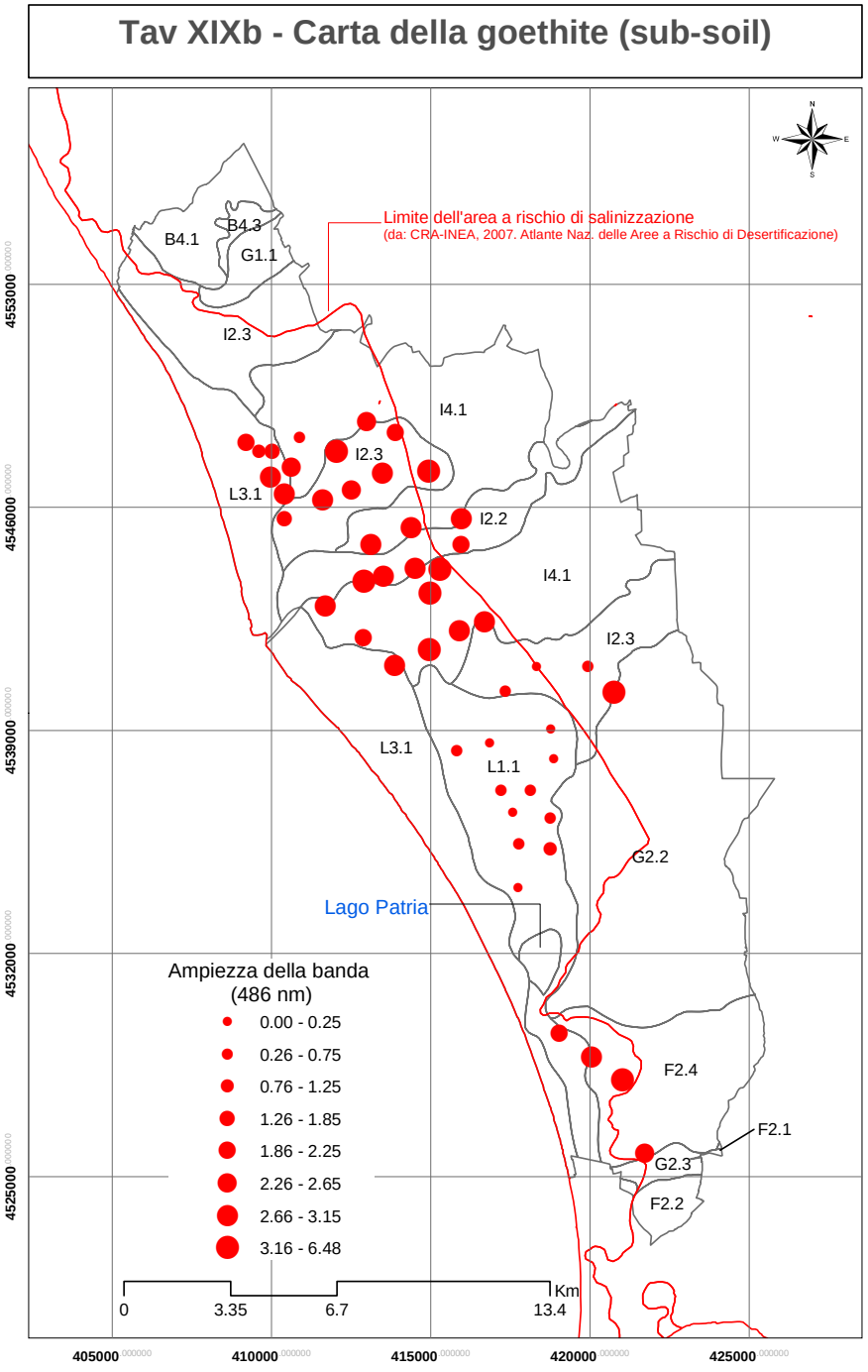
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



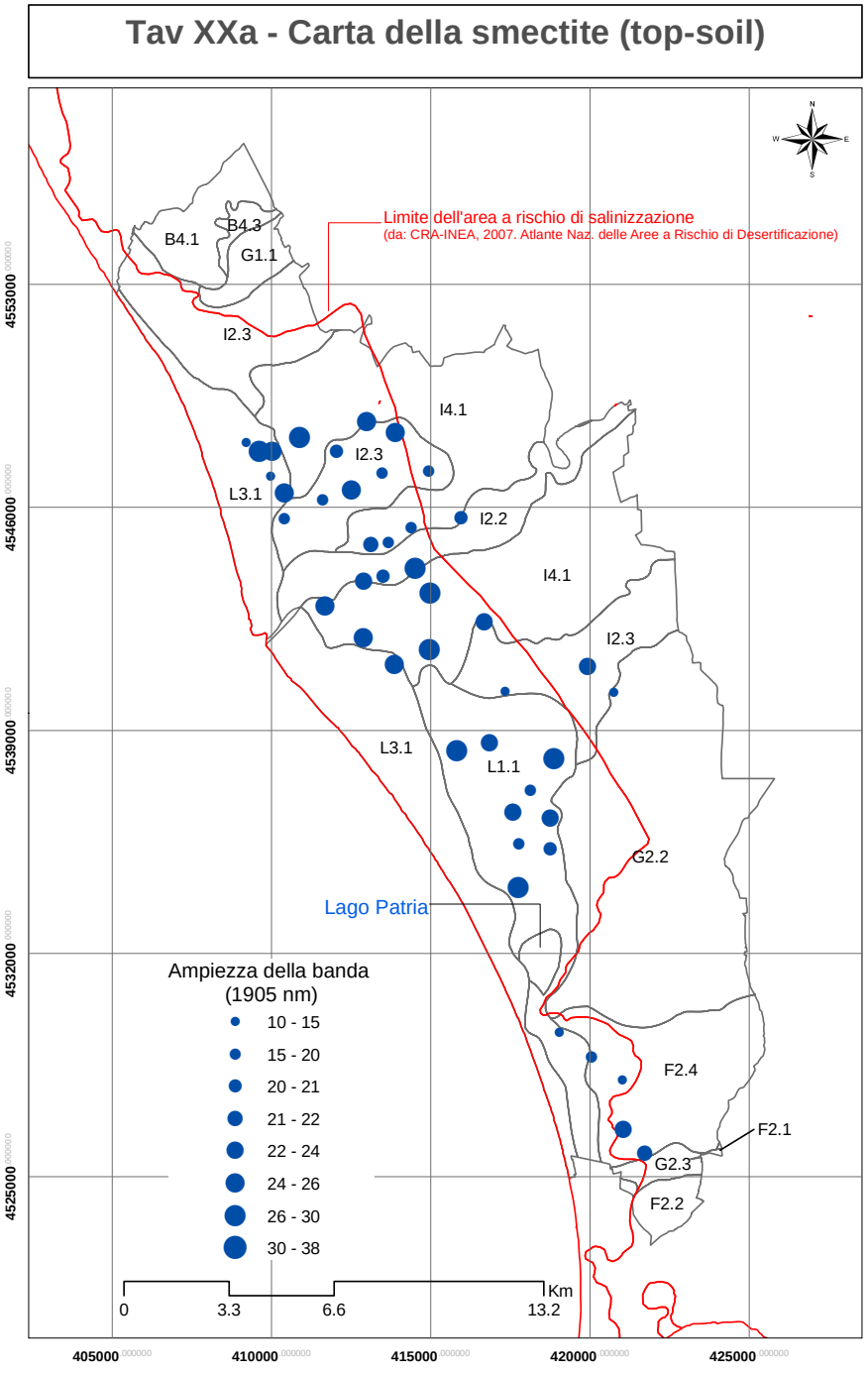
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II



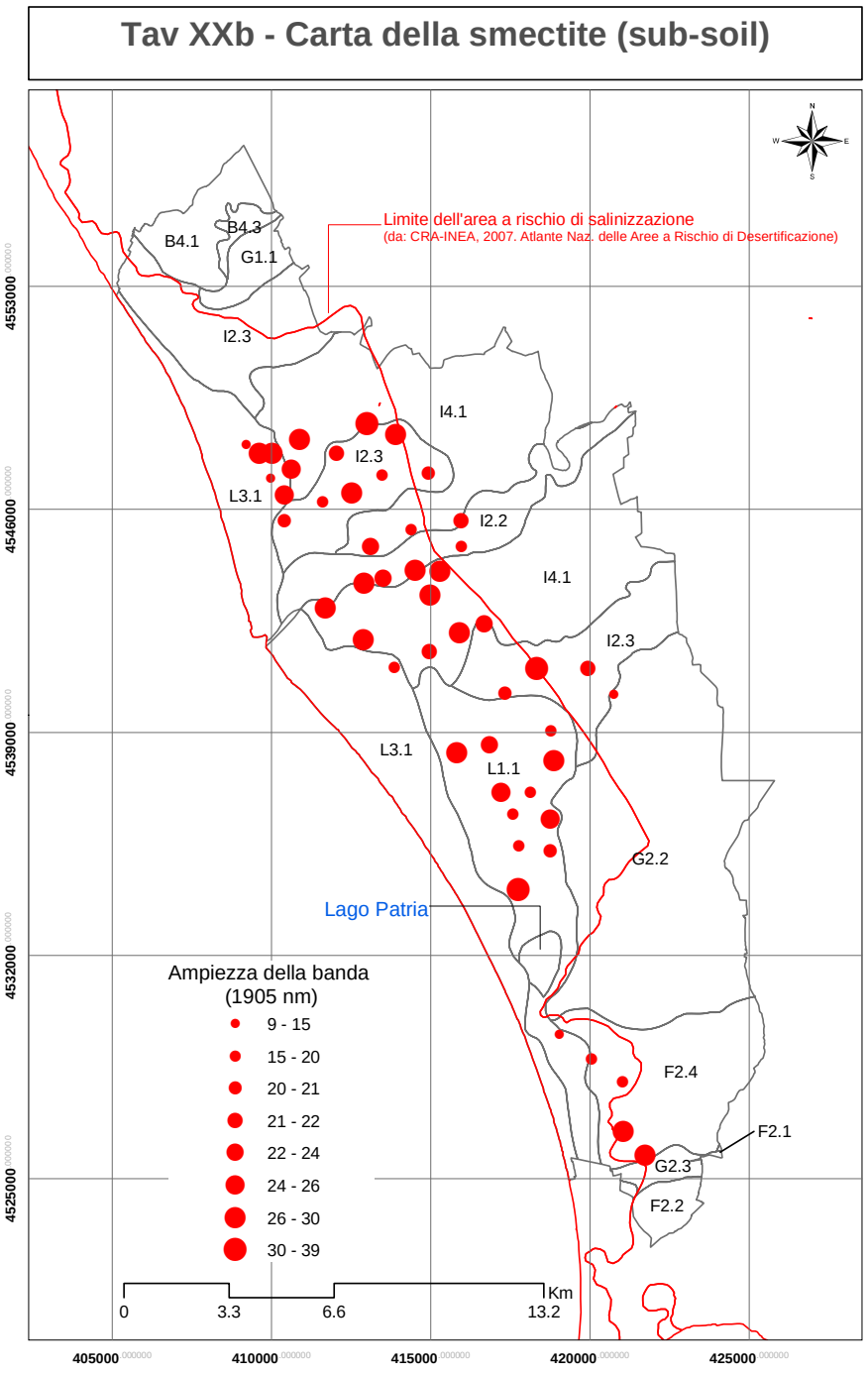
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



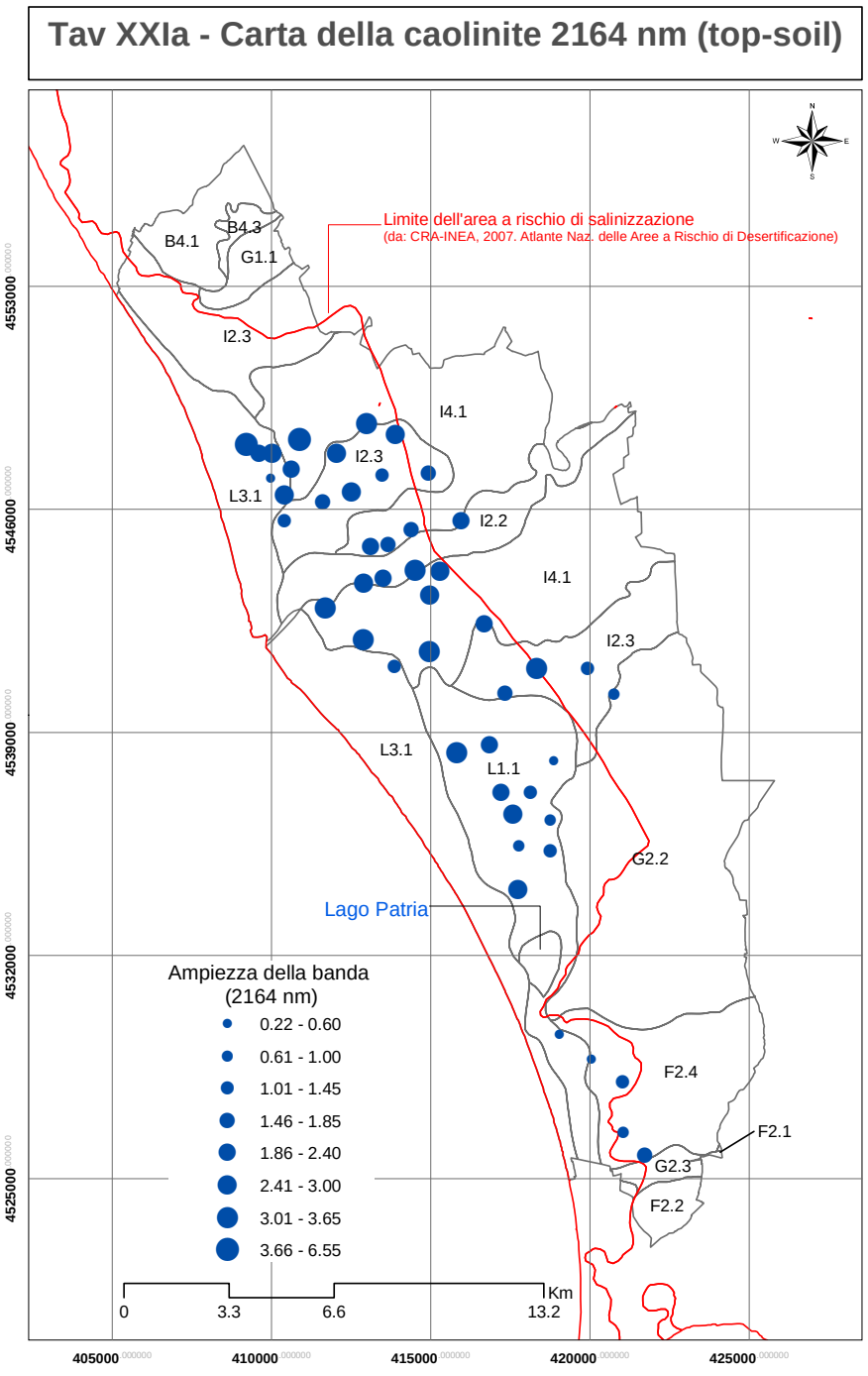
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



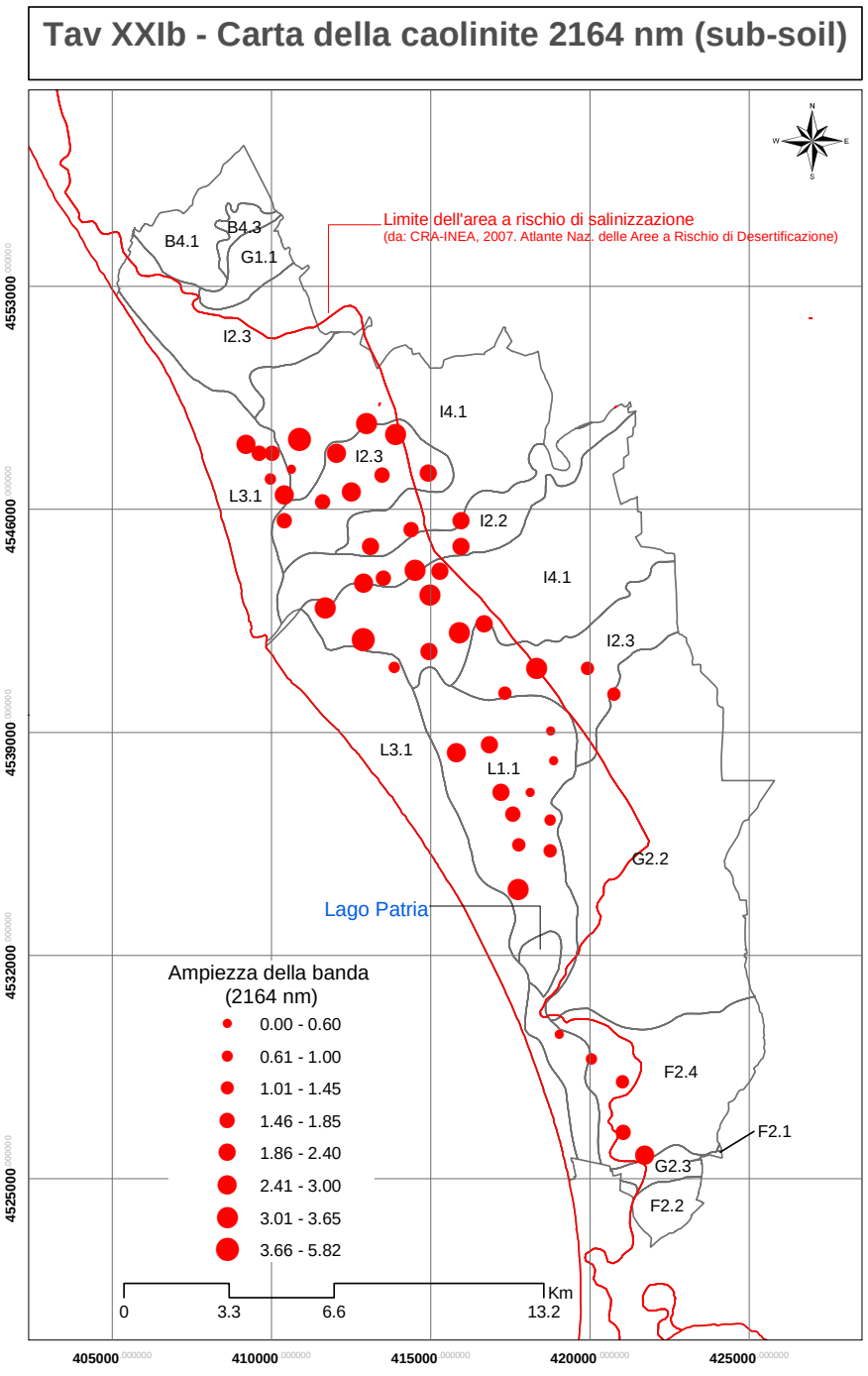
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



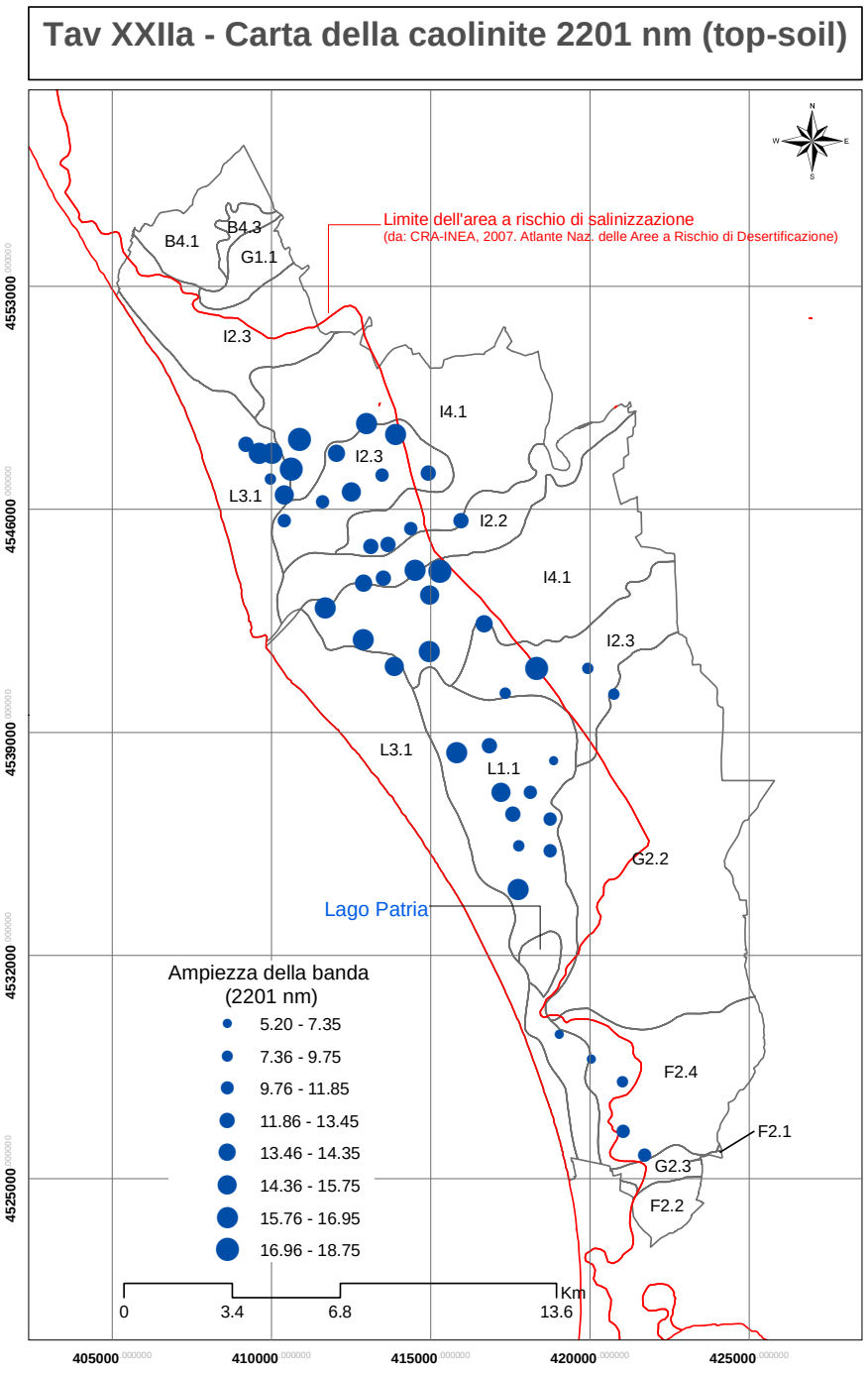
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



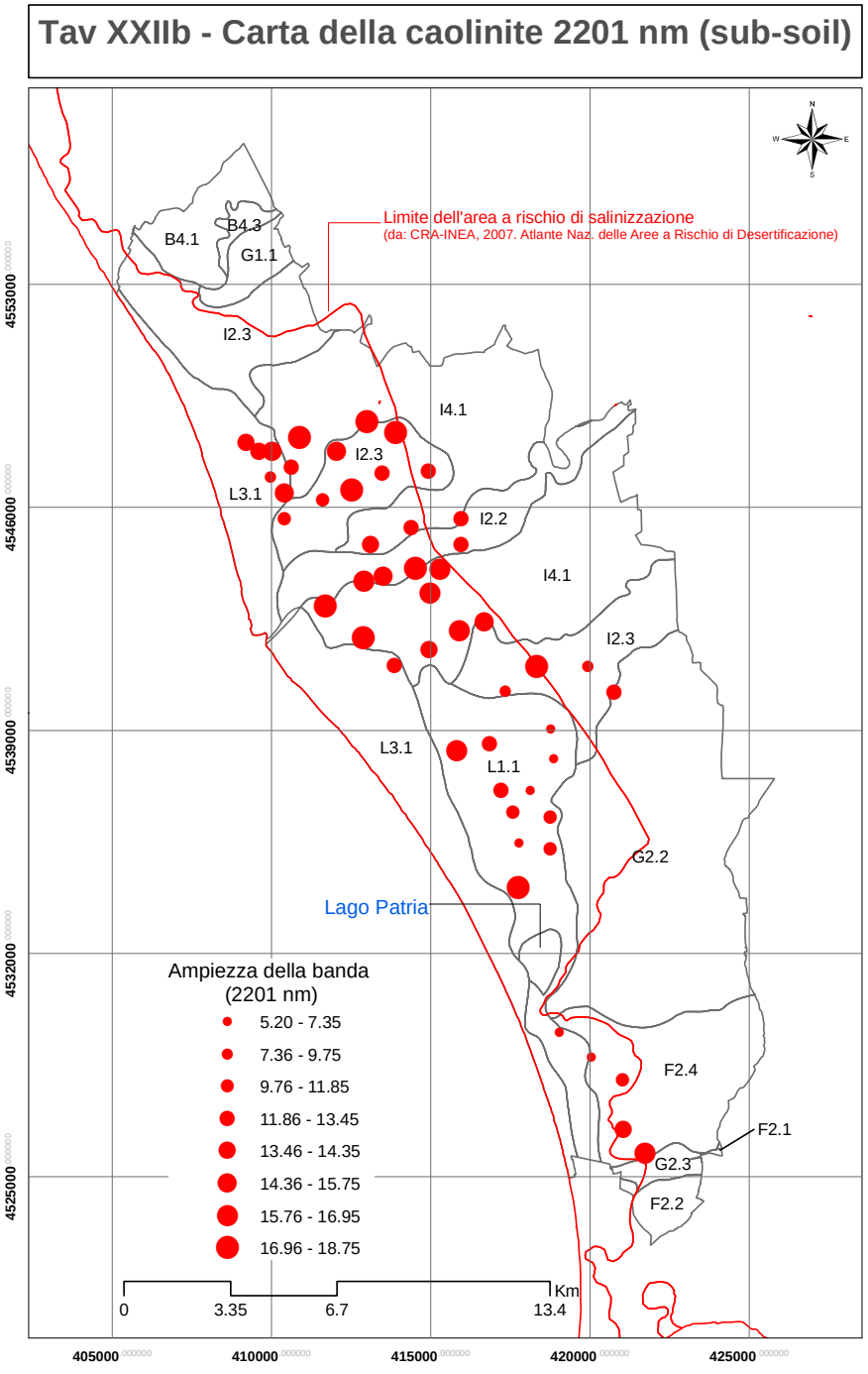
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



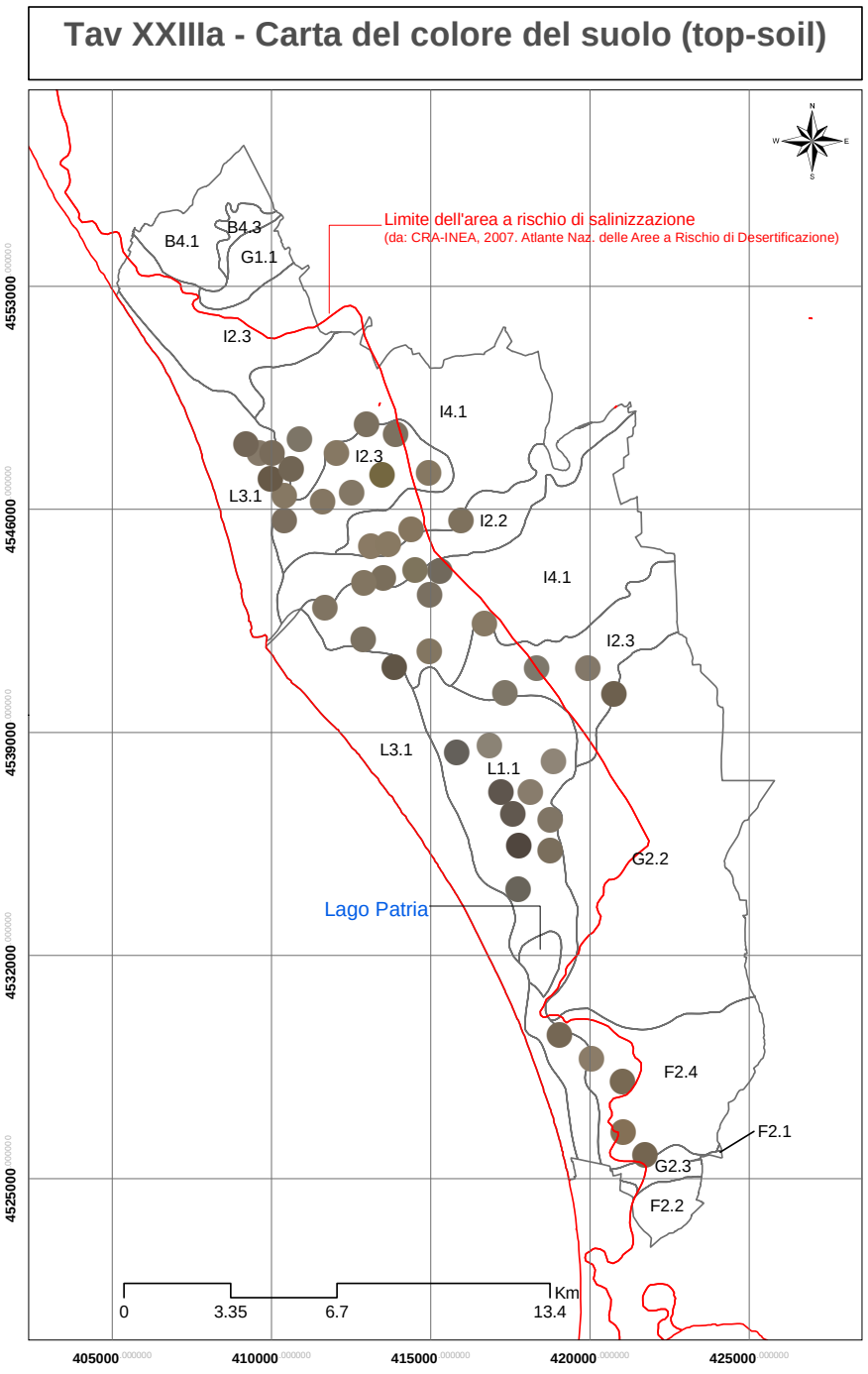
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



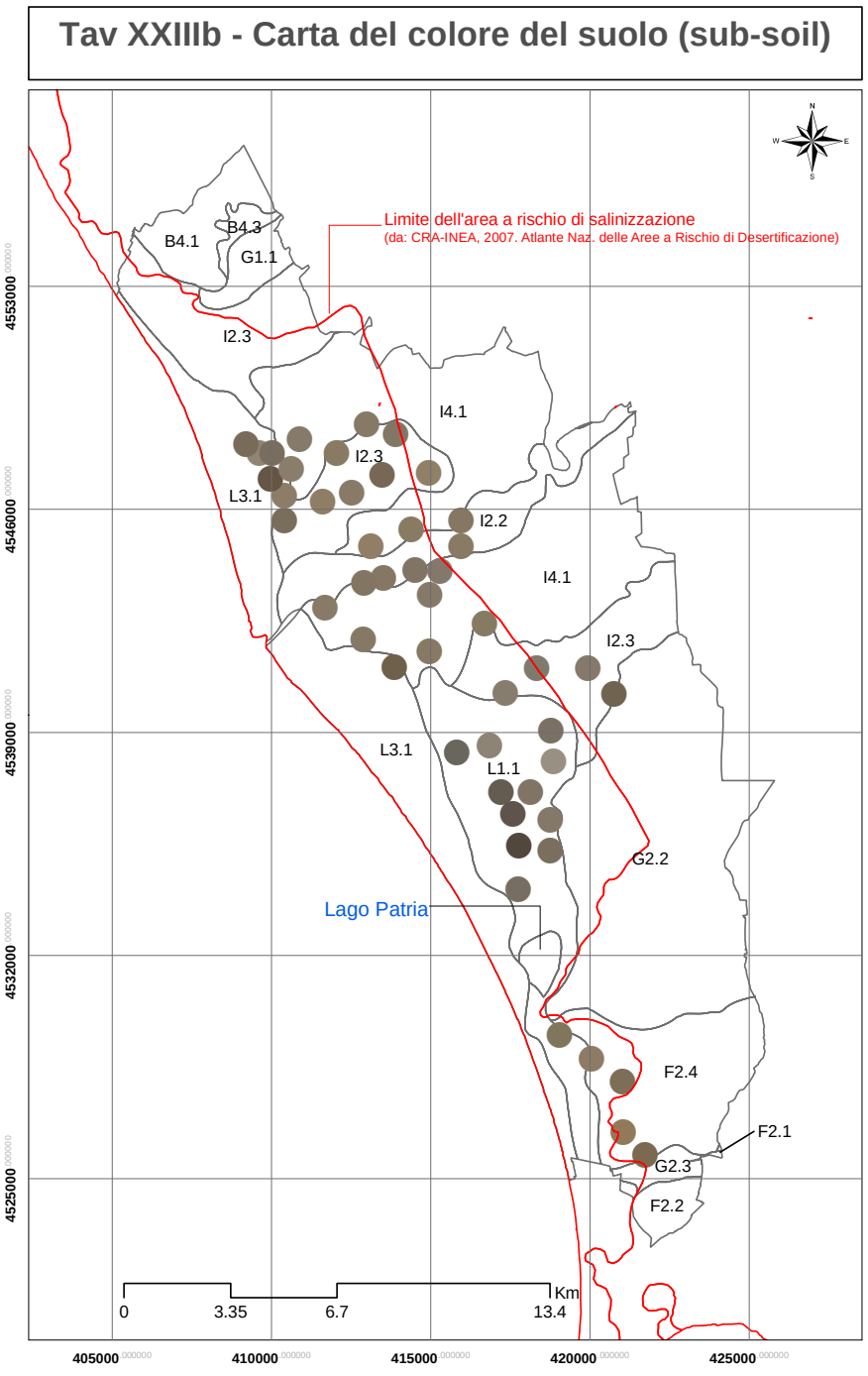
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



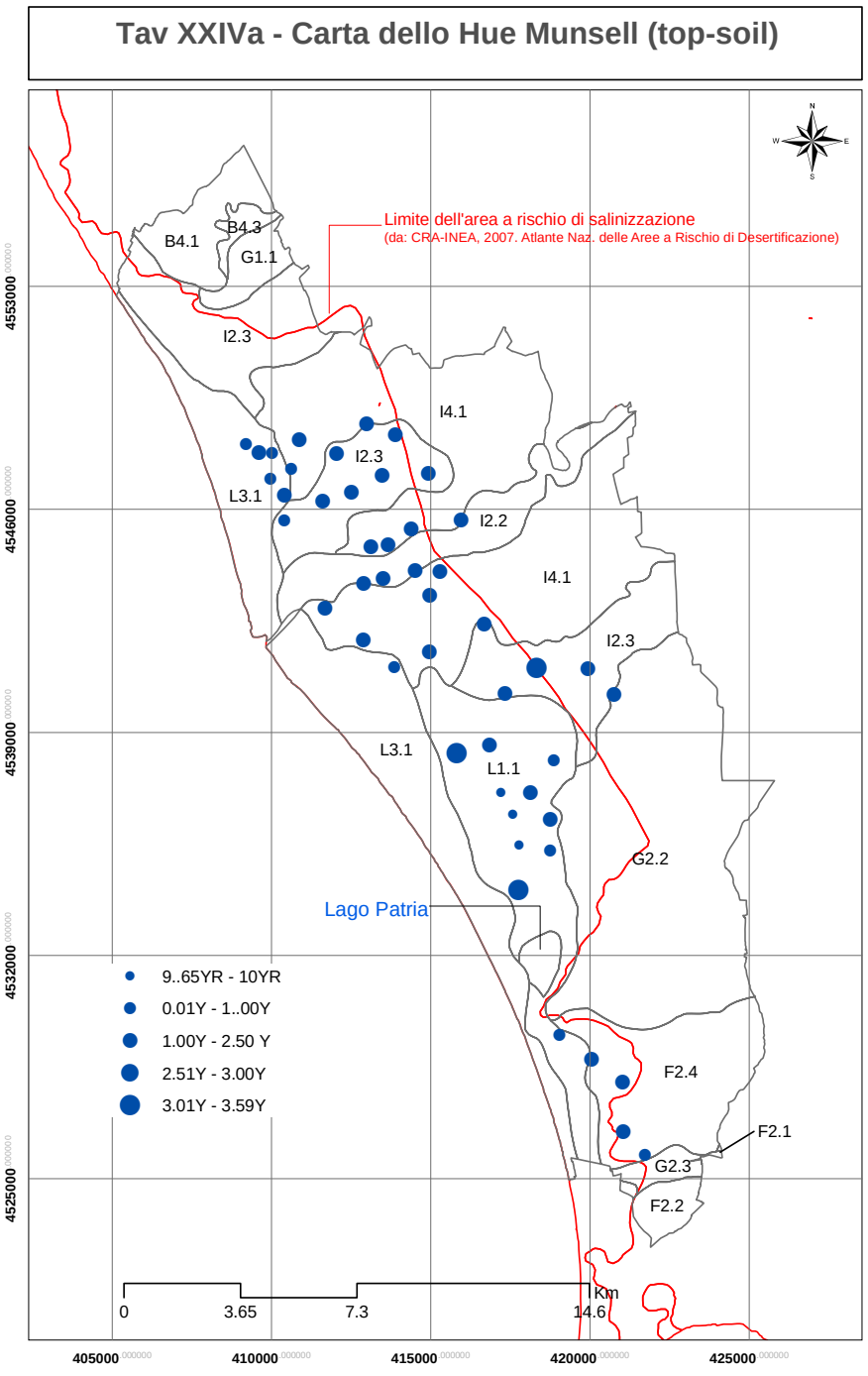
Le classi sono basate su "raggruppamenti naturali" inerenti i l'ampiezza della banda, che massimizzano la differenza tra le classi stesse (*Jenkis Natural Breacks*). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



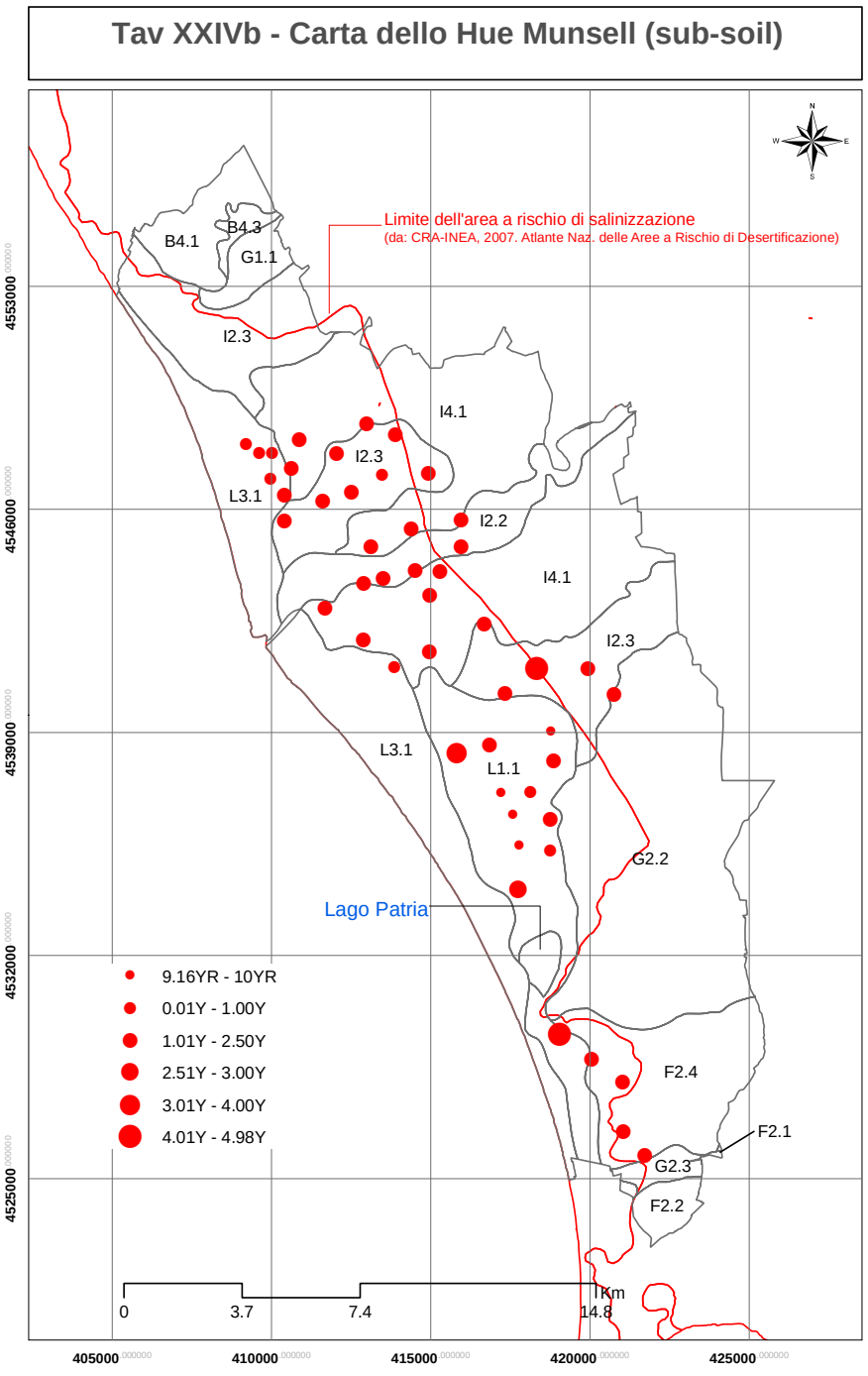
Il colore riprodotto è quello reale, ottenuto dalla composizione RGB corrispondente al colore Munsell (es. col. Munsell 3.5Y 3.98/0.61 = comp. RGB 100, 96, 90). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



Il colore riprodotto è quello reale, ottenuto dalla composizione RGB corrispondente al colore Munsell (es. col. Munsell 3.5Y 3.98/0.61 = comp. RGB 100, 96, 90). Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.

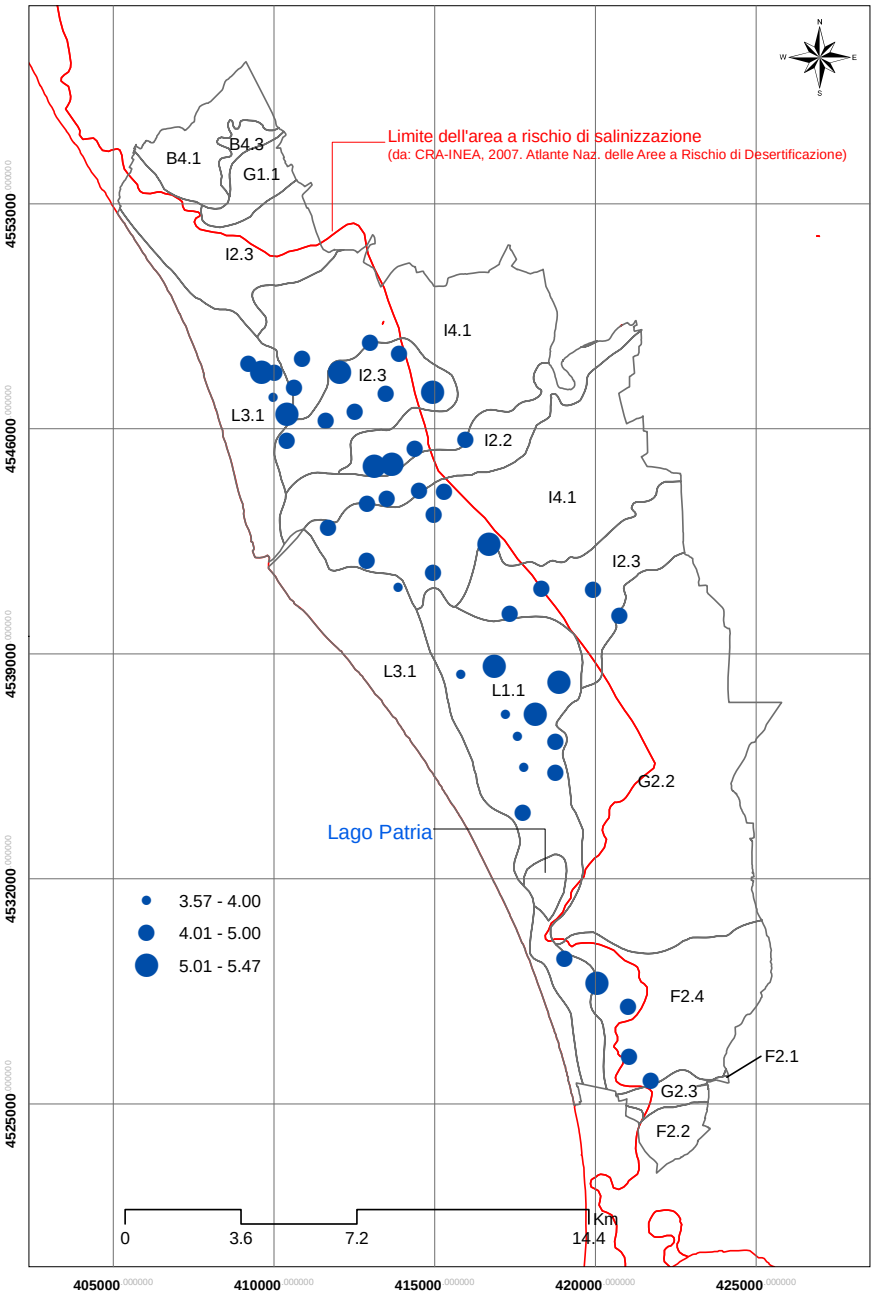


Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.

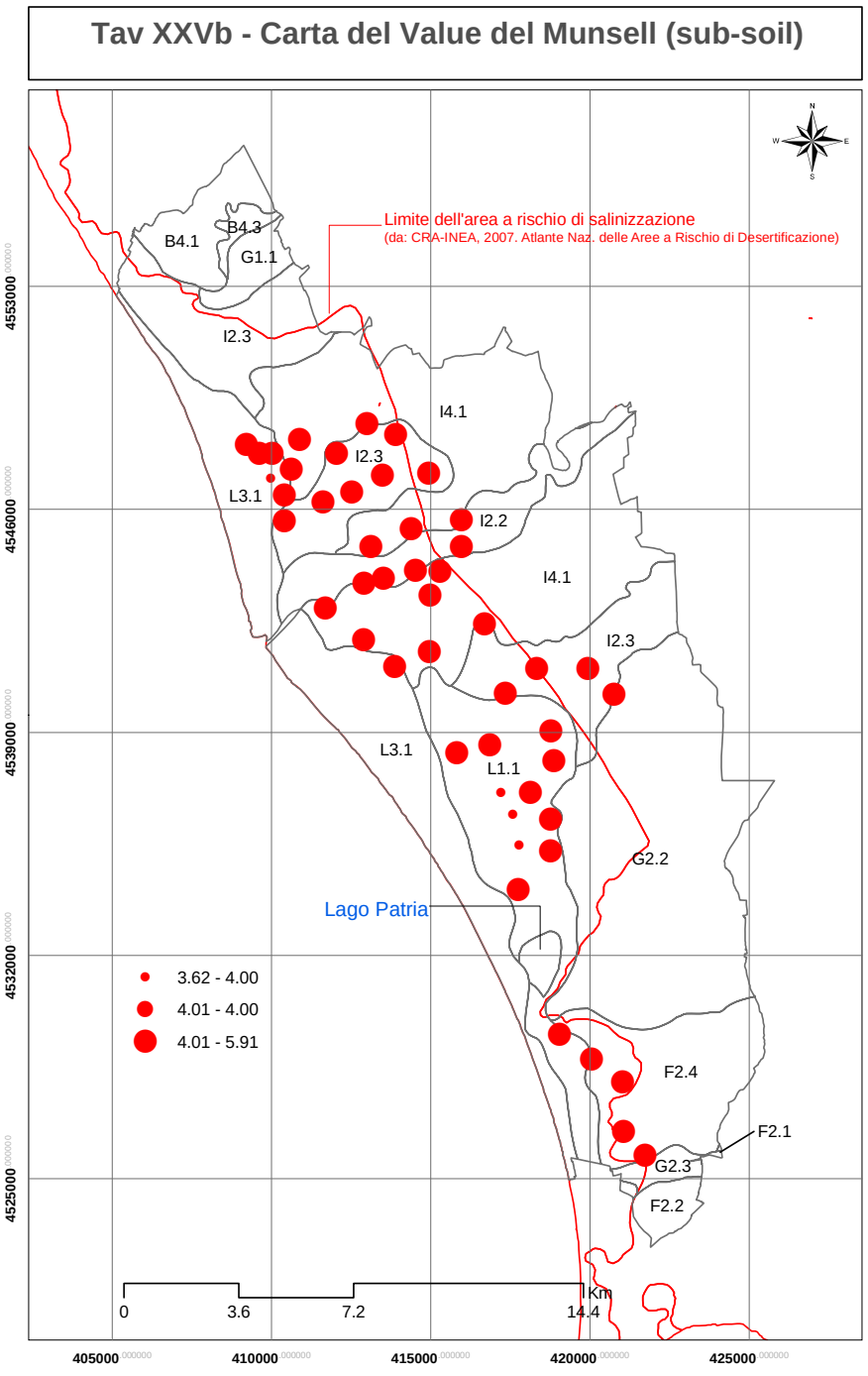


Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.

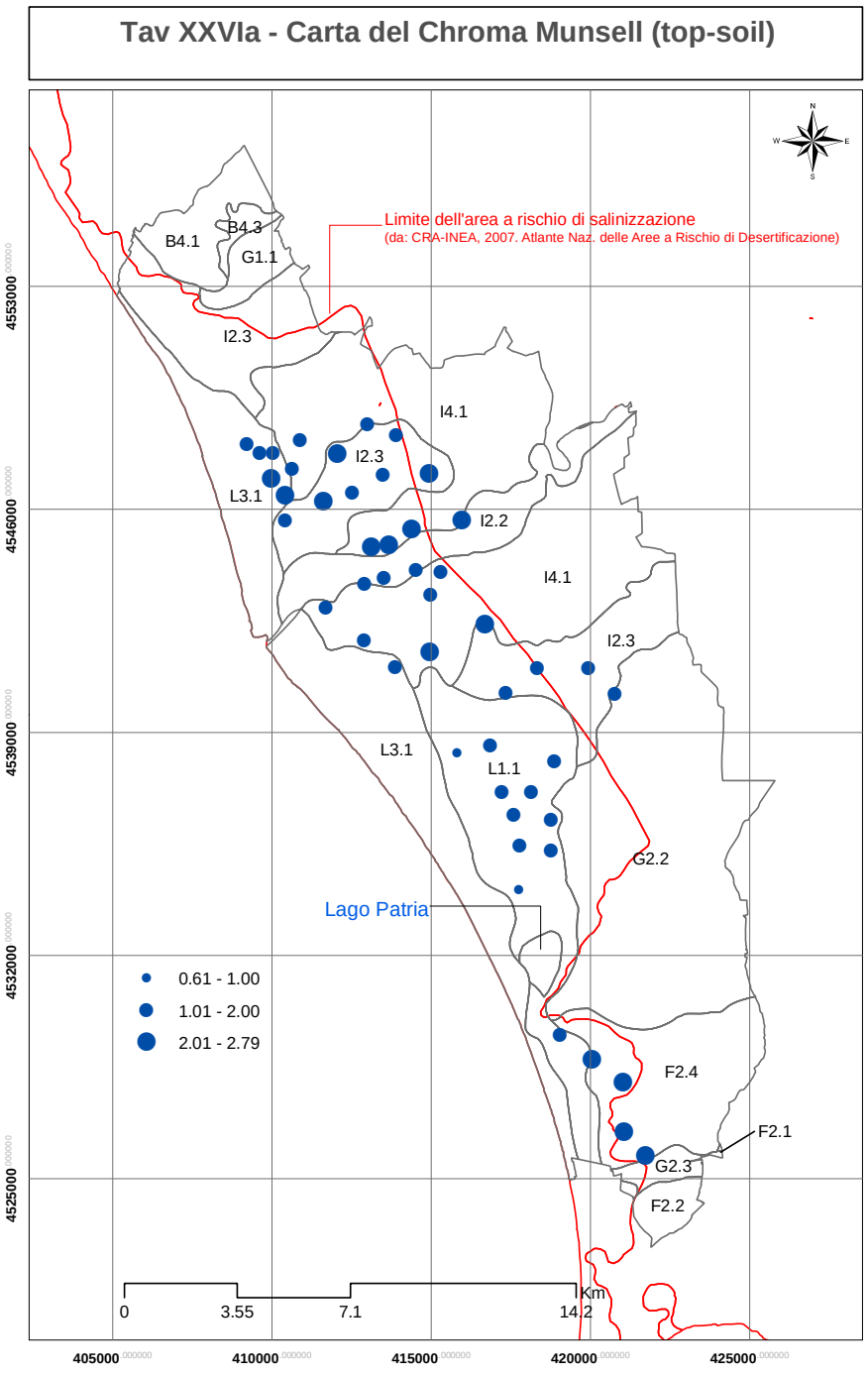
Tav XXVa - Carta del Value Munsell (top-soil)



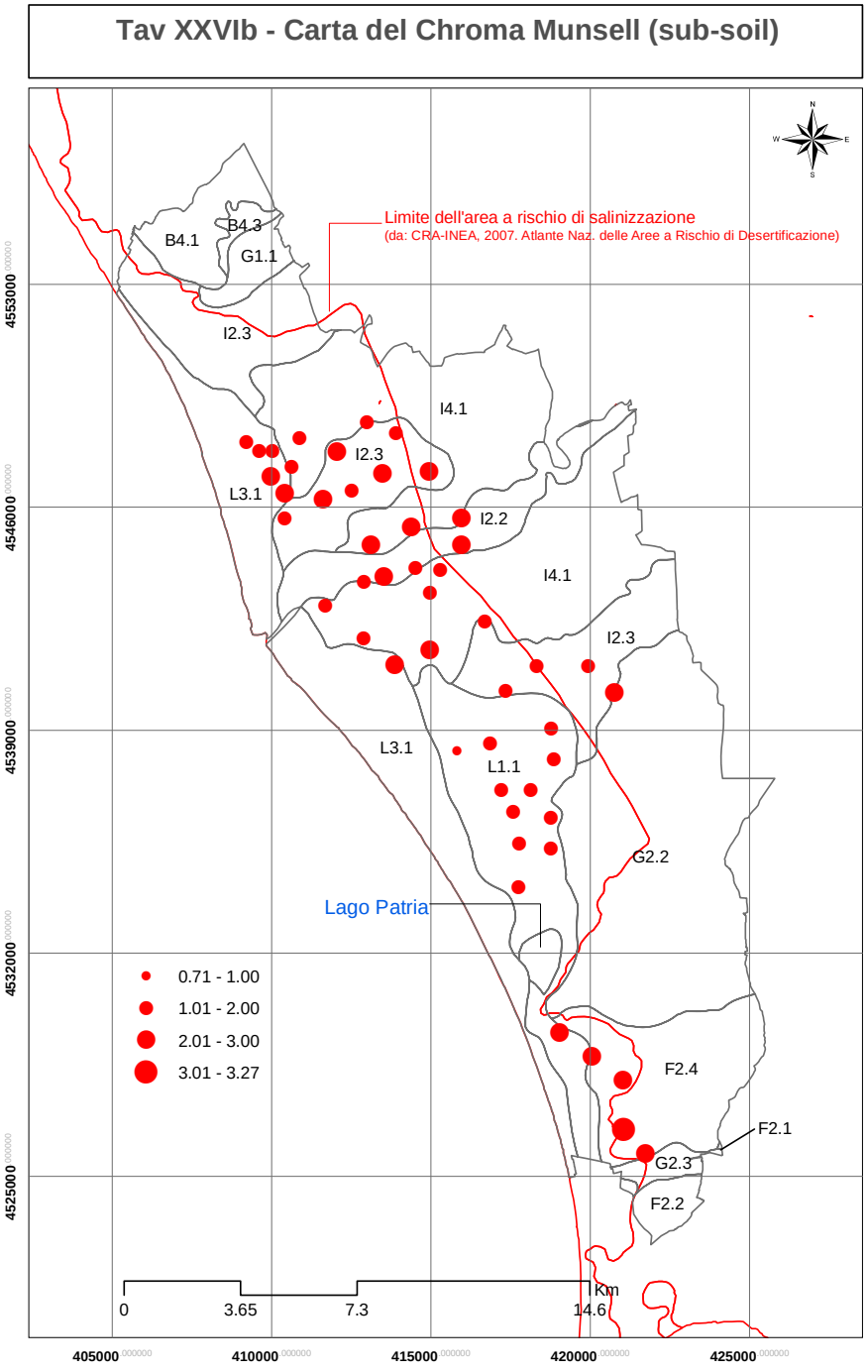
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



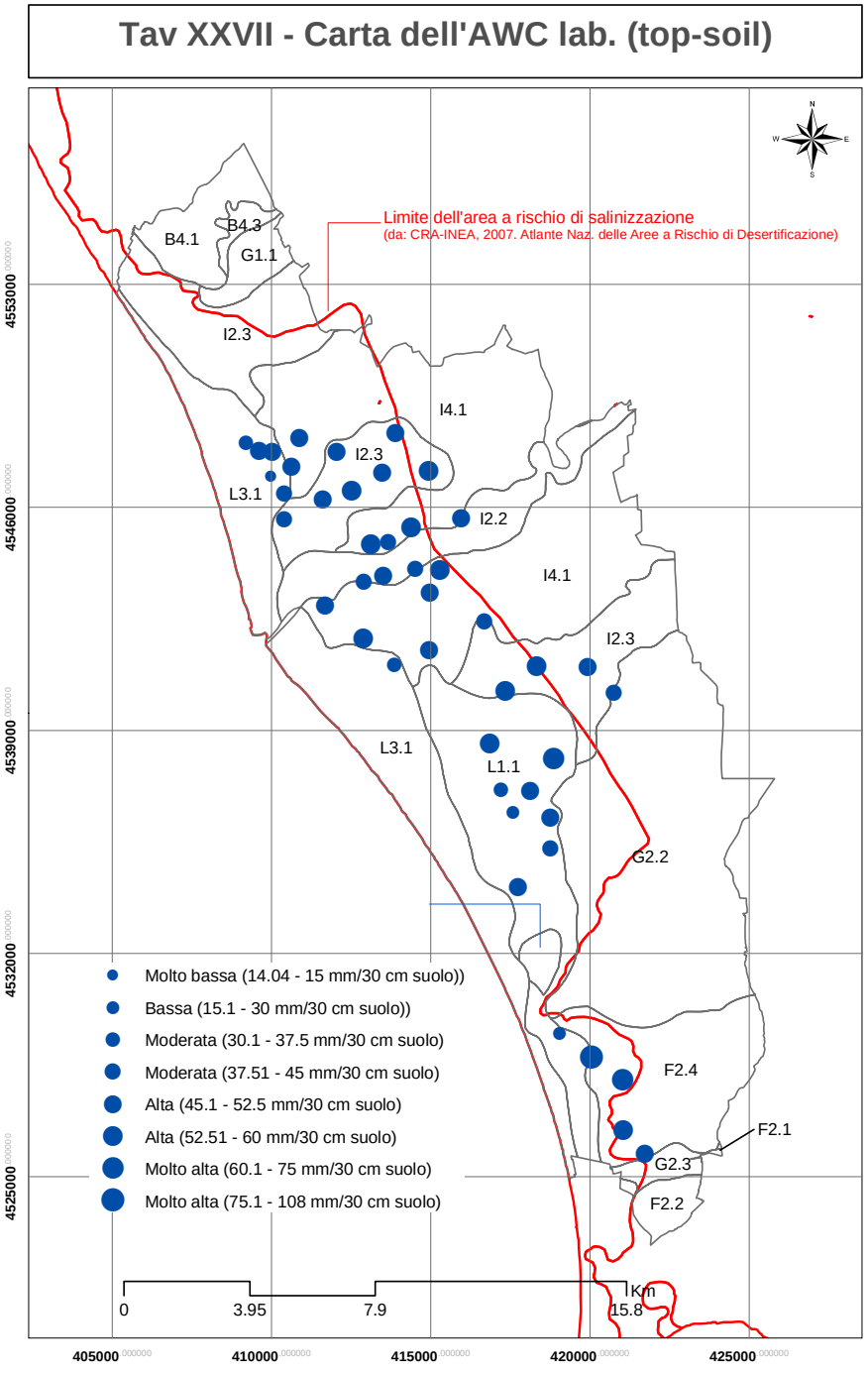
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



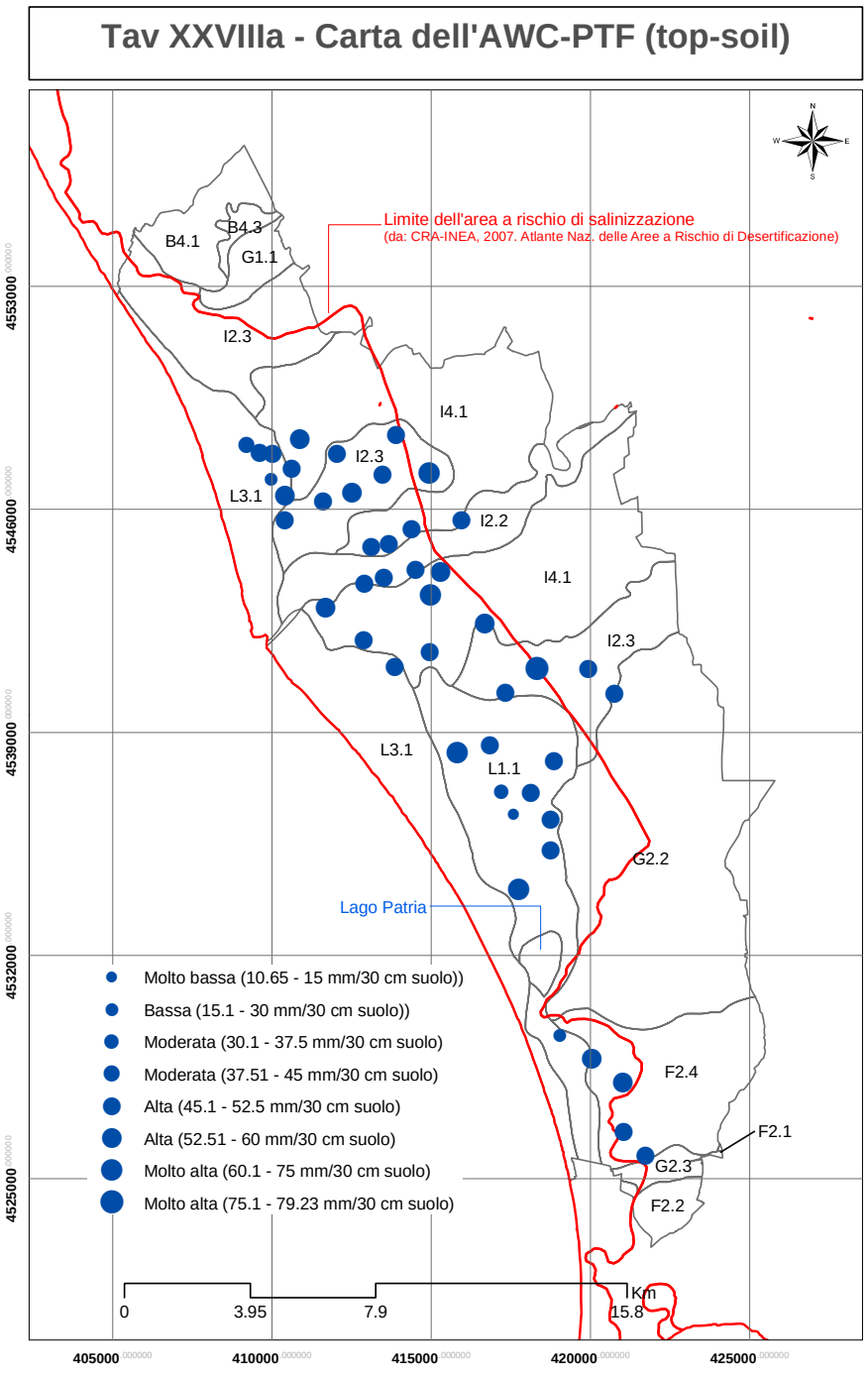
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



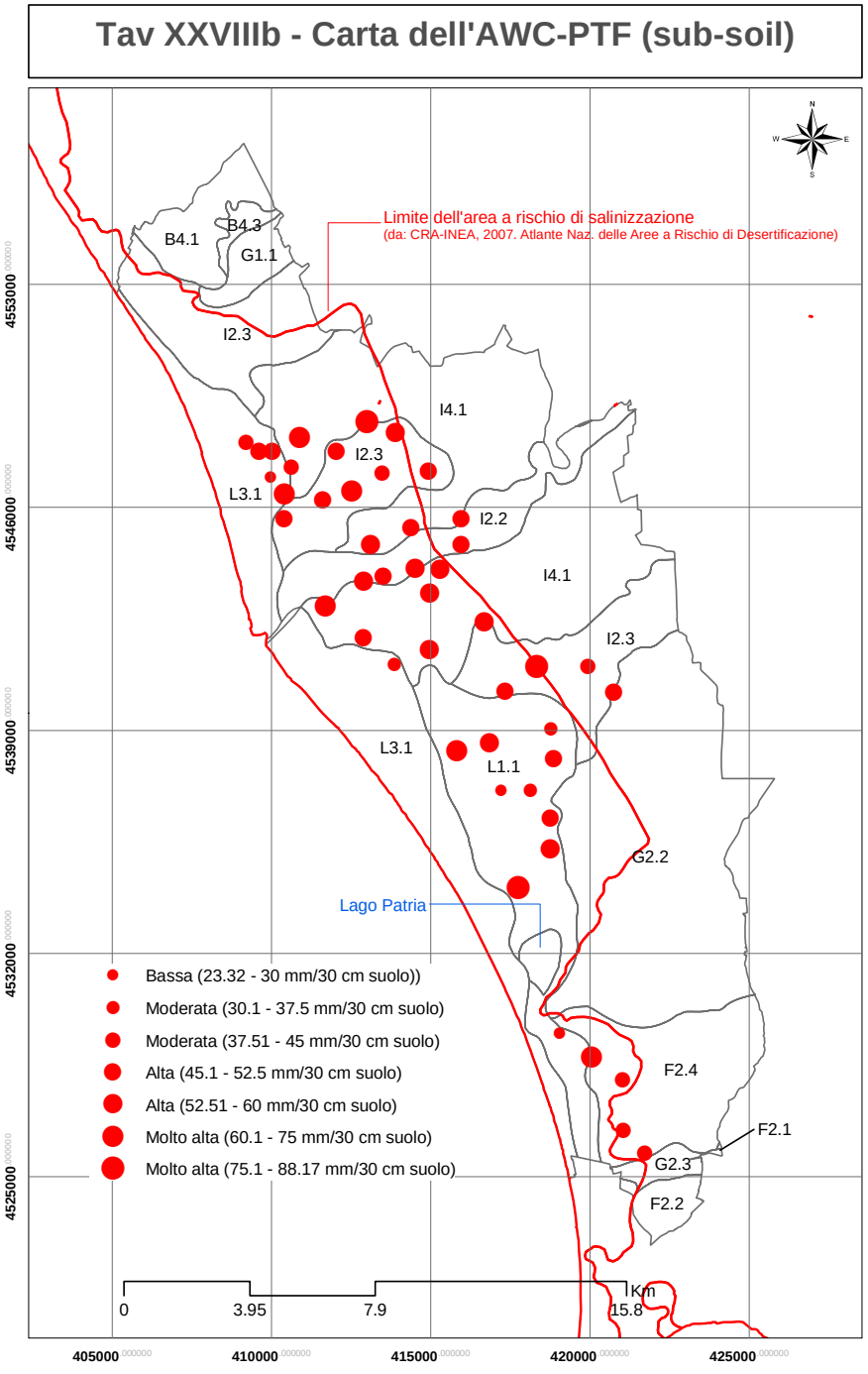
Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



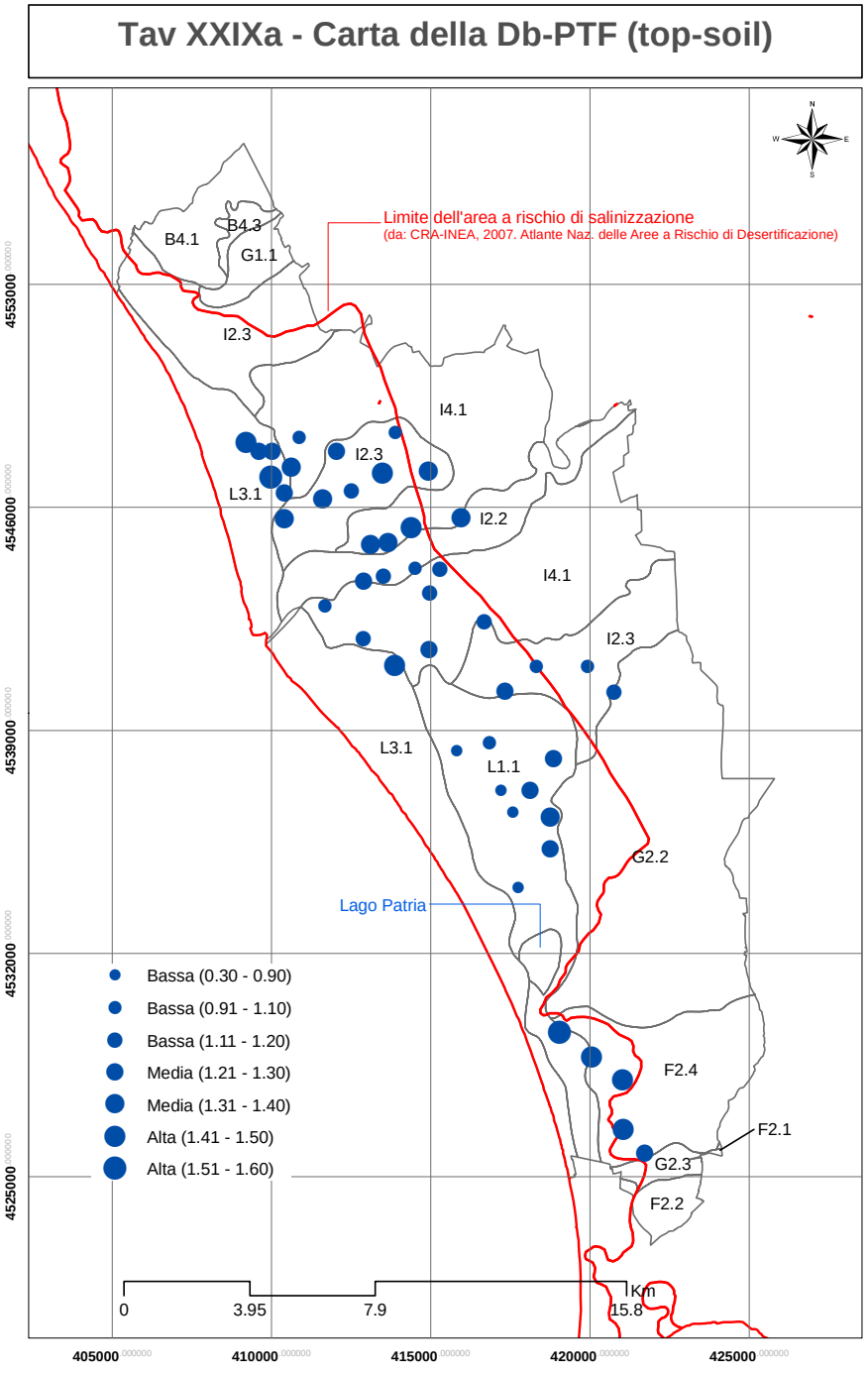
Per meglio valutare la variabilità spaziale dell'AWC, le classi "moderata" (30 < AWC< 45 mm[1]) "alta" (45 < AWC < 60 mm) e "molto alta" (> 75 mm) sono state suddivisa in sottoclassi. Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



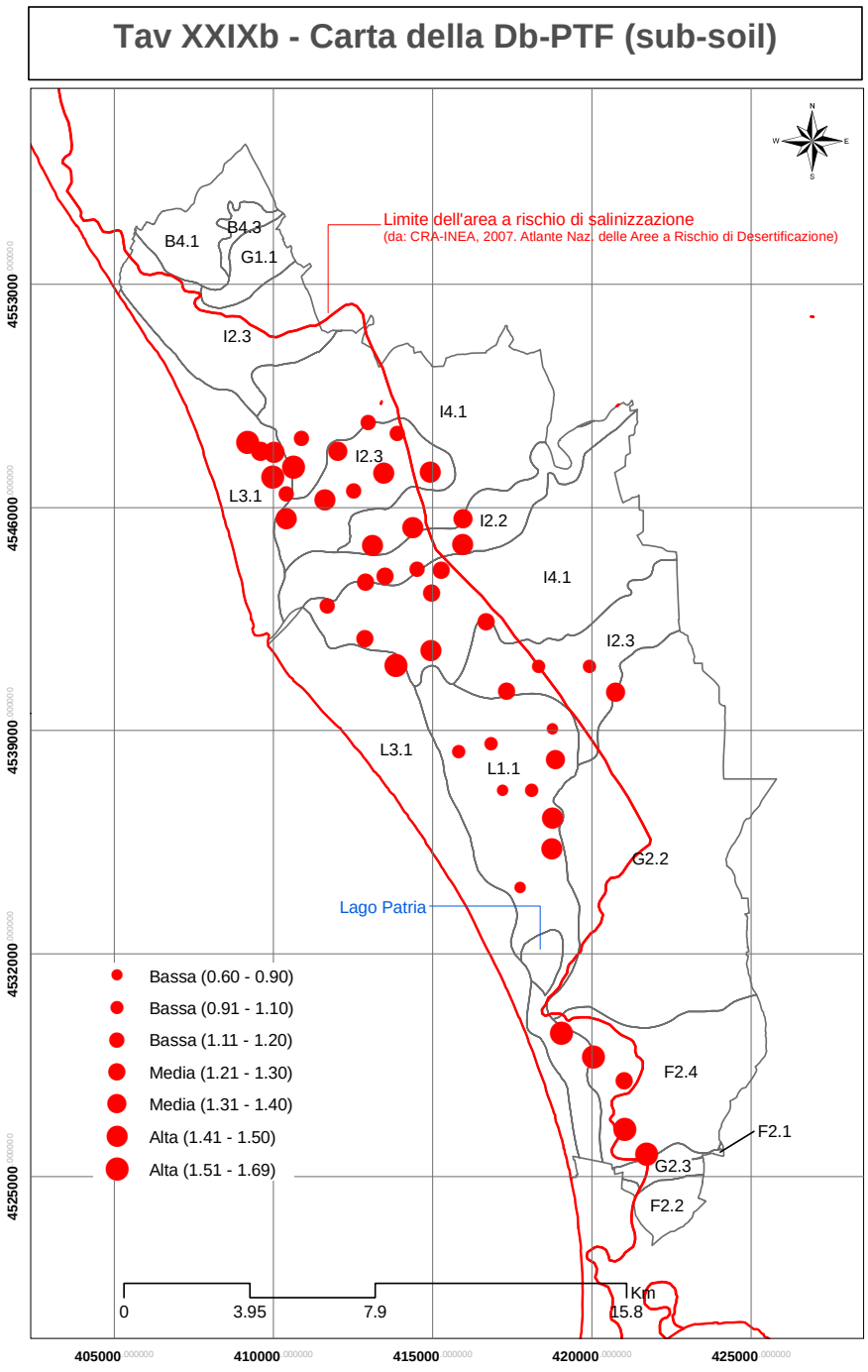
Per meglio valutare la variabilità spaziale dell'AWC, le classi "moderata", "alta" e "molto alta" sono state suddivisa in sottoclassi, in accordo con il metodo *Jenkis Natural Breacks.* Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



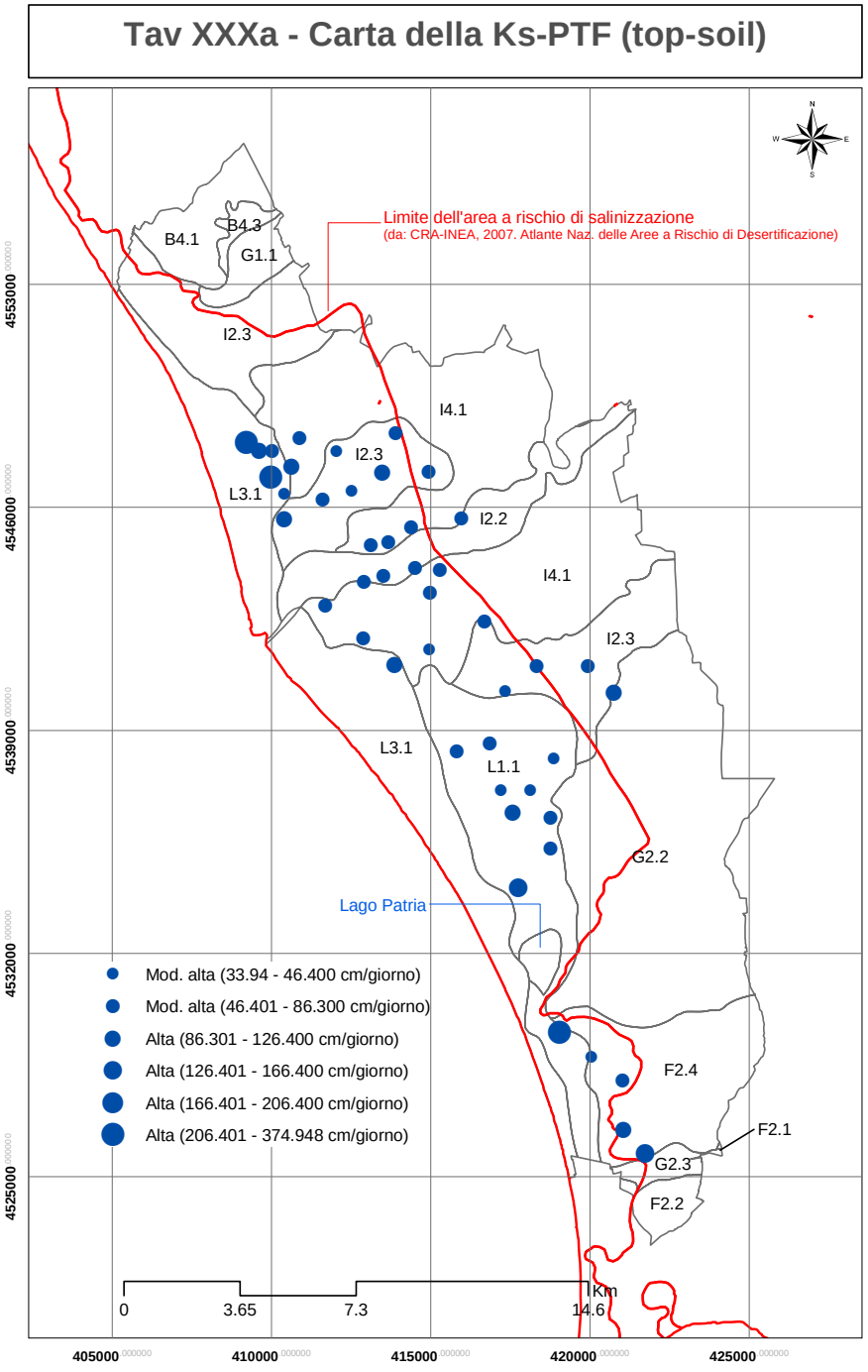
Per meglio valutare la variabilità spaziale dell'AWC, le classi "moderata", "alta" e "molto alta" sono state suddivisa in sottoclassi, in accordo con il metodo *Jenkis Natural Breacks.* Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



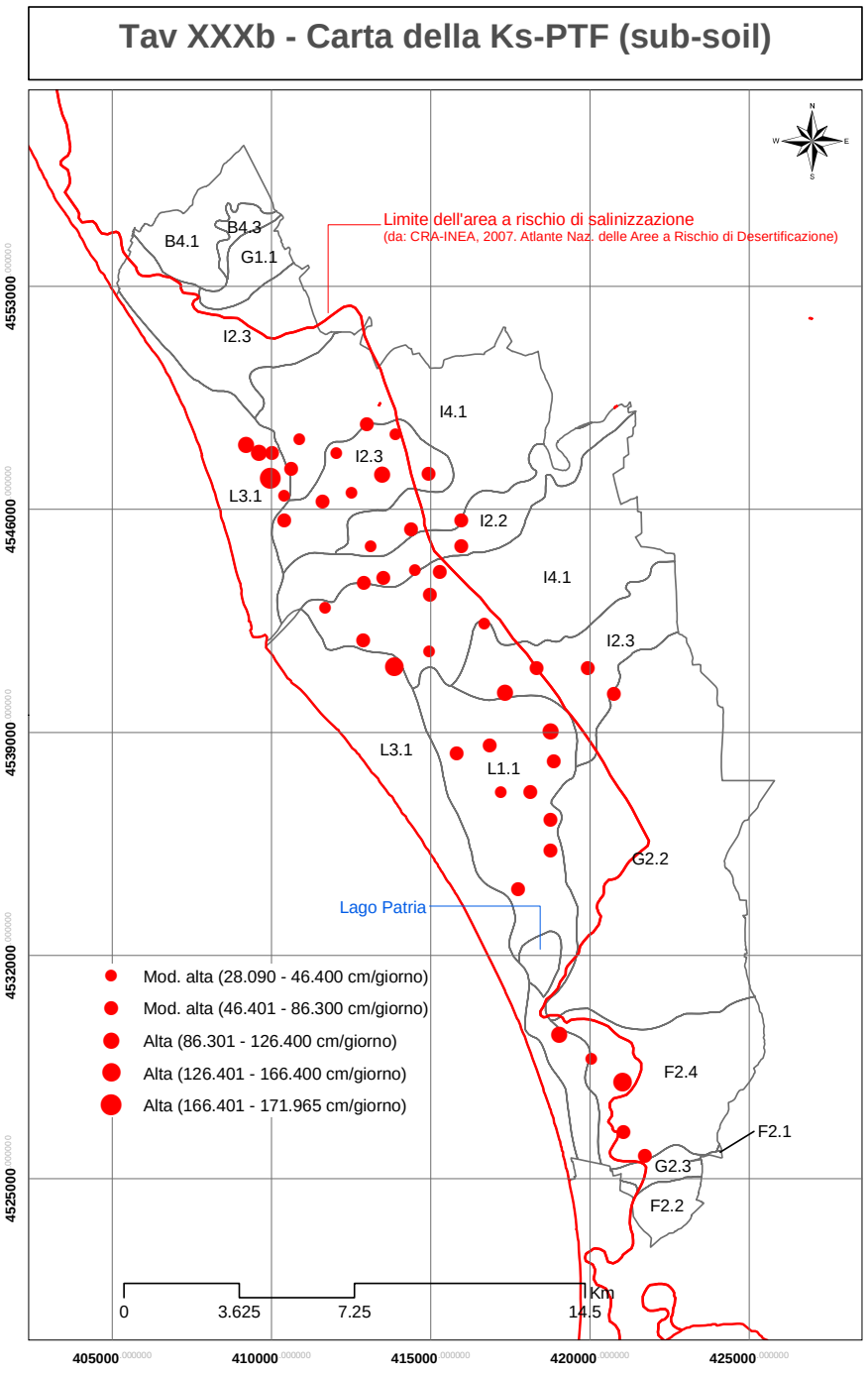
Per meglio valutare la variabilità spaziale della Db, le classi "bassa", "media" e " alta" sono state suddivisa in sottoclassi, in accordo con il metodo *Jenkis Natural Breacks.* Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



Per meglio valutare la variabilità spaziale della Db, le classi "bassa", "media" e " alta" sono state suddivisa in sottoclassi, in accordo con il metodo *Jenkis Natural Breacks.* Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



Per meglio valutare la variabilità spaziale della Ks, le classi "moderatamente alta" e "alta" sono state suddivisa in sottoclassi, in accordo con il metodo *Jenkis Natural Breacks.* Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.



Per meglio valutare la variabilità spaziale della Ks, le classi "moderatamente alta" e "alta" sono state suddivisa in sottoclassi, in accordo con il metodo *Jenkis Natural Breacks.* Per la descrizione delle unità cartografiche, vedi legenda allegata alla Tav II.