



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"
FACOLTA' DI AGRARIA-PORTICI
Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e dell'Ambiente

DOTTORATO DI RICERCA

**IN VALORIZZAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE
AGRO-FORESTALI
XVIII CICLO**

***Nuovi approcci alla Land Evaluation: un
caso studio nel lodigiano***

Dottorando

Dott. Piero Manna

RELATORE

Prof. F. Terribile

Co-RELATORE:

Dr. A. Basile

COORDINATORE:

Prof. A. Cioffi

ANNO ACCADEMICO 2004-2005

ai miei genitori

Ringraziamenti

La realizzazione di questo lavoro è il frutto di tre anni trascorsi a stretto contatto con un gruppo di persone uniche dal punto di vista professionale ma ancora di più dal punto di vista umano. A loro sento di dovere molto. Desidero ringraziare in modo particolare il prof. Fabio Terribile, il docente che mi ha guidato durante questi tre anni di dottorato e che mi ha dato la possibilità di avvicinarmi al complesso e affascinante mondo delle scienze del suolo e della pedologia. Di lui non dimenticherò mai l'inesauribile energia, la passione, la curiosità e la competenza con le quali affronta il proprio lavoro. Ringrazio di vero cuore il Dr. Angelo Basile per la professionalità e la disponibilità dimostratemi in questi anni e grazie alle quali ho potuto superare i momenti di maggiore incertezza. Sono profondamente grato al Dr. Roberto De Mascellis per la pazienza e la calma con le quali mi ha ascoltato e per la competenza con la quale mi ha saputo consigliare innumerevoli volte. Colgo l'occasione per ringraziare il prof. Massimo Menenti, direttore del CNR ISAFOM di Ercolano, per avermi consentito di frequentare l'istituto e di svolgere alcune delle attività di laboratorio fondamentali per il completamento della tesi. Tante persone mi hanno dedicato tempo ed impegno, aiutandomi nei periodi di lavoro più intenso. Le stesse persone con le quali ho trascorso momenti indimenticabili e per le quali nutro sentimenti di profonda stima ed affetto. In particolare ho il desiderio di ringraziare Luciana Minieri, Michela Iamarino, Nadia Orefice, Simona Vingiani, Susi Pepe, Antonello Bonfante, Antonio Mileti, Eugenio Feole, Giuliano Langella, Paolo Magliulo. Ognuno di voi, ragazzi, mi ha insegnato qualcosa ed io ne farò tesoro.

Grazie anche a te Carmelina per essere stata al mio fianco e per avermi ascoltato, sempre.

Sono infinitamente grato ai miei fratelli Luigi e Gaetano e ai miei genitori, ai quali dedico questa tesi, per avermi sostenuto nei momenti più difficili, per avermi incoraggiato e per aver creduto in me.

Colgo l'occasione per esprimere gratitudine a tutti i professionisti che ho avuto il piacere di incontrare in questi tre anni e che hanno sempre mostrato estrema disponibilità nei miei confronti. Ringrazio in particolare i dott.ri. Gabriele Buttafuoco, Giorgio Albani, Giacomo Mele, Maurizio Buonanno, Dario Sacco, il prof. Marco Acutis e tutti i suoi collaboratori.

Infine un grazie a tutti i "priniani", per i bei momenti trascorsi insieme.

Bene, ora sono pronto a volare....sempre più in alto. E se ci riuscirò sarà anche grazie a tutti voi!

Indice

Introduzione	I
1. I sistemi di valutazione delle terre	4
1.1 USDA Land Capability System	4
1.2 USBR Land Classification for Irrigated Agriculture	6
1.3 FAO Framework for Land Evaluation - Land Suitability	7
2. Casi studio in Italia	11
2.1 Alcuni Esempi	12
2.1.1 La Capacità d'Uso dei Suoli	12
2.1.2 L'Attitudine dei Suoli	13
3. Limiti e potenzialità delle applicazioni di Land Evaluation	16
3.1 Aspetti generali	16
3.2 I Modelli e la Land Evaluation	18
3.3 La variabilità dei suoli e la Land Evaluation	19
4. Obiettivo della Ricerca	21
5. Approcci metodologici per migliorare la base fisica del processo di valutazione delle terre	23
5.1 La variabilità spaziale dei suoli	23
5.2 Approcci geostatistici	24
5.2.1 Il variogramma	29
5.2.2 Il Kriging	30
5.3 Approcci deterministici	31
6. Il comportamento Idrologico dei suoli e la Pedologia	34
6.1 Le principali variabili e proprietà idrauliche	36
6.1.1 Contenuto d'acqua nel suolo	36
6.1.2 Capacità idrica di campo	38
6.1.3 Acqua disponibile	40
6.1.3 Movimento dell'acqua in un suolo	42
7. Le PTF (funzioni di pedotrasferimento)	48
8. Il funzionamento del sistema suolo-pianta-atmosfera	52
8.1 Principi e funzionamento dei modelli di simulazione	52
9. Il caso studio della pianura lodigiana	54
9.1 Introduzione all'area di studio	54
9.1.1 Clima	54
9.1.2 Geologia e Litologia	55
9.1.3 Geomorfologia	56
9.1.4 Idrografia ed Idrogeologia	58
9.1.5 Uso del suolo	59
9.2 La classificazione del pedopaesaggio Lodigiano	60
9.2.1 Pedopaesaggio dei terrazzi subpianeggianti rilevati sulla pianura (R)	60
9.2.2 Pedopaesaggio del livello fondamentale della pianura (L)	64
9.2.3 Pedopaesaggio delle valli fluviali dei corsi d'acqua olocenici (V)	67
9.3 L'area di studio	72
10. Materiali e metodi	74
10.1 Inquadramento Pedo-Paesaggistico	74

10.2 Campionamento e misure di campo	75
10.2.1 Lo schema di Campionamento	75
10.2.2 Campionamento per le analisi chimiche	77
10.2.3 Campionamento per le analisi idrologiche	77
10.2.4 Il penetrometro	78
10.3 Le analisi di laboratorio	79
10.3.1 Analisi chimiche	79
10.3.2 Analisi idrologiche	79
10.4 Il sito per il monitoraggio in continuo delle variabili idrauliche	83
10.5 Le Pedofunzioni	85
10.5.1 Vereecken et al. (1989)	86
10.5.2 Wosten et al., (1999).	88
10.5.3 Indici per la scelta delle PTFs	89
10.6 Le analisi modellistiche	91
10.6.1 Il modello SWAP	91
10.6.2 Il modello CropSyst	95
10.7 Le analisi territoriali	100
10.7.1 La morfologia del paesaggio	100
10.7.2 Indici di vegetazione e stime di produzione	101
10.8 Le analisi geostatistiche	102
10.9 La Land Suitability per il mais	102
11. Risultati e Discussione	105
11.1 Premessa	105
11.2 La misura dei parametri edafici	107
11.2.1 I dati edafici	107
11.2.2 I dati territoriali	112
11.3 Analisi spaziale dei parametri edafici	116
11.3.1 Approccio classico e pedopaesaggistico	116
11.3.2 Approccio deterministico continuo	134
11.3.3 Approccio geostatistico	139
11.3.4 Valutazioni sui risultati degli approcci di distribuzione spaziale prodotti (geostatistico e deterministico continuo)	151
11.4. Le applicazioni territoriali	151
11.4.1 Le applicazioni modellistiche	151
11.4.2 L'approccio classico alla Land Evaluation	176
11.4.3 I risultati a confronto	177
12. Considerazioni conclusive	180
Bibliografia	182

*When land use and management are
well matched with soil capability,
things work as expected.*

Earth Sciences for Society Foundation, 2005.

Introduzione

Il suolo è un fattore essenziale per il mantenimento dell'equilibrio globale della biosfera, per la produzione di biomassa, per la regolazione di altre componenti ambientali (come le acque sotterranee) e costituisce il substrato della maggior parte delle attività biologiche, comprese quelle dell'uomo. La vita ed il tenore di vita sulla terra dipendono anche dalle capacità del suolo di produrre beni, e da ciò l'uomo può trarre vantaggio tramite le sue attività di utilizzazione. E' quindi una necessità primaria delimitare i differenti suoli e definirne le proprietà valutando le diverse possibilità di utilizzazione e di intervento, attraverso una politica globale di gestione, valutazione e conservazione (Borlaug and Dowswell, 1994). Tale politica per essere applicata richiede necessariamente informazioni armonizzate sia nel tempo che nello spazio (Bouma and Bregt, 1989).

L'uomo osserva e valuta il territorio sin da tempi immemorabili. Nella Bibbia (Numeri 13:21) è scritto che gli uomini inviati da Mosè ad esplorare la terra di Canaan riferirono al loro ritorno di aver trovato un territorio nel quale *“scorrevano fiumi di latte e miele”*. Probabilmente essi consideravano quelle terre particolarmente indicate per gli scopi che avevano in mente, e cioè far pascolare i cammelli sulle pianure semi aride e coltivare datteri nelle oasi (Beek, K.J., 1978)

In passato il modo in cui l'uomo sfruttava le risorse del territorio evolveva lentamente, in modo graduale, come risultato di decisioni prese da singoli individui separatamente.

Oggi in un mondo sempre più complesso e densamente popolato, sta diventando urgente la necessità di pianificare qualsiasi forma di utilizzo del territorio, sfruttando al meglio le risorse ambientali e nello stesso tempo preservare tali risorse per il futuro. Una fase fondamentale della pianificazione è quella comunemente definita Valutazione del Territorio o Land Evaluation, termini mediante i quali possiamo intendere: *“tutti i metodi per analizzare o predire l'uso potenziale del territorio”* (Van Diepen et al., 1991), oppure *“ il processo di valutazione del ‘comportamento’ del territorio quando utilizzato per uno specificato scopo, comprendente l'esecuzione e l'interpretazione di indagini sull'utilizzo attuale del territorio, sulla vegetazione, sulla morfologia, sui suoli, sul clima e su tutti gli altri aspetti ambientali che consentano di identificare e poi confrontare i possibili utilizzi alternativi, in termini applicabili agli obiettivi della valutazione”* (FAO,1985).

Oggi la Land Evaluation rappresenta lo strumento principale, adoperato sia in paesi sviluppati che in via di sviluppo, per l'analisi e la pianificazione territoriale a fini ambientali, agricoli e forestali.

Essa nasce dall'interpretazione della carta pedologica che costituisce il documento informativo di base e che illustra le caratteristiche ed i modelli di distribuzione geografica dei suoli presenti nell'ambito di un determinato territorio. Dalla sua consultazione è possibile desumere una vasta gamma di informazioni, che si prestano ad essere impiegate nei più diversi settori attinenti la pianificazione territoriale. Il risultato finale è la produzione di carte derivate contenenti l'informazione richiesta, esplicitata in forma semplice e comprensibile da una vasta gamma di utenti non necessariamente specializzati. Si può quindi affermare che oggi gli esperti dei suoli dispongono dei mezzi necessari per "comunicare" con i non "addetti ai lavori". Obiettivo questo che è stato raggiunto nel corso degli ultimi decenni.

La scienza del suolo infatti conobbe un periodo di particolare attenzione durante gli anni '30, nel corso dei quali si ebbe un improvviso ed incontrollato sviluppo urbano ed agricolo. Tuttavia il particolare interesse per questa nuova scienza fu accompagnato dalla nascita di un gergo tecnico difficilmente comprensibile, che condusse ad un allontanamento tra gli scienziati del suolo e coloro che delle conoscenze e del lavoro dei primi avevano bisogno: i pianificatori territoriali, gli ingegneri e gli agricoltori. Gli studi sulle proprietà dei suoli furono gradualmente abbandonati perché troppo difficili da interpretare. I primi esperti dei suoli a far luce sulla problematica furono Edelman (1963) e Kellog (1961) che in alcuni scritti definirono chiaramente la necessità di rendere comprensibili i propri studi, anche e soprattutto a coloro che sarebbero stati gli utilizzatori finali.

Prima della seconda guerra mondiale, in risposta a tali esigenze, il Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) sviluppò il *Land Capability System*, un sistema per lo studio della capacità d'uso del territorio e dei suoli. Negli anni successivi furono prodotti diversi altri sistemi di interpretazione delle informazioni riguardanti il territorio, con particolare attenzione alla gestione delle risorse idriche e dei suoli e alla previsione sulla qualità delle produzioni agricole. Ne è un esempio il *Land Classification System for Irrigated Agriculture* sviluppato dal U.S. Bureau of Reclamation.

Uno degli obiettivi principali della comunità scientifica e dei soggetti preposti alla pianificazione territoriale era quello di giungere ad una metodologia di valutazione del territorio basata su concetti e procedure universalmente validi e applicabili ad ogni tipo di utilizzo del territorio stesso. Negli anni '70 la FAO coinvolse un gruppo di esperti che si dedicarono a tale scopo; essi discussero i primi risultati ottenuti in un incontro avvenuto a Wageningen nel 1973 (Brinkman and Smyth, eds. 1973). In seguito ad un secondo incontro avvenuto a Roma, fu pubblicato il *FAO Framework for Land Evaluation* (FAO 1976; ILRI 1977). Questo schema fu sviluppato assegnando particolare peso alla fase descrittiva

riguardante i possibili o potenziali utilizzi del territorio ed ai fattori ambientali e socio-economici che lo caratterizzano. Lo scopo era chiaramente quello di ridurre le approssimazioni cui si va incontro quando viene applicato, in un dato ambiente, un sistema di valutazione sviluppato in ambienti caratterizzati da condizioni (nel più ampio senso del termine) totalmente differenti.

Riassumendo, il Land Capability System o Sistema per definire la Capacità d'Uso del territorio è un vero e proprio schema di valutazione e classificazione, che negli anni è stato adattato per l'utilizzo in diversi paesi, così come il Land Classification System for Irrigated Agriculture. E' da essi che deriva il Framework della FAO il quale non può essere considerato un sistema di valutazione a tutti gli effetti, piuttosto un insieme di concetti, principi e procedure sulla base delle quali possono essere costruiti sistemi di valutazione a scala nazionale, regionale o locale (Beek, K.J., 1978).

Tuttavia, qualsiasi schema di classificazione del territorio poggia su un concetto comune, che è quello del confronto fra le caratteristiche del territorio stesso ed i requisiti che esso dovrebbe avere per essere destinato, in quanto idoneo, ad un utilizzo.

1. I sistemi di valutazione delle terre

1.1 USDA Land Capability System

Fu sviluppato negli anni '30 dal Soil Conservation Service of the U.S. Department of Agriculture. Il suo utilizzo è finalizzato alla definizione dell'intensità massima d'uso del territorio, compatibile con le esigenze di conservazione delle risorse ambientali in generale e del suolo in particolare. E' stato adottato in diversi paesi nel corso degli anni (British Land Use Capability Classification -1969-, Canadian Land Capability Scheme -1970-, Dutch system -1975-, etc.). E' un sistema "qualitativo" basato sull'identificazione di caratteristiche fisiche permanenti del territorio che potrebbero limitarne l'utilizzo. Tra le caratteristiche considerate vi sono quelle intrinseche del suolo come la profondità, la tessitura, la pietrosità superficiale, la capacità di ritenzione idrica e poi vi sono quelle ambientali come la pendenza, il rischio di erosione, l'inondabilità, etc. Secondo tale sistema le unità territoriali individuate e cartografate, possono ricadere all'interno di otto differenti Classi di Capacità o Capability Classes a seconda delle capacità potenziali che esse possiedono. Tali capacità sono riferite a predefinite tipologie d'uso sostenibile: coltivazioni agrarie oppure pascoli, foreste, aree ricreative, parchi naturali. Le limitazioni all'uso aumentano dalla classe I verso la classe VIII, cosicché ricadranno nella prima classe le aree idonee alla produzione di colture agrarie e nell'ultima classe le aree la cui destinazione potrebbe essere l'utilizzo come zone ricreative o parchi naturali (fig.1.1). Il sistema separa le aree idonee alla coltivazione (Classi I-IV) da quelle non idonee (Classi V-VIII). La capacità d'uso di ogni unità territoriale viene assegnata mediante un confronto tra le caratteristiche della stessa (pendenza, tessitura, profondità del suolo, etc.) ed i limiti precedentemente definiti per l'identificazione delle classi (fig.1.2). Oltre le classi possono essere definite delle "sottoclassi" tramite le quali viene identificato il tipo di limitazione, e delle "unità", alle quali solitamente è associata in legenda una descrizione degli interventi sistematori consigliati per le unità territoriali in esse ricadenti. Le classi vengono identificate con numeri romani (I-VIII), le sottoclassi con lettere minuscole (ad es., *e*, *w*, *s*, *c*) che seguono il numero romano della classe, le unità con un numero arabo che segue la lettera minuscola. Un esempio di classificazione sino al livello di unità, potrebbe essere il seguente: VI_w-2.

Il Land Capability System può essere considerato come una sistema qualitativo "generico" e non "specifico" per una determinata coltura. In Portogallo ad esempio i suoli sui quali viene coltivato il famoso vino *Porto*, ricadono, secondo questo sistema, nelle classi VI e VII. Questo schema quindi trova massimo impiego nelle pianificazioni su piccola scala, regionale o nazionale.

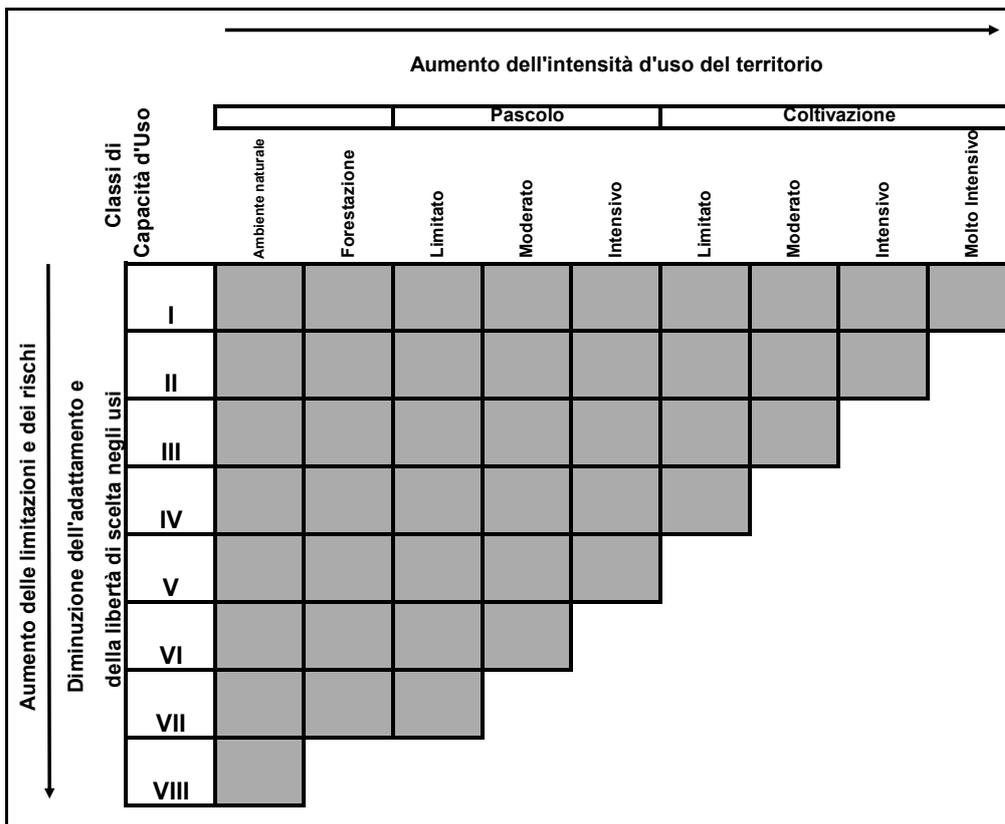


Fig.(1.1): le classi di capacità d'uso secondo il Land Capability system (USDA)

CAPACITÀ D'USO DEI SUOLI

Modello interpretativo

Classi di capacità	Profondità utile	Tessitura orizzontale superficiale %	Scheletro orizzontale superficiale %	Pietrosità e rocciosità %	Fertilità orizzonte superficiale	Drenaggio	Rischio di inondazioni	Lim. climatiche	Pend. %	Erosione
I	>100 cm	—	< 15	P < 3 R < 2	—	buono	assente	assenti	< 2	assente
II	80 - 100 cm	A+L > 70 A > 35	15 - 35	idem	pH 4,5 - 5,5 TSB 35 - 50% CSC 5-10meq CaCO3 > 40%**	mediocre mod. rapido*	lieve < 1v/10 a < 2gg	lievi	2 - 10	assente
III	50 - 80 cm	A > 50 - 60 S > 85 L > 60 - 70	35 - 70	idem	pH < 4,5 TSB < 35% CSC < 5 me	lento	moderato 1v/5 - 10 a > 2gg	moderate 200 - 700 m	10 - 20	debole
IV	25 - 50 cm	idem	idem	P 3 - 15 R < 2	idem	molto lento rapido	alto > 1c/5 a > 7gg	idem	20 - 35	moderata
V	< 25 cm	idem	idem	P 15 - 50 R 2 - 25	idem	impedito	molto alto golene aperte	idem	< 2	assente
VI	idem	idem	idem	P 15 - 50 R 2 - 25	idem	idem	idem	forti 700-300 m	35 - 70	moderata
VII	idem	idem	idem	P 15 - 50 R 25 - 50	idem	idem	idem	molto forti > 2300 m	> 70	forte
VIII	idem	idem	idem	P > 50 R > 50	idem	paludi	idem	idem	idem	molto forte
Sotto Classi	s	s	s	s	s	w*	w	c	e	e
Tipo di Limit.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fig.(1.2): guida schematica per l'attribuzione della classe di capacità d'uso (fonte ERSAL)

1.2 USBR Land Classification for Irrigated Agriculture

Nato per la pianificazione di progetti di irrigazione, costituisce un tipico esempio di metodo con approccio multidisciplinare. Il metodo si basa sulla valutazione degli inputs di un qualsiasi sistema colturale per predire gli outputs di produzione in funzione di fattori fisici (tipologia di suolo, topografia, clima, qualità dell'acqua di irrigazione, etc.) e socio-economici. A differenza del Land Capability System basato sul principio dell'uso sostenibile del territorio, in questo sistema viene dato maggior peso a fattori di tipo economico. Il territorio viene suddiviso in classi (da 4 a 6) ognuna delle quali possiede caratteristiche fisico-economiche tali da essere più o meno idonea alla coltivazione in irriguo. I fattori fisici ed economici sono correlati tramite le relazioni esistenti fra tipologia di suoli, topografia, proprietà idrauliche dei suoli e potenzialità produttive, costi di produzione, investimenti per la realizzazione dei progetti di irrigazione. Anche in questo caso dalla prima verso l'ultima classe diminuisce l'attitudine all'utilizzo per colture irrigue (aumentano i costi per la realizzazione dei progetti e diminuiscono i profitti); alle ultime due classi sono destinati gli ambienti non idonei, oppure idonei ma solo in seguito a particolari interventi e sistemazioni. Come nel caso del Land Capability System questo sistema di classificazione consente di definire le aree più o meno idonee alla coltivazione in irriguo, senza alcun riferimento al tipo di coltura e alle tecniche gestionali, nonostante esse abbiano un peso rilevante nell'insieme di fattori che caratterizzano le potenzialità di un territorio.

1.3 FAO Framework for Land Evaluation - Land Suitability

Viene applicato con lo scopo di classificare il territorio in Land Suitability Classes o Classi di Attitudine. Vi sono due concetti fondamentali su cui poggia questo schema. Il primo è quello del Land Use System (LUS), con il quale si intende la combinazione di due fattori: l'Unità Territoriale o Land Unit (LU) individuata e cartografata dai pianificatori sulla base di fattori differenzianti, ed il Tipo di Utilizzo o Land Utilization Type (LUT), cioè la destinazione d'uso (la cui descrizione può essere più o meno dettagliata) della suddetta unità territoriale (fig. 1.3). In pratica il land use system è uno specifico LUT praticato su una data unità territoriale, caratterizzato da input ed output propri.

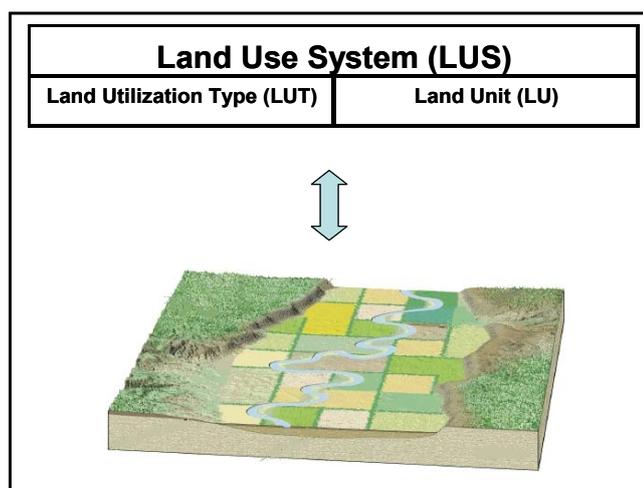


Fig.(1.3): il Land Use System

Studiando le diverse combinazioni LU/LUT si può giungere ad una valutazione del rendimento dell'attuale Land Use System, e di eventuali sistemi alternativi. Il secondo concetto fondamentale è quello del "confronto" o "matching" che è il processo di valutazione vero è proprio, basato in pratica su un confronto tra le caratteristiche del territorio ed i requisiti che esso dovrebbe avere per soddisfare o meglio per consentire un determinato utilizzo.

Le Unità Territoriali vengono identificate e delimitate sulla base di numerosi fattori fisici (suoli, idrologia, clima, vegetazione, etc.) considerati più o meno omogenei al loro interno. Tali fattori sono definiti come *Caratteristiche del Territorio* o Land Characteristics e costituiscono i termini di confronto rispetto ai requisiti necessari per un determinato LUT; ai fini del confronto il framework della FAO prevede anche di considerare le interazioni esistenti tra i suddetti fattori, dando luogo a quelle che vengono definite *Qualità del territorio* o Land Qualities che potrebbero costituire delle limitazioni all'uso del territorio considerato.

Caratteristiche del territorio possono essere la tessitura dei suoli, la permeabilità, il livello della falda, la velocità di infiltrazione dell'acqua, la pendenza, il rapporto precipitazione/evaporazione. E l'interazione di questi fattori può dar luogo a qualità del territorio come la lavorabilità del suolo oppure il rischio di ristagno idrico. In pratica le caratteristiche del territorio possono essere definite come proprietà misurabili e le qualità come il risultato delle interazioni tra tali proprietà.

La descrizione del tipo di utilizzo attuale (LUT) o la scelta dei possibili utilizzi alternativi per i quali viene affrontato uno studio di valutazione del territorio, può presentare un livello di dettaglio più o meno elevato, variabile a seconda delle esigenze e chiaramente a seconda della scala alla quale è richiesta l'indagine. Il tipo di utilizzo può essere descritto attraverso la definizione dei fattori fisici e gestionali che lo caratterizzano. Per quel che riguarda i fattori fisici esempi potrebbero essere il tipo di coltura (erbacea o arborea) e la varietà, mentre in riferimento agli aspetti gestionali si potrebbe descrivere il sistema colturale (asciutto, irriguo, tipo di irrigazione).

Dalla descrizione del tipo di utilizzo cui potrebbe essere destinato il territorio derivano chiaramente i requisiti o Land Use Requirements (LR) che lo stesso dovrebbe possedere per essere classificato come idoneo. Essi vengono definiti tecnicamente i criteri diagnostici ed in pratica rappresentano i fattori limitanti nel processo di valutazione, di conseguenza sono le informazioni che devono essere studiate con maggior attenzione. Possono essere requisiti riferiti al regime idrico, oppure alla disponibilità di elementi nutritivi, oppure alle condizioni di umidità del suolo e alla lavorabilità, etc.

La valutazione del Land Use System potrebbe consistere ad esempio, nel predire i livelli produttivi ottenibili da una data coltura nell'area oggetto di studio. A tale scopo come già detto, è necessario conoscere le caratteristiche e le qualità del territorio e le esigenze della coltura, oltre che le relazioni quantitative esistenti tra questi fattori. La complessità del processo di valutazione cresce se si considerano anche i fattori fisici previsti come inputs del sistema (ad es. concimazioni, irrigazioni, etc.) e le relazioni esistenti tra questi e gli outputs attesi.

Il risultato finale è la suddivisione del territorio in classi indicanti l'attitudine all'utilizzo oggetto della valutazione. Esse tipicamente vengono identificate dalla lettera S (suitable), seguita da un pedice numerico che sta ad indicare il grado di idoneità. Le classi variano da molto adatto (S1) a poco adatto (S3). Le aree non idonee vengono indicate con la lettera N (not suitable). Anche in questo caso è possibile definire delle sottoclassi (facendo seguire alla

classe una lettera indicante il fattore limitante) e delle unità (aggiungendo un pedice numerico alla sottoclasse) alle quali in legenda corrisponderà una descrizione dettagliata. Nelle figure 1.4 e 1.5 sono riportate la struttura gerarchica di classificazione e le diverse fasi del processo di valutazione secondo il framework della FAO, 1976.

Concludendo, i principi su cui poggiano tutti i sistemi di valutazione del territorio sono comuni, ma il Framework messo a punto dalla FAO, a differenza degli schemi precedenti, appare come un protocollo applicabile per la valutazione di un qualsiasi tipo d'utilizzo del territorio ed in qualsiasi contesto ambientale. Esso viene applicato previa la descrizione dettagliata dell'uso del territorio, per valutare l'attitudine ad usi specifici, non generici. Inoltre particolare attenzione è dedicata ai possibili utilizzi alternativi del territorio. Nel presente lavoro per l'approccio classico alla valutazione del territorio si farà riferimento a quest'ultimo schema.

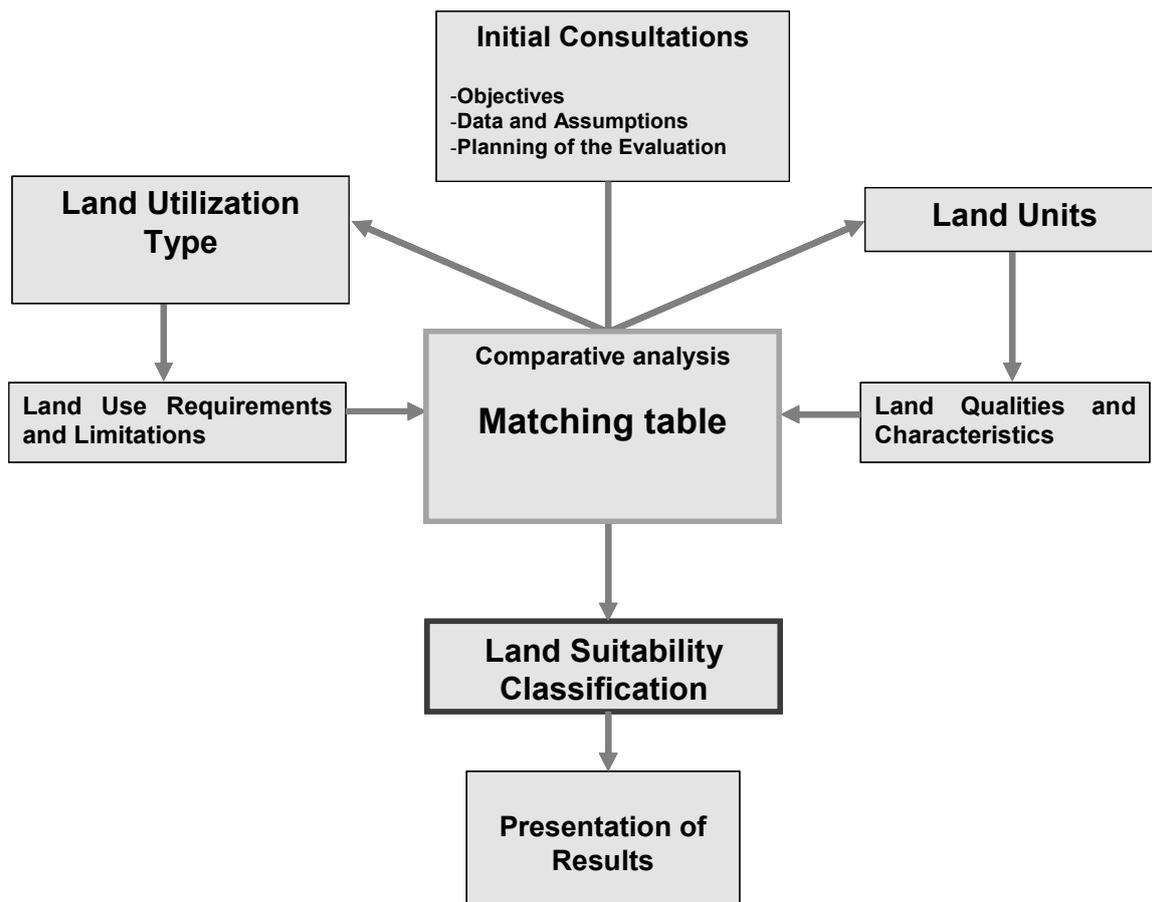


Fig.(1.4): le fasi del processo di valutazione secondo la FAO. 1976.

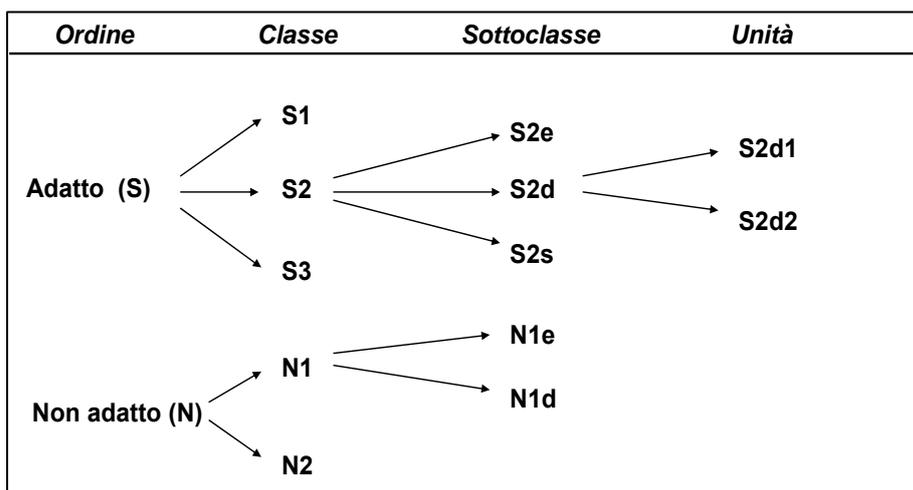


Fig.(1.5): la struttura gerarchica secondo il framework della FAO, 1976

2. Casi studio in Italia

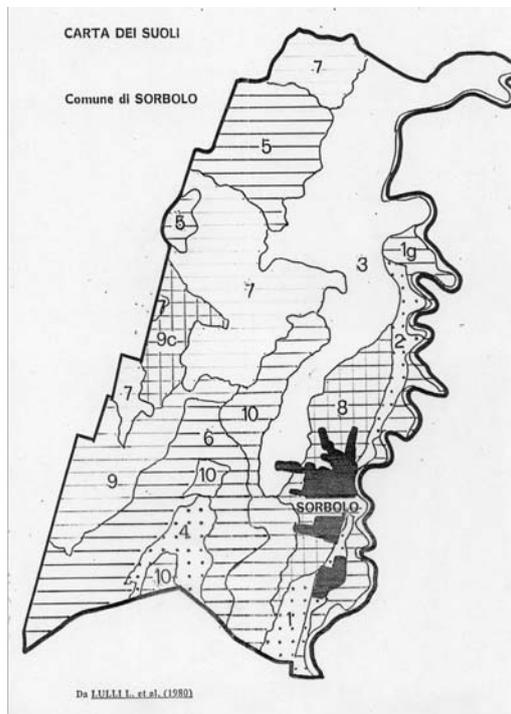
Le decisioni che riguardano la destinazione d'uso del territorio e delle risorse naturali sono sempre più articolate in ragione della complessa interdipendenza ed integrazione dei comparti che costituiscono il sistema economico e produttivo. I progetti ed i piani che derivano dai programmi e dalle politiche di intervento sul territorio necessitano di un adeguato supporto conoscitivo sullo stato, le proprietà e le potenzialità delle risorse naturali messe in gioco. In questo scenario la conoscenza delle risorse pedologiche è di primaria importanza. L'utilizzo di una carta dei suoli per scopi applicativi e pianificatori è legata necessariamente ad una sua interpretazione, che conduce solitamente alla produzione di carte derivate contenenti l'informazione richiesta, esplicitata in forma semplice e comprensibile da una vasta gamma di utenti non necessariamente specializzati. Le carte derivate possono riguardare la capacità d'uso dei suoli per scopi generici o l'attitudine dei suoli ad usi specifici. In Italia la valutazione delle terre è oramai uno strumento affermato a scala nazionale e regionale e ciò è testimoniato dai numerosi progetti che negli ultimi anni sono stati finanziati dalle regioni nell'ambito di piani di sviluppo atti a regolamentare l'uso e la gestione del territorio. (ad es.:P.O.R. Campania 2000-2006).

A titolo di esempio seguono, al fine di comprendere le reali potenzialità delle carte derivate, i risultati di alcune applicazioni in Italia degli schemi valutativi di cui si è precedentemente discusso.

2.1 Alcuni Esempi

2.1.1 La Capacità d'Uso dei Suoli

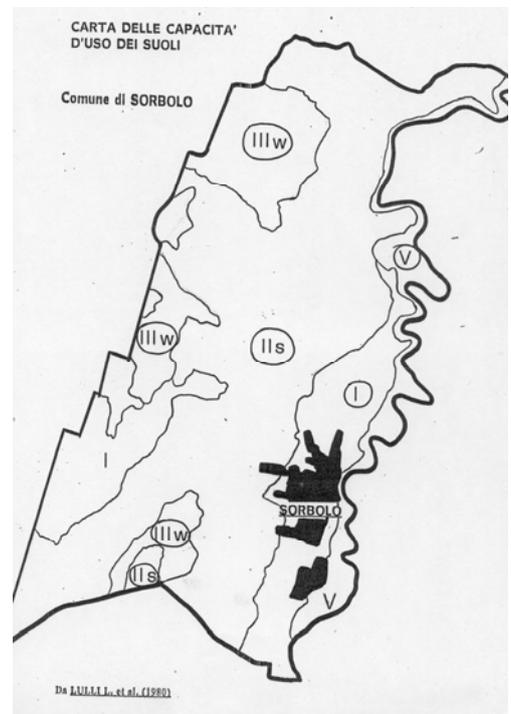
Il materiale presentato è tratto da un lavoro sviluppato dall'Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo di Firenze (Lulli et al., 1980). Il Comune di Sorbolo (Parma) chiese che venisse realizzata una cartografia dei suoli che servisse come supporto per un Piano Regolatore generale, inteso a disciplinare le destinazioni d'uso relative all'intero territorio comunale. Tra le carte derivate venne redatta una carta d'uso dei suoli alla cui realizzazione si giunse mediante l'applicazione dello schema classico di valutazione della capacità d'uso dei suoli (Land Capability Evaluation) di cui si è precedentemente discusso. In fig.2.1 è riportata la carta dei suoli utilizzata come supporto informativo di base per lo studio e la mappa della classificazione ottenuta con relativa legenda di riepilogo.



LEGENDA DELLA CARTA DEI SUOLI

SCALA 1:35.000

- SERIE CASALONE** della famiglia dei franco fci, medi (calcarei), medi **Typi: Puro Ruvum.**
Suoli franco argillosi sabbiosi, senza frangia, profondi oltre 1 m, ben drenati, moderatamente alcalini.
Si trovano su sedimenti granitici alluvionali, su superfici su tempo frequentemente inondate.
- FASE DI GOLINA della serie Casalone.**
Suoli con le caratteristiche della Serie.
Si trovano su sedimenti granitici alluvionali, su superfici che vengono occasionalmente inondate con una certa frequenza.
- SERIE ENDINO** della famiglia dei franco fci, medi (calcarei), medi **Typi: Puro Ruvum.**
Suoli franco argillosi limosi in profondità, profondi oltre 1 m, ben drenati, moderatamente alcalini.
Si trovano su sedimenti alluvionali moderatamente granitici, su superfici su tempo frequentemente inondate.
- SERIE CONDO** della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Kuvfuvum.**
Suoli franco argillosi, profondi oltre 1 m, moderatamente ben drenati in superficie e impermeabili in profondità per l'azione del carbonio d'argilla, moderatamente alcalini.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti ricoperti da sedimenti granitici alluviali, su superfici che occasionalmente vengono inondate di rado.
- SERIE RASARIN** della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Euvu Chuvuvum.**
Suoli argillosi limosi, profondi oltre 1 m, scarsamente drenati, moderatamente alcalini. Presentano fenomeni di ristagno d'acqua temporaneo fino alla superficie e un'accentuata fissurazione nella stagione asciutta.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti, su rocce argillose con morfologie di conca.
- SERIE VALLETTA** della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Euvu Chuvuvum.**
Suoli argillosi, profondi oltre 1 m, scarsamente drenati, moderatamente alcalini. Presentano fenomeni di ristagno d'acqua temporaneo fino alla superficie e un'accentuata fissurazione nella stagione asciutta.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti, su superfici su tempo non inondate.
- SERIE BOGO** della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Euvu Chuvuvum.**
Suoli argillosi limosi, profondi oltre 1 m, impercettibilmente drenati, moderatamente alcalini. Presentano un'accentuata fissurazione nella stagione asciutta.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti, su superfici su tempo non inondate.
- SERIE PRASSINARA** della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Euvu Chuvuvum.**
Suoli argillosi, profondi oltre 1 m, impercettibilmente drenati, moderatamente alcalini. Presentano un'accentuata fissurazione nella stagione asciutta.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali alluviali, su superfici su tempo pedicellate.
- SERIE SORBOL** della famiglia dei franco fci, medi (calcarei), medi **Typi: Puro Ruvum.**
Suoli franco argillosi, profondi oltre 1 m, ben drenati, moderatamente alcalini.
Si trovano su sedimenti granitici alluvionali, su superfici su tempo non inondate.
- SERIE RANOCIELLO** della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Euvu Chuvuvum.**
Suoli franco argillosi, profondi oltre 1 m, da moderatamente ben drenati ad impercettibilmente drenati, moderatamente alcalini. Presentano una debole fissurazione nella stagione asciutta.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti, su superfici su tempo non inondate.
- FASE DI CONCA della Serie Ruvum.**
Suoli con le caratteristiche della Serie, ma con fenomeni di ristagno d'acqua temporaneo fino alla superficie.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti, su superfici con pendenze inferiori all'1%.
- SERIE SARTONARI**, della famiglia degli argillosi, medi (calcarei), medi **Typi: Kuvfuvum.**
Suoli argillosi limosi, profondi oltre 1 m, da impercettibilmente drenati a moderatamente ben drenati, moderatamente alcalini. Presentano un'accentuata fissurazione nella stagione asciutta.
Si trovano su sedimenti fini alluvionali recenti, su superfici occasionalmente non inondate.



LEGENDA DELLA CAPACITÀ DEI SUOLI PER USI AGRICOLI

CLASSE	UNITA PEDOLOGICHE	LIMITAZIONI D'USO
I	1,2,8,9	Nessuna limitazione
II _s	3	Difficoltà di lavorazione in qualche periodo dell'anno
	6,7,10	Difficoltà di lavorazione in qualche periodo dell'anno; fessurazioni profonde nella stagione asciutta
III _w	4,5	Difficoltà di lavorazione in qualche periodo dell'anno; fessurazioni profonde nella stagione asciutta; ristagni di acqua temporanei nel suolo
	9 conca	Difficoltà di lavorazione in qualche periodo dell'anno; ristagni di acqua temporanei nel suolo; debole permeabilità del sottosuolo
V	1 golenia	Frequenti esondazioni

s = limitazioni di suolo
w = limitazioni per ristagno d'acqua.
Le classi IV,VI,VII, e VIII non compaiono nel territorio di Sorbolo.

Fig. (2.1): la carta dei suoli e la carta della Capacità d'Uso dei suoli del comune di Sorbolo. (ISSDS,1980)

2.1.2 L'Attitudine dei Suoli

Le carte dell'attitudine dei suoli ad usi specifici costituiscono uno strumento molto potente di cui le amministrazioni regionali, provinciali e comunali possono disporre al fine di pianificare interventi mirati sul territorio atti alla corretta gestione delle risorse agro-forestali ed alla salvaguardia dell'ambiente. Ne sono un esempio le carte di orientamento allo spandimento dei liquami zootecnici e le carte dell'attitudine dei suoli a coltivazioni specifiche.

-Attitudine dei suoli allo spandimento dei liquami zootecnici

L'esempio riportato è parte di un progetto dell'ERSAL (Ente Regionale per lo Sviluppo Agricolo della Lombardia), 1995. In tale progetto, commissionato dalla Regione Lombardia, furono analizzate diverse problematiche strettamente connesse con l'uso e la gestione dei suoli agricoli. Tra queste, quella relativa all'utilizzazione dei liquami zootecnici. Per la realizzazione della carta di orientamento allo spandimento dei liquami venne messo a punto un modello di classificazione nel quale i fattori limitanti (precedentemente definiti criteri diagnostici), erano: il *rischio di inondabilità*, la *rocciosità*, la *pietrosità*, la *pendenza*, il *drenaggio*, la *profondità della falda*, lo *scheletro*, le *caratteristiche vertiche*, lo *spessore dello strato permeabile*, la *tessitura* e la *presenza/assenza di orizzonti organici*. In fig 2.2 è possibile osservare la matching table relativa al modello messo a punto dall'ERSAL ed in fig.2.3 la carta derivata per le province di Brescia e Bergamo.

ATTITUDINE DEI SUOLI ALLO SPANDIMENTO AGRONOMICO DEI LIQUAMI				
Modello Interpretativo				
FATTORI LIMITANTI	CLASSI DI ATTITUDINE DEI SUOLI			
	ADATTI	MOD. ADATTI	POCO ADATTI	NON ADATTI
INONDABILITÀ	ASSENTE	DA LIEVE A MODERATA	ALTA	MOLTO ALTA
ROCCIOSITÀ (%)	ASSENTE	0 - 2	2 - 10	> 10
PIETROSITÀ (%)	0 - 15	15 - 50	15 - 50	> 50
PENDENZA (%)	0 - 5	5 - 10	10 - 15	> 15
DRENAGGIO	BUONO MEDIOCRE LENTO	LENTO (con falda) MOLTO LENTO MOD. RAPIDO	MOLTO LENTO (con falda) MOD. RAPIDO (con falda) RAPIDO	IMPEDITO RAPIDO (con falda)
PROFONDITÀ DELLA FALDA (cm)	> 150	100 - 150	75 - 100	< 75
SCHIELETRO (%) (1)	< 35	35 - 70	35 - 70	> 70
CARATTERISTICHE VERTICHE	FESSURAZIONI ASSENTI O PRESENTI (con orizz. fino a 100 cm a tess. media, fine o mod. fine)	FESSURAZIONI PRESENTI (con orizz. a tess. mod. grossolane entro 100 cm)	FESSURAZIONI PRESENTI (con orizz. a tess. grossolane entro 100 cm)	FESSURAZIONI PRESENTI (con orizz. a tess. grossolane entro 100 cm e con falda)
PROF. STRATO PERMEABILE (cm)	> 80	50 - 80	< 50	< 50 (con falda entro 150 cm)
TESSITURA (PRIMO METRO)	F AS FSA FA FL L FLA A AL	FS	SF	S - SF (con falda entro 150 cm)
ORIZZONTI ORGANICI	ASSENTI	PRESENTI TRA 100 E 150 cm	PRESENTI TRA 50 E 100 cm	PRESENTI ENTRO 50 cm

Fig. (2.2): modello interpretativo per l'attitudine dei suoli allo spandimento dei liquami (ERSAL, 1995)

CARTA DI ORIENTAMENTO PEDOLOGICO ALLO SPANDIMENTO DEI LIQUAMI ZOOTECNICI

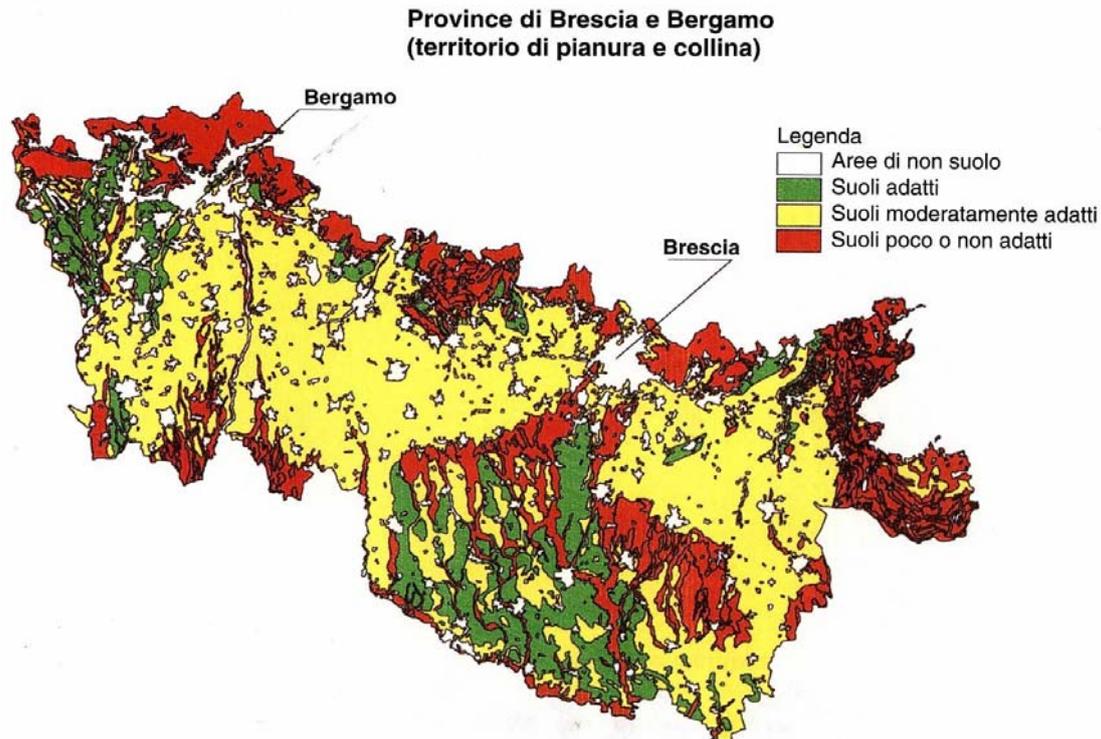


Fig. (2.3): carta di orientamento pedologico allo spandimento dei liquami zootecnici. (ERSAL, 1995)

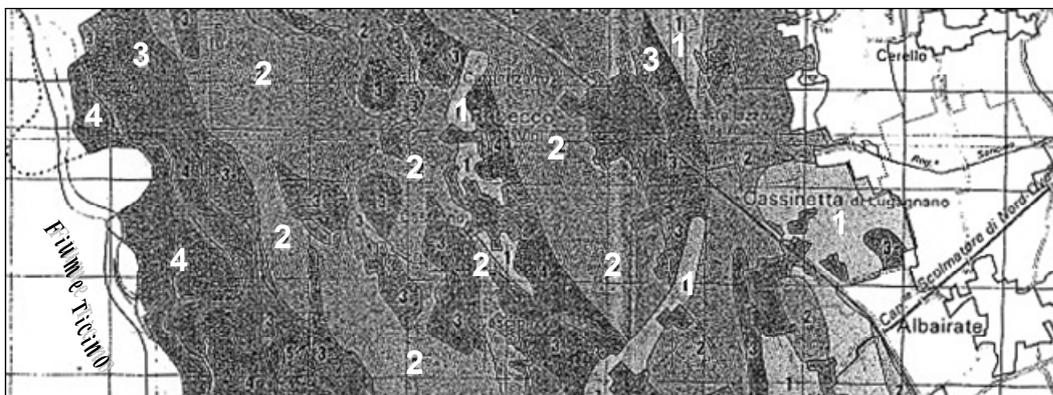
-Attitudine dei suoli alla coltivazione del Mais

L'attitudine dei suoli alla coltivazione del mais rappresenta uno dei temi cardine del presente lavoro di tesi. Quella che segue è una breve introduzione ad un metodo per la stima dell'attitudine dei suoli alla coltivazione del mais messo a punto dall'ERSAL. Il metodo verrà successivamente ripreso per una descrizione più dettagliata. E verranno mostrati i risultati ottenuti dalla sua applicazione nell'areale di studio oggetto della presente tesi.

L'Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia (ERSAL) nel 1985 iniziò ad operare per il rilevamento dei suoli lombardi alla scala di semidettaglio 1:50000, con la finalità di promuovere, attraverso la produzione e pubblicazione delle carte pedologiche e delle carte da esse derivate, un più razionale uso della risorsa suolo e delle altre risorse ambientali.

Tra i vari prodotti ottenuti fu derivata, partendo dalla carta dei suoli del Parco Ticino Abbiatense, una carta dell'attitudine dei suoli alla coltivazione del mais. Si tratta dell'applicazione di un modello empirico-qualitativo secondo lo schema proposto dalla FAO (1976) tramite il quale si giunse alla individuazione delle aree più o meno idonee a tale coltura. Gli elementi (qualità e caratteristiche del territorio) considerati dal modello furono i seguenti: *nutrizione idrica, drenaggio, profondità del suolo, scheletro, tessitura, reazione,*

saturazione. L'approccio non condusse ad un valore numerico corrispondente all'effettiva produzione del mais (ad es. q/ha di granella) ma piuttosto ad un indice riassuntivo di capacità produttiva delle diverse serie di suoli. In figura 2.4 si riporta una sezione della carta derivata ottenuta ed una riproduzione della relativa legenda.



Unità cartografica	Classe Capacità Produttiva
1	Ottima
2	Buona
3	Discreta
4	Scarsa
5	Molto scarsa

Fig.(2.4): sezione della carta di attitudine alla coltivazione del mais dei suoli del parco Ticino Abbatense. (fonte ERSAL)

3. Limiti e potenzialità delle applicazioni di Land Evaluation

3.1 Aspetti generali

Sono sempre più numerosi gli studi che affrontano problematiche riguardanti la qualità dell'ambiente e la degradazione del territorio a scala mondiale e contemporaneamente cresce l'interesse per l'Agricoltura di Precisione, cioè l'applicazione di moderne tecniche di coltivazione a scala aziendale (Robert et al., 1996). Oggi le Regioni, nella figura dei Pianificatori territoriali, considerano con grande attenzione scenari alternativi di utilizzo del territorio valutando sia gli aspetti produttivi che la sostenibilità ambientale. L'approccio allo studio dell'uso attuale e potenziale del territorio va sotto il nome di Land Evaluation o Valutazione del Territorio. La Land Evaluation viene quindi utilizzata per valutare le potenzialità del territorio in riferimento ad un utilizzo generico o specifico. Il territorio viene suddiviso in "classi", ognuna delle quali riflette le interazioni esistenti tra le caratteristiche dell'ambiente e la produttività in generale.

Solitamente l'assegnazione delle classi segue la regola secondo la quale è il fattore limitante, tra le qualità e le caratteristiche del territorio selezionate, a determinare il grado di attitudine. Si assume la perfetta conoscenza delle condizioni ottimali che possano condurre alla massima attitudine e degli effetti che deviazioni da tale optimum possano causare.

Si tratta quindi di modelli concettuali o mentali con una forte base empirica, che dipendono molto dall'esperienza e dalle capacità intuitive dell'esperto e che normalmente non considerano input ed output di tipo quantitativo. I risultati delle loro applicazioni sono valutazioni di tipo puramente qualitativo, a dispetto delle moderne ricerche e delle conoscenze acquisite negli ultimi anni sui processi che avvengono nel sistema suolo.

Inoltre la maggior parte degli studi di Land Evaluation viene condotta a scala Regionale, ma spesso le problematiche riguardanti la gestione territoriale andrebbero affrontate a livello aziendale. La variazione nella scala di osservazione comporta necessariamente l'adozione non solo di tecniche differenti per il reperimento delle informazioni e l'analisi dei dati, ma anche una differenziazione nelle proprietà che vengono indagate e nei processi considerati.

Una complicazione ulteriore deriva dalla consapevolezza che i limiti di quelle che nelle scienze del suolo vengono definite unità pedologiche, difficilmente corrispondono ai limiti legali entro i quali vengono prese decisioni riguardanti la gestione del territorio. Appare quindi evidente la necessità di dover adattare gli schemi della valutazione del territorio ad esigenze specifiche, caso per caso. In altre parole, la descrizione e la caratterizzazione delle

unità territoriali (LU), dell'uso del territorio (LUT) e del sistema suolo/uso del suolo (LUS) devono essere definite differientemente a seconda della scala di osservazione (Bouma J., 1997).

Altro aspetto fondamentale riguardante in modo specifico le produzioni agrarie, è il rapporto tra le conoscenze dell'esperto e le esigenze dell'utilizzatore finale, il coltivatore ad esempio. L'interesse di quest'ultimo è oggi rivolto non unicamente al sapere se la propria azienda ricada in un'area più o meno idonea ad un tipo di coltivazione, ma piuttosto ad avere informazioni di tipo quantitativo riguardo al cosa fare, quando, dove e in che modo (Bouma J., 1999).

Per i motivi citati, oggi, parallelamente alla diffusione di tecniche produttive sempre più complesse e precise, l'interesse si è rivolto ad approcci alla land evaluation in grado di dare risposte di tipo quantitativo che prevedano l'utilizzo di tecniche innovative per l'estensione areale delle informazioni. I recenti sviluppi avutisi nel settore delle simulazioni mediante computer, hanno aperto la strada alla diffusione di tali sistemi anche negli studi di valutazione territoriale (M.Littleboy, *et al.*,1996).

3.2 I Modelli e la Land Evaluation

Un modello è una rappresentazione semplificata della realtà tramite il quale è possibile stimare un processo senza ricorrere alla sua misura, oppure più compiutamente, è la rappresentazione di un sistema o di un processo, ottenuta sostituendo con semplificazioni, astrazioni e analogie, al fenomeno reale un fenomeno in un campo più familiare. Nella Land Evaluation i modelli sono utilizzati per predire il rendimento del sistema territoriale o land use system, date le caratteristiche fisiche di quel territorio. I modelli definiti biofisici consentono previsioni riguardo le produzioni agrarie in un dato contesto ambientale oppure riguardo gli effetti che il clima o le pratiche gestionali possono sortire in tale contesto. Possono essere adoperati per predire i livelli produttivi di una data coltura e gli effetti che su questi possono avere differenti strategie di gestione o le diverse qualità del territorio direttamente coinvolte nel processo produttivo, come la disponibilità idrica, la disponibilità di elementi nutritivi oppure la radiazione solare.

I modelli biofisici vengono classificati in base al tipo di informazioni in grado di fornire (qualitative o quantitative), in base alla loro complessità (empirici o meccanicistici) ed in base alla scala di applicazione (D.G. Rossiter, 2003).

I modelli più semplici sono modelli qualitativi che si basano unicamente sulle capacità intuitive e sulle conoscenze dell'esperto riguardo le caratteristiche locali del territorio, essi difficilmente possono essere formalizzati e la loro applicazione è limitata al territorio nel quale l'esperto ha sviluppato la propria esperienza. Sono poco complessi e non richiedono alcun tipo di calcolo, non possono essere formalizzati proprio perché trattasi di modelli mentali olistici.

Di pari livello, ma con applicabilità non limitata al territorio noto all'esperto, sono i modelli qualitativi basati sulla formalizzazione (a giudizio degli esperti) delle relazioni esistenti tra le Qualità (ad es. grado di fertilità, disponibilità idrica, lavorabilità del suolo, etc.) e le Caratteristiche (ad es. grado di pietrosità, pendenza, profondità del suolo, etc.) del territorio e degli effetti che esse hanno sulle potenzialità d'utilizzo dello stesso. Appartengono a questa categoria i modelli più diffusamente applicati negli studi di land evaluation (Framework FAO, Land Capability System USDA).

I modelli empirici-statistici consentono predizioni quantitative e si basano sull'analisi di Caratteristiche statiche del territorio (profondità del suolo, pendenza, pietrosità, etc.). Essi sono il risultato di relazioni statistiche esistenti tra i dati di output (es. produzioni) e quelli di input (es. Caratteristiche del territorio) stabilite da analisi regressive multiple effettuate su grandi banche dati. I primi approcci alla loro applicazione risalgono agli anni '30 quando agli

esperti dei suoli, al fine di tassare i raccolti, veniva chiesto di predire le produzioni ottenibili in una data area in base alle proprietà dei suoli. Tali modelli non possono essere applicati in ambienti differenti da quelli nei quali viene effettuata la loro calibrazione. Le variabili considerate sono statiche e non è possibile simulare il comportamento del sistema nel tempo. Infine vi sono i modelli dinamici che simulano i processi biofisici che avvengono nel land system e la variazione di tali processi nel tempo, richiedono in ingresso serie temporali di dati. Sono i modelli di ultima generazione, meccanicistici e non empirici. Essi sono basati più su principi scientifici o leggi naturali universali (legge della conservazione della massa e dell'energia, leggi di diffusione, convezione e dispersione, leggi della cinetica etc.) che su relazioni empiriche. Teoricamente la loro applicabilità è universale, tuttavia la linea di demarcazione tra modelli meccanicistici ed empirici non è molto chiara. Infatti qualsiasi modello meccanicistico presenta componenti empiriche. I modelli meccanicistici consentono simulazioni dinamiche, in quanto in grado di gestire dati in ingresso variabili nel tempo, come i dati climatici ad esempio. La grande forza di tali modelli si esprime in tutti i casi nei quali è importante conoscere la componente temporale di un dato. Ad esempio la variazione nel tempo dello stress idrico: conoscerne i livelli medi annuali in alcuni casi non è così importante come conoscerne i livelli raggiunti durante specifiche fasi del ciclo culturale.

3.3 La variabilità dei suoli e la Land Evaluation

Un altro aspetto fondamentale e che può essere considerato un limite all'applicazione dei metodi classici di Land Evaluation, e che negli ultimi anni è oggetto di numerosi studi è la variabilità spaziale dei suoli. I suoli non sono distribuiti casualmente nel territorio, essi sono il risultato dei processi della pedogenesi, in pratica sono “un prodotto” del territorio (roccia madre, morfologia, clima, attività umane) che li circonda. Nelle attuali carte pedologiche che costituiscono la base di partenza per qualsiasi studio di valutazione e pianificazione territoriale, la variabilità spaziale dei suoli è rappresentata mediante poligoni colorati secondo una data scala, con limiti netti, supposti omogenei e racchiudenti suoli simili tra di loro, connessi tramite una legenda agli attributi di suolo misurati in un ristretto numero di profili. Tale rappresentazione appare estremamente pratica, perché è sufficiente localizzare un sito sulla mappa e tramite la legenda risalire all'unità di mappa cui appartiene ed alle relative proprietà del suolo. Dal punto di vista scientifico può invece risultare inadeguato, poiché ignora la variazione spaziale sia a livello di processi pedogenetici che di effettiva distribuzione dei suoli che sappiamo variare in maniera continua piuttosto che discontinua. Inoltre sappiamo che i suoli sono fortemente anisotropici sia in senso verticale che orizzontale (Beckett and Webster, 1971; McSweeney et al., 1994). L'anisotropia verticale è solitamente

più accentuata (Wilding, 1984). Questo è dovuto ai complessi processi di eluviazione-illuviazione che avvengono all'interno di essi. Sappiamo anche che le proprietà dei suoli sono caratterizzate da dinamismi completamente differenti. Ad esempio, proprietà come la tessitura ed il contenuto in sostanza organica in uno stesso appezzamento possono considerarsi abbastanza statiche dal punto di vista della distribuzione spaziale, la concentrazione dei nitrati invece può essere molto variabile nello spazio ed anche nel tempo (Friend et al. 1990).

Oggi quindi gli esperti dei suoli sono chiamati a rispondere a domande sempre più specifiche che richiedono risposte sempre più dettagliate. Per far ciò essi devono necessariamente interagire con esperti in altre discipline ed arricchire il proprio bagaglio culturale di nuove tecniche, di nuovi metodi e mezzi per comprendere fino in fondo i processi che avvengono nel nostro ambiente e il modo in cui questi evolvono nel tempo e nello spazio.

4. Obiettivo della Ricerca

In genere il modo in cui il territorio viene gestito riflette principalmente le direttive politiche comuni (Politiche Agrarie Comunitarie) piuttosto che l'attitudine delle diverse unità di terre ai differenti possibili utilizzi (Beek, K.J.,1980). Ciò costituisce una forte limitazione alla corretta gestione del nostro ambiente. Inoltre la valutazione del territorio secondo i metodi classici (FAO, 1976), che rappresenta la base di partenza di qualsiasi pianificazione territoriale, oggi presenta delle forti limitazioni messe in evidenza dal crescente interesse delle istituzioni e dei singoli individui per approcci quantitativi piuttosto che qualitativi, in grado di dare risposte a problematiche sempre più complesse e specifiche. Problematiche che appaiono numerose, come risultato della maggiore attenzione oggi rivolta all'ambiente e alla sua salvaguardia, e differenziate a seconda della scala di osservazione. Alla scala aziendale ad esempio un agricoltore potrebbe voler sapere come ottenere maggiori produzioni riducendo i costi da sostenere. La soluzione potrebbe derivare dall'applicazione mirata di fertilizzanti ed antiparassitari e dal ricorrere, dove possibile, alla pratica del minimum tillage. L'agricoltore quindi sarà interessato a capire cosa fare, quando, dove ed in che modo. Un ambientalista potrebbe essere interessato a capire come ridurre l'utilizzo di prodotti chimici di sintesi in agricoltura, riducendo di conseguenza l'inquinamento delle falde acquifere. A scala di minor dettaglio, invece, una Regione potrebbe essere interessata ad individuare possibili ed alternative destinazioni d'uso del territorio. In tutti questi casi le attuali procedure di valutazione territoriale risulterebbero utili ma sicuramente non in grado di fornire informazioni di tipo quantitativo riguardo le possibili alternative. In particolare, risposte alle domande dell'agricoltore o dell'ambientalista possono essere date solo una volta che siano state comprese le dinamiche ed i processi che avvengono in un ecosistema, ricorrendo ad esempio all'applicazione di modelli fisicamente basati, in grado di simulare tali dinamiche; modelli in grado di simulare la crescita di specifiche colture oppure i processi di movimento dei soluti nel suolo.

Da tali premesse consegue la necessità di migliorare, o meglio di implementare, le attuali metodiche di valutazione territoriale con strumenti in grado di fornire informazioni di tipo quantitativo sui processi che caratterizzano un ecosistema, e su come questi variano nello spazio ed anche nel tempo. Questo potrebbe consentire di rispondere a domande del tipo: cosa fare? Quando? Dove? In che modo?

Il presente lavoro costituisce un approccio moderno alla land evaluation il cui obiettivo è in linea con le considerazioni precedentemente fatte: migliorare il processo di valutazione del territorio.

Esso è parte di un progetto PRIN 2001-2003 finanziato dal Mi.U.R dal titolo: “Metodologie pedologiche per lo studio della variabilità spaziale dei suoli”, che rappresenta il primo studio in ambito nazionale ad affrontare tale problematica in diversi contesti italiani. I siti studio selezionati per tale progetto sono tre: Val Chiavenna (Lombardia), Lodigiano (Lombardia), Mustigarufi (Sicilia).

Tra i tre areali si è scelto il Lodigiano come ambiente nel quale sviluppare il presente lavoro di tesi. Si tratta di un’area con un’estensione pari a circa 2000 ettari situata poco a sud della città di Lodi. Il territorio appare fortemente antropizzato, infatti esso è caratterizzato da una ricca tradizione agricola risalente al periodo Romano, durante il quale furono deviati in canali i corsi d’acqua naturali (fiumi Lambro ed Adda) con l’obiettivo di rifornire la zona con acqua utile all’agricoltura. Risalta in particolare il Canale Muzza i cui scavi iniziarono nel 1220 d.C., esso costituisce la più importante derivazione del fiume Adda e con le sue rogge fornisce acqua a decine di migliaia di ettari di superficie agricola. L’attività agricola preponderante è quella zootecnica principalmente per la produzione lattiero casearia. Ne deriva che la superficie agricola utilizzabile sia quasi totalmente occupata da seminativi, tra i quali prevale nettamente il mais. Nell’area sono state condotte diverse campagne pedologiche che hanno previsto l’apertura di profili per la descrizione dei suoli nei principali pedopaesaggi, il campionamento e l’osservazione dei suoli mediante trivellata, il campionamento per le analisi chimiche ed idrauliche e diverse attività di misura in campo (ad es. utilizzo del penetrometro a cono).

Questo ambiente è stato scelto come sito di studio per il presente lavoro proprio in virtù delle condizioni pedoambientali che lo identificano. Il tentativo di studiare e di comprendere la variabilità delle proprietà pedologiche di un ambiente intensamente coltivato da cui risalire ad una valutazione delle attitudini che lo caratterizzano rappresenta una vera e propria sfida, alla quale non è possibile rinunciare!

5. Approcci metodologici per migliorare la base fisica del processo di valutazione delle terre

5.1 La variabilità spaziale dei suoli

La distribuzione delle diverse tipologie di suoli sul territorio viene rappresentata tramite delle mappe, le cosiddette carte dei suoli o carte pedologiche. Le carte dei suoli sono tipicamente rappresentate da poligoni colorati con limiti netti che segnano il margine tra tipologie differenti di suoli. All'interno di ogni poligono sono racchiusi suoli ritenuti molto simili sia dal un punto di vista tassonomico che dal punto di vista funzionale. Tali poligoni rappresentano le cosiddette serie di suoli; la serie costituisce la categoria più bassa del sistema di classificazione più comunemente utilizzato (Soil Survey Staff, 1975). Tuttavia sono numerosi gli studi che hanno dimostrato quanto sia diversa la realtà, cioè che quelle aree definite omogenee e con limiti netti secondo il rilevamento pedologico standard, in realtà possono presentare un'ampia variabilità interna e senz'altro non presentano margini netti, piuttosto "sfumano" le une nelle altre. Possiamo quindi affermare che attualmente le metodologie standard utilizzate per realizzare le carte pedologiche, soffrono di un difetto di informazioni utili a comprendere in che modo le proprietà dei suoli, in particolare quelle fisiche, variano nello spazio e quindi utili ad attuare una corretta gestione degli ecosistemi.

Per affrontare tali onerose problematiche è necessario riconoscere che il continuum suolo non può essere descritto ed analizzato secondo schemi deterministici basati sulla discontinuità (rilevamento pedologico standard per serie). Negli ultimi anni si stanno quindi affermando approcci alternativi a queste problematiche, quali: (i) lo studio della variabilità "continua stocastica regionalizzata" del suolo e (ii) lo studio della variabilità "continua deterministica" del suolo.

La variabilità continua stocastica regionalizzata è il tema della geostatistica. Molti autori ne hanno suggerito l'uso per incorporare la variabilità spaziale degli attributi nella cartografia pedologica e nell'analisi GIS (Webster, 1985; Oliver e Webster, 1990; McBratney et al., 1991; Rogowski e Wolf, 1994).

L'altro approccio, che si sta affermando per lo studio della variabilità spaziale dei suoli, è quello di considerare la stessa come una variabilità di tipo continuo deterministico. Tale variabilità è controllata dall'azione di fattori pedogenetici riconoscibili (ad es. morfologia del territorio), come la variabilità discontinua deterministica (approccio standard), ma non si esprime secondo i requisiti della cartografia per unità. Molti studi hanno dimostrato che esistono strette relazioni tra variabili ambientali quantitative ed alcune proprietà dei suoli

(McKenzie ed Austin, 1993; Odeh et al., 1994; Gessler et al., 1995). Lo studio delle variabili ambientali viene generalmente effettuato mediante l'analisi dei modelli digitali del terreno (DEM) e delle immagini satellitari a diverse lunghezze d'onda, in grado di fornire informazioni ad altissima risoluzione su variabili distribuite, ma la diffusione di nuove tecniche e strumenti di misura alternativi è oggi "incalzante".

5.2 Approcci geostatistici

Dato che la realtà varia da un punto all'altro e non esiste la possibilità né la convenienza ad effettuare osservazioni in ogni punto, è necessario definire dei metodi che consentano di predire o stimare una data caratteristica in un punto in cui non c'è stato il campionamento a partire dai valori registrati in altre postazioni. Oggi in tutto il mondo sono numerosi gli studi condotti al fine di comprendere il fenomeno della eterogeneità naturale a scale differenti. E ciò è dovuto alla presa coscienza dell'importanza che la variabilità spaziale assume in tutti gli studi ambientali (Webster, 1985; Christakos, 1992; Cressie, 1991; Goovaerts, 1999; Castrignanò et al., 2000); la variabilità di una proprietà osservabile in un dato territorio è strettamente legata alla scala di osservazione del fenomeno, infatti alla sua strutturazione contribuiscono fattori e processi di tipo diverso, interagenti fra loro su numerose scale differenti sia spaziali che temporali. Ne segue pertanto, che la variabilità spaziale in generale è fortemente influenzata dalla scala di osservazione prescelta, ma anche dalla metodologia adottata, oltre che dalla variabile o variabili prese in esame.

A livello regionale, la *classificazione dei profili di suolo* è stato il metodo tradizionalmente usato per raggruppare suoli simili in unità più o meno omogenee e separare quelli che si differenziano maggiormente. La variabilità all'interno dell'unità di mappa è stata descritta secondo la statistica classica, assegnando a ciascuna unità lo stesso valore atteso, dato dalla media dei campioni ricadenti al suo interno, e, come errore della stima, la varianza entro l'unità ("*within-unit*"). Secondo tale approccio, inoltre, la variabilità attorno alla media è assunta casuale, senza alcun riferimento alla posizione geografica dei singoli punti di campionamento.

Attualmente, esistono numerosi risultati sperimentali (Oliver e Webster, 1986; McBratney et al., 1991; Castrignanò et al., 2000a) che attestano come spesso questa variabilità casuale contenga in realtà una componente strutturale, dipendente cioè spazialmente, per cui, almeno entro un determinato raggio di influenza, le differenze spaziali fra le proprietà dei suoli possono essere espresse, anziché in termini assoluti, in funzione della distanza di separazione fra i punti di campionamento.

Recenti sviluppi della teoria statistica consentono di quantificare l'interdipendenza spaziale fra i campioni e quindi di utilizzare tale informazione per la fase successiva di interpolazione, aumentando la precisione della stima. Questa moderna evoluzione dell'approccio statistico si basa, essenzialmente, sulla *teoria delle variabili regionalizzate (geostatistica)* (Isaak e Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997), che è attualmente applicata con successo in sempre nuove aree di studio ed in particolare nelle scienze del suolo e ambientali (Goovaerts e Journel, 1995; Castrignanò et al., 2000a,b; Wackernagel, 2003). La variazione spaziale delle caratteristiche del suolo contiene componenti sia *sistematiche*, o deterministiche, che *casuali*. La variabilità sistematica consiste in un cambiamento graduale e ben definito ("*trend*"), che può essere interpretato in termini di fattori o processi agenti ad una data scala più grande di quella di osservazione (topografia, litologia, clima, età dei suoli, composizione fisico-chimica, etc.).

Oltre a questa componente della variazione, vi sono anche delle differenze che non possono essere attribuite a cause note, ricadenti cioè sotto il diretto controllo dello sperimentatore: è questa parte dell'eterogeneità globale, che sfugge all'interpretazione, che viene chiamata casuale.

Ne segue, pertanto, che la variabilità spaziale è il risultato di molti fattori interagenti su di un continuum spazio-temporale: quelli che operano su grandi distanze (fattori pedogenetici) e per lunghi periodi di tempo (azione degli agenti atmosferici caratterizzanti il clima) vengono a loro volta modificati da altri processi che agiscono a più breve distanza spaziale (erosione e successivo deposito del materiale originario) o temporale (fattori meteorologici).

Questa natura tipicamente gerarchizzata ("*nested*") della variabilità naturale fa sì che il tipo e le cause di variazione dipendano sensibilmente dalla scala e dalla intensità di campionamento.

La classificazione dei suoli attraverso la descrizione dei profili pedologici e la successiva elaborazione statistica dei dati analitici rilevati sono stati i metodi più comunemente usati per descrivere la variazione spaziale.

Una delle assunzioni fondamentali della classificazione è che le differenze naturali possano essere descritte da un numero relativamente ristretto di proprietà diagnostiche, che debbono godere dei seguenti requisiti: avere la più alta indipendenza reciproca e, contemporaneamente, il più alto grado di covarianza con le molte altre proprietà non diagnosticate. Ciò garantirebbe un duplice risultato: massimizzare la variazione fra le unità di mappa individuate ("*varianza between-unit*") e minimizzare quella all'interno di ciascuna unità ("*varianza within-unit*"), rispetto ovviamente alla varianza totale.

Molte volte, da una semplice ispezione visiva o da una immagine aerea o telerilevata, i pedologi riescono ad individuare dove il paesaggio subisce delle brusche variazioni e a tracciare dei confini in modo da suddividerlo in classi. Ciascuna classe viene, dunque, descritta separatamente in base ai dati rilevati su campioni prelevati al suo interno, utilizzando le medie come predittori. Una certa variabilità rimane pur sempre all'interno della classe, ma questa o è talmente piccola da poter essere trascurata o viene considerata come un disturbo ineliminabile, che può però essere tollerato nel sistema di classificazione, almeno fino a un dato livello, generalmente posto al 10%. Il precedente approccio adotta una descrizione discontinua della realtà e tiene poco conto della variazione graduale sia all'interno che fra le classi. La variabilità interna, inoltre, è assunta sempre minore di quella fra le unità; ma in un'agricoltura moderna, altamente intensiva e ad elevato livello tecnologico, essa può superare quella fra le unità pedologiche. In contesti ambientali fortemente antropizzati, è molto probabile che le indagini classiche non riescano: 1) a stimare valori affidabili di quelle proprietà maggiormente influenzate dall'intervento umano: concentrazioni di fosforo solubile, di cationi scambiabili, di solfati, conducibilità idrica, porosità, etc.); 2) a rilevare la presenza localizzata di micro-elementi inquinanti nel suolo, nelle acque, nelle piante o nell'aria; 3) ad individuare focolai di infezione e a prevederne la probabile direzione di diffusione; 4) a segnalare l'insorgenza di stress di qualsiasi tipo nei sistemi forestali o agrari.

Nell'approccio classico la stima della media viene usata per scopi predittivi, per cui se un attributo non è stato misurato in un dato punto all'interno di una unità di mappa, il suo valore atteso è espresso dalla media dell'unità corrispondente. La statistica classica assume dunque che il valore atteso di una data proprietà del suolo in un punto all'interno di un'unità sia dato dalla media dell'unità più una variabile casuale, spazialmente non correlata, che rappresenta una misura del grado di dispersione dei valori attorno alla media. Le procedure statistiche classiche assumono, dunque, che la variazione all'interno di una unità sia distribuita casualmente e omogeneamente. In realtà, le proprietà ambientali sono delle variabili continue, per cui non è irragionevole aspettarsi che esse varino secondo la distanza vettoriale di separazione, mostrando un diverso grado di "continuità" o similarità in funzione della direzione.

Ne segue, pertanto, che il modello classico è inadeguato per scopi di interpolazione, poiché non assume una dipendenza spaziale fra i singoli campioni.

Come si è accennato, l'alternativa possibile all'approccio classico è quella di trattare il suolo come una *funzione casuale* e di descriverlo utilizzando i metodi della *Geostatistica*. La differenza fondamentale di tale approccio è nel supporre che esista una correlazione spaziale fra i campioni e che le relazioni possano essere espresse in termini di distanze relative fra i

punti anziché in funzione delle loro posizioni assolute. L'idea base di questa teoria è credere che il suolo sia un *continuum*: l'approccio metodologico che ne scaturisce permette di quantificare questa proprietà fondamentale tramite un modello matematico spaziale, che viene poi utilizzato in fase di interpolazione. Essenzialmente, per *dipendenza spaziale* si intende quella proprietà del suolo per cui è molto probabile che siti vicini risultino più simili di altri posti a distanze maggiori; in altre parole si assume che i valori dell'attributo oggetto di studio non siano distribuiti casualmente, ma risultino correlati spazialmente. Adottando questa visione della realtà, vengono a cadere i presupposti fondamentali della statistica classica, per cui è necessario seguire un approccio alternativo.

La teoria delle variabili regionalizzate è attualmente ben formulata matematicamente e ormai applicata con successo in numerosi ambiti, da quello più propriamente geologico, in cui fu formulata originariamente, a quello delle scienze ambientali. Secondo la teoria delle variabili regionalizzate, la variazione spaziale di una qualunque proprietà può essere espressa come la somma di 3 componenti principali:

1. una componente deterministica, relativa ad un valore medio costante o ad una variazione graduale a lungo raggio, generalmente descritta da un polinomio (trend);
2. una componente casuale correlata spazialmente;
3. un rumore" ("white noise") o errore residuo non correlato spazialmente.

Se con x_i indichiamo il vettore posizione, allora la variabile spaziale Z nel punto x_i è data da:

$$Z(x_i) = m(x_i) + \varepsilon'(x_i) + \varepsilon'' \quad [\text{eq. 5.1}]$$

ove $m(x_i)$ è una funzione deterministica che descrive la componente di trend; $\varepsilon'(x_i)$ rappresenta il residuo da $m(x_i)$ di natura stocastica, variabile localmente e dipendente spazialmente, e ε'' il termine di errore, indipendente spazialmente, con media zero e varianza σ^2 .

Nelle applicazioni più semplici la teoria assume una media locale costante e una varianza “stazionaria” delle differenze (residui) fra i punti separati da un dato vettore distanza: è questo ciò che costituisce “l’ipotesi intrinseca” di Matheron (1965). La sua formulazione è espressa nei termini di varianza delle differenze, ovvero di valore atteso delle differenze al quadrato. In formula:

$$\text{var} [z(\mathbf{x}) - z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] = E \left[\{z(\mathbf{x}) - z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\}^2 \right] = 2\gamma(\mathbf{h})$$

[eq. 5.2]

Ove $z(\mathbf{x})$ rappresenta il valore di una qualche proprietà z nel punto \mathbf{x} e $z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$ è il valore di z a $(\mathbf{x}+\mathbf{h})$. La semivarianza γ dipende dal vettore di separazione \mathbf{h} , il *lag*, sia in termini di distanza che di direzione, ma non dalle posizioni effettive dei punti.

La funzione che collega γ ad \mathbf{h} è detta *variogramma* e, nel caso di variazione intrinseca, esso contiene tutta l’informazione utile relativa alla variazione spaziale della proprietà in esame.

5.2.1 Il variogramma

La lettura e l'interpretazione del variogramma (fig.5.1) è fondamentale, poiché esso sintetizza tutta l'informazione essenziale, quale la forma della variazione, la sua grandezza e scala spaziale. Non si tratta tuttavia di un concetto assoluto, ma dipendente sensibilmente dalla scala di indagine e dalle dimensioni dell'area coperta dal campionamento. Dopo aver calcolato il variogramma sperimentale è necessario adattare alle semi-varianze discrete un modello matematico, che è utilizzato nella fase successiva di interpolazione con il *kriging*. I modelli teorici possono assumere forme differenti, ma in generale quelli che appaiono limitati superiormente raggiungono un valore massimo (*sill*), a distanza finita (*range*) o asintoticamente a distanza infinita: in questo caso il sill rappresenta la varianza *a priori* di un processo casuale. Spesso il variogramma sperimentale interseca l'asse delle ordinate a qualche valore positivo, noto come *varianza di nugget*, che comprende diverse componenti: l'errore di misura e la variazione ad una scala più piccola del minimo intervallo di campionamento.

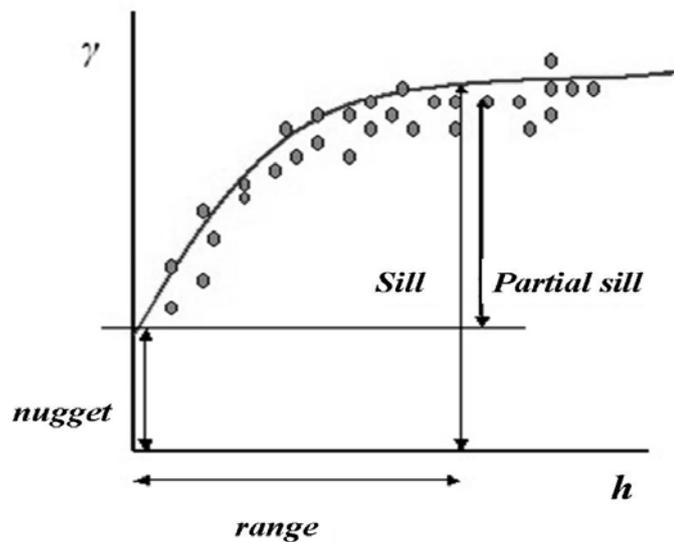


Fig. (5.1) Variogramma teorico

Come caso estremo il variogramma sperimentale può presentare un andamento orizzontale, nugget puro, che denota totale assenza di dipendenza spaziale nei dati, per cui non ha senso tentare di applicare un qualche metodo di interpolazione. Se la variabile è supposta comunque continua, solo un campionamento più intenso può rivelarci la probabile esistenza di una qualche struttura spaziale a scala più piccola. Le considerazioni precedenti dovrebbero essere state sufficienti a mettere in evidenza il ruolo cruciale del variogramma in un'analisi spaziale di parametri ambientali.

5.2.2 Il Kriging

Il *kriging* è una tecnica che permette di ottenere stime ottimali e non distorte della variabile regionalizzata in punti non campionati, utilizzando i risultati dell'analisi strutturale, precedentemente descritta, e la serie dei dati sperimentali. Una proprietà molto utile del kriging è che per ogni valore stimato viene calcolato anche un termine di errore (*varianza della stima*), fornendo pertanto una misura dell'affidabilità dell'interpolazione. Le forme più semplici di kriging consentono la stima di valori puntuali (*kriging puntuale*) o areali (*kriging a blocchi*) e presuppongono stazionarietà nei dati.

Il termine di kriging comprende in realtà tutta una serie di metodi per la stima locale, che va dal *kriging semplice* o *ordinario*, al *co-kriging multivariato*, al *kriging universale* e *con deriva esterna* entrambi non stazionari, al *factor kriging*. Il kriging consiste essenzialmente in una media mobile pesata:

$$\hat{z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad [\text{eq. 5.3}]$$

ove $\hat{z}(\mathbf{x}_0)$ è la stima in un punto \mathbf{x}_0 del territorio della variabile z , N il numero dei punti ricadenti in un vicinato di \mathbf{x}_0 e λ_i sono i pesi che sommano ad 1 in modo da garantire la mancanza di distorsione della stima. I suddetti pesi sono calcolati in modo da minimizzare la varianza di stima, con il vincolo che la loro somma sia uguale ad 1. Per ottenere delle mappe spaziali, $\hat{z}(\mathbf{x}_0)$ è calcolato ai nodi di una griglia sufficientemente fine, definita dall'utente: i risultati possono quindi venir mostrati sottoforma di mappe alle isolinee o ai falsi colori o tridimensionali. Il kriging permette di superare molte delle limitazioni proprie dei metodi tradizionali di interpolazione. Per esempio, i pesi nel kriging non sono arbitrariamente fissati, ma determinati dal modello di variogramma e dalla configurazione dei dati; si tratta inoltre di un interpolatore non distorto e "*ottimale*", nel senso che le stime sono note con il minimo della varianza di errore; inoltre le varianze di stima possono venir calcolate e mappate come le stime, per cui è dunque possibile determinarne i limiti fiduciali. Questo è sufficiente ad affermare la superiorità del kriging rispetto agli altri interpolatori e la sua maggiore sensibilità. Va comunque sottolineato che, come ogni procedura statistica, esso presuppone il verificarsi di determinate assunzioni fra cui, fondamentale, la presenza di una qualche dipendenza spaziale. L'ampia varietà di procedure di kriging richiede inoltre una scelta oculata di quella più adatta al caso considerato.

5.3 Approcci deterministici

L'utilizzo di tecniche di stima di tipo geostatistico come il kriging ed il cokriging sono state utilizzate con successo in molti studi, tuttavia la ricerca di metodi in grado di garantire una migliore accuratezza di stima e contemporaneamente ridurre i costi del rilevamento (campionamento), continua ininterrottamente (Odeh, *et al.*, 1994).

Alcuni autori (Webster, 1997) sono giunti alla conclusione che i metodi puramente geostatistici negli approcci quantitativi al rilevamento pedologico appaiono utili alla grande scala di rilevamento mentre la loro utilità a scale di minor dettaglio non è ancora chiara (McKenzie, 1999). A queste scale i metodi classici di rilevamento sembrano essere più efficienti perché, ai fini della mappatura della distribuzione spaziale dei suoli, si basano sostanzialmente sulle relazioni esistenti tra le caratteristiche di questi ultimi e proprietà ambientali, territoriali, paesaggistiche più facilmente osservabili. Tuttavia queste relazioni derivano tipicamente da modelli mentali qualitativi non formalizzabili, che gli esperti dei suoli sviluppano nel corso della loro esperienza in campo (Austin and McKenzie, 1988; Hudson, 1992; Hewitt, 1993; Webb, 1994).

C'è l'esigenza di sviluppare metodi di rilevamento quantitativi, applicabili a scale intermedie (1:50.000 – 1:100.000). Una possibilità è quella di integrare i metodi convenzionali qualitativi con approcci di tipo quantitativo. I poligoni delimitati sulle carte pedologiche ad esempio, potrebbero costituire uno strato informativo utilizzabile prima o durante l'analisi geostatistica. Un approccio simile condurrebbe a risultati contenenti sia informazioni derivanti dall'esperienza del pedologo che informazioni quantitative dipendenti dalla struttura spaziale dei dati.

Altro approccio verso il quale negli ultimi anni si è rivolta l'attenzione è in pratica l'analogo esplicito del metodo classico di rilevamento pedologico. Numerosi studi hanno dimostrato che esistono interessanti relazioni tra variabili ambientali quantitative ed alcune proprietà dei suoli (McKenzie and Austin, 1993; Odeh et al., 1994; Gessler et al., 1995). Tali variabili quando adoperate al fine di migliorare le mappature della distribuzione spaziale dei suoli, vengono definite ausiliarie o secondarie. Tra le più interessanti vi sono quelle derivanti dall'analisi dei modelli digitali del terreno e delle immagini satellitari ottenibili con sensori multispettrali (Cook et al., 1996a).

Dai modelli digitali del terreno è possibile generare una serie di variabili che riflettono i processi geomorfologici, climatici ed idrologici. Diversi studi basati sull'utilizzo di regressioni lineari multiple, hanno dimostrato la possibilità di stimare talune proprietà agronomiche dei suoli da proprietà morfologiche facilmente misurabili (McKenzie, *et al*

1989). Le regressioni multiple possono essere combinate con i metodi della geostatistica (kriging), questo metodo è noto con il nome di regression-kriging.

Le caratteristiche topografiche del territorio sono utili a comprendere anche i processi che avvengono a scale di grande dettaglio (a scala aziendale ad esempio). E questo avviene in diversi modi: innanzitutto vi è un'influenza diretta su fenomeni come la ridistribuzione delle particelle (erosione e/o deposizione), della sostanza organica, degli elementi nutritivi, che si traducono in cambiamenti delle proprietà fisiche e chimiche dei suoli. Poi vi è un effetto anche sui movimenti dell'acqua nel suolo, in senso sia verticale che orizzontale, e quindi sulla disponibilità idrica per le colture. (Verity and Anderson, 1990). La posizione rispetto al versante, la pendenza, la curvatura e la superficie totale coinvolta nei deflussi idrici sono tra le proprietà topografiche più importanti che hanno un legame diretto con la variabilità spaziale delle produzioni (Kravchenko., *et al.* 2000).

Le variabili ambientali sono spesso adoperate per ottenere informazioni secondarie su attributi territoriali, come l'indice di inumidimento (wetness index) o l'indice di trasporto dei sedimenti. Informazioni facilmente disponibili riguardo correlazioni esistenti tra le proprietà idrauliche dei suoli e le variabili topografiche sono piuttosto scarse, nonostante numerosi studi abbiano dimostrato la loro esistenza (Halvorson and Doll, 1991; Mapa and Pathmarajah, 1995). Si sa molto di più, grazie allo sviluppo di modelli regressivi multipli o funzioni di pedotrasferimento, riguardo le relazioni esistenti tra il comportamento idrologico dei suoli e proprietà fisico-chimiche come la tessitura, la sostanza organica e la densità, che a loro volta sono fortemente correlate con le variabili topografiche. Si può quindi senz'altro ipotizzare che le proprietà idrauliche dei suoli siano in qualche modo dipendenti dalla topografia del territorio (Pachepsky, *et al.*, 2001).

La nuova generazione di sensori multispettrali (ASTER, SPOT-5 HRG, Landsat-7 ETM) è caratterizzata da alta risoluzione sia spaziale che spettrale ed i dati da essi ottenibili, grazie alla crescente competizione del mercato in questo settore, sono oggi disponibili a costi sensibilmente ridotti. Questi sensori sono spesso utilizzati per lo studio della vegetazione, di conseguenza possono essere di grande aiuto per ottenere informazioni utili alla mappatura dei suoli. Satelliti come NOAA, Terra ed Aqua forniscono gratuitamente dati giornalieri a bassa risoluzione, ma a dispetto di ciò essi sono stati adoperati con successo nello studio degli indici di intensità e di sviluppo fenologico della vegetazione, ambedue correlabili con i processi che caratterizzano i suoli (Rossiter, D.G., 2005). Le immagini satellitari ai raggi gamma possono fornire interessanti informazioni sulla variazione spaziale del materiale parentale dal quale i suoli si sono evoluti, oppure cogliere le differenze più evidenti tra classi tessiturali e mineralogiche degli strati più superficiali. Con l'ausilio di tecniche geostatistiche è possibile

integrare i dati continui relativi ad una data superficie ottenuti mediante sensori, con i dati puntuali ottenuti dal campionamento in campo. Vi sono studi molto recenti (Shepherd & Walsh, 2002) che hanno dimostrato l'esistenza di forti correlazioni tra talune proprietà dei suoli (basi di scambio, conducibilità elettrica, P, carbonio organico, contenuto in argilla e sabbia) ed alcuni segnali iper-spettrali.

L'utilizzo di queste tecnologie richiede un'attenta e precisa validazione tra ciò che viene osservato in campo e ciò che viene generato dall'interpretazione digitale della realtà. Questo oggi è possibile tramite l'utilizzo di tecniche GPS (Global Position System) differenziali.

6. Il comportamento Idrologico dei suoli e la Pedologia

E' oramai opinione comune che il progresso scientifico sia possibile solo lì dove venga applicato un approccio multidisciplinare alla ricerca. Diversi autori sottolineano l'importanza di un approccio integrato allo studio di problematiche riguardanti l'agricoltura, la vulnerabilità delle falde acquifere, le risorse idriche, le scienze ambientali e della terra in generale (Hangsheng, 2003). Per estendere a diverse scale spaziali e temporali le conoscenze acquisite su problematiche molto complesse come le proprietà fisiche e chimiche dei suoli e le dinamiche delle acque è necessario che la pedologia si integri con scienze come la fisica del suolo, l'idrologia ed altre discipline correlate.

Tipicamente gli esperti dei suoli focalizzano la loro attenzione sui profili (pedon) osservati in campo in un dato contesto ambientale, i fisici del suolo hanno acquisito enormi conoscenze ed enfatizzato i loro studi e le loro teorie conducendo ricerche di laboratorio su campioni di ridotte dimensioni e gli idrologi hanno maggior dimestichezza con processi a scala territoriale o di bacino. Inoltre vi sono significative differenze anche negli approcci che tali esperti hanno rispetto le loro ricerche; gli studi pedologici tradizionalmente sono di tipo descrittivo mentre quelli sulle proprietà fisiche ed idrauliche si basano principalmente sull'utilizzo di strumenti di misura e modelli matematici. Tuttavia i pedologi, i fisici del suolo e gli idrologi hanno diversi interessi in comune e spesso beneficiano delle conoscenze reciproche. Infatti i principi della fisica e dell'idrologia sono alla base della caratterizzazione e quantificazione delle proprietà fisiche ed idrauliche dei suoli e dei processi che governano la morfologia dei suoli, la genesi e quindi la loro classificazione e mappatura.

I fisici del suolo e gli idrologi hanno delucidato i processi di deflusso idrico attraverso i suoli e a scala di bacino ed hanno fatto grandi progressi nel settore del monitoraggio e della modellizzazione dei flussi idrici, energetici e gassosi nel profilo pedologico e attraverso il continuum suolo-pianta-atmosfera. Essi hanno dato il loro contributo in molti altri settori di particolare interesse per gli scienziati del suolo.

Si può affermare che l'idrologia del suolo costituisce la principale forza trainante nei processi di pedogenesi, morfologia e distribuzione.

E' evidente quindi la necessità di una maggiore integrazione fra le diverse discipline. Sforzi in tal senso sono stati compiuti (Terribile e Basile, 2004; Kutilek, 2004) e altri passi si dovrebbero compiere. In particolare, come sottolineato da Nielsen *et. al.*, (1998) è urgente la necessità di integrare le informazioni contenute nei report delle carte pedologiche, con dati riguardanti il comportamento idrologico dei suoli sia in senso spaziale che temporale.

In definitiva si sta affermando una branca della scienza del suolo che va sotto il nome di idropedologia. Kutilek (1966) individua nella combinazione tra le teorie della fisica del suolo e le teorie della pedogenesi , il soggetto di questa nuova scienza. Per una definizione esplicita ed approfondita degli obiettivi dell'idropedologia si rimanda al lavoro di Lin et al. 2004.

Di seguito vengono definite e descritte le principali variabili e proprietà idrauliche utilizzate nel campo della pedologia e idrologia. Viene sottolineata l'importanza dei progressi che sono stati raggiunti in questo settore ed in particolare per ciò che attiene alla misura delle proprietà idrauliche.

6.1 Le principali variabili e proprietà idrauliche (fonte: Metodi di analisi fisica del suolo)

6.1.1 Contenuto d'acqua nel suolo

Il contenuto d'acqua nel suolo viene generalmente definito come rapporto tra la massa dell'acqua presente nel mezzo poroso e la massa del materiale secco, o attraverso il volume d'acqua presente nell'unità di volume del mezzo poroso. Quando le determinazioni si riferiscono a campioni di suolo da sottoporre ad analisi chimiche, normalmente il contenuto d'acqua si esprime su basi gravimetriche e viene valutato attraverso il rapporto θ_m adimensionale:

$$\theta_m = \frac{M_w}{M_s} \quad [\text{eq.6.1}]$$

dove M_w è la massa dell'acqua presente nel campione e M_s è la massa del campione secco.

Nella maggior parte delle applicazioni è vantaggioso definire il contenuto d'acqua nel mezzo poroso su basi volumetriche esprimendolo attraverso il rapporto anch'esso adimensionale:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad [\text{eq. 6.2}]$$

tra il volume dell'acqua V_w ed il volume totale V_t . Il contenuto d'acqua è una grandezza adimensionale che se espressa in volume ha dimensioni $[L^3 L^{-3}]$ e si misura in $(m^3 m^{-3})$ o $(cm^3 cm^3)$.

In ogni caso, il contenuto d'acqua volumetrico θ e quello gravimetrico θ_m possono essere dedotti l'uno dall'altro se è conosciuta la densità apparente ρ_b del mezzo poroso, attraverso la relazione:

$$\theta = \theta_m \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad [\text{eq. 6.3}]$$

dove ρ_w è la densità dell'acqua.

Il contenuto d'acqua massimo di un mezzo poroso, definito dalla condizione in cui tutti i pori del mezzo sono pieni d'acqua, viene indicato come contenuto d'acqua in condizione di saturazione completa θ_s ed in alcune applicazioni per la valutazione dell'acqua presente nel suolo si fa riferimento al grado di saturazione s , definito dal rapporto fra il contenuto d'acqua nel suolo e quello alla saturazione completa:

$$s = \frac{\theta}{\theta_s} \quad [\text{eq. 6.4}]$$

Il parametro adimensionale s viene di solito espresso in percentuale e varia da 0 a 100%. Tuttavia, come la condizione di saturazione completa ($s = 100\%$) è molto difficile da raggiungere, specie in campo ma pure in laboratorio, per la presenza sia di minuscole bolle d'aria sia di pori ciechi, anche l'assenza assoluta di acqua nel suolo è una situazione estrema altrettanto difficile da conseguire ($s = 0\%$). Se si indica con θ_r il contenuto d'acqua residuo nel suolo, si preferisce fare riferimento alla cosiddetta saturazione effettiva S_e :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [\text{eq. 6.5}]$$

che coincide con s solo se $\theta_r = 0$. Quindi, per quanto ora detto, e se P rappresenta la porosità del mezzo, deve essere: $\theta_s \leq P$

6.1.2 Capacità idrica di campo

Il movimento dell'acqua nel suolo è un processo che evolve con continuità nel tempo e può ricondursi, in modo schematico, ad un alternarsi di fenomeni di infiltrazione e redistribuzione (Santini, 1975). In conseguenza di apporti meteorici o irrigui, l'acqua s'infiltra attraverso la superficie del suolo e muove impegnando nel tempo spazi sempre maggiori del profilo. Se il processo di infiltrazione evolve in un profilo omogeneo inizialmente caratterizzato da contenuti d'acqua modesti, è evidente lo stabilirsi di una *zona di trasmissione*, ove i contenuti d'acqua sono relativamente elevati e variano poco con la profondità, sovrapposta ad una *zona di inumidimento* caratterizzata invece da contenuti d'acqua che rapidamente si riducono per raggiungere il valore iniziale in prossimità del cosiddetto *fronte di inumidimento*.

Quando termina l'alimentazione sulla superficie, il fronte di inumidimento continua a spostarsi verso gli strati inferiori del suolo, con velocità che si riduce rapidamente nel tempo, e l'acqua si ridistribuisce interessando spazi sempre più profondi a spese di quella che abbandona le zone superficiali ad elevato grado di saturazione. Nelle zone più superficiali, i contenuti d'acqua nel profilo del suolo possono più rapidamente ridursi per effetto di processi di evaporazione diretta attraverso la superficie del suolo e per l'attingimento da parte delle radici delle piante. Inoltre, la presenza di una falda poco profonda e di intensi fenomeni di evapotraspirazione possono dar luogo ad un flusso ascendente dell'acqua diretto dalla falda verso gli strati più superficiali del suolo. Tutti questi processi elementari evolvono nel tempo con velocità differenti e tali da consentire al suolo di svolgere un'utile e preziosa funzione di immagazzinamento dell'acqua e delle sostanze nutritive in essa disciolte, in modo che le piante possano fronteggiare la domanda traspirativa, da considerare essenzialmente come continua, anche quando le alimentazioni idriche per precipitazione o interventi irrigui sono irregolari o praticamente assenti per lunghi periodi di tempo.

La Società Americana di Scienza del Suolo (Soil Science Society of America, 1997) riprendendo alcuni concetti e risultati di Veihmeyer e Hendrickson (1927; 1948), definisce la capacità idrica di campo θ_{CIC} , o semplicemente *capacità di campo*, come quel particolare valore del contenuto d'acqua in volume che è presente in un suolo 2-3 giorni dopo che un processo di infiltrazione ne ha inumidito il profilo e quando il processo di drenaggio è divenuto di entità praticamente trascurabile. E' implicito il riferimento ad un suolo con struttura e tessitura uniforme e ad un processo di redistribuzione dell'acqua che evolve in assenza di fenomeni di evapotraspirazione e con la superficie libera di una eventuale falda freatica sufficientemente profonda in modo da non influenzare il processo di moto.

Questa definizione di capacità di campo risulta ambigua e genera diverse perplessità, non solo per quanto attiene al tempo che deve trascorrere perché si possa ritenere concluso il processo

di drenaggio (2-3 giorni dall'inizio della redistribuzione), ma soprattutto per quel che riguarda la condizione di uniformità del suolo richiesta affinché il parametro θ_{CIC} abbia un significato utile per le pratiche applicazioni. Gli sviluppi oggi raggiunti dalla teoria del moto dell'acqua nel suolo e dalle tecniche di misura del contenuto d'acqua in campo hanno indotto gli studiosi a ritenere che il concetto originario di capacità di campo sia essenzialmente generico e semplicistico e non adatto a caratterizzare, seppure globalmente, un processo di redistribuzione.

La capacità di campo non può certamente essere considerata una proprietà del suolo né una costante, ma rappresenta un tentativo grossolano per sintetizzare un tipico processo dinamico attraverso un unico parametro globale (Hillel, 1998). Come evidenziato da Gardner et al. (1970), il processo di redistribuzione, e quindi la capacità di campo, dipende dal profilo di umidità che si determina nel suolo al termine della preliminare fase di infiltrazione, nonché dalle condizioni che si instaurano al contorno del campo di moto. La redistribuzione dell'acqua, inoltre, evolve con continuità e non presenta bruschi arresti. La rapidità di evoluzione del processo decresce con continuità nel tempo e, in assenza di una falda superficiale, specialmente per suoli di media o fine tessitura, una condizione di quasi equilibrio si raggiunge praticamente solo dopo diversi giorni. Soltanto per suoli a tessitura grossolana ed a struttura più stabile il concetto di capacità di campo trova un riscontro sperimentale in quanto il processo di drenaggio per questi suoli è inizialmente molto rapido, ma successivamente rallenta notevolmente a causa dell'accentuata riduzione della conducibilità idraulica con il diminuire del potenziale matriciale che caratterizza questi suoli.

6.1.3 Acqua disponibile

Il concetto di *acqua disponibile* non è stato mai precisato con chiarezza in termini fisici e spesso ha provocato controversie fra le diverse Scuole di studiosi. Cavazza suggerisce che “nel generico e schematizzato concetto corrente di acqua disponibile, si intende riferirsi alla quantità di acqua che, potendo essere trattenuta dal terreno, ne è estraibile sino al punto in cui il suo potenziale di matrice diventa tanto basso da non permettere un’ulteriore assunzione da parte delle piante in attività biologica” (Cavazza, 1997).

Veihmeyer e Hendrickson (1927) sostenevano che le attività delle piante praticamente non risentissero delle variazioni di umidità in un campo di valori abbastanza ampio e che l’acqua presente nel suolo si poteva considerare *ugualmente disponibile* per le piante per valori di θ compresi fra la capacità di campo θ_{CIC} e il punto di appassimento permanente θ_{AP} , che rappresentava un valore di soglia al di sotto del quale si assumeva che l’attività delle piante veniva bruscamente ridotta. Questo modello concettuale, ampiamente diffuso (Ratliff, 1983; Ritschie, 1999), porta a considerare l’acqua disponibile AWC (*Available Water Capacity*) come una costante caratteristica del suolo definita dalla relazione:

$$AWC = \theta_{CIC} - \theta_{AP} \quad [\text{eq. 6.6}]$$

che, anche se basata su ipotesi prive di un riscontro fisico, è stata utilizzata per la sua semplicità in modo generalizzato, nella risoluzione di molti problemi di gestione dell’irrigazione. L’equazione, infatti, fornisce agli agricoltori un criterio pratico per programmare gli interventi irrigui: allorché i processi di evapotraspirazione e di redistribuzione dell’acqua nel suolo determinano in campo condizioni prossime al punto di appassimento permanente, si suggerisce di irrigare fino a riportare i contenuti d’acqua nella zona esplorata dalle radici delle piante a valori prossimi alla capacità di campo.

Tuttavia, la valutazione dell’acqua disponibile attraverso la precedente equazione presenta notevoli incertezze non solo per le limitazioni evidenziate in precedenza circa il concetto di capacità di campo, ma anche per difficoltà legate all’individuazione del parametro θ_{AP} . Il punto di appassimento permanente è stato definito come il contenuto d’acqua che si riscontra nel suolo interessato dalle radici quando la pianta appassisce completamente e non è in grado di recuperare il turgore se inserita per dodici ore in un’atmosfera satura (Briggs, 1912). Questo criterio per la valutazione di θ_{AP} si è spesso rivelato arbitrario e soggetto a notevoli incertezze in quanto sono richiesti in genere tempi molto più lunghi per raggiungere condizioni di equilibrio fra il potenziale dell’acqua nella pianta e nel suolo. Condizioni di appassimento, anche se temporanee, possono verificarsi nelle ore centrali della giornata,

quando la domanda traspirativa è elevata mentre il suolo si presenta ancora abbastanza umido, ed inoltre la risposta delle piante dipende non solo dalle condizioni di umidità del suolo ma è anche legata, attraverso meccanismi complessi, alle condizioni atmosferiche, alla fisiologia ed ai processi di trasporto dell'acqua nel suolo e nella pianta.

Nel tentativo comunque di ricercare un criterio più semplice e meglio definito per valutare θ_{AP} , lo stato idrico nelle piante viene posto in relazione al potenziale dell'acqua nel suolo convenendo di definire il punto di appassimento come il contenuto d'acqua nel suolo al potenziale di -1,5 MPa, che può essere agevolmente determinato in laboratorio su piccoli campioni rimaneggiati con l'impiego di un comune apparato a pressione (Dane, 2001). Questo criterio è ormai universalmente utilizzato nelle applicazioni anche in considerazione del fatto che la funzione di ritenzione idrica del suolo per valori bassi del potenziale è caratterizzata da variazioni modeste del contenuto d'acqua anche per sensibili variazioni del potenziale medesimo.

Anche se il concetto di acqua disponibile viene spesso impiegato in certe categorie di modelli che simulano il bilancio idrologico del suolo (Bouma, 1999; Pereira, 1995; Tiscareno-Lopez, 1993), la validità dei risultati ottenuti da tali modelli può in vari casi risultare compromessa dall'approccio statico, o semi-statico, adottato per valutare il bilancio idrico.

La disponibilità di tecniche di misura sempre più sofisticate, messe a punto per la determinazione delle proprietà idrauliche dei suoli e per il monitoraggio dell'acqua nel suolo e nelle piante, hanno condotto negli ultimi anni a notevoli approfondimenti delle conoscenze sui processi di trasferimento dell'acqua nel sistema suolo-pianta-atmosfera. I principali risultati conseguiti al riguardo sono da porre in relazione ad un approccio dinamico in cui il campo è visto come un sistema unico caratterizzato da processi interdipendenti, di natura complessa e funzioni sia dello spazio sia del tempo, e dove il concetto di acqua disponibile per le piante non si considera come una mera proprietà del suolo, ma dipende anche dalle caratteristiche delle piante e dalle condizioni atmosferiche.

Le condizioni atmosferiche determinano al variare del tempo la domanda traspirativa, cioè l'entità dei flussi di acqua che le piante devono estrarre dal suolo per soddisfare in modo efficiente alle loro funzioni fisiologiche e sostenerne il turgore. D'altra parte, la traspirazione effettiva, in risposta alla domanda imposta dall'atmosfera, dipende dalle resistenze al moto dell'acqua nelle piante e nel suolo, dagli aggiustamenti fisiologici in conseguenza di stress idrici, dall'estensione e densità degli apparati radicali, dall'aerazione del suolo alle varie profondità e dalle proprietà idrauliche del suolo che risultano variabili con i contenuti d'acqua.

6.1.3 Movimento dell'acqua in un suolo

Per lo studio del moto dell'acqua nel suolo si parte dalla legge di Darcy estesa alle condizioni di non saturazione:

$$q = -k(\theta)\nabla h \quad [\text{eq. 6.7}]$$

in cui q [LT^{-1}] è la velocità di flusso, $k(\theta)$ [LT^{-1}] la conducibilità idraulica, θ [-] il contenuto d'acqua volumetrico e ∇H [-] il gradiente nelle tre dimensioni del potenziale dell'acqua nel suolo, dove $H=h+z$ è la somma fra il potenziale di pressione o matriciale h [L] e il potenziale geometrico z [L].

Introducendo l'equazione di continuità:

$$\partial\theta/\partial t = -\nabla q \quad [\text{eq. 6.8}]$$

ed affiancandola alla legge di Darcy si perviene all'equazione generale del moto valida anche in condizioni di non saturazione:

$$\partial\theta/\partial t = -\nabla[k(\theta)\nabla h] \quad [\text{eq. 6.9}]$$

la quale, per processi di moto unidimensionali, ed assumendo h come variabile dipendente è espressa dalla seguente relazione (nota come equazione di Richards):

$$C(h) \partial h/\partial t = \partial/\partial z [k(h) (\partial h/\partial z + 1)] \quad [\text{eq. 6.10}]$$

in cui $C(h)$, la capacità capillare del mezzo, viene definita come $d\theta/dh$.

L'equazione differenziale di cui sopra risulta fortemente non lineare per la forte dipendenza di k ed h da θ e viene in genere risolta per via numerica. La sua soluzione, associando corrette condizioni iniziali e al contorno, necessita quindi della definizione della relazione di ritenzione idrica $h(\theta)$ che lega il potenziale di pressione o matriciale h della fase liquida al contenuto d'acqua in volume θ , e di conducibilità idraulica $k(\theta)$, che riferisce al contenuto d'acqua la conducibilità idraulica del mezzo poroso.

6.1.3.1 Funzione di ritenzione idrica

La relazione che esprime il rapporto tra contenuto d'acqua e potenziale è una caratteristica specifica per ogni suolo e dipende da fattori chimico-mineralogici e granulometrici. La funzione che esprime questa relazione è detta funzione di ritenzione idrica ed è una relazione da determinare sperimentalmente per ogni corpo poroso. In un suolo saturo e in equilibrio con acqua libera alla stessa quota, la pressione che vige è quella atmosferica, e quindi la pressione idrostatica

e il potenziale matriciale sono pari a zero. Se si applica al sistema descritto una leggera depressione, non si assiste ad alcun fenomeno di flusso, fintantoché, aumentando la depressione, essa non superi un valore critico specifico, chiamato potenziale di entrata d'aria (air entry value), al di là del quale è possibile lo svuotamento dei primi pori più grossi. Man mano che la depressione imposta aumenta, il sistema cede acqua svuotando via via i pori a diametro decrescente. Ai più bassi valori del contenuto d'acqua, la curva di ritenzione dipende in prevalenza dalla superficie specifica del suolo e perciò dalla tessitura e dalla composizione mineralogica. Per i valori maggiori di contenuto d'acqua, il valore del potenziale dipende principalmente dai fenomeni di capillarità e quindi dalla distribuzione di frequenza del diametro dei pori. In figura 6.1 a titolo di esempio sono riportate le funzioni di ritenzione per un suolo sabbioso e per un suolo argilloso.

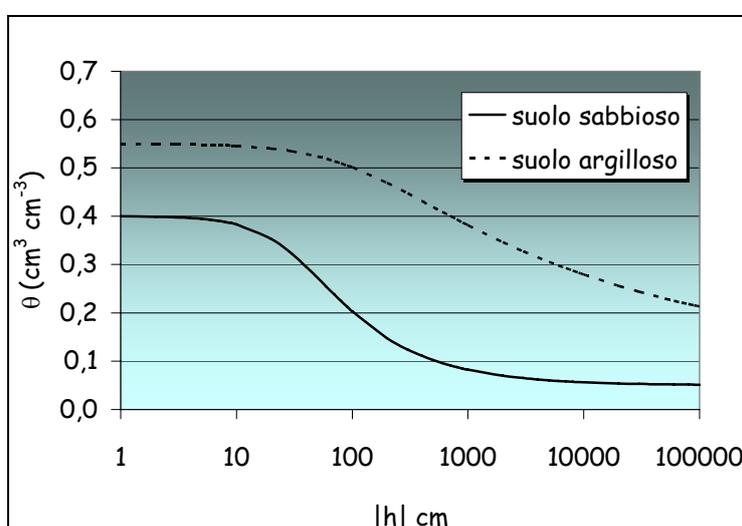


Fig. (6.1): esempi di funzioni di ritenzione per un suolo sabbioso ed un suolo argilloso

Nelle prove condotte per determinare la funzione di ritenzione idrica vengono ottenute coppie di valori di h e di θ che rappresentano punti della funzione. L'insieme di tali punti rappresenta quindi in maniera discreta la relazione che lega queste due variabili. Per sintetizzare la funzione di ritenzione idrica $\theta(h)$ in letteratura sono state proposte numerose relazioni analitiche in forma parametrica. L'impiego di tali relazioni analitiche rappresenta un efficiente strumento per interpolare e estrapolare i rilievi sperimentali ottenuti da prove di laboratorio o di campo.

Brooks e Corey (1964) sulla base di un grande numero di dati sperimentali, hanno proposto il seguente modello parametrico costituito da una relazione di potenza:

$$S_e = \begin{cases} 1 & \text{per } h \geq h_b \\ (h_b/h)^\lambda & \text{per } h < h_b \end{cases} \quad [\text{eq. 6.11}]$$

dove i parametri del modello sono rappresentati da h_b che rappresenta la cosiddetta tensione di entrata d'aria (*air entry value*) e da λ che è una grandezza caratteristica del mezzo legata alla distribuzione dei pori nel campione di suolo. Molto simile al modello di Brooks e Corey è quello suggerito da Campbell (1974)

$$\psi = a \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad [\text{eq. 6.12}]$$

dove: ψ rappresenta il potenziale matriciale; a la tensione di entrata d'aria : b un coefficiente di Campbell.

Molto usato è il seguente modello parametrico proposto da van Genuchten (1980):

$$S_e = \begin{cases} 1 & \text{per } h \geq 0 \\ \left(1 + |\alpha h|^n \right)^{-m} & \text{per } h < 0 \end{cases} \quad [\text{eq. 6.13}]$$

in cui i coefficienti $\alpha(\text{cm}^{-1})$, n ed m costituiscono dei parametri empirici che individuano la forma della curva. In particolare α è approssimativamente uguale all'inverso del valore del potenziale capillare nel punto di flesso della curva.

Il contenuto idrico a saturazione θ_s rappresenta il massimo contenuto idrico volumetrico di un suolo. Tale valore non dovrebbe essere assunto pari alle porosità, rispetto alla quale è solitamente inferiore al 5-10% a causa dell'aria diffusa o intrappolata nei pori. E' comunque un dato di facile determinazione sperimentale.

Il contenuto idrico residuale θ_r viene generalmente determinato per estrapolazione e quindi non rappresenta necessariamente il minimo contenuto idrico possibile in un suolo, ma anch'esso potrebbe essere determinato sperimentalmente, per esempio mediante determinazione del contenuto d'acqua quando il suolo è in condizioni molto secche, con l'impiego di un comune apparato a pressione.

I parametri θ_s e θ_r vengono solitamente considerati come parametri empirici utilizzati all'interno delle funzioni di ritenzione idrica e quindi non sempre riconducibili ad un preciso significato fisico. I parametri n ed m sono indipendenti, ma, sebbene le curve di ritenzione, con n ed m variabili forniscono un'approssimazione ottimale dei dati sperimentali per gran parte dei suoli, ciò può comportare problemi di identificazione nella stima dei parametri. Risultati più stabili e facilmente calcolabili per un uso di routine si ottengono invece imponendo $m=1-1/n$.

In sintesi l'equazione di van Genuchten [eq. 6.13] contiene 4 parametri indipendenti, (θ_r , θ_s , α , n) che devono essere stimati a partire dai dati relativi alla ritenzione idrica osservati su uno specifico suolo. Per far ciò si adotta un algoritmo di ottimizzazione in cui si minimizza una funzione obiettivo definita di solito come la somma del quadrato degli scarti tra valori misurati e valori stimati tramite la relazione analitica relativamente al contenuto d'acqua ai diversi valori del potenziale matriciale.

Infine, c'è da rimarcare l'equivalenza fra le funzioni di Brooks e Corey e van Genuchten. E' quindi possibile il passaggio da una espressione all'altra attraverso le seguenti relazioni fra i parametri:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1/h_b, \\ n &= \lambda + 1, \quad \text{e} \\ m &= \lambda/(\lambda + 1) \end{aligned} \quad [\text{eq. 6.14}]$$

6.1.3.2 Funzione di conducibilità idraulica

Quando il sistema poroso è solo parzialmente saturo il coefficiente di proporzionalità nella legge di Darcy (k_0) non è più una costante per un dato suolo, ma diventa anch'esso variabile in funzione del contenuto d'acqua [$k(\theta)$] o del potenziale [$k(h)$] ed è nota come funzione di conducibilità idraulica.

In condizioni di saturazione parziale una parte dei pori del mezzo è impegnata dalla fase gassosa; il processo di moto può quindi interessare solo quella frazione dello spazio poroso occupata dall'acqua. A questa diminuzione dell'area utile al moto si associa anche un aumento della tortuosità dei percorsi in grado di condurre acqua nell'ambito del mezzo poroso, dovuto agli ostacoli al movimento dell'acqua rappresentati dai pori occupati dalla fase gassosa. Se si considera anche che, per le leggi della capillarità, i pori a svuotarsi per primi sono quelli a diametro maggiore, cioè quelli con maggior capacità di condurre acqua, si può concludere che la relazione tra k e θ o tra k e h è fortemente non lineare. La determinazione sperimentale della funzione di conducibilità pone problemi maggiori rispetto alla funzione di ritenzione in quanto è una grandezza non misurabile direttamente. Tuttavia, entrambe le funzioni di ritenzione esaminate in precedenza possono essere combinate con modelli per la previsione della conducibilità idraulica, una volta nota e definita una relazione funzionale tra le due. I numerosi approcci formulati per sviluppare funzioni continue in grado di descrivere $k(h)$ e $k(\theta)$ (Gardner, 1958; Kunze et al. 1968, Millington e Quirk, 1961; Russo, 1988) sono distinti da importanti differenze concettuali; tuttavia parte delle differenze nelle loro capacità descrittive e predittive sono dovute al fatto che le diverse formulazioni sono state calibrate su data set di dimensioni esigue e relativi a particolari e distinte classi tessiturali. Tali modelli forniscono una valida alternativa alle misure dirette. Si tratta di formulazioni basate generalmente su modelli di distribuzione statistica dei pori, idealizzati come un insieme di capillari cilindrici, all'interno dei quali il flusso è descrivibile secondo le relazioni di Poiseuille e Darcy.

In ogni caso k varia di parecchi ordini di grandezza non solo fra suoli diversi ma anche per uno stesso suolo al variare del contenuto d'acqua o del potenziale. In figura 6.2 a titolo di esempio sono riportate le funzioni conducibilità idraulica $k(h)$ per un suolo sabbioso e per un suolo argilloso. Da tale rappresentazione si evidenzia innanzitutto la elevata variabilità dei valori della conducibilità associata alle variazioni del potenziale per ciascuna classe di suolo. Emerge poi il differente comportamento delle due classi di suolo. Il suolo sabbioso, nel campo prossimo alla saturazione, mostra valori della conducibilità più elevati rispetto al suolo argilloso; il comportamento si inverte ai valori minori del potenziale. Il diverso

comportamento si può spiegare con le differenze nella distribuzione di frequenza del diametro dei pori e nella tortuosità mostrate dai due tipi di suolo.

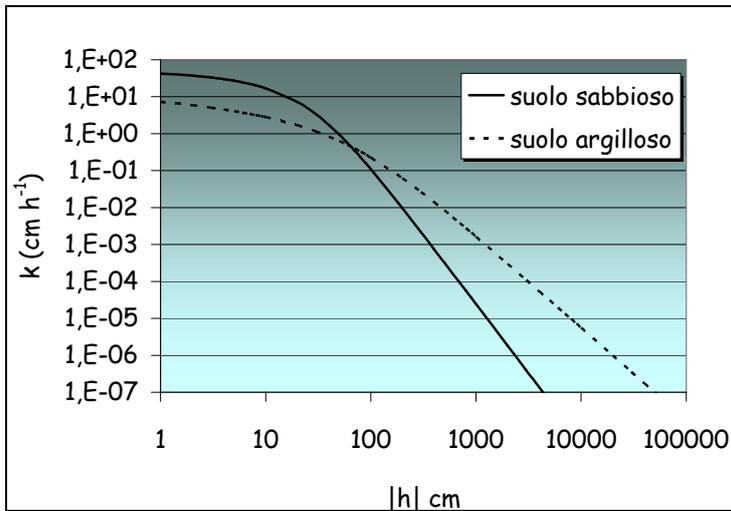


Fig. (6.2): esempi di funzioni di conducibilità idraulica per un suolo sabbioso ed un suolo argilloso

Campbell (1985), definisce la funzione di conducibilità idraulica secondo l'equazione:

$$k(\psi) = k_0 \left(\frac{a}{\psi} \right)^{2 + \frac{3}{b}} \quad [\text{eq. 6.15}]$$

dove $k_0 [LT^{-1}]$ rappresenta la conducibilità idraulica alla saturazione.

La formulazione secondo il modello Mualem-van Genuchten (1976) è invece la seguente:

$$k_r(S_e) = \frac{k(S_e)}{k_0} = S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad [\text{eq. 6.16}]$$

dove l è un parametro legato alla tortuosità, posto solitamente uguale a 0.5.

Come detto in precedenza, quelle che sono state brevemente descritte rappresentano le principali proprietà e variabili adoperate nel campo della pedologia e dell'idrologia. In particolare per ciò che attiene agli studi sul comportamento idrologico dei suoli e su quei processi la cui comprensione è di primaria importanza nell'ottica di una gestione sostenibile del territorio. A testimonianza dei progressi compiuti in questi settori vi sono anche le metodiche applicate per la stima, a basso costo, delle proprietà idrauliche dei suoli. Tra queste compaiono le funzioni di pedotrasferimento, alla cui applicazione si è ricorso anche nel presente lavoro di tesi.

7. Le PTF (funzioni di pedotrasferimento)

Le procedure tipicamente adoperate per la misura delle proprietà idrauliche sono molto dispendiose, sia in termini economici che in termini di tempo ed energie necessarie a tal fine. Per questo motivo, negli ultimi decenni, sono stati sviluppati dei modelli matematici in grado di fornirci una stima della curva di ritenzione a partire da proprietà dei suoli facilmente misurabili e a costi inferiori, quali la tessitura, il contenuto in sostanza organica e la densità apparente. Questi modelli sono stati definiti da Bouma (1989) “pedotransfer functions” o “funzioni di pedotrasferimento” (PTFs).

Quello delle pedofunzioni è oggi un campo di ricerca attivo che ha fornito risultati nel complesso soddisfacenti, anche se la maggior parte degli studi ha carattere empirico e significato locale; questi studi inoltre spesso hanno ignorato informazioni significative sulla distribuzione dimensionale delle particelle elementari e delle classi dei pori. Tuttavia lavori più recenti (Scheinost et al., 1997a, 1997b) hanno mostrato come l'utilizzazione di modelli più accurati per la descrizione della distribuzione delle dimensioni delle particelle elementari o la determinazione analitica di un maggior numero di classi, non migliori necessariamente le capacità predittive delle pedofunzioni. Previsioni più accurate potrebbero essere ottenute includendo nelle pedofunzioni termini relativi alla distribuzione dei macropori associati con la struttura del suolo, ma le tecniche più recenti di acquisizione di tali dati (es. tomografia computerizzata), sono più dispendiosi in termini di tempo e di risorse della misura della curva di ritenzione stessa.

Le PTFs possono essere distinte in due gruppi:

Class PTFs: gli orizzonti del profilo vengono raggruppati in classi tassonomiche (classi tessiturali) ad ognuna delle quali sono associate le proprietà idrauliche medie (curva di ritenzione e/o conducibilità) derivate empiricamente, proprie di quella classe.

Continuous PTFs: in questo caso le proprietà idrauliche (curva di ritenzione e/o conducibilità) vengono derivate da regressioni multiple empiriche, nelle quali le variabili indipendenti possono essere costituite da proprietà dei suoli facilmente misurabili come tessitura, densità, contenuto in sostanza organica. Le continuous PTFs possono essere poi suddivise in 3 gruppi:

- a) i parametri idraulici o i parametri interni a modelli idrologici di ritenzione e/o conducibilità sono direttamente correlati alla tessitura e agli altri parametri;
- b) il contenuto idrico o la conducibilità a specifici valori di tensione è stimato dai dati disponibili e successivamente utilizzato per derivare la curva di ritenzione o di conducibilità completa;

c) viene individuata una relazione fisico-empirica tra le distribuzione dimensionale delle particelle, la distribuzione delle classi dei pori ed il contenuto idrico a determinati valori di potenziale.

Pur non esistendo relazioni universalmente applicabili per la derivazione delle proprietà idrauliche del suolo, è possibile indicare un certo numero di pedofunzioni derivate da set cospicui di dati e sufficientemente testate in campagna ed in laboratorio. La loro scelta ed il loro conseguente utilizzo per la stima dei parametri idraulici è principalmente funzione di fattori quali la scala di indagine, la disponibilità ed il tipo di dati misurati, il grado di accuratezza richiesta. A seconda dei dati di input disponibili si possono definire diversi livelli di informazione, per ciascuno dei quali è individuabile una o più pedofunzioni:

Livello 1: frazioni granulometriche (almeno tre), classe tessiturale;

Livello 2: frazioni granulometriche (almeno tre), densità apparente o sostanza organica %;

Livello 3: frazioni granulometriche, densità apparente e sostanza organica %;

Livello 4: frazioni granulometriche, densità apparente, sostanza organica %, contenuto idrico a -33 e -1500 kPa;

Livello 5: frazioni granulometriche, densità apparente, sostanza organica %, conducibilità satura.

Nella tabella 7.1 vengono riportate, per ciascun livello informativo, alcune pedofunzioni tra le più utilizzate ed i relativi input ed output.

TABELLA [7.1]: SCHEMA RIASSUNTIVO DI ALCUNE PEDOFUNZIONI

Riferimento	Livello Informativo	Variabili in input	Variabili in output	Modalità di calcolo
A. Bloemen, 1980	1	Contenuti % di almeno tre classi dimensionali (qualsiasi classificazione)	K satura (cm^d^{-1}).	Calcolo dal <i>median particle size</i> e dal <i>grain size distribution index</i> .
B. Cosby et al., 1984	1	Sabbia ($50-2000 \mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %	K satura (cm^d^{-1}).	1 equazione di regressione per tutte le tessiture.
C. Campbell e Shiozawa, 1992	1	Limo ($2-50\mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %	<i>Air entry pot.</i> (m); K satura (ms^{-1}).	Calcolo dal <i>geometric mean particle size</i> ; una equazione per tutte le tessiture.
D. Saxton et al., 1986	1	Sabbia ($50-2000 \mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %	Potenziale idrico (kPa); K insatura (cmd^{-1}).	3 equazioni in funzione del range di potenziale; non valida per tutte le tessiture
E. Rawls et al., 1982 ^a	2	Sabbia ($50-2000 \mu\text{m}$) %, Limo ($2-50\mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %, Sostanza organica %	Contenuto idrico a 10 valori di potenziale matriciale.	1 equazione di regressione per tutte le tessiture e per per ciascun valore di potenziale
F. Brakensiek et al., 1984	2	Sabbia ($50-2000 \mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %, Porosità (g cm^{-3})	K satura (cmd^{-1}).	1 equazione di regressione per tutte le classi tessiture.
G. Rawls e Brakensiek, 1985	2	Sabbia ($50-2000 \mu\text{m}$) % (limiti 5-70%), Argilla ($< 2\mu\text{m}$) % (limiti 5-60 %), Porosità (g cm^{-3})	Parametri λ , θ_r e h_i di Brooks e Corey; Parametri qr,qs, a e n di van Genuchten.	Equazioni di regressione per tutte le classi tessiture; non valida per tutti i range tessiture.
H. Campbell, 1985	2	Contenuti % di almeno tre classi dimensionali (qualsiasi classificazione), Densità apparente (g cm^{-3})	<i>Air entry pot.</i> (m); K satura (ms^{-1}); K insatura (cmd^{-1}).	Calcolo dal <i>geometric mean particle size</i> e <i>geometric standard deviation</i> ; una equazione per tutte le classi tessiture
I. Simota e Mayr, 1996	3	Sabbia ($63-2000 \mu\text{m}$) %, Limo ($2-63\mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Carbonio organico (%)	Parametri θ_r , θ_s , α e n di van Genuchten; parametri medi per classe tessitura.	1 equazione di regressione per tutte le classi tessiture.
J. Rawls et al., 1982	3	Sabbia ($50-2000 \mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Sostanza organica %	Contenuto idrico a 12 valori di potenziale matriciale.	Equazioni di regressione valide per tutte le classi tessiture
K. Jarvis et al., 1997	3	Sabbia ($63-2000 \mu\text{m}$) %, Limo ($2-63\mu\text{m}$) %, Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Carbonio organico (%), struttura	Parametri λ , θ_s e h_i di Brooks e Corey; K satura (mmh^{-1}), microporosità K satura (mmh^{-1}), macroporosità	Equazioni di regressione valide per tutte le classi tessiture
L. Scheinost et al., 1997 ^a	3	Argilla ($< 2\mu\text{m}$) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Sostanza organica %	Parametri θ_r , θ_s , α e n di van Genuchten;	Equazioni di regressione valide per tutte le classi tessiture

CONTINUA TABELLA [7.1]: SCHEMA RIASSUNTIVO DI ALCUNE PEDOFUNZIONI

Riferimento	Livello Informativo	Variabili in input	Variabili in output	Modalità di calcolo
M. Rawls et al., 1982 ^a	4	Sabbia (50 – 2000 μm) %, Argilla (< 2 μm) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Sostanza organica %, Contenuto idrico a -33 e -1500 kPa	Contenuto idrico a 12 valori di potenziale matriciale.	Equazioni di regressione valide per tutte le classi tessiture
N. Vereecken et al., 1989, 1990	5	Sabbia (50 – 2000 μm) %, Limo (2 – 50 μm) %, Argilla (< 2 μm) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Carbonio organico (g g^{-1}), Conduttività saturata (cm d^{-1}) ^b	Parametri θ_r , θ_s , α e n di van Genuchten; Parametri di Gardner b e l per la K insatura (md^{-1}). K saturata (cm d^{-1})	Equazioni di regressione valide per tutte le classi tessiture
O. Wosten et al., 1999	5	Limo (2 – 50 μm) %, Argilla (< 2 μm) %, Densità apparente (g cm^{-3}), Sostanza organica %, tipo di orizzonte (superficiale o profondo)	Parametri θ_s , α , n , K_s e L di van Genuchten;	Equazioni di regressione valide per tutte le classi tessiture

^a La pedofunzione di Rawls et al. (1982) è indicata nel testo come Rawls modello 1, Rawls modello 2 e Rawls modello 3 in funzione delle variabili in input per la stima del contenuto idrico in corrispondenza dei seguenti valori di potenziale (kPa): -4, -7, -10, -20, -33, -60, -100, -200, -400, -700, -1000, -1500. Per Rawls modello 1 le variabili in input sono: sabbia, limo, argilla, carbonio organico e densità apparente; per Rawls modello 2 e Rawls modello 3 gli input sono gli stessi con in aggiunta il contenuto idrico a -33 kPa di potenziale ed il contenuto idrico a -33 e a -1500 kPa di potenziale rispettivamente.

^b Il numero di frazioni granulometriche ed i loro limiti dimensionali necessari per la derivazione dei parametri della distribuzione dimensionale delle particelle necessari come input per la pedofunzione di Scheinost et al. (1997a) dipendono dai dati disponibili;

Si rimanda al volume recentemente pubblicato da Pachepsky et. al. (2004) per una review completa sull'argomento.

Nel presente lavoro, al fine di stimare le proprietà idrauliche dei suoli, da utilizzare successivamente come dati di ingresso in modelli per la simulazione della crescita colturale (CropSyst) e del comportamento idrologico dei suoli (SWAP), si è proceduto alla valutazione di alcune pedofunzioni e alla successiva selezione di due di esse che sono state confrontate e valutate per gli scopi prefissi. In particolare, il confronto è stato effettuato tra la PTF sviluppata da Vereecken et al. (1989) e la PTF derivata da Wösten et al., (1999) dal database di suoli europei HYPRES, al fine di stimare i parametri idraulici da inserire come dati di input nel modello SWAP. La selezione delle citate funzioni è stata motivata dalla disponibilità e dalla tipologia dei dati misurati.

8. Il funzionamento del sistema suolo-pianta-atmosfera

8.1 Principi e funzionamento dei modelli di simulazione

I modelli attualmente utilizzati in tutti i settori delle scienze dell'ambiente in genere, rappresentano, a vari livelli di complessità, la schematizzazione matematica delle dinamiche e delle interazioni nel sistema acqua-suolo-pianta-atmosfera, con lo scopo di migliorarne la gestione e di comprenderne più a fondo la complessità che lo caratterizza. Recentemente sono stati proposti, in numero sempre crescente, modelli per la descrizione dei processi idrologici dei suoli e della crescita delle colture; questi modelli variano ampiamente nell'approccio concettuale e nella loro complessità, e sono fortemente influenzati dall'ambiente in cui sono stati sviluppati, dalla formazione dei modellisti e dai loro interessi immediati nell'applicazione del modello. La quantità degli input richiesti, l'approfondimento nella trattazione dei processi di base, la sensibilità e l'accuratezza delle simulazioni dipendono tutte dalle finalità del modellista nell'affrontare l'esercizio di simulazione, ossia se la prospettiva concettuale è quella della ricerca o della pratica di gestione.

Una prima distinzione che può essere fatta tra tali modelli è fra *deterministici* e *stocastici*. I primi presumono che un sistema o un processo operino in modo tale che il verificarsi a monte di una serie di condizioni ed eventi comporti un risultato univocamente definibile, i secondi presuppongono un grado di incertezza più o meno ampio insito nella risposta del sistema e quindi sono strutturati in modo da rendere conto di tale incertezza.

Una seconda distinzione fondamentale è quella tra modelli *meccanicistici* e modelli *funzionali*. I primi includono i processi fondamentali descrivendoli al meglio secondo lo stato attuale delle conoscenze, mentre i secondi adottano soluzioni semplificate che però necessitano di un numero inferiore di input e di tempi di calcolo decisamente più brevi.

Volendo descrivere le caratteristiche strutturali e i principi di funzionamento dei modelli, la prima caratteristica comune a tutti che viene rilevata è la loro struttura in moduli o submodelli relativi ai vari comparti dei quali il modello si propone di simulare, matematicamente, i reciproci scambi continui di energia e materia. Solitamente è presente un *modulo suolo*, nel quale vengono descritti i movimenti di flusso idrico in funzione delle caratteristiche fisiche del suolo, un *modulo pianta*, che considera l'accrescimento e la gestione della coltura nelle sue varie fasi fenologiche, e un *modulo dinamiche dei nutrienti* (o di contaminanti, inquinanti etc., a seconda dei casi) che modella gli input, il trasporto, l'assorbimento, l'accumulo, la lisciviazione e le altre dinamiche cui specifici elementi nutritivi sono soggetti. A questi si può

aggiungere un *modulo atmosfera*, dove vengono specificate e definite le variabile climatiche che rappresentano il motore di tutto il sistema (Ungaro, 1997).

Nel presente lavoro sono stati utilizzati due modelli ascrivibili alla categoria dei modelli deterministici-meccanicistici. Si tratta del modello SWAP (Soil Water Atmosphere Plant), (van Dam et al., 1997), e del modello Cropsyst (Stockle, C.O.and Nelson, R., 2005). Essi sono modelli dinamici in grado di simulare, con “passo” giornaliero, i processi idrologici che avvengono all'interno del suolo e la crescita delle colture durante le varie fasi fenologiche.

9. Il caso studio della pianura lodigiana

9.1 Introduzione all'area di studio (inquadramento ambientale: fonte ERSAF, 2004)

La provincia di Lodi è ubicata nel settore centro meridionale della regione Lombardia. La fisiografia della provincia, quasi interamente pianeggiante con lembi di terrazzi antichi nell'area di San Colombano al confine con la provincia di Pavia, è segnata dalle imponenti valli di fiumi Po e Adda, che ne costituiscono rispettivamente i confini sud ed est. Il territorio è inoltre caratterizzato dalla presenza di altri corsi d'acqua, minori ma non trascurabili, tra i quali il Lambro, e da una consistente rete di canali irrigui.

Dei circa 80.000 ettari di superficie complessiva, ripartiti in 62 comuni (incluso S. Colombano al Lambro), oltre 9.500 sono costituiti dalle cosiddette "aree miste" (aree urbane, corpi d'acqua, cave, discariche e altri tipi di utilizzo). I rimanenti 70.500 ettari (circa 88%) costituiscono pertanto la superficie utile di suolo.

Il settore agricolo ha una significativa rilevanza economica in tutto il territorio provinciale, con le grosse aziende ad indirizzo cerealicolo zootecnico e la produzione di vino sul terrazzo di San Colombano.

9.1.1 Clima

Dall'analisi dei dati di temperatura e piovosità si può notare una relativa uniformità delle temperature, dovuta all'assenza di elementi morfologici di rilievo. Il clima è caratterizzato da inverni freddi, con temperatura media 3.6°C, ed estati calde e afose, con temperatura media 22.5°C. Il mese più freddo è gennaio con temperatura media 2.0°C, quello più caldo luglio con temperatura media 23.4°C. Quanto alle precipitazioni medie annue (pioggia e neve fusa), si può osservare una relativa uniformità delle precipitazioni, attestate tra gli 800 mm nella parte meridionale della provincia e i quasi 1000 mm nell'area confinante con la provincia di Milano. Ciò è dovuto al fatto che le masse d'aria mediterranea, richiamate verso l'areale padano dalle perturbazioni meteorologiche, accentuano la propria instabilità man mano che risalgono la pianura.

9.1.2 Geologia e Litologia

Il territorio della provincia di Lodi ha avuto origine dalle complesse vicende intervenute durante l'era quaternaria; la sua genesi si deve, infatti, prima alla dinamica fluvio-glaciale durante il Pleistocene (1.7 – 0.01 milioni di anni - in seguito abbreviati in MA), poi a quella fluviale durante l'Olocene (a partire da 0.01 MA).

Affioramenti diretti di rocce prequaternarie sono presenti solo nella ristretta zona collinare situata nei pressi di San Colombano al Lambro dove, per motivi tettonici, affiorano litotipi più antichi di origine marina. Il colle, assieme a due piccoli rilievi nei pressi di Casalpusterlengo, rappresenta la culminazione di strutture sepolte costituite da marne con intercalazioni arenacee ed argillose attribuite al Miocene (circa 23.8 – 5.3 MA - + 0.1), e da sovrastanti depositi argillosi e sabbiosi (Desio, 1965).

L'assetto geologico è pertanto dominato dalla piana proglaciale würmiana, nota come Livello Fondamentale della Pianura (LFdP), formatasi al termine dell'ultima glaciazione quaternaria; in essa sono bene riconoscibili le incisioni vallive, a tratti fortemente incassate, dei corsi d'acqua principali (Adda, Lambro e nella parte meridionale della provincia del fiume Po) ritenute di età olocenica.

Relativamente alla datazione cronologica delle superfici, le attuali conoscenze, ottenute attraverso lo studio dei rapporti isotopici del carbonio in carote di sedimenti oceanici, indicano che sono molti gli episodi glaciali che hanno interessato il pianeta dal Pliocene superiore ai giorni nostri: molti più dei 4 generalmente riconosciuti nei sedimenti continentali della zona circostante le alpi (Würm, Riss, Mindel e Gunz).

Mentre è consolidata l'attribuzione “glaciale Würm” per designare il periodo con clima freddo e umido che ha caratterizzato le vicende alpine nell'intervallo tra 0.10/0.08 e 0.01 MA, e al cui termine si colloca l'inizio dell'Olocene, è più incerta quella di “glaciale Riss” per l'intervallo compreso tra 0.34/0.30 e 0.13 MA, durante il quale si sono alternati più volte episodi a clima freddo e caldo; precedente e con datazioni meno precise, è la cronologia degli episodi glaciali anteriori.

La nomenclatura riportata in seguito è la stessa riportata nella Carta Geologica della Lombardia in scala 1:250.000 (Servizio Geologico Nazionale, Regione Lombardia e altri, 1990), avvalendosi, per l'attribuzione dell'età delle superfici, di criteri basati sull'alterazione dei suoli e sulla posizione fisiografica delle superfici più antiche.

9.1.3 Geomorfologia

Il territorio provinciale può essere suddiviso in due grandi ambiti geomorfologici, il livello fondamentale della pianura e le valli fluviali che occupano la maggior parte del territorio provinciale, ed in un terzo ambito, arealmente meno rappresentativo, costituito dai rilievi dell'alto strutturale di San Colombano.

Livello fondamentale della pianura: Questo ambito fisiografico occupa la maggior parte della superficie provinciale. Si tratta per la quasi totalità della porzione ascrivibile alla "bassa pianura", fatta eccezione per una piccola parte di "media pianura" a nord del canale Muzza. La pendenza delle superfici varia tra lo 0,1 e lo 0,2 %, la quota tra i 62 e 106 m s.l.m.; la granulometria dei sedimenti ha una dominanza sabbioso-limoso. L'attuale carattere pianeggiante del livello fondamentale è il risultato dell'applicazione di intense tecniche di livellamento su una morfologia in origine leggermente più ondulata. Indicativa di questa attività sono le particelle agricole spesso separate da gradini. La distribuzione areale dei tipi di suolo ha indicato che, almeno nella fase di chiusura della deposizione sul livello fondamentale, il regime idrico dominante era di tipo meandriforme con basso indice di sinuosità.

Valli fluviali: I principali corsi d'acqua del lodigiano, Adda, Lambro e Po, hanno inciso la pianura formando valli fluviali di profondità ed ampiezza variabile. L'Adda scorre nella parte orientale della provincia e nel tratto lodigiano ha una valle ampia e un percorso che in corrispondenza della città di Lodi passa da un regime idrografico del tipo a canali intrecciati ad uno di tipo meandriforme. Il fondovalle attuale è inciso di circa 10 metri rispetto al LFdP; tra questi due lembi sono ben conservati evidenti terrazzi d'accumulo, il più grande in sinistra Adda nell'area di Crespiatica e Boffalora d'Adda, quello più piccolo in destra Adda a sud di Cavenago d'Adda. L'area dei terrazzi si articola in superfici subpianeggianti separate tra loro da gradini discontinui. Il Lambro scorre nella parte occidentale della provincia con una valle profondamente incassata, situata a circa 25 metri di profondità entro il LFdP. Il Po scorre con un regime a meandri lungo il confine meridionale della provincia entro un letto confinato da arginature realizzate lungo l'asta fluviale in età moderna. Il percorso del Po nel tratto piacentino-lodigiano ha subito durante l'Olocene l'influenza dei torrenti di provenienza appenninica, principalmente Trebbia e Nure. Questi, mediante il trasporto e la deposizione di grandi quantità di sedimenti, ne hanno spinto l'alveo verso nord, fino ad erodere la scarpata del livello fondamentale. Nel tratto lodigiano la valle del Po è caratterizzata da numerosi rami e meandri abbandonati, spesso ancora ben riconoscibili, come nei pressi di Caselle Landi a Cornovecchio.

Alto strutturale di San Colombano: Nella porzione centro-occidentale della provincia è presente il complesso collinare di San Colombano, che s'immerge con una dolce fascia di raccordo al di sotto delle formazioni fluvioglaciali più recenti. Si tratta di relitti dei terrazzi fluvioglaciali mindeliani e rissiani, la cui forma originale è ancora riconoscibile nei lembi pianeggianti separati dalle incisioni fluviali recenti. Nell'ambito delle stesse colline, incluse nel fluvioglaciale più antico, si trovano piccole porzioni di rocce terziarie di età miocenica, la cosiddetta "Formazione di San Colombano". La parte centrale del complesso collinare, con un livello sommitale posto a quote variabili da 110 a 140 m s.l.m., unitamente alla fascia di immersione al di sotto del livello fondamentale, è attribuita al glaciale Mindel mentre la fascia periferica, stretta e discontinua, posta a quote sommitali variabili tra 80 e 90 m s.l.m., è attribuita al glaciale Riss.

9.1.4 Idrografia ed Idrogeologia

Nel Lodigiano, come nel resto della Pianura Padana, la diffusione di litotipi ad elevata permeabilità, la costituzione pianeggiante del terreno e l'abbondante alimentazione idrica, determinano la presenza di una considerevole circolazione idrica sotterranea. Questa ha luogo all'interno di una potente coltre alluvionale le cui caratteristiche litologiche ed il cui assetto strutturale favoriscono la formazione di un acquifero multistrato, costituito cioè da più falde acquifere sovrapposte interdipendenti tra loro. Dal punto di vista idrogeologico possiamo descrivere la presenza di acqua nella provincia di Lodi secondo due tipologie: l'acqua nel suolo e l'acqua di falda.

L'acqua nel suolo: La presenza di acqua nel suolo o, comunque, entro 2-3 metri di profondità dalla superficie topografica può essere dovuta alla presenza di orizzonti poco permeabili, oppure alla influenza di una vera falda freatica a profondità ridotta. Nel primo caso si formano orizzonti di suolo sovente saturi d'acqua, per ristagno interno, ed eventualmente piccole falde sospese. Ciò accade nei terreni che hanno orizzonti argilloso-limosi, compatti, o in suoli con granulometria medio-fine soggetti a forte interferenza idrica (vicinanza di canali irrigui, fontanili, aree morfologicamente depresse, etc.). Una falda idrica a profondità ridotta è invece riscontrabile in qualche situazione nell'area in esame: in alcuni tratti di fondovalle (Lambro, Adda e Po) e nella parte settentrionale della provincia, in prossimità delle aree di media pianura con fontanili in attività. In tutti questi casi, per fattori interni o esterni al suolo, il drenaggio è molto rallentato, con sensibili influenze sui caratteri pedologici.

L'acqua di falda: Il sottosuolo della provincia di Lodi è caratterizzato dalla presenza di un acquifero complesso, multistrato, rappresentabile schematicamente in due falde principali: la prima freatica, semiconfinata nella parte più meridionale della Provincia, la seconda, profonda, in pressione. L'acquifero viene alimentato da un consistente flusso sotterraneo proveniente dai settori centro-settentrionali del territorio lombardo e maggiormente concentrato lungo i canali più permeabili, corrispondenti ad alvei fluviali attuali o abbandonati o a paleoalvei sepolti. Il lodigiano si trova immediatamente al di sotto della fascia dei fontanili, dove la falda freatica è molto prossima alla superficie e soggiace, rispetto al piano di campagna, a profondità che variano in corrispondenza delle irregolarità del profilo topografico. La profondità della falda al di sotto del LFdP si mantiene mediamente intorno ai 7-8 m; risulta massima (12-14 m) in prossimità della scarpata e decresce rapidamente nei terrazzi più bassi fino anche ad annullarsi in vicinanza degli alvei fluviali. Ai piedi delle scarpate di terrazzo esistono talvolta delle sorgenti per affioramento della superficie piezometrica. Da ricordare, inoltre, che la ricorrenza stagionale delle pratiche irrigue produce

sensibili oscillazioni della falda freatica, il cui effetto è riconoscibile nelle frequenti situazioni di saturazione profonda dei suoli e di risalita dal basso dei fenomeni connessi, soprattutto nella parte centrale e meridionale della provincia.

9.1.5 Uso del suolo

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal progetto Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali (DUSAF) sulle ortofoto IT2000, la provincia di Lodi si caratterizza per l'uso a seminativo preponderante rispetto alle altre forme di utilizzo del territorio, con una superficie di circa 60.000 ettari, pari al 78% dell'estensione provinciale. Questa presenza contraddistingue l'intera provincia ad esclusione delle aree lungo i principali corsi d'acqua (fiume Adda e Po) dove il pioppeto assume un'importanza areale significativa.

Tra le colture presenti riconducibili alla componente seminativo troviamo cereali autunno-vernini, colture industriali (mais) e riso, concentrato nella pianura centrale idromorfa, al confine con la provincia di Pavia.

I prati, elementi tipici dell'agricoltura e del paesaggio lodigiano, si distribuiscono in modo omogeneo su tutto il territorio provinciale con una leggera concentrazione lungo la valle del fiume Adda. Infine abbiamo le superfici a bosco e a pioppeto, che si estendono per circa 5.600 ha (7,2% della superficie totale) e si localizzano nelle valli dei fiumi Adda e Po e dei corsi d'acqua minori naturali ed artificiali e nelle zone del terrazzo di San Colombano al confine con la provincia di Pavia.

Le siepi e filari costituiscono una fitta ragnatela, omogeneamente distribuita nelle aree più prettamente agricole della provincia, che ha un'estensione complessiva superiore ai 1200 km lineari. Tale rete, attraverso i corridoi ecologici tra differenti aree naturali in cui si "muovono" la fauna e la flora spontanea, si comporta come una riserva di biodiversità. Per questo motivo, e per il suo valore come elemento del paesaggio agrario, la sua importanza è stata rivalutata enormemente negli ultimi anni.

9.2 La classificazione del pedopaesaggio Lodigiano

La provincia di Lodi è formata da tre grandi pedopaesaggi, articolati in altri più specifici in dipendenza della variabilità ambientale:

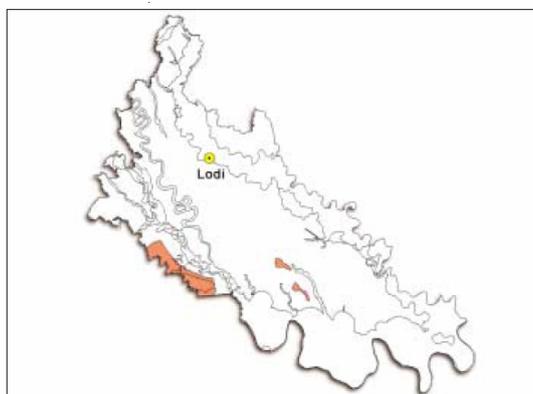
- 1) pedopaesaggio dei terrazzi subpianeggianti rilevati sulla pianura (R)
- 2) pedopaesaggio del livello fondamentale della pianura (L)
- 3) pedopaesaggio delle valli fluviali dei corsi d'acqua olocenici (V)

All'interno di questi pedopaesaggi si distribuiscono 75 tipi di suolo identificati, cartografati e descritti (fasi di serie), organizzati in 62 unità cartografiche, della provincia di Lodi. In ogni unità cartografica si può avere la distribuzione omogenea di un solo tipo di suolo prevalente (consociazioni), oppure l'associazione di due tipi di suolo alternati secondo un modello di distribuzione conosciuto (unità complesse: complessi, associazioni e gruppi indifferenziati).

9.2.1 Pedopaesaggio dei terrazzi subpianeggianti rilevati sulla pianura (R)

In provincia di Lodi questo pedopaesaggio, scarsamente diffuso (circa 1% del territorio provinciale), è presente con due distinti terrazzi ubicati presso l'abitato di Casalpusterlengo. Presso il confine tra le province di Lodi e Pavia è ubicato il colle di San Colombano al Lambro, che viene interamente descritto nella provincia di Lodi, dove ricade la sua parte più estesa, per ragioni di continuità e contiguità geografica anche se il comune di San Colombano è parte della provincia di Milano. Si riconoscono due ordini di terrazzi: superiore, o dei terrazzi antichi (detti anche pianalti), ed inferiore, o dei terrazzi intermedi, entrambi pre-würmiani, le cui forme caratteristiche, terrazzi e conoidi terrazzate, sono più o meno pendenti ed incise in relazione diretta con l'età.

Terrazzi subpianeggianti rilevati sulla pianura (R), provincia di Lodi, base informativa suolo, ERSAF



9.2.1.1 Terrazzi antichi (RA)

I terrazzi antichi, sebbene trascurabili per estensione, hanno però un grande risalto morfologico, in particolare il colle di San Colombano, che si erge in modo netto sui terreni circostanti anche grazie a processi neotettonici che interessano le strutture sepolte. I due terrazzi ubicati nei pressi di Casalpusterlengo mancano invece di una siffatta evidenza, anche perché maggiormente soggetti a rimaneggiamento antropico. Questi terrazzi sono costituiti da superfici con pendenza bassa (Casalpusterlengo) o da bassa fino a moderatamente elevata (San Colombano), variamente incise e degradate, impostate su sedimenti di origine fluvio-glaciale di età mindeliana. È molto probabile che tali terrazzi fossero un tempo in continuità con analoghe superfici ubicate più a nord e siano state, nel tempo, ridimensionate in seguito a processi erosivi. I suoli presenti in questi paesaggi riflettono le evidenze di una lunga esposizione a processi pedogenetici avvenuti sotto condizioni climatiche mutate più volte, da quelle tipiche di ambienti subtropicali a quelle tipiche di ambienti glaciali e periglaciali. Il clima subtropicale fu attivo nell'areale padano durante il lungo interglaciale Mindel-Riss (circa 0,43-0,3 MA) e durante il più breve interglaciale Riss-Würm (circa 0,13-0,08 MA), mentre durante i restanti periodi si ebbe l'alternanza di climi freddi e temperati. I suoli hanno pertanto un carattere composito, avendo subito ripetuti cicli erosivi e pedogenetici dei quali portano le tracce. Sulle superfici meglio conservate essi sono estremamente evoluti, caratterizzati dalla presenza di orizzonte argillico ben espresso, arrossato, con molte figure pedogenetiche come pellicole illuviali d'argilla e concentrazioni di ossidi di ferro e manganese. Nelle superfici più incise e pendenti, l'erosione maggiore può aver determinato l'asportazione degli orizzonti superiori e talora anche dell'intero orizzonte argillico, determinando il ringiovanimento dei suoli. Dal punto di vista chimico-fisico questi suoli, non calcarei, evidenziano una saturazione in basi medio alta, con reazione tendenzialmente neutra o subacida in superficie che diventa subalcalina o alcalina lungo il profilo, mentre la tessitura, condizionata dai processi erosivi, varia da moderatamente fine o media sino a moderatamente grossolana o grossolana.



Un' immagine rappresentativa dei terrazzi antichi.

9.2.1.2 Terrazzi intermedi (RI)

Il pedopaesaggio dei terrazzi intermedi ha una diffusione ancora minore di quello precedente ed è costituito da due piccole superfici ubicate ai margini del colle di San Colombano. Si tratta di aree apprezzabilmente rilevate sulla pianura solo presso il margine rivolto ai terrazzi antichi e gradualmente digradanti verso di essa. Il substrato di tali terrazzi, non osservato in profilo perché situato a oltre 2m di profondità, si sa essere costituito da limi argillosi, di probabile origine eolica e con altrettanta probabilità ascrivibile per età all'interglaciale Riss-Würm. I suoli presenti hanno caratteri morfologici che evidenziano forti analogie con le condizioni di pedogenesi delle superfici più antiche, nonostante abbiano un minor grado di espressione delle figure pedogenetiche imputabile ad una minore durata dei processi (sono superfici - e suoli- un po' più recenti) e forse ad un clima con caratteri di tropicalità meno spinti. Anche qui è frequente il ringiovanimento del suolo a causa dei processi erosivi. Sotto il profilo chimico-fisico si registra la prevalenza di suoli non calcarei con reazione neutra o subacida, con elevata saturazione basica e con tessitura moderatamente fine o media.



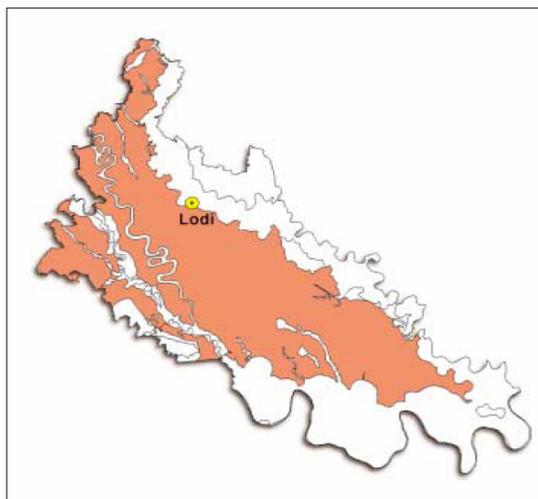
Un'immagine rappresentativa dei terrazzi intermedi.

9.2.2 Pedopaesaggio del livello fondamentale della pianura (L)

Il livello fondamentale della pianura si estende su oltre la metà del territorio lodigiano (54%). Costituisce il corpo centrale della provincia, tra la valle del Po che lo delimita a sud e quella dell'Adda ad est. Questo paesaggio rappresenta la pianura formata per colmamento fluviale nella fase finale della glaciazione würmiana, esternamente alla cerchia morenica, mediante l'accumulo del carico grossolano trasportato dai corsi d'acqua alimentati dalle acque di fusione dei ghiacciai alpini.

In funzione della granulometria dei sedimenti, variabile e decrescente (dalle ghiaie ai termini più fini) in senso nord-sud in relazione alla riduzione della velocità e competenza delle acque, e in funzione dell'idrologia superficiale e profonda, è possibile individuare entro questo pedopaesaggio 3 principali ambienti che si susseguono da nord verso sud: alta pianura ghiaiosa (assente nel territorio lodigiano), media pianura idromorfa e bassa pianura sabbiosa.

*Livello fondamentale della pianura (L),
provincia di Lodi, base informativa suolo
ERSAF.*



9.2.2.1 *Media pianura idromorfa (LQ)*

La media pianura idromorfa, la cui presenza in provincia di Lodi è sporadica (meno dell'1%) e limitata all'estrema propaggine settentrionale della provincia, costituisce l'ambiente in cui, a causa della diminuzione di permeabilità dovuta alla riduzione granulometrica dei sedimenti, la falda freatica emerge alla superficie del suolo o permane a scarsa profondità. Chiamata anche zona delle risorgive, è delimitata a nord dalla linea ideale che congiunge i primi fontanili e a sud dal loro organizzarsi in corsi d'acqua permanenti, strutturati secondo un reticolo idrografico di tipo meandriforme. In questo ambiente la pedogenesi è condizionata dai processi di rideposizione dovuti alle acque correnti o stagnanti e, soprattutto, dalla saturazione idrica del suolo a diverse profondità e per periodi più o meno lunghi (nei suoli della provincia la falda è quasi sempre presente attorno al metro o anche più in superficie). L'idromorfa è più evidente presso le depressioni corrispondenti alle testate dei fontanili, mentre assume un minor rilievo nelle superfici subpianeggianti e relativamente stabili che costituiscono il corpo principale di questo ambito morfologico. I suoli presenti hanno tessitura media, con reazione tipicamente da neutra ad alcalina ed elevata saturazione basica.



Un'immagine rappresentativa della media pianura idromorfa.

9.2.2.2 *Bassa pianura sabbiosa (LF)*

La bassa pianura sabbiosa caratterizza da sola oltre la metà del territorio lodigiano (circa 53%); il suo limite settentrionale, situato perlopiù a nord della provincia, coincide con la zona in cui le acque di risorgiva si organizzano in un reticolo fluviale a meandri, il quale diviene sempre più inciso nei terreni circostanti man mano che ci si avvicina alla piana di divagazione del Po, suo limite meridionale. L'estensione della bassa pianura è interrotta longitudinalmente dalla valle del Lambro e da quella del cavo Sillaro, quest'ultima abbondantemente sovradimensionata rispetto alle attuali portate del corso d'acqua a testimonianza di una sua maggiore attività ed importanza nel passato e, per finire, dalla valle dell'Adda, limite orientale della provincia. La generalizzata stabilità di questo ambiente ha consentito una prolungata pedogenesi sui materiali d'origine, con diffusa presenza di orizzonti di illuviazione d'argilla in profondità; locali fattori di disturbo, riconoscibili nell'attività di piccoli corsi d'acqua e/o nell'oscillazione della falda, hanno talvolta interferito con i processi di formazione del suolo determinando la presenza di orizzonti d'alterazione, talvolta con evidenze di deposizione di carbonati secondari. I sedimenti che costituiscono la bassa pianura sono generalmente sabbioso-limosi; i suoli sono fertili, generalmente ben drenati o con fenomeni di idromorfia di lieve o moderata entità, equilibrati nelle proprietà chimico-fisiche. Generalmente essi hanno tessitura da moderatamente grossolana a moderatamente fine, con falda raramente riscontrata entro il primo metro di profondità, ed hanno reazione perlopiù da subacida a subalcalina con saturazione in basi medio alta.



Un'immagine rappresentativa della bassa pianura sabbiosa.

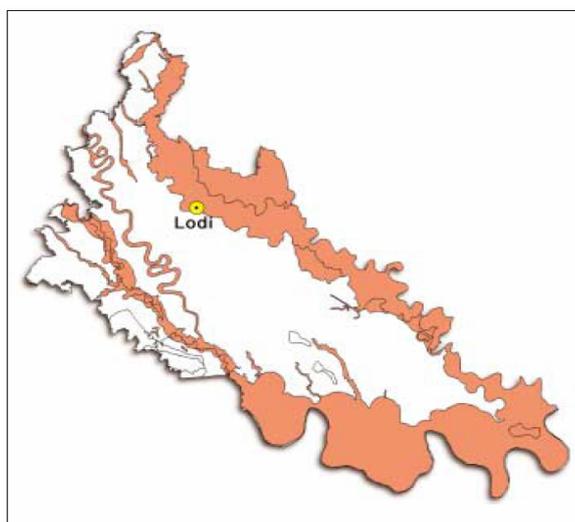
9.2.3 Pedopaesaggio delle valli fluviali dei corsi d'acqua olocenici (V)

Questo paesaggio include i piani di divagazione dei principali corsi d'acqua, attivi o fossili, e le loro superfici terrazzate, situate a quote maggiori rispetto al fiume ed affrancate dalle acque. Le valli sono state incise dai corsi d'acqua del reticolo idrografico attuale o recente e molti di essi, attivi già nel Pleistocene, continuano a incidere o a sovralluvionare i propri depositi.

In provincia di Lodi sono presenti alcuni sistemi vallivi di una certa importanza che la attraversano da nord a sud: la valle del Lambro e quella dell'Adda e, tra questi, di minor importanza e risalto, il solco vallivo del Cavo Sillaro, che incide la pianura con un percorso accentuatamente meandriforme. L'ultimo e più imponente sistema vallivo è quello del Po, che ha un percorso approssimativamente trasversale rispetto alle valli precedenti e nel cui corso esse convergono. Sono inoltre presenti, con incidenza minima, piccole lenti alluvionali di forma allungata, situate talvolta in corrispondenza di corsi d'acqua minori (rogge e canali), talaltra in corrispondenza di piccoli affluenti dei corsi d'acqua maggiori.

Nel paesaggio delle valli fluviali sono individuati due differenti ambienti: le superfici terrazzate e le piane alluvionali inondabili.

Valli fluviali (V), provincia di Lodi, base informativa suolo, ERSAF



9.2.3.1 Superfici terrazzate, sospese sui corsi d'acqua attuali (VT)

Questo pedopaesaggio comprende i terrazzi alluvionali dell'Olocene antico, situati a quote maggiori rispetto al corso d'acqua, dal quale sono separati mediante scarpate erosive, e non più inondabili. Essi corrispondono a precedenti alvei fluviali, abbandonati in seguito a una fase erosiva che ne ha provocato l'approfondimento, e la loro genesi è riconducibile all'alternanza di fasi di deposizione e di erosione, innescate dalle variazioni di portata dei corsi d'acqua e dalle ripetute variazioni del livello medio del mare. Poiché durante l'Olocene la dinamica fluviale è stata prevalentemente erosiva, i corsi d'acqua hanno modellato la piana fluvioglaciale e fluviale precedente, incidendovi vari ordini di superfici, di età proporzionale alla quota sul corso d'acqua, ciascuno dei quali testimonia una precisa fase di stazionamento e di successiva incisione fluviale. In provincia di Lodi i terrazzi fluviali hanno una diffusione pari al 10% del territorio e fiancheggiano i corsi d'acqua in precedenza nominati. I terrazzi più estesi, anche se discontinui, appartengono all'Adda, meno estesi ma continui quelli del Lambro e del Sillaro, sporadici i terrazzi del Po (un solo terrazzo lungo il tratto fluviale di pertinenza lodigiana). I suoli presenti sono mediamente evoluti sulle superfici più stabili, talvolta con orizzonti ad accumulo illuviale d'argilla, e variamente ringiovaniti su quelle in pendenza e nelle scarpate, più soggette a processi erosivi attuali. È relativamente frequente in tale ambiente la presenza della falda nel profilo di suolo, a profondità anche prossime alla superficie, sia come acqua libera che come figure di ossidoriduzione (screziature e concentrazioni ferro-manganesifere), così come è possibile riscontrare nella parte più profonda del profilo orizzonti organici sepolti. Tali suoli hanno in genere tessitura da moderatamente grossolana a moderatamente fine, con prevalenza dei termini più grossolani nei terrazzi dell'Adda e del Lambro, di quelli più fini presso il Po. Sono talvolta pietrosi in superficie e scheletrici nel profilo, permeabili, a volte con orizzonti ad accumulo di sostanza organica in superficie; tendenzialmente hanno saturazione basica da media ad elevata, meno frequentemente sono desaturati, ed hanno reazione da subacida a neutra i terrazzi del Lambro, subalcalina o alcalina quelli dell'Adda.



Un'immagine rappresentativa delle superfici terrazzate sospese sui corsi d'acqua attuali.

9.2.3.2 Piane alluvionali (inondabili) attuali o recenti (VA)

Questo paesaggio è costituito dalle piane alluvionali recenti dei corsi d'acqua, ad essi adiacenti, situate alla stessa quota e costruite per successive tracimazioni in occasione degli eventi di piena a seguito di una dinamica prevalentemente deposizionale. I corsi d'acqua che solcano il territorio lodigiano hanno tutti un regime a meandri, il che comporta un carico solido costituito da materiale fine e una limitata capacità erosiva, in modo che qualunque riduzione di portata, conseguente ad una diminuzione della velocità del corso d'acqua, innesca condizioni di deposito. Il sottosistema delle alluvioni recenti è moderatamente diffuso nel lodigiano (circa 35%), soprattutto lungo le valli del Po e dell'Adda che costituiscono oltre il 90% delle alluvioni recenti (il Po da solo costituisce più della metà di tale paesaggio). La pedogenesi è solitamente poco espressa, sia per la frequente alternanza di episodi erosivi e deposizionali, sia per l'altrettanto frequente sommersione da parte del corso d'acqua durante gli eventi di piena oppure per risalita di falde di subalveo. I suoli sono quindi scarsamente differenziati dal materiale di partenza e riflettono le particolari caratteristiche dei sedimenti sui quali si sono formati, potendo esprimere al massimo orizzonti d'alterazione, spesso ubicati nella parte bassa del profilo e sepolti da sedimenti più recenti. In generale essi presentano da lievi a forti problemi di idromorfia, frequentemente con osservazione della falda entro il suolo, la quale può permanere presso la superficie anche per lunghi periodi di tempo. La tessitura accomuna i suoli "del Lambro" e "dell'Adda", in generale da moderatamente grossolani a grossolani, frequentemente con scheletro abbondante, mentre i suoli "del Po" hanno in genere tessitura media o più fine e non presentano scheletro. Il comportamento chimico accomuna invece i suoli dell'Adda e del Po, tipicamente calcarei, saturati ed a reazione alcalina, diversi da quelli del Lambro che sono tipicamente non calcarei, solitamente alcalini e saturati ma con diffusa presenza di suoli a reazione sub-acida. In questo ambiente le superfici adiacenti ai corsi d'acqua e le isole fluviali corrispondenti alle golene aperte o agli alvei di piena, sono seguite da superfici sub-pianeggianti situate fra queste ed i terrazzi, da cui sono talvolta separate da gradini morfologici poco pronunciati.



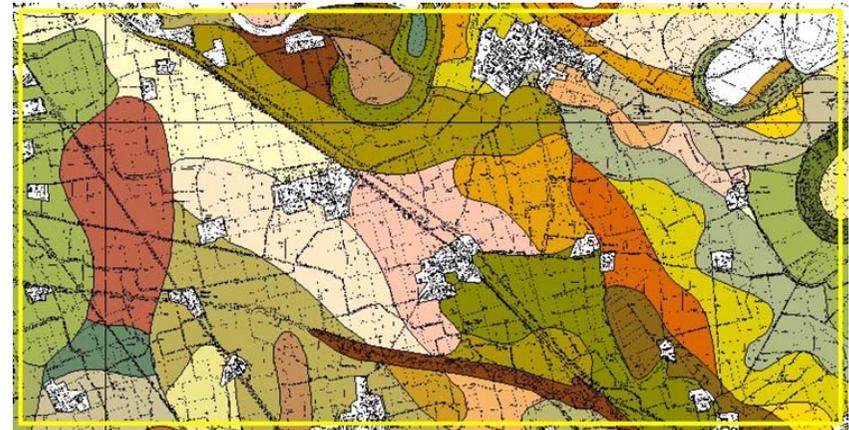
Un'immagine rappresentativa delle piane alluvionali.

9.3 L'area di studio

L'area in cui si svolge il presente lavoro è costituita da una superficie con un'estensione pari a circa 2000ha situata poco a sud della città di Lodi. L'ambiente appare fortemente antropizzato, esso è caratterizzato da una fitta rete di canali adoperati per l'irrigazione dei campi. Il più importante fra questi è il canale Muzza, derivazione del fiume Adda, che attraversa trasversalmente l'areale di studio. L'attività zootecnica è diffusa su tutto il territorio e ciò comporta che la maggior parte della superficie agricola utilizzabile sia destinata a seminativi, in modo particolare a mais. L'area di studio comprende nel settore ovest, parte del pedopaesaggio del livello fondamentale della pianura, da ora in poi definito *pedopaesaggio dei terrazzi alluvionali antichi* (L) e nel settore est, parte del pedopaesaggio delle valli fluviali dei corsi d'acqua olocenici, da ora in poi definito *pedopaesaggio dei terrazzi alluvionali recenti* (V).

In figura 9.1 è possibile osservare la localizzazione dell'area.

Ortofoto a colori Regione Lombardia. Fonte: portale Regione Lombardia (www.regione.lombardia.it)



Le unità pedologiche.
(ERSAL, 2000)

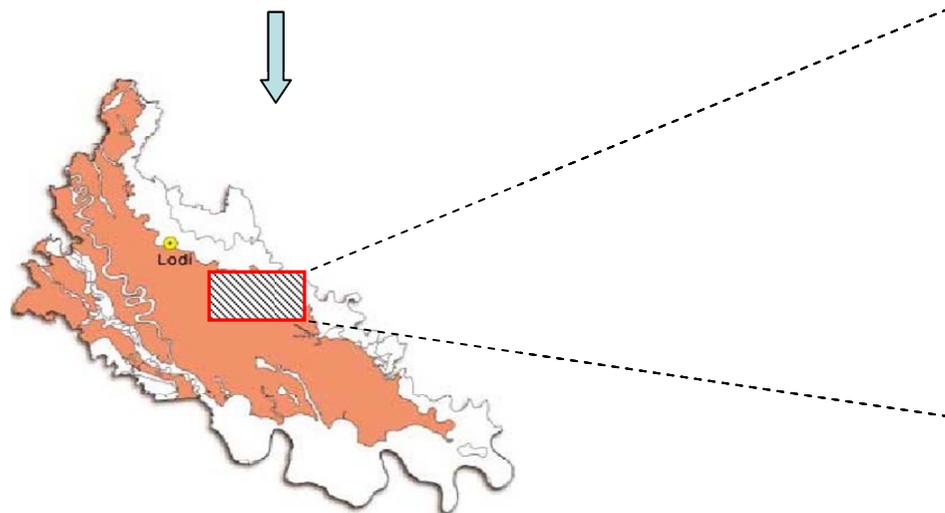


Fig.(9.1): la localizzazione dell'area di studio.

10. Materiali e metodi

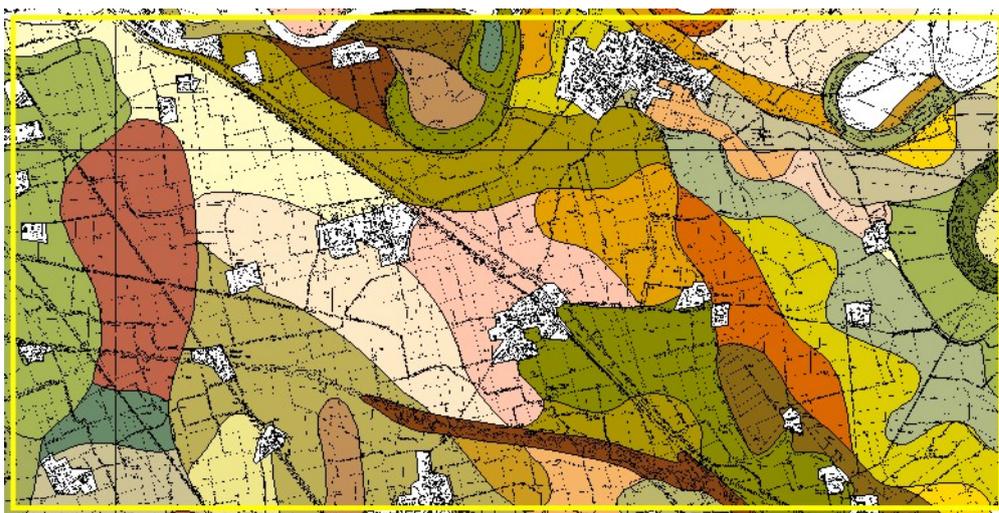
10.1 Inquadramento Pedo-Paesaggistico

Per l'inquadramento paesaggistico e pedologico dell'areale si è fatto riferimento a:

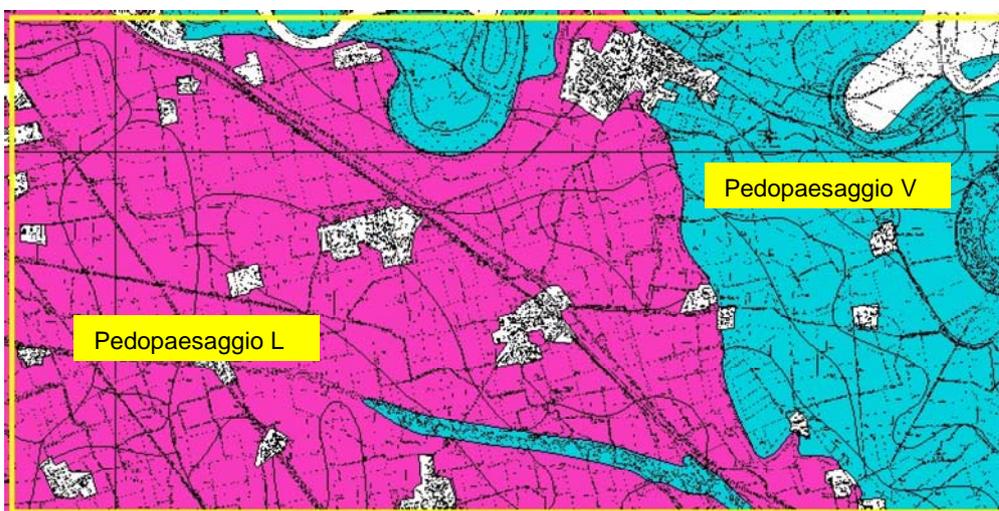
Suoli e Paesaggi della Provincia di Lodi. Regione Lombardia. ERSALF 2004

Progetto Carta Pedologica. I suoli del lodigiano. Regione Lombardia. ERSAL 2000

Nei lavori citati la classificazione del paesaggio prevede una suddivisione in Sistemi, Sottosistemi, Unità e Sottounità. Per gli scopi della presente tesi ai termini “Sistema di Paesaggio” e “Pedopaesaggio” è associato lo stesso significato.



Le unità pedologiche. ERSAL, 2000.



I pedopaesaggi *L* (terrazzi alluvionali antichi) e *V* (terrazzi alluvionali recenti). ERSAL,2000.

10.2 Campionamento e misure di campo

10.2.1 Lo schema di Campionamento (Castrignanò, A. et al., 2001)

Lo schema di campionamento adottato nell'areale Iodigiano (PRIN 2001-2003) è stato definito sulla base delle conoscenze pregresse del sito e mediante l'applicazione di tecniche di simulazione spaziale stocastica. I siti campionati sono 100, comprensivi di 5 profili aperti per la descrizione dei suoli più rappresentativi dei pedopaesaggi presenti. Al fine di pianificare lo schema di campionamento si è reso indispensabile il ricorso alla carta d'uso del suolo, redatta dall'ERSAL nel 2000 sulla base delle ortofoto del 1999 e restituita in scala 1:10.000. Dall'esame della suddetta carta sono state individuate diverse zone non campionabili: laghi, bacini, specchi d'acqua; alvei fluviali e corsi d'acqua artificiali; vegetazione palustre e delle torbiere; aree sabbiose e ghiaiose; spiagge prive di vegetazione ed adiacenti ai corpi idrici; aree urbanizzate ed infrastrutture. Si è ottenuto pertanto un file raster dell'area in esame da cui sono state eliminate le zone non campionabili, mentre le restanti classi d'uso del suolo sono state riclassificate in un'unica classe definita "campionabile". Tale file ha costituito la mappa di base su cui sono state localizzate le osservazioni eseguite in passato per l'indagine pedologica dell'area in esame; in particolare:

81 punti corrispondenti a 76 trivellate e 5 profili pedologici, effettuati dall'ERSAL per la realizzazione della carta pedologica a scala 1:37.500 ed ubicati su tutta l'area di studio;

77 punti, confinati al settore NO dell'area, e relativi a trivellate eseguite nell'ambito di una Convenzione ERSAL-CNR.

Il file costituente la mappa di base e quello con l'ubicazione dell'informazione pregressa (158 campioni) sono stati inviati in ingresso al programma di simulazione, al fine di ottenere il posizionamento ottimale di ulteriori 100 punti di campionamento. In questo caso il processo di allocazione è stato effettuato in due fasi successive:

Fase 1. Allocazione di un subcampione di 50 punti, secondo il criterio di minimizzazione della distanza media fra i campioni, al fine di garantire con le osservazioni pregresse un ricoprimento sufficientemente uniforme dell'area di studio;

Fase 2. Allocazione degli ulteriori 50 punti, considerando come informazione pregressa sia le 158 osservazioni pregresse che i 50 punti precedentemente posizionati. In questa fase si è applicato un diverso criterio di ottimizzazione, mirante alla minimizzazione della varianza di kriging e quindi alla massimizzazione della precisione di stima. A tale scopo si è calcolato il variogramma sperimentale della variabile limo misurata nell'orizzonte Ap, risultata quella più

strutturata fra le altre rilevate negli 81 punti del primo insieme di osservazioni pregresse. Ad esso è stato quindi adattato un modello matematico, comprendente un effetto nugget e una struttura di tipo sferico: Nugget=28,307 (%); Range=776,70 m; Sill=57,91 (%).

La mappa spaziale in figura 10.1 rappresenta l'ubicazione di tutti i campioni (158 pregressi + 100 allocati).

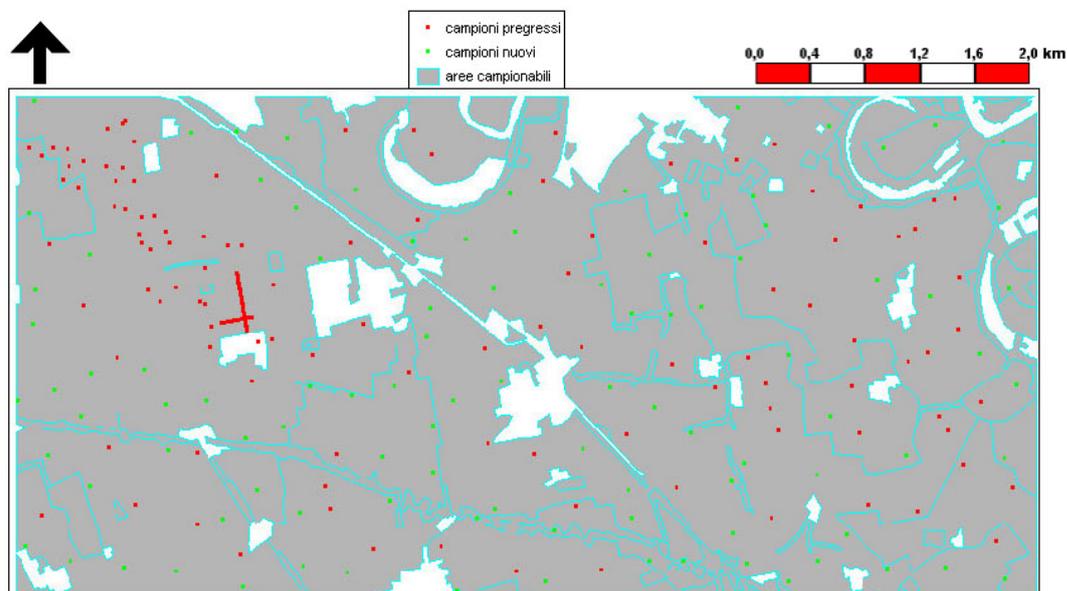


Fig. (10.1): Ubicazione dei campioni (pregressi + 100 nuovi) nell'area del lodigiano. (Castrignano et al., 2001)

10.2.2 Campionamento per le analisi chimiche

L'osservazione dei suoli mediante l'utilizzo di trivelle ha consentito contemporaneamente di effettuare campionamenti per le successive analisi chimiche. La procedura è stata la seguente:

scavo con trivella sino alla profondità di circa 150cm.

descrizione del sito mediante compilazione di schede cartacee, secondo i metodi classici (Sanesi, 1977) di rilevamento pedologico, (caratteri della stazione, uso del suolo, orizzontazione, colore, scheletro, effervescenza in HCl, classe tessiturale, etc.).

campionamento disturbato degli orizzonti individuati.

I campioni disturbati, relativi ai primi due orizzonti di ogni sito, sono stati sottoposti alle analisi chimiche.



10.2.3 Campionamento per le analisi idrologiche

Contemporaneamente al campionamento per le analisi chimiche sono stati effettuati, in 40 siti, campionamenti di tipo indisturbato, del solo orizzonte di superficie, per le analisi idrologiche di laboratorio. Inoltre sono state effettuate misure della resistenza alla penetrazione mediante l'utilizzo di un penetrometro a cono (tutti i 100 siti).

Il campionamento indisturbato è stato effettuato infiggendo nel suolo, lentamente dall'alto, cilindri di materiale e dimensioni diversi, a seconda delle analisi successive di laboratorio, con il lato inferiore esterno tagliato a becco di clarino per facilitarne la penetrazione nel suolo.

In particolare:

per la determinazione delle funzioni di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica mediante un transitorio di evaporazione si è ricorso a cilindri di acciaio del volume di 650 cm^3 ($\text{Ø}=7.7 \text{ cm}$; $s=0.2 \text{ cm}$; $h=14.0 \text{ cm}$);

per la determinazione della ritenzione idrica con metodologie che prevedono il raggiungimento delle condizioni di equilibrio sono stati utilizzati cilindri di acciaio del volume di 300 cm^3 ($\text{Ø}=7.3 \text{ cm}$; $s=0.15 \text{ cm}$; $h=7.0 \text{ cm}$);

La tecnica di campionamento utilizzata prevede la preparazione di uno scalino orizzontale per il campionamento di ogni orizzonte pedologico individuato (nel caso in cui vengano campionati anche gli orizzonti profondi, ad esempio nei profili), su cui poggiare il campionatore (cilindro di acciaio o alluminio) visibile in fig. 10.2, il quale viene

preventivamente trattato, esternamente, con un lubrificante (tipo vasellina) per ridurre le forze di attrito esterne. Sulla sommità del campionatore viene posto un disco di acciaio e l'intero sistema (cilindro + disco), viene sottoposto ad una pressione crescente ed uniforme mediante un martinetto idraulico, la cui risalita viene impedita da una traversa di acciaio ancorata al suolo per mezzo di due aste infisse ad una profondità maggiore di quella di campionamento (fig. 10.3).



Fig: (10.2) Il campionatore cilindrico



Fig: (10.3) Il martinetto idraulico

Il cilindro di acciaio viene spinto dal martinetto lentamente nella matrice mentre l'operatore, con appositi attrezzi, provvede ad eliminare il suolo esternamente al campionatore riducendo così le pressioni e gli attriti laterali facilitandone la penetrazione. L'estrazione del campione viene svolta con molta attenzione per evitare formazioni di crepe e dopo aver sigillato le estremità con dischetti di cartone o di legno (per impedire le perdite di suolo) viene legato, inserito in busta ed etichettato.

10.2.4 Il penetrometro

Il penetrometro a cono è stato adoperato per la misurazione della resistenza alla penetrazione. Si tratta di un sistema caratterizzato da un'asta metallica con punta a cono avente angolo di 30° , ed un diametro di 12,83mm. Il sistema è equipaggiato con un sensore ad ultrasuoni per la misura della profondità di lettura ed un data storage per la registrazione dei dati con intervalli di 3,5cm. L'operatore, durante le misure, infigge l'asta in posizione verticale nel suolo cercando di imporre una pressione costante dall'alto verso il basso. Lo strumento solitamente esplora uno strato di suolo spesso circa 60cm.



un

10.3 Le analisi di laboratorio

10.3.1 Analisi chimiche

Sui campioni sciolti sono state effettuate analisi per determinare le seguenti caratteristiche:

tessitura (idrometro)

contenuto in carbonio organico (Blackmore)

contenuto totale in azoto (analizzatore CHNS; Carlo Erba)

contenuto totale di 13 elementi estratti con acqua regia (Cu, Ti, Ni, Al, Fe, Mn, Cr, Mg, Na, Si, Ca, Zn, K) e determinati con ICP AES (Varian liberty 150)

pH (HCl – H₂O) 1:5

conducibilità elettrica 1:5

Le analisi sono state eseguite secondo i metodi del MiPAF, 2000.

10.3.2 Analisi idrologiche

I campioni indisturbati degli orizzonti pedologici prelevati in campo, prima di essere sottoposti alle prove d'analisi idrologiche, sono stati preparati applicando una garza alla base del cilindro (con maglia di dimensioni tali da non rappresentare un ostacolo ai flussi ma sufficiente ad evitare la perdita di matrice) e misurando l'altezza del suolo campionato con un micrometro (mediando su vari punti di misura) per ottenere il volume totale apparente del suolo campionato. Sui campioni così preparati sono state determinate le relazioni di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica.

Per la determinazione della conducibilità idraulica alla saturazione, K_0 , è stato utilizzato il metodo a carico variabile riportato come ufficiale nel manuale dei Metodi di Analisi Fisica del Suolo (Rossi Pisa, 1997). I campioni sono stati saturati lentamente mediante inumidimento dal basso per favorire la fuoriuscita dell'aria. Tale processo di pretrattamento dura dalle 48 alle 96 ore a seconda dell'altezza e del tipo di suolo da saturare.

I campioni saturi sono stati successivamente posti nel permeometro a carico variabile. Il supporto della misura viene immerso in acqua, imponendo, esternamente, un carico costante per mezzo di una elettrovalvola che conserva l'altezza dell'acqua superiore a quella del pelo libero della matrice nel cilindro. L'acqua, in seguito a questo carico idraulico fluisce dall'esterno all'interno del campione attraversando la sua sezione basale. Vengono quindi misurati il tempo e, con un micrometro di precisione, la risalita dell'acqua all'interno del

campione. Per ogni campione sono state effettuate dalle 3 alle 6 repliche. Successivamente per pesata, è stato misurato il contenuto d'acqua alla saturazione per riferire ad esso i valori misurati di K_0 .

Per la determinazione delle proprietà idrauliche nel non saturo i campioni saturi sono stati attrezzati con tre capsule porose ($\varnothing=6$ mm $l=60$ mm) inserite lateralmente ad una distanza dalla base di 25, 50 e 75 mm. Le capsule sono collegate tramite tubicini di nylon ad una micro valvola a 4 canali; il canale centrale è collegato ad un trasduttore di precisione (1000 cm di fondo scala) mentre la quarta via è utilizzata per lo



Fig.:(10.4): le celle di carico e le valvole.

spurgo del circuito da eventuale presenza di bolle d'aria. Il fondo del campione viene sigillato con parafilm per impedire il flusso verso il basso ed imporre così una condizione di moto nullo al contorno inferiore del campo di moto. Il campione così preparato viene posto su di una cella di carico di precisione (3 kg di fondo scala) e sottoposto ad un processo di evaporazione in ambiente termoregolato a $20^{\circ}\text{C} (\pm 0.5)$, visibile in fig. 10.4.

Il trasduttore di tensione, la cella di carico e la valvola sono collegati ad un sistema automatico di acquisizione e gestiti da un apposito software. In particolare, il sistema di acquisizione è un VXI composto da un mainframe B-size della HP con scheda multiplexer a 16 canali per le celle di carico, scheda multiplexer ad 8 canali e 350 Ohm per i trasduttori e scheda multimetro per le



Fig. (10.5): il sistema di acquisizione

misure elettriche (fig. 10.5). Il sistema è corredato inoltre di alimentatori stabilizzati per i trasduttori e le celle di carico.

Per la gestione del sistema è stato messo a punto presso l'ISPAIM (CNR) un software sviluppato in ambiente di programmazione HP-VEE. In particolare, il software permette di gestire quattro postazioni di misura impostando per ognuna di queste i parametri di calibrazione delle celle di carico e dei trasduttori di tensione. Inoltre sono impostati a video il

tempo di ritardo della scansione dei canali delle valvole (in secondi) e il tempo di ciclo (in minuti).

Ogni ciclo di misura prevede l'acquisizione dell'orario della misura, del peso e dei valori di potenziali alle tre altezze con una scansione della valvola di 120 secondi. Il ciclo di misura viene ripetuto ogni 30 o 60 minuti in funzione del tipo di suolo e quindi della rapidità con cui si evolve l'essiccamento.

I rilievi vengono interrotti quando nel tensiometro posizionato più in alto nel campione si nota entrata d'aria. Il campione viene poi posto in stufa a 105 °C per 36 ore per riferire a questo valore del peso secco tutte le pesate effettuate durante la prova.

I valori di contenuto d'acqua, mediati per tutto il volume del campione, sono messi in relazione ai valori di potenziale, misurati agli stessi tempi e a tre diverse altezze, attraverso una procedura di iterazione per la determinazione dei punti sperimentali della curva di ritenzione. Il risultato può essere espresso sia in forma tabellare che parametrica, assegnando una espressione matematica alla curva di ritenzione e stimandone i parametri attraverso procedure numeriche. Inoltre, sono determinati alcuni punti della curva di ritenzione (da 1 a 15 atm) mediante apparato di pressione (Busoni e Mecella, 1977)

Per il calcolo della conducibilità ed ulteriori dettagli si fa riferimento alle procedure di calcolo messe a punto nella definizione del metodo del profilo istantaneo (Boels et al., 1978; Wendroth et al., 1993). I valori del potenziale alle diverse altezze vengono utilizzati per la determinazione, ad ogni tempo di misura, dei gradienti del potenziale fra due tensiometri adiacenti. Inoltre, dai valori del potenziale e dalla curva di ritenzione sono calcolati i valori di contenuto d'acqua per ogni compartimento di suolo corrispondente ai tre tensiometri; questi valori di contenuto d'acqua sono utilizzati per il calcolo dei flussi attraverso ogni compartimento. Data la condizione al contorno inferiore di flusso nullo, il rapporto fra i flussi e i gradienti, per ogni tempo di misura, determina il valore della conducibilità idraulica riferita al contenuto d'acqua (potenziale) medio dei due compartimenti fra i quali è stato calcolato. Per ogni campione ci sono in definitiva n-1 serie di dati dove n è il numero dei tensiometri (compartimenti) e nella configurazione in esame, quindi, ci sono due ripetizioni di dati per ogni esperimento.

Inoltre, per orizzonti di piccolo spessore e per una verifica delle procedure illustrate precedentemente, sono stati misurate alcune curve di ritenzione idrica applicando un metodo che prevede il raggiungimento dell'equilibrio idrostatico e che, a fronte dei lunghi tempi di misura (2-3 mesi), può essere applicato su più campioni contemporaneamente (15-20). Tale metodo rappresenta il metodo ufficiale nelle norme Italiane (Busoni e Mecella, 1997). Nel

caso in esame campioni di suolo del volume di circa 100-150 cm³ sono stati prelevati, preparati e saturati con le stesse tecniche prima descritte. I campioni, una volta saturati, sono coperti da un parafilm per impedire i processi evaporativi dalla sommità del campione, pesati e posti in una cassetta tensiometrica a sabbia per la determinazione dei valori di ritenzione fino a -100 cm di potenziale. Dopo l'ultima misura i campioni sono distrutti e messi in stufa a 105 °C. per 24 h per determinare il peso secco e riferire quindi, a quest'ultimo, sia i valori di contenuto d'acqua che di densità apparente. Dopo di ciò il materiale disturbato è nuovamente saturato e posto nelle camere a pressione dove con tempi di residenza di 10-15 giorni sono determinati i contenuti d'acqua a 0.3, 1, 4 e 15 atmosfere di pressione.

La parametrizzazione delle curve di ritenzione e di conducibilità idraulica per le applicazioni modellistiche è stata ottenuta con l'ausilio del programma RETC (van Genuchten M. Th., et al., 1991).

10.4 Il sito per il monitoraggio in continuo delle variabili idrauliche

I 5 profili aperti nell'area di studio, rappresentativi dei principali pedopaesaggi, sono stati descritti e campionati secondo le precedenti metodiche. In questi casi però il campionamento indisturbato per l'analisi delle proprietà idrauliche è stato effettuato per ogni orizzonte individuato, sino alla profondità di circa 200cm.

Uno tra i cinque profili era inserito in un precedente progetto (ARMOSA- Attivazione di una Rete per il Monitoraggio della qualità dei Suoli Agricoli della Lombardia) come sito sperimentale per il monitoraggio in continuo delle dinamiche idrologiche dei suoli. I dati ottenuti nel corso del suddetto progetto sono stati adoperati nel presente lavoro per la calibrazione dei modelli di simulazione SWAP e CropSyst.

Segue una descrizione della stazione di monitoraggio (fonte: tesi Bonfante A., 2005)

La stazione nasce con il fine di monitorare il moto dell'acqua e dei soluti (nitrati) nel suolo, essa è caratterizzata da:

Un sistema per l'acquisizione in continuo dei valori di contenuto d'acqua nel suolo a diverse profondità (0-120 cm, una misura ogni 4 ore) mediante tecnica TDR (Time Domain Reflectometry; Tectronics;) (fig. 10.6) con sonde trifilari. Tale tecnica si basa essenzialmente sulla relazione esistente tra il contenuto d'acqua volumetrico ($m^3 m^{-3}$) e la costante dielettrica apparente ϵ_a del suolo. Per una descrizione dettagliata si rimanda ai lavori di Topp et al. (1980), Topp e Davis (1985), Dalton e van Genuchten (1986), Zegelin et al. (1992), Cassel et al.(1994).

Un sistema per l'acquisizione in continuo dei valori di potenziale matriciale a diverse profondità (20-140 cm, con misure ogni 30 minuti) mediante tensiometri muniti di trasduttori (fig. 10.7).

Un sistema per l'estrazione della soluzione circolante a diverse profondità (30-140 cm, campionamenti discontinui settimanali) mediante capsule porose poste in depressione (fig. 10.8).

I sistemi di monitoraggio, situati nelle vicinanze del profilo rappresentativo di ogni sito, sono gestiti da un impianto composto da: PC, software di gestione, multiplexer a 16-36 canali (Campbell Scientific multiplexer models, the SDMX50) e TDR, alimentati a corrente (allaccio elettrico con gruppo di continuità). Tale impianto consente, così strutturato, l'impostazione dell'acquisizione e l'immagazzinamento dei dati relativi alle misure di TDR e tensiometriche. Per questo sito sono state disposte tre repliche dei sistemi di misura disposti lungo i filari come riportato in figura 10.9.

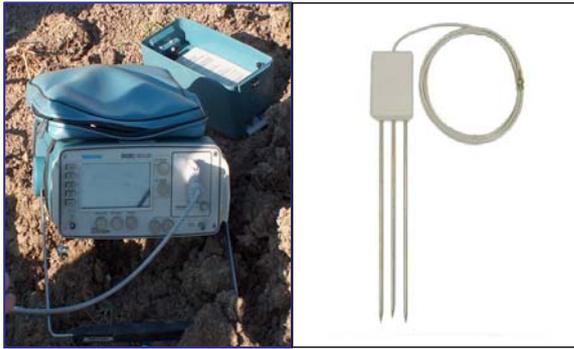


Fig.(10.6): il TDR della tektronix e le sonde trifilari



Fig.(10.7): i tensiometri muniti di trasduttori



Fig.(10.8):Le capsule porose

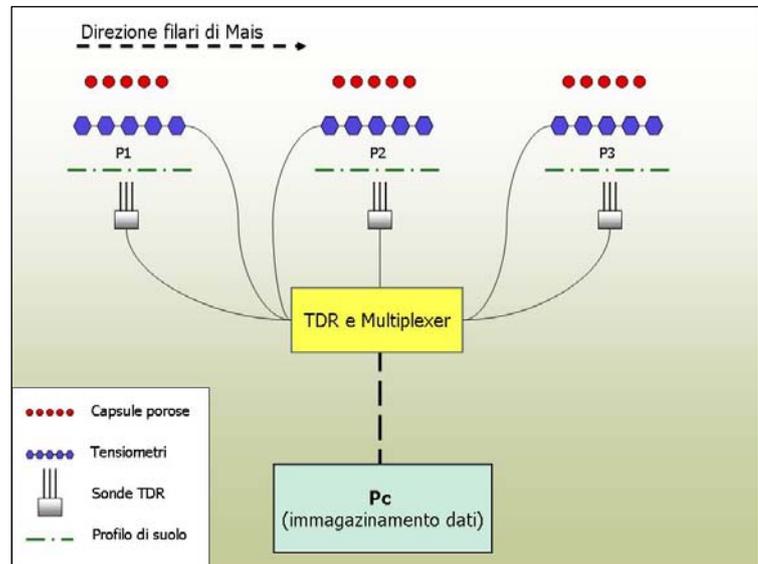


Fig.(10.9): lo schema delle tre repliche

Durante la prova sperimentale sono state acquisite le informazioni relative ai trattamenti agronomici (irrigazione, lavorazioni, spandimento di concime minerale e/o organico, etc.,) nonché misure di accrescimento colturale (misure di LAI, biomassa ed asportazioni di azoto della coltura).

10.5 Le Pedofunzioni

Nel presente lavoro, al fine di stimare le proprietà idrauliche dei suoli, da utilizzare successivamente come dati di ingresso in modelli per la simulazione della crescita colturale (CropSyst) e del comportamento idrologico dei suoli (SWAP), si è proceduto alla valutazione di alcune pedofunzioni e alla successiva selezione di due di esse per gli scopi prefissi. In particolare, si sono prese in esame e messe a confronto la PTF sviluppata da Vereecken et al. (1989) e la PTF derivata da Wosten et al., (1999) dal database di suoli europei HYPRES, al fine di stimare i parametri idraulici da inserire come dati di input nel modello SWAP. Riguardo al modello CropSyst, esso implementa la pedofunzione di Rawls e Brakiensek modificata da Saxton (Rawls, et al., 1982) con la quale vengono derivati i parametri idraulici (α , b , θ_s e K_0) per la risoluzione delle funzioni di ritenzione e conducibilità secondo il modello proposto da Campbell (eq.6.12-6.15) La selezione delle citate funzioni è stata motivata anche da risultati ottenuti in esperienze pregresse condotte in ambienti simili all'areale oggetto di questo studio.

L'utilizzo delle pedofunzioni è stato possibile grazie alla banca dati realizzata in seguito alle analisi chimico-fisiche effettuate sui campioni di suolo. In figura 10.10 ne è riportato un esempio.

Segue una descrizione delle pedofunzioni messe a confronto.

A	B	C	D	E	F	G	H	I
			USDA					
Campione	Profondità	argilla	limo	sabbia	densità apparente gr/cm ³	carbonio organico gr/kg	carbonio organico gr/gr	sostanza organica %
107 scheda PRIN	0-23	3,68	31,32	65,00	1,40	8,72	0,0087	1,503
107 non trattato	0-23	8,89	28,81	62,5	1,40	8,72	0,0087	1,503
107 trattato	0-23	11,76	24,59	63,65	1,40	8,72	0,0087	1,503
121 scheda PRIN	0-20	5,48	28,52	66,00	1,36	22,24	0,0222	3,834
121 non trattato	0-20	9,27	40,39	50,34	1,36	22,24	0,0222	3,834
121 trattato	0-20	20,24	33,04	46,72	1,36	22,24	0,0222	3,834
226 scheda PRIN	0-40	12,99	37,01	50,00	1,60	15,70	0,0157	2,707
226 non trattato	0-40	13,45	44,6	41,95	1,60	15,70	0,0157	2,707
226 trattato	0-40	23,74	32,42	43,84	1,60	15,70	0,0157	2,707
208 scheda PRIN	0-33	11,39	34,81	54,00	1,52	14,98	0,0150	2,583
208 non trattato	0-33	10,58	46,88	42,74	1,52	14,98	0,0150	2,583
208 trattato	0-33	23,02	35,43	41,55	1,52	14,98	0,0150	2,583
248 scheda PRIN	0-32	12,00	33,00	55,00				
248 non trattato	0-32	15,77	38,24	45,99				
248 trattato	0-32	13,63	31,42	54,95				
108 scheda PRIN	0-28	8,30	36,70	55,00	1,41	25,34	0,0253	4,369
108 non trattato	0-28	4,79	55,11	40,1	1,41	25,34	0,0253	4,369
108 trattato	0-28	22,78	35,92	41,3	1,41	25,34	0,0253	4,369
112 scheda PRIN	0-40	14,64	30,36	55,00	1,54	41,86	0,0419	7,217
112 non trattato	0-40	13,94	37,96	48,1	1,54	41,86	0,0419	7,217
112 trattato	0-40	12,65	39,94	47,41	1,54	41,86	0,0419	7,217
131 scheda PRIN	0-35	5,38	30,62	64	0,60	14,01	0,0140	2,415
131 non trattato	0-35	7,09	43,34	49,57	0,60	14,01	0,0140	2,415
131 trattato	0-35	12,48	35,36	52,16	0,60	14,01	0,0140	2,415
115 scheda PRIN	0-10	2,91	27,09	70	0,89	39,67	0,0397	6,839
115 trattato	0-10	17,08	39,71	43,21	0,89	39,67	0,0397	6,839

Fig.(10.10): la banca dati delle analisi chimico-fisiche: un esempio

10.5.1 Vereecken et al. (1989)

Regressioni per la stima dei parametri dell'equazione di van Genuchten (θ_r , θ_s , α e n) per la curva di ritenzione $\theta(h)$ e dei parametri dell'equazione di Gardner (b e λ) per la conducibilità idraulica insatura $K(h)$. Nel primo caso gli input richiesti sono le percentuali di sabbia, limo ed argilla, il contenuto in carbonio organico (g g^{-1}) e la densità apparente ρ_b (g cm^{-3}); nel secondo caso è necessaria anche una misura di conducibilità idraulica a saturazione (cm d^{-1}). Queste pedofunzioni sono state messe a punto analizzando un data base di 182 orizzonti caratterizzati dai seguenti range di valori: sabbia 5.6-97.8% (media 52.14%), limo 0.1-80.7% (media 36.81%), argilla 0.1-54.46% (media 10.93%), sostanza organica 0.01-6.6 % (media 1.03%) e densità apparente 1.040-1.23 Mg/m^3 (media 1.466 Mg/m^3).

Le regressioni derivate per i parametri della curva di ritenzione secondo la formulazione di van Genuchten sono le seguenti:

$\theta_r = 0.015 + 0.005 C + 0.014 CO$
$\theta_s = 0.81 - 0.283 \rho_b + 0.001 C$
$\log(\alpha) = -2.486 + 0.025 Sa - 0.351 CO - 2.617\rho_b - 0.023 C$
$\log(n) = 0.053 - 0.009 Sa - 0.013 C + 0.00015 (Sa)^2$

dove: C = % argilla; Sa = % sabbia; CO = carbonio organico (g g^{-1}); ρ_b = densità apparente (g cm^{-3});

I valori di r^2 calcolati dagli Autori validando le pedofunzioni sui dati di origine sono 0.70, 0.85, 0.68 e 0.56 per θ_r , θ_s , $\log(\alpha)$ e $\log(n)$ rispettivamente.

La relazione funzionale per esprimere la conducibilità in funzione del potenziale idrico $K(h)$ è quella proposta da Gardner (1958):

$$k(h) = [1+(bh)^\lambda]^{-1} \quad [\text{eq. 10.1}]$$

e le pedofunzioni individuate per la stima dei parametri λ (indice della distribuzione dei pori) e b (indice inversamente proporzionale all'*air entry point*) sono così espresse:

$$\log(b) = -2.640 - 0.019 Sa + 0.05 C + 0.506 \log(K_{\text{sat}}^m)$$

$$\log(\lambda) = 1.186 - 0.194 \log(C) - 0.0489 \log(S).$$

dove: $S = \% \text{ limo}$; $k_{\text{sat}} = \text{conducibilità alla saturazione (cm d}^{-1}\text{)}$.

I valori di r^2 calcolati dagli Autori validando le pedofunzioni sui dati di origine sono 0.61 e 0.55 per $\log(b)$ e $\log(n)$ rispettivamente.

In assenza di valori misurati per la conducibilità idraulica a saturazione, Vereecken et al.(1990) riportano una equazione di regressione derivata analizzando lo stesso set di dati:

$$\log(K_{\text{sat,e}}) = 20.62 - 0.96 \log(\text{argilla}\%) - 0.66 \log(\text{sabbia}\%) - 0.46 \log(C \text{ org.}) - 8.43\rho_b$$

10.5.2 Wosten et al., (1999).

Queste pedofunzioni nascono dall'analisi delle informazioni raccolte nella banca dati delle proprietà idrauliche dei suoli europei HYPRES (Hydraulic PROPERTIES of European Soils), contenente dati misurati su un totale di 5521 orizzonti e alla cui creazione hanno partecipato 20 istituzioni di 12 paesi Europei.

Trattasi di regressioni lineari per la stima dei parametri dell'equazione di van Genuchten (θ_r , θ_s , α , n , K_0 ed l) per la curva di ritenzione $\theta(h)$ e per la curva di conducibilità $K(h)$ da essa derivata secondo l'equazione proposta da Mualem-van Genuchten (eq. 6.16)

Gli input richiesti sono le percentuali di limo ed argilla, la percentuale in sostanza organica e la densità apparente (g cm^{-3}). Inoltre è richiesta una variabile qualitativa (topsoil o subsoil) che entra nella regressione assumendo valore di 0 oppure 1.

Le regressioni derivate per i parametri della curva di ritenzione e di conducibilità insatura secondo la formulazione di van Genuchten – Mualem sono le seguenti:

$$\theta_s = 0.7919 + 0.001691 C - 0.29619 D - 0.000001491 S^2 + 0.0000821 OM^2 + 0.02427 C^{-1} + 0.01113 S^{-1} + 0.01472 \ln(S) - 0.0000733 OM C - 0.000619 D*C - 0.001183 D*OM - 0.0001664 \text{topsoil}*S$$

$$\alpha = -14.96 + 0.03135 C + 0.0351 S + 0.646 OM + 15.29 D - 0.192 \text{topsoil} - 4.671 D^2 - 0.000781 C^2 - 0.00687 OM^2 + 0.0449 OM^{-1} + 0.0663 \ln(S) + 0.1482 \ln(OM) - 0.04546 D*S - 0.4852 D*OM + 0.00673 \text{topsoil}*C$$

$$n = -25.23 - 0.02195 C + 0.0074 S - 0.1940 OM + 45.5 D - 7.24 D^2 + 0.0003658 C^2 + 0.002885 OM^2 - 12.81 D^{-1} - 0.1524 S^{-1} - 0.01958 OM^{-1} - 0.2876 \ln(S) - 0.0709 \ln(OM) - 44.6 \ln(D) - 0.02264 D*C + 0.0896 D*OM + 0.00718 \text{topsoil}*C$$

$$l = 0.0202 + 0.0006193 C^2 - 0.001136 OM^2 - 0.2316 \ln(OM) - 0.03544 D*C + 0.00283 D*S + 0.0488 D*OM$$

$$K_0 = 7.755 + 0.0352 S + 0.93 \text{topsoil} - 0.967 D^2 - 0.000484 C^2 - 0.000322 S^2 + 0.001 S^{-1} - 0.0748 OM^{-1} - 0.643 \ln(S) - 0.01398 D*C - 0.1673 D*OM + 0.02986 \text{topsoil}*C - 0.03305 \text{topsoil}*S$$

dove: C = % argilla; Sa = % sabbia; S = % limo; OM = % sostanza organica; D = densità apparente

(g cm^{-3}); topsoil = 1; subsoil = 0;

10.5.3 Indici per la scelta delle PTFs

Le pedofunzioni possono essere valutate in modo da esprimere in termini quantitativi l'affidabilità dei valori stimati sulla base dei dati disponibili.

Una prima analisi può essere limitata ad un confronto statistico tra i dati misurati disponibili e quelli stimati, utilizzando i classici indici di errore, quali l'errore medio, lo scarto quadratico medio e lo scarto quadratico medio standardizzato e calcolando i coefficienti di correlazione tra dati misurati e dati stimati.

Tuttavia nella valutazione di pedofunzioni adoperate per la stima della curva di ritenzione, come in questo specifico caso, è importante non tanto la coincidenza tra la stima e la misura di singoli valori di contenuto idrico in corrispondenza di un determinato potenziale, quanto piuttosto il contenuto idrico su tutto il campo di esistenza della curva di ritenzione. A tale scopo, nella tesi, si è proceduto al calcolo dei seguenti indici per la valutazione della migliore PTFs da utilizzare:

$$- RME = \frac{1}{n} \sum_n \frac{Ei - Mi}{Mi} \quad \text{Errore Medio Relativo, (Williams et al., 1992)}$$

$$- RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Mi)^2}{n}} \quad \text{Radice dell'Errore Quadratico Medio, (Fox, 1981)}$$

$$- RRMSE = RMSE \frac{100}{\bar{M}} \quad \text{Radice dell'Errore Quadratico Medio Relativo}$$

inoltre si è effettuata una stima dell'efficienza (EF) dei modelli secondo quanto suggerito da Loague e Green, 1991.

$$- EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ri)^2}{\sum_{i=1}^n (Mi - \bar{M})^2}$$

dove: Ei = valore stimato; Mi = valore misurato; n = numero di coppie di dati; \bar{M} = valore medio dati misurati; $Ri = (Ei - Mi)$

L'indice RME può assumere valori positivi o negativi ed indica se il contenuto idrico stimato con una pedofunzione è sostanzialmente superiore ($RME \gg 0$) o inferiore ($RME \ll 0$) a quello misurato sperimentalmente. Gli indici $RMSE$ ed $RRMSE$ sono sempre positivi; uguali a zero solo nel caso in cui tutti i valori misurati siano uguali a quelli stimati dalla pedofunzione. Poiché possono essere interpretati come gli analoghi continui della deviazione standard lungo

tutta la curva di ritenzione, la loro importanza come indici di errore è più significativa di quella di *RME*; quando quest'ultimo è pari a zero, ciò non implica che la stima complessiva sia buona, cioè che anche *RMSE* o *RRMSE* siano pari a zero.

L'indice di efficienza *EF* appare utile perché consente l'identificazione rapida di modelli inefficienti. Esso può assumere valori da $-\infty$ a $+1$. I valori negativi stanno ad indicare che il valore medio di tutti i dati misurati è un predittore migliore rispetto al modello adoperato.

10.6 Le analisi modellistiche

I modelli di simulazione adoperati in questa tesi sono:

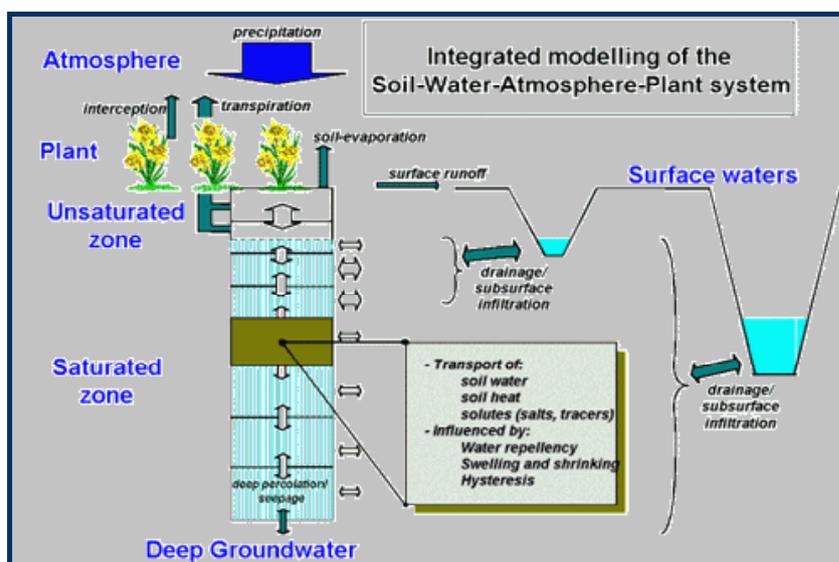
- SWAP -Soil, Water, Atmosphere and Plant- (van Dam et al., 1997)
- CropSyst (Stöckle et al., 2005)

Quella che segue è una descrizione sintetica dei principi di funzionamento dei suddetti modelli, in particolare si è voluto porre l'attenzione sugli aspetti specifici per i quali i due modelli sono stati scelti: gli aspetti idropedologici per quel che riguarda il modello SWAP e gli aspetti culturali in riferimento all'utilizzo di CropSyst.

10.6.1 Il modello SWAP

E' un modello matematico basato sull'originario SWATRE (Belmans et al., 1983) e descrive il moto dell'acqua nel suolo utilizzando l'equazione di Richards, risolvendola con uno schema numerico a differenze finite (van Dam et al., 1997) attraverso le funzioni idrauliche del suolo descritte dalle espressioni analitiche di van Genuchten (eq. 6.13) e Mualem-van Genuchten (eq. 6.16)

Nella figura seguente viene riportata la schematizzazione dei principali processi implementati in SWAP.



Il modello è in grado di risolvere l'equazione del moto con diverse condizioni al contorno inferiore (ad esempio con la presenza di falda, di uno strato impermeabile, con il drenaggio libero, etc.).

L'attingimento idrico radicale delle piante viene tenuto in conto attraverso un termine additivo, S , all'equazione di Richards:.

$$\frac{\partial h}{\partial t} C(h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} - 1 \right) \right] - S \quad [\text{eq. 10.2}]$$

Il modello determina la traspirazione giornaliera della coltura come la somma degli attingimenti idrici radicali giornalieri (Soil water extraction) a diversa profondità. Il suolo viene diviso in comparti (layers) e per ognuno il modello determina l'attingimento di acqua potenziale e quello attuale. L'attingimento potenziale ad una certa profondità z viene definito dalla seguente relazione:

$$S_p(z) = T_p / D_{\text{root}}(z) \quad [\text{eq. 10.3}]$$

dove:

$S_p(z)$ = attingimento potenziale alla profondità z .

T_p = traspirazione potenziale della coltura

$D_{\text{root}}(z)$ = densità radicale alla profondità z

La traspirazione potenziale viene determinata in accordo con la relazione di Ritchie (1972) che, tramite il LAI, divide l'evapotraspirazione potenziale in evaporazione potenziale e traspirazione potenziale.

L'attingimento attuale S_a viene calcolato come quota della traspirazione potenziale T_p , in accordo con i coefficienti di riduzione da stress idrico (α_{rw}) e salino (α_{rd}). (Feddes et al., 1978)

$$S_a(z) = \alpha_{\text{rw}} \times \alpha_{\text{rd}} \times T_p(z) \quad [\text{eq. 10.4}]$$

La traspirazione attuale giornaliera è data dall'integrazione dell'attingimento attuale giornaliero nei diversi comparti di suolo.

Nell'applicazione di SWAP non si è tenuto conto del coefficiente di stress salino ma solo del coefficiente di stress idrico descritto da Feddes et al., (1978) e riportato in figura 10.11:

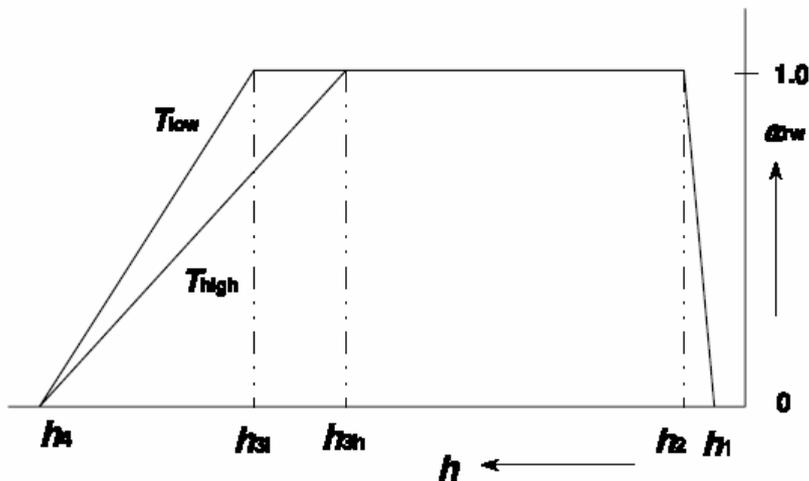


Fig.(10.11): relazione tra traspirazione attuale e potenziale in funzione del potenziale idrico (Feddes,1978)

Dove il coefficiente di riduzione α_{rw} è funzione del potenziale dell'acqua nel suolo h e del tasso di traspirazione potenziale.

$$\alpha_{rw}(h,t) = \frac{T_{a,t}}{T_{p,t}} \quad [\text{eq. 10.5}]$$

La variazione dei valori h_1 e h_2 è funzione principalmente della porosità del suolo, mentre h_{3h} , h_{3i} e h_4 variano principalmente in funzione delle caratteristiche della pianta.

Il primo (h_1) è il valore in cm di potenziale al di sotto del quale le radici iniziano a estrarre acqua dal suolo. Al di sopra di tale valore l'attingimento è impedito per le condizioni di anaerobiosi dovute all'eccesso d'acqua; h_2 è il valore al di sotto del quale le radici iniziano a estrarre acqua dal suolo in maniera ottimale; h_{3h} e h_{3i} sono i valori di potenziale matriciale al di sotto dei quali le radici iniziano a estrarre acqua dal suolo in maniera non ottimale in caso, rispettivamente, di elevati e bassi valori di evapotraspirazione potenziale; h_4 è il valore limite al di sotto del quale le radici non sono in grado di estrarre acqua dal suolo (punto di appassimento).

Un'interessante applicazione del modello SWAP in questo lavoro ha riguardato la simulazione degli interventi irrigui. A tale scopo al modello è stato imposto di intervenire con apporti irrigui ogni qualvolta venisse raggiunto e superato un livello soglia indice di stress per la coltura, definito dal seguente rapporto:

$$I_s = T_a/T_p$$

dove:

Is = indice di stress

Ta = traspirazione attuale

Tp = traspirazione potenziale

La soglia di intervento è stata posta pari a 0,87 per l'intero ciclo vegetativo della coltura. Cosicché il modello è intervenuto con le irrigazioni tutte le volte che il rapporto Ta/Tp ha uguagliato oppure è sceso al disotto di tale soglia. Riguardo la quantità d'acqua somministrata ad ogni intervento, è stato stabilito farla variare tra i 40 ed i 50 mm in funzione dello stadio vegetativo della coltura.

10.6.2 Il modello CropSyst

Il moto dell'acqua nel modello Cropsyst viene descritto attraverso la soluzione dell'equazione di Richards. In talune condizioni (saturazione) il modello opera secondo una schematizzazione a cascata.

La funzione di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica sono parametrizzate secondo i modelli di Campbell (1985) (equazioni 6.12 e 6.15)

Il modello "a cascata" si basa su una infiltrazione simulata dove ogni strato del suolo raggiunge la CIC (capacità idrica di campo) prima che l'acqua muova a quello successivo. Il valore della CIC, il contenuto iniziale d'acqua e la quantità di acqua che raggiunge un determinato strato determinano quindi se l'acqua debba migrare o meno verso lo strato successivo.

Cropsyst simula la traspirazione della coltura in base al potenziale fogliare:

$$WU_1 = K \cdot C_1 / 1.5 \cdot (\Psi_{s1} - \Psi_1) \quad [\text{eq. 10.6}]$$

Dove:

WU_1 = water uptake nel comparto 1

Ψ_{s1} = potenziale del comparto numero 1 di suolo

Ψ_1 = potenziale fogliare

C_1 = conduttanza radicale nel comparto 1 di suolo

K = time step del giorno espresso in secondi

Per ottenere la traspirazione totale WU si sommano le traspirazioni realizzate in ogni comparto di suolo:

$$WU = \sum_{i=1}^n WU_i \quad [10.7]$$

dove n è il numero di comparti di suolo.

Questo modello è tra i più adoperati per la simulazione della crescita delle colture. Il modulo pianta gestisce la crescita della coltura considerando le relazioni esistenti tra la produzione di biomassa nelle diverse fasi fenologiche definite dalla somma termica, ed i fattori limitanti temperatura ed azoto (fig. 10.12). (fonte: tesi Bonfante, 2005)

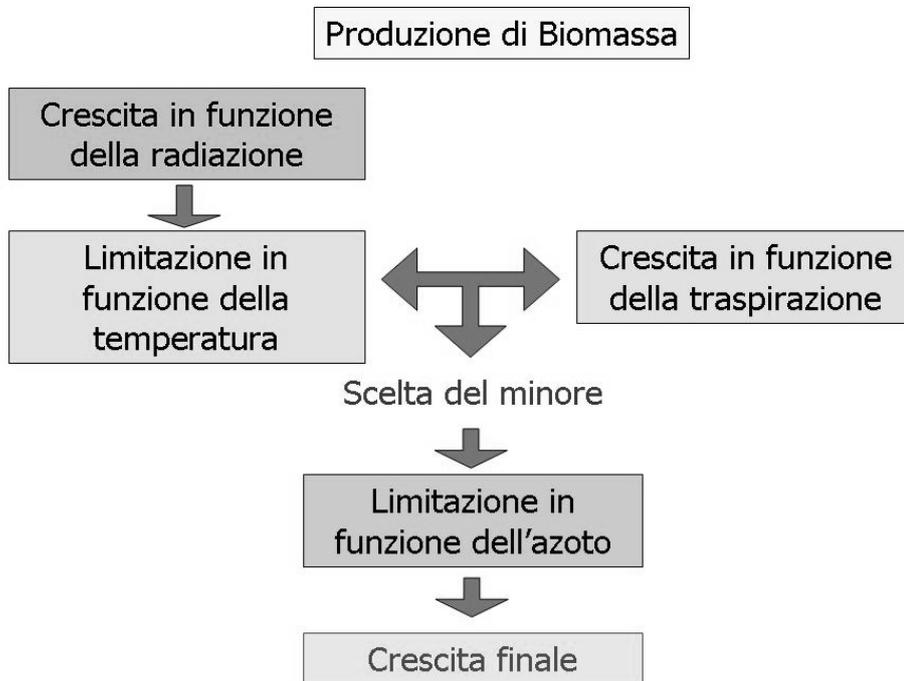


Fig. (10.12): Schema della produzione di biomassa in Cropsyst

Tale accrescimento viene poi ripartito nella porzione epigea ed ipogea. Da qui mediante l'applicazione di un indice di raccolta (*harvest index*), tipico per ogni coltura, il modello è in grado di stimare anche i valori di resa produttiva (*Yield*). Più nel dettaglio:

la produzione di biomassa può essere determinata da:

a) energia solare intercettata, secondo l'equazione:

$$G_R = I_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot LAI}) \cdot RUE \quad [\text{eq. 10.8}]$$

dove:

G_R = Tasso di crescita colturale

I_0 = densità di flusso luminoso alla superficie della coltura

RUE = Radiation Use Efficiency, tasso di fotosintesi netta

LAI: leaf area index

tale funzione viene moltiplicata, successivamente, per il coefficiente T_{min} che rappresenta la limitazione allo sviluppo determinata dalla temperatura definito dal cardinale inferiore (T_{base}) e dall'ottimo termico (T_{opt}) (fig. 10.13).

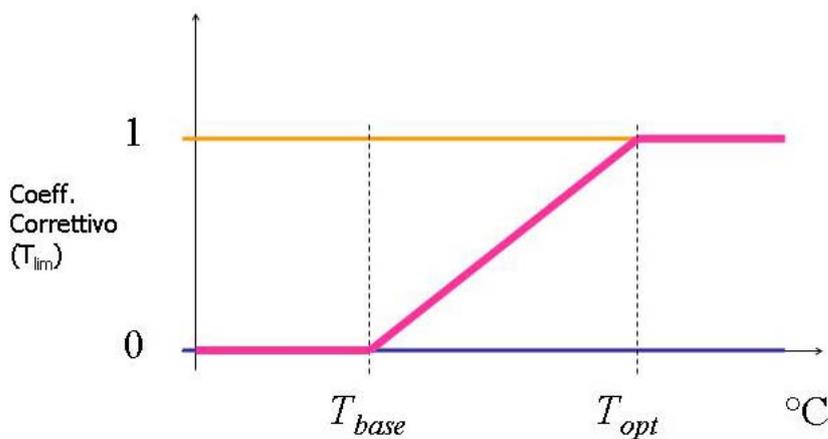


Fig. (10.13) – Grafico del coeff. correttivo T_{min}

b) flussi traspirativi, secondo la funzione:

$$G_{Tr} = Tr_{act} \cdot \frac{B_{Tr}}{VPD} \quad [eq. 10.9]$$

dove:

G_{tr} = accrescimento dovuto alla traspirazione

Tr_{act} = traspirazione attuale

B_{tr} = coefficiente di traspirazione-biomassa (biomassa prodotta/acqua traspirata)

VPD = vapor pressure deficit

Tra i due processi (a,b) il modello seleziona quello che simula la minore produzione di biomassa e procede con la fase successiva nella quale viene considerata la disponibilità di azoto come fattore limitante la produzione di biomassa. Per ogni coltura vengono definite le curve del contenuto % di azoto in funzione della biomassa epigea prodotta (figura: 10.14)

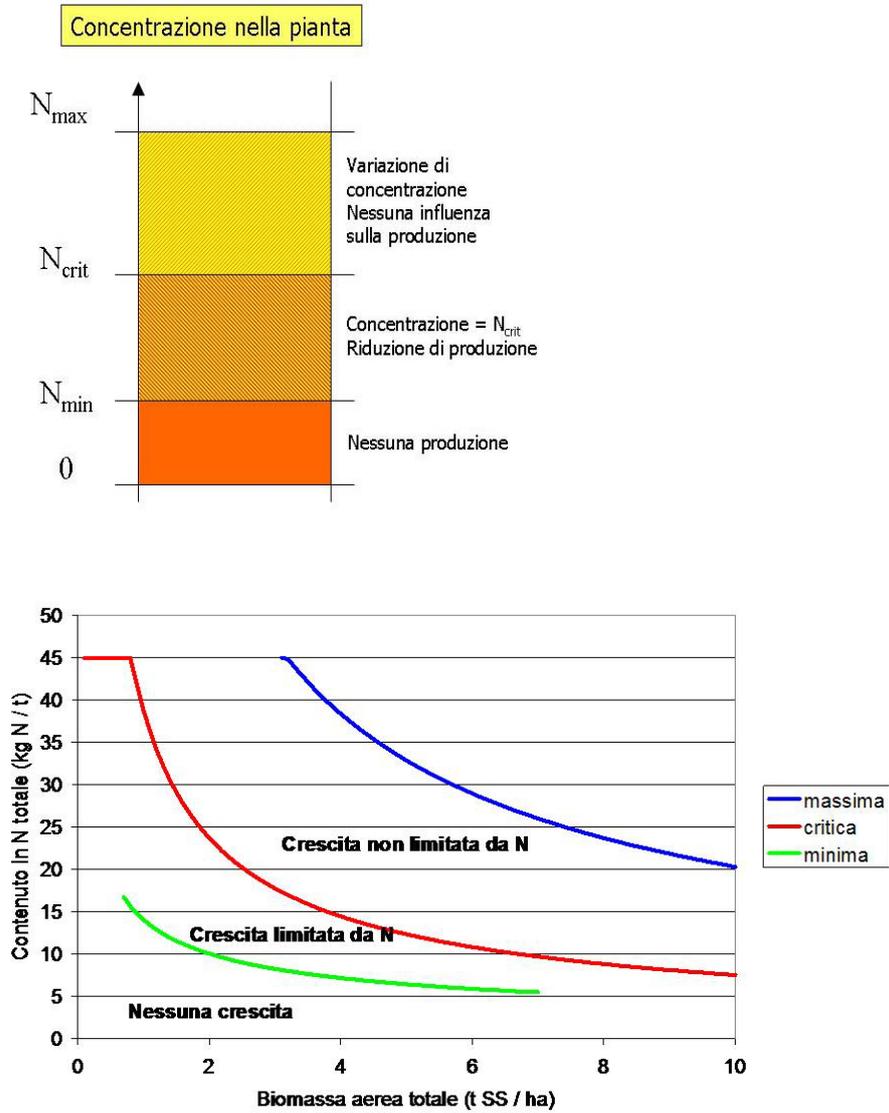


Fig.(10.14)– Relazioni tra concentrazione di azoto nella pianta e produzione di biomassa

Cosicché la riduzione della produzione di biomassa indotta dall'azoto può essere descritta dalla seguente funzione:

$$G_N = G_{Npot} \cdot \left[1 - \frac{NC_{crit} - NCONC_a}{NC_{crit} - NC_{min}} \right] \quad [\text{eq. 10.10}]$$

dove:

GN = accrescimento limitato dalla disponibilità di azoto

GN_{pot} = accrescimento potenziale (valore min tra G_r e G_{tr})

NC_{crit} , NC_{min} = concentrazione critica e minima dell'azoto nella pianta (derivata dalle funzioni sopra descritte e variabile in funzione dello stadio di sviluppo)

$NCONC_a$ = concentrazione attuale in azoto nella pianta

I dati di input utilizzati per effettuare le simulazioni con i modelli citati sono stati ricavati da:

- banca dati proprietà chimico-fisiche ed idrauliche: per il modulo suolo
- misure di campo(altezza pianta, approfondimento radicale, LAI): per il modulo pianta
- banca dati climatici(ERSAF): per le condizioni al contorno superiore
- informazioni bibliografiche (ERSAL): per le condizioni al contorno inferiore(presenza falde)

10.7 Le analisi territoriali

10.7.1 La morfologia del paesaggio

Parte del presente lavoro di tesi ha riguardato l'applicazione di tecniche per l'analisi territoriale secondo un approccio di tipo deterministico allo studio di alcune variabili ambientali. A tal fine si è ricorso all'utilizzo del software SAGA (Böhner et. al., 2002) sviluppato per studi di indagine territoriale (fig.10.15) Non si dispone di informazioni dettagliate riguardo gli aspetti tecnici e gli algoritmi implementati nel software citato. Esso è un GIS (Geographical Information System) mediante il quale è possibile elaborare dati di tipo vettoriale ed in particolare di tipo raster; tramite il suo utilizzo è stato possibile derivare, a partire da un modello digitale del terreno (DEM), alcune variabili territoriali continue ad alta risoluzione (ad es.: indici morfologici di curvatura). Il modello digitale del terreno, realizzato dalla regione Lombardia, è stato sottoposto ad un'indagine di accuratezza in alcune aree campione, la quale come si vedrà nella sezione dedicata ai risultati, ha evidenziato la necessità di elaborare un nuovo DEM . In figura 10.16 è riportata un'immagine del modello digitale del terreno gentilmente fornito dalla regione Lombardia.

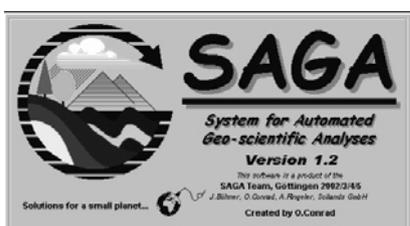


Fig. (10.15): il software SAGA (Böhner et. al., 2002)

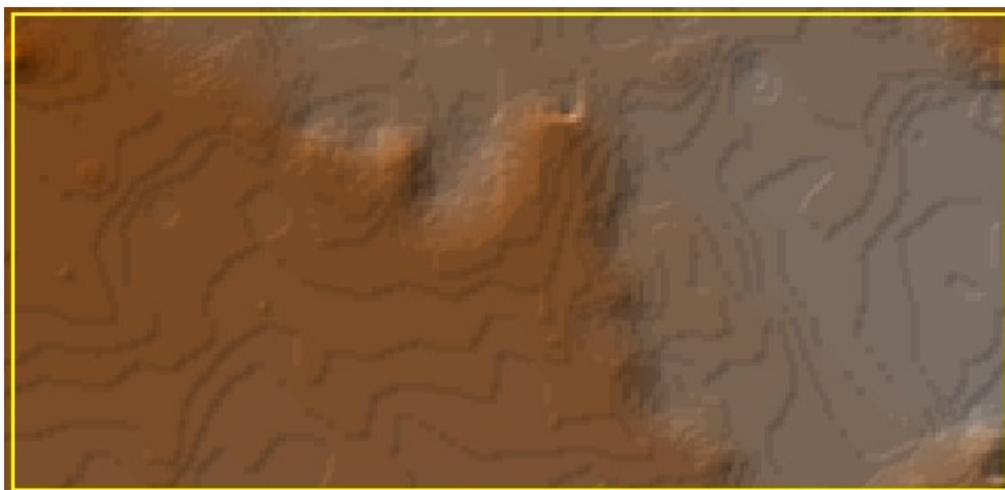


Fig.(10.16): modello digitale del terreno nella versione iniziale

10.7.2 Indici di vegetazione e stime di produzione

Per la valutazione dei risultati ottenuti nei 100 siti campionati mediante l'applicazione del modello CropSyst, non disponendo di misurazioni sulle produzioni reali se non nel sito di calibrazione del modello, si sono condotte interviste ai coltivatori della zona al fine di ottenere informazioni sulle produzioni ottenute negli stessi anni delle simulazioni. Si sono scelte due aziende (az. Belvignatino e az. Pompola) ricadenti nei due pedopaesaggi principali. Inoltre la possibilità di disporre, per gli areali studiati, di un indice di vegetazione telerilevato, l'NDVI, ha consentito di utilizzare, durante la fase di valutazione dei risultati, anche delle informazioni legate all'analisi vegetazionale. L'NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*, si ottiene dalla elaborazione di immagini da satellite, con una combinazione dei canali del rosso (RED) e dell'infrarosso vicino (NIR):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Esso si basa sulla caratteristica, comune a tutte le piante, di alta riflettanza nel NIR e bassa riflettanza nel RED, ed è, con buona approssimazione, proporzionale alla biomassa fotosinteticamente attiva (Malingreau, 1989).

In particolare si disponeva di:

- una serie multitemporale (periodo marzo-settembre) di immagini NDVI del satellite Modis, relativa ognuna ad un periodo di 16 giorni secondo il metodo MVC (*Maximum Value Composite*), con risoluzione di 231 m, scaricate gratuitamente dal sito <http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp>;
- immagini del satellite Quick Bird nel visibile (RGB) e nel IR vicino, relative rispettivamente al 05 giugno e al 21 luglio 2004, con risoluzione di 2,4m, dalla cui elaborazione è stato ottenuto l'NDVI relativo alle due giornate considerate. Le immagini Quick Bird sono state gentilmente fornite dall'unità operativa PRIN 2003 dei proff. Wolf e Carnicelli.

Le immagini sono state elaborate con il software Erdas e la valutazione dei risultati è consistita nel calcolo dei coefficienti di correlazione tra i dati puntuali simulati dal modello, i dati delle interviste ai coltivatori, ed i valori dell'NDVI ottenuto dall'elaborazione delle immagini satellitari.

10.8 Le analisi geostatistiche

Per le analisi geostatistiche si è ricorso all'utilizzo del software ISATIS v5.0.5 (Geovariances).

10.9 La Land Suitability per il mais

Al fine di pervenire ad una stima dell'attitudine dei suoli alla coltivazione del mais mediante l'applicazione di un metodo classico di valutazione (approccio empirico, qualitativo), nell'areale di studio si è ricorso all'utilizzo di un modello messo a punto dall'ERSAL negli anni '80. Secondo tale modello le caratteristiche e le qualità del territorio considerate ai fini della valutazione sono: *nutrizione idrica, drenaggio, profondità del suolo, scheletro, tessitura, reazione, saturazione*.

Non vengono considerati fattori importanti come ad esempio la concentrazione di macroelementi (azoto, fosforo, potassio) nel suolo, perché si ritiene che questi siano parametri troppo variabili nel tempo (concimazioni annuali) per essere considerati e comunque al cui deficit si può facilmente rimediare. Anche i fattori climatici non vengono considerati, la motivazione risiede nel fatto che trattandosi di un'area non molto vasta e pressoché pianeggiante, il loro inserimento nel modello avrebbe senz'altro appesantito le procedure di valutazione senza cambiare i risultati.

Riguardo la *nutrizione idrica*, si fa riferimento ad un modello sulla produttività messo a punto dall'Istituto Sperimentale per la nutrizione delle Piante (Tombesi, 1982); che interpreta l'andamento della produzione di biomassa al variare della disponibilità idrica. L'equazione è la seguente:

$$A / 1 + re^{-mx}$$

dove A , r ed m sono costanti mentre x rappresenta la quantità d'acqua che giunge alla coltura espressa in percentuale della richiesta idrica totale. Si fa quindi riferimento alle esigenze idriche del mais (evapotraspirazione potenziale) mettendole in relazione con il deficit idrico di ogni pedon, derivato dalla carta del deficit idrico teorico, supponendo assenza di irrigazione per esaltare le differenze, in termini di comportamento idrologico, tra suoli diversi.

Per quanto riguarda il *drenaggio*, si fa riferimento ad una serie (unici dati disponibili) di classi di drenaggio, ad ognuna delle quali corrisponde un coefficiente:

rapido	0,9
buono	1
mediocre	0,9
lento	0,75
molto lento	0,6
impedito	0,2

Per il parametro *scheletro*, si fa riferimento ad una formula proposta da Tombesi, *et. al.* 1995. Essa prevede una relazione lineare tra produttività e contenuto in scheletro. In corrispondenza del massimo contenuto in scheletro il valore del coefficiente associato tocca un minimo di 0,4; per terreni sprovvisti di scheletro il coefficiente è pari ad 1.

La *tessitura* entra nel modello definita in classi, cosicchè ad ogni classe viene associato un coefficiente:

sabbiosa	0,7
limosa	0,7
sabbioso-franca	0,75
franco-limosa-argillosa	0,75
franco-sabbiosa	0,85
franco-argillosa	0,8
franco-sabbiosa-argillosa	0,75
argilloso-lomosa	0,7
franca	1
argilloso-sabbiosa	0,7
franco-limosa	0,9
argillosa	0,6

Riguardo la *reazione del suolo*, viene associato il coefficiente 1 ai suoli aventi un pH in acqua ottimale per la coltivazione del mais e cioè variabile tra 6,0 e 7,5. Per i suoli aventi valori di pH maggiori o minori viene applicata un'equazione proposta da Tombesi et. al. (1985) che prevede una relazione non lineare fra pH e produzione:

$$1,05/1+be^{-cp}$$

dove b e c sono costanti mentre p è il rapporto fra il pH del suolo e quello ottimale per il mais.

Per il fattore *saturation* il modello utilizza un'equazione lineare secondo la quale a tasso di saturazione in basi nullo corrisponde un coefficiente di 0,4 mentre il coefficiente sale fino ad 1 per TSB uguali o superiori a 75.

La *profondità* del suolo viene considerata sia in via separata che contemporaneamente agli altri parametri. Secondo il modello la produttività di una coltura può essere attribuita per due terzi agli orizzonti di superficie (0-40cm) e per un terzo agli orizzonti profondi (40-100cm) avendo considerato l'approfondimento radicale massimo pari a 100cm. I coefficienti relativi agli altri parametri considerati (tessitura, scheletro, reazione, etc.) vengono calcolati e poi moltiplicati per 2/3 oppure 1/3 a seconda si riferiscano ad orizzonti di superficie o profondi. Il coefficiente risultante è la somma dei valori ottenuti. Per suoli con spessore inferiore ai 40cm è prevista l'applicazione di un coefficiente variabile tra 1 (spessore minimo 40cm) e 0,3 (spessore nullo).

Per ognuna delle osservazioni viene infine calcolata la media aritmetica dei 6 coefficienti, ottenuti come visto in precedenza. La media viene poi moltiplicata per il coefficiente relativo alla profondità. Il valore finale ottenuto (indice di potenzialità produttiva di un suolo per il mais) viene raggruppato in classi:

Indice	Potenzialità produttiva
0,85-1	Ottima
0,70-0,85	Buona
0,55-0,70	Discreta
0,40-0,55	Scarsa
0,25-0,40	Molto scarsa

11. Risultati e Discussione

11.1 Premessa

E' stato già detto che l' obiettivo di questa tesi è quello di effettuare, nell'areale di studio, una valutazione quantitativa delle proprietà dei suoli e della loro attitudine alla coltivazione del mais. Tale obiettivo vuole essere raggiunto applicando dei modelli fisicamente basati in grado di simulare i processi idrologici che avvengono nei suoli e la crescita delle colture (nel caso specifico: mais).

Questo capitolo dei "Risultati e Discussione" viene così articolato in tre grandi tematiche:

- 1) La misura dei parametri edafici: l'applicazione dei modelli di simulazione a scala puntuale e territoriale può avvenire solo previa la misurazione o la stima delle variabili o dei parametri di input (ad es.: tessitura, spessore e proprietà idrauliche degli orizzonti) dei modelli, necessari alla risoluzione degli algoritmi in essi implementati. Quindi la misura dei parametri edafici è la prima problematica che verrà affrontata in questo capitolo;
- 2) Analisi spaziale dei parametri edafici (approcci geostatistico e deterministico): nelle applicazioni territoriali è necessario conoscere anche la struttura spaziale delle suddette variabili (oppure, in alternativa, conoscere la struttura spaziale dei dati di output dei modelli: ad es.:bilanci idrologici, produzione di biomassa, etc.). Per tali motivi nel presente lavoro si è effettuata un'indagine sulla distribuzione spaziale delle proprietà chimiche e chimico-fisiche dei suoli presenti nell'areale di studio ed in particolare su alcune di quelle proprietà e di quei parametri idraulici fondamentali in quanto dati di input dei modelli.
- 3) Le applicazioni modellistiche: La conoscenza dei parametri edafici (input dei modelli) e della loro distribuzione spaziale rappresenta la base su cui applicare le procedure di simulazione modellistica. Quindi l'ultima parte di questo capitolo tratterà della scelta e dell'implementazione delle simulazioni modellistiche, le quali dovranno adeguarsi alla qualità e quantità della banca dati edafica prodotta.

Più nello specifico, la trattazione dei risultati sarà articolata nei seguenti punti:

Le tematiche affrontate	Le fasi della ricerca
La misura dei parametri edafici:	I dati edafici; I dati territoriali;
Analisi spaziale dei parametri edafici	<ul style="list-style-type: none"> (i) l'approccio classico (statistica descrittiva); (ii) l'approccio deterministico continuo; (iii) l'approccio geostatistico; (iv) valutazione sui risultati degli approcci di distribuzione spaziale prodotti (geostatistico e deterministico continuo);
Le applicazioni territoriali	Le applicazioni modellistiche; l'approccio classico alla Land Evaluation; i risultati a confronto;

11.2 La misura dei parametri edafici

11.2.1 I dati edafici

In figura 11.1 è possibile osservare l'ubicazione dei 100 siti ove sono stati campionati i suoli. Il campionamento è stato definito sulla base delle conoscenze pregresse del sito e mediante l'applicazione di tecniche di simulazione spaziale stocastica, così come riportato nei materiali e metodi.

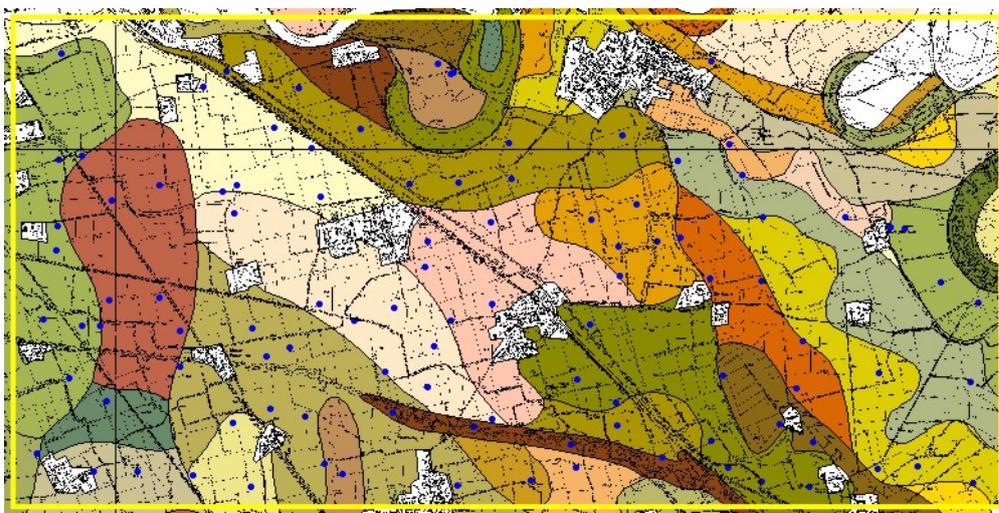


Fig. (11.1): ubicazione dei punti di campionamento.

Tutti i dati morfologici, chimici e fisici ottenuti dai rilevamenti di campo e le successive analisi di laboratorio sono stati organizzati in una piccola banca dati (gestita in Excel). Seguono degli esempi estratti da questa banca dati.

11.2.1.1 I dati morfologici

I dati morfologici sono stati riportati in schede descrittive di profili e trivellate. In figura 11.2 è riportata una sezione della banca dati.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Località	n° campione	profilo	CoordX UTM	CoordY UTM	Tipo	orizzonte-St	profondità	Aspetti Superficiali	Uso del suolo	Umidità	Colore matr. umido
2	LOD	N	101102	547066,3875	5013380,6422	T	Stazione					
3	LOD	356	101102			T	Ap	0-40			2	10YR 4/3
4	LOD	357	101102			T	AC	40/50			2	10YR 4/4
5	LOD	N	101102			T	C	50-105			2	10YR 4/6
6	LOD	N	101102			T	2C	105-120			2	2,5Y 5/4
7	LOD	N	103	544006,4579	5013638,7871	T	Stazione			Mais		
8	LOD	358	103			T	Ap	0-40			2	10YR 4/3
9	LOD	359	103			T	B1	40-70			2	10YR 4/6
10	LOD	N	103			T	B2	70-110			2	7,5YR 4/4
11	LOD	N	104	542797,5497	5014105,9384	T	Stazione			Mais		
12	LOD	360	104			T	Ap	0-40			2	2,5Y 4/3
13	LOD	361	104			T	B	40-85			2	2,5Y 5/4
14	LOD	N	104			T	C	85-105			2	2,5Y 5/2
15	LOD	N	105	544622,1842	5014162,0231	T	Stazione			Mais		
16	LOD	362	105			T	Ap	0-40			2	10YR 4/3
17	LOD	363	105			T	Bt	40-100			2	10YR 5/6
18	LOD	N	106	546051,4449	5013567,7432	T	Stazione		Arato			
19	LOD	364	106			T	Ap	0-45			2	10YR 4/3
20	LOD	365	106			T	B1	45-100			2	7,5YR 4/4
21	LOD	N	106			T	B2	100-115			2	7,5YR 4/6
22	LOD	N	107	546743,7914	5012312,2438	T	Stazione			Mais		
23	LOD	366	107			T	Ap1	0-23			2	10YR 4/3
24	LOD	N	107			T	Ap2	23-42			2	10YR 4/3
25	LOD	367	107			T	Bw(t)	42-70			2	10YR 4/4
26	LOD	N	107			T	C	70-114			2	10YR 5/3
27	LOD	N	108	549453,6666	5011607,7008	T	Stazione			Mais		
28	LOD	368	108			T	Ap	0-28			2	10YR 3,5/2
29	LOD	369	108			T	Bw	28-50			2	10YR 4,5/3
30	LOD	N	108			T	CB	50-75			2	10YR 5,5/2
31	LOD	N	108			T	2CB	75-83			2	10YR 5/3
32	LOD	N	109	547418,9479	5011685,2065	T	Stazione		Arato	Mais		
33	LOD	370	109			T	Ap1	0-22			2	10YR 4/3
34	LOD	N	109			T	Ap2	22-40			2	10YR 4/3
35	LOD	371	109			T	C/Bt	40-75			2	10 YR 4,5/4
36	LOD	N	109			T	C	75-110			2	10YR 4,5/4
37	LOD	N	110	545734,7715	5012780,0907	T	Stazione			Mais		
38	LOD	372	110			T	Ap	0-30			2	10YR 4/4

Fig.(11.2): I dati morfologici: un esempio.

11.2.1.2 I dati chimici e chimico-fisici

Si riporta in figura 11.3 un esempio dell'organizzazione dei dati chimici e chimico-fisici ottenuti dalle analisi effettuate sui campioni sciolti. Nel caso delle trivellate, le analisi sono state effettuate sui primi due orizzonti campionati mentre nel caso dei profili sono stati analizzati tutti gli orizzonti:

1	A	B	C	D	E	F	G	H	AT	AU	AV	AW	AX	AY
	Localita'	n' campione	profilo	CoordX UTM	CoordY UTM	Tipo	orizzonte-St	profondità	CO (gr/kg)	SO (gr/kg)	N tot (gr/kg)	C/N	Umi. s.t.q.(gr/kg)	Schel. > 2mm (%)
2	LOD	N	101102	547066,3875	5013380,6422	T	Stazione							
3	LOD	356	101102			T	Ap	0-40	10,23	17,64	1,37	7,47	148,7	0
4	LOD	357	101102			T	AC	40-50	8,35	14,40	1,16	7,20		
5	LOD	N	101102			T	C	50-105						
6	LOD	N	101102			T	2C	105-120						
7	LOD	N	103	544006,4579	5013638,7871	T	Stazione							
8	LOD	358	103			T	Ap	0-40	10,17	17,53	1,37	7,42	154,7	0
9	LOD	359	103			T	B1	40-70	5,09	8,78	0,88	5,78		
10	LOD	N	103			T	B2	70-110						
11	LOD	N	104	542797,5497	5014105,9384	T	Stazione							
12	LOD	360	104			T	Ap	0-40	11,70	20,16	1,53	7,64	177,5	0
13	LOD	361	104			T	B	40-85	8,34	14,38	1,16	7,19		
14	LOD	N	104			T	C	85-105						
15	LOD	N	105	544622,1842	5014162,0231	T	Stazione							
16	LOD	362	105			T	Ap	0-40	11,27	19,43	1,46	7,72	181,9	0
17	LOD	363	105			T	Bt	40-100	3,90	6,72	0,68	5,74		
18	LOD	N	106	546051,4449	5013567,7432	T	Stazione							
19	LOD	364	106			T	Ap	0-45	9,49	16,36	1,35	7,03		
20	LOD	365	106			T	B1	45-100	4,37	7,53	0,78	5,60		
21	LOD	N	106			T	B2	100-115						
22	LOD	N	107	546743,7914	5012312,2438	T	Stazione							
23	LOD	366	107			T	Ap1	0-23	8,72	15,03	1,14	7,65	129,8	1,5
24	LOD	N	107			T	Ap2	23-42						
25	LOD	367	107			T	Bw(t)	42-70	3,07	5,29	0,59	5,20		
26	LOD	N	107			T	C	70-114						
27	LOD	N	108	549453,6666	5011607,7008	T	Stazione							
28	LOD	368	108			T	Ap	0-28	25,34	43,69	2,16	11,73	217,9	0
29	LOD	369	108			T	Bw	28-50	3,00	5,17	0,67	4,48		
30	LOD	N	108			T	CB	50-75						
31	LOD	N	108			T	2CB	75-83						
32	LOD	N	109	547418,9479	5011685,2065	T	Stazione							
33	LOD	370	109			T	Ap1	0-22	9,67	16,66	1,33	7,29	132,9	0
34	LOD	N	109			T	Ap2	22-40						
35	LOD	371	109			T	C/Bt	40-75	1,42	2,45	0,47	3,02		
36	LOD	N	109			T	C	75-110						
37	LOD	N	110	545734,7715	5012780,0907	T	Stazione							
38	LOD	372	110			T	Ap	0-30	10,53	18,15	1,34	7,86	331,7	0,2

Fig.(11.3): I dati chimici e chimico-fisici: un esempio.

11.2.1.3 I dati idrologici

In figura 11.4 è riportato un esempio della banca dati delle proprietà idrauliche misurate in laboratorio. Le misurazioni sono state effettuate su circa 40 campioni indisturbati prelevati in superficie e sui campioni relativi agli orizzonti individuati nei profili.

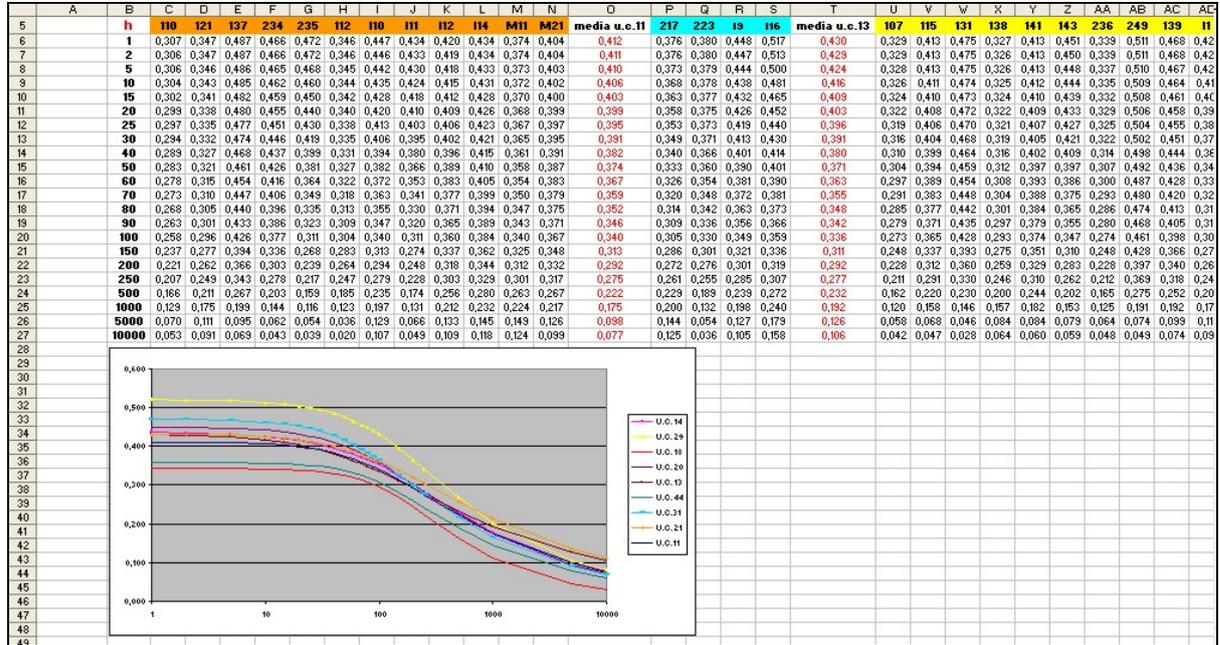


Fig.(11.4): I dati delle misure idrauliche di laboratorio: un esempio.

11.2.1.4 I dati penetrometrici

In figura 11.5 è riportato un esempio della organizzazione dei dati penetrometrici misurati in campo. Le misurazioni sono state effettuate in corrispondenza di ognuno dei siti campionati con trivellata (100 punti).

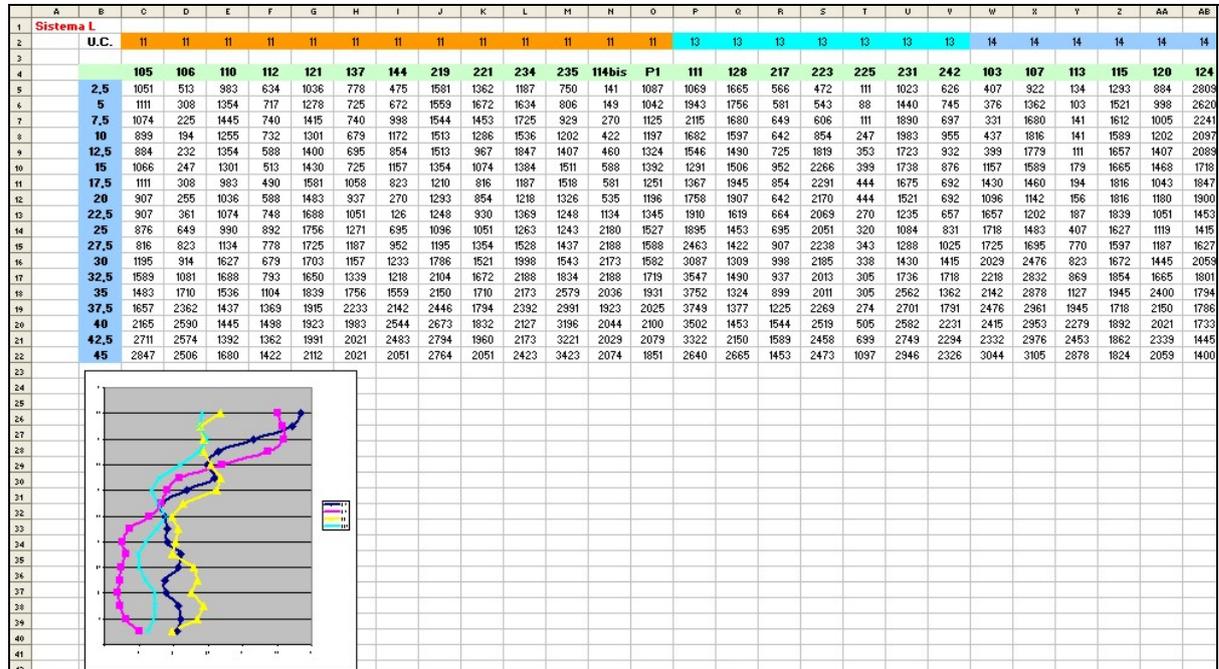


Fig. (11.5): I dati penetrometrici: un esempio.

11.2.2 I dati territoriali

Con l'obiettivo di studiare nell'areale di interesse la morfologia del territorio e verificare l'esistenza o meno di relazioni tra variabili ambientali continue (ad es. quota, pendenza, indice di curvatura, etc.) e variabili misurate a scala puntuale (ad es. tessitura, dati chimici, dati idrologici, etc.), è stato analizzato per verificarne l'accuratezza, un modello digitale del terreno prodotto dalla regione Lombardia (fig.11.6). A tal fine sono state scelte alcune aree campione nelle quali è stata valutata l'idoneità del DEM (prodotto dalla regione Lombardia con isoipse ottenute dalla CTR) per gli scopi di questo lavoro. In particolare è stato confrontato questo DEM con l'originale cartografia CTR 1:5000. In figura 11.7 si riportano, a titolo d'esempio, i risultati ottenuti dall'analisi effettuata in un'area campione caratteristica del territorio di studio, cioè l'area localizzata ad ovest e comprendente un paleoalveo delimitato e visibile anche sulla carta dei suoli del lodigiano prodotta dall'ERSAL. Qui sono state rilevate alcune incongruenze come quelle indicate dalle frecce nell'immagine. Le isoipse indicate costituiscono senz'altro degli artefatti, in quanto delimitanti punti quotati isolati e ricadenti su (o in prossimità di) manufatti di origine antropica come ad esempio incroci stradali, piazze, etc.

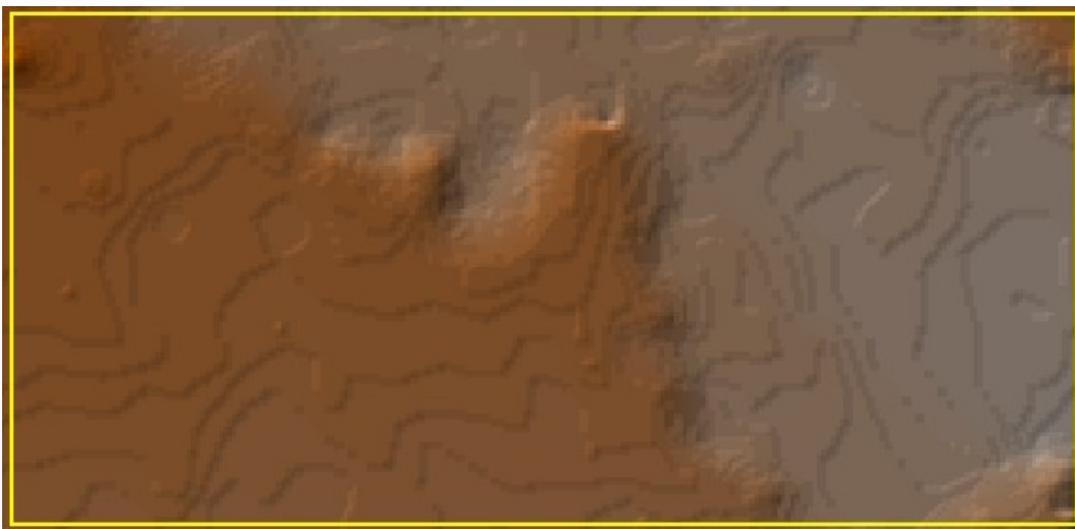


Fig. (11.6) Il DEM realizzato dalla regione Lombardia.

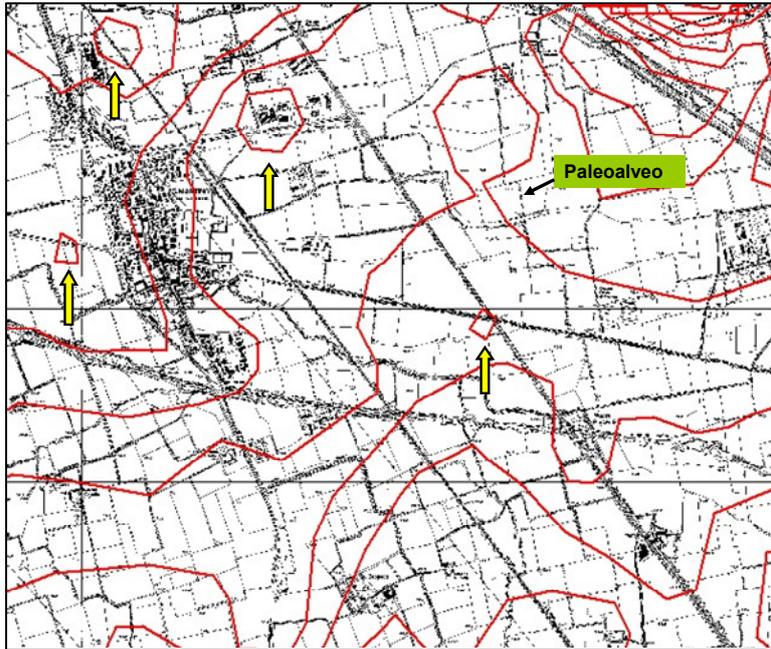


Fig.(11.7): sovrapposizione delle isoipse alla CTR 1:5000.

Alla luce dei risultati ottenuti da questa analisi e considerata la natura pressoché pianeggiante dell'area di studio, da cui l'esigenza di poter disporre di un modello digitale quanto più rappresentativo della reale morfologia del territorio, si è proceduto alla realizzazione di un secondo modello digitale del terreno mediante digitalizzazione e successiva interpolazione, di circa 1500 nuovi punti quotati selezionati dalla CTR 1:5000. La selezione è avvenuta scartando tutti i punti ricadenti in prossimità di o su manufatti (ad es. strade, canali, piazze, etc.). Inoltre si è scelto di estendere il modello oltre l'area di studio (passando da circa 20 a circa 96 Km²), per cogliere forme del territorio altrimenti non visibili, dalle quali si è ipotizzato potessero dipendere taluni processi attivi nell'areale di interesse. In figura 11.8 è possibile osservare il risultato ottenuto in seguito alla selezione dei suddetti punti.

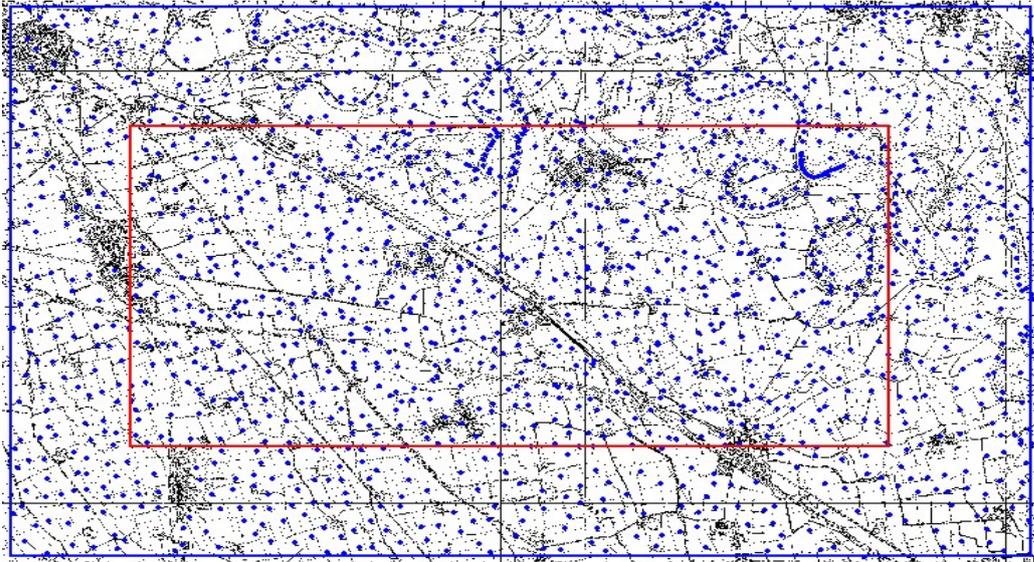


Fig. (11.8) La selezione dei punti quotati per la realizzazione del nuovo DEM.

Nelle figure 11.9 e 11.10 si osserva il nuovo DEM realizzato. In particolare in figura 11.10 è riportato un esempio delle fasi di elaborazione del modello mediante l'utilizzo del software SAGA (Böhner et. al., 2002).

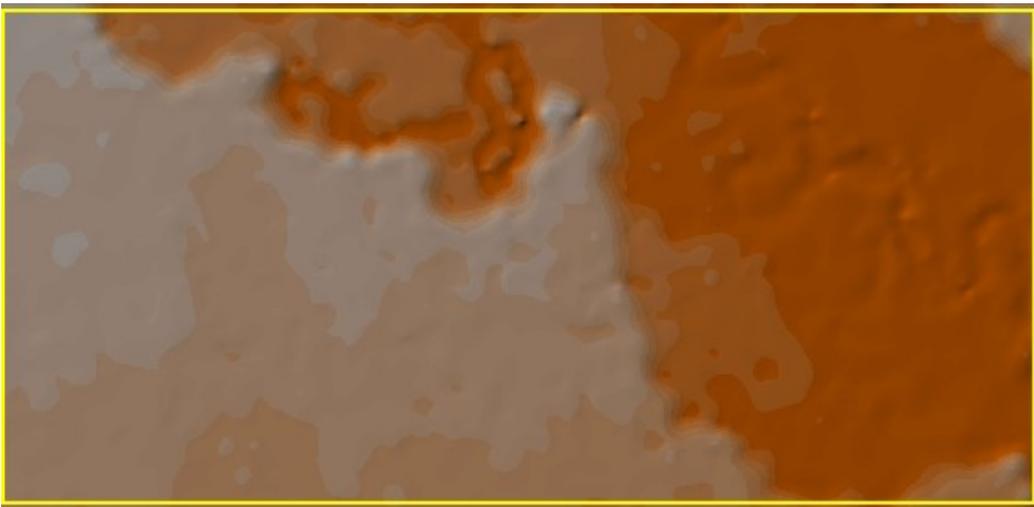


Fig. (11.9) Il nuovo modello digitale del terreno.

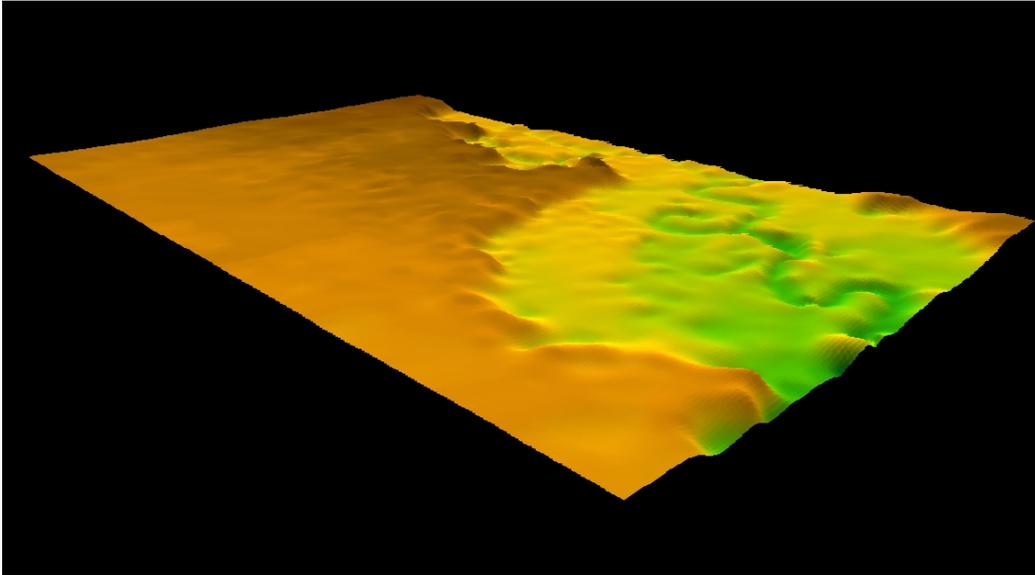


Fig. (11.10) L'elaborazione del DEM mediante il software SAGA.

Il modello digitale realizzato ha consentito di individuare, in una successiva fase di elaborazione dei dati, alcune interessanti correlazioni tra variabili continue ottenute dal DEM e variabili misurate a scala puntuale.

11.3 Analisi spaziale dei parametri edafici

Il fine ultimo di queste indagini è stato quello di identificare i caratteri distintivi più evidenti presenti nell'areale di studio, verificarne la coerenza con i dati riportati nella cartografia di base disponibile e descriverne, quando possibile, la struttura spaziale.

11.3.1 Approccio classico e pedopaesaggistico

Nei paragrafi che seguono vengono presentati i risultati di un'analisi descrittiva dell'areale di studio nel suo insieme, dei sistemi di paesaggio e delle unità di paesaggio in esso identificate.

11.3.1.1 Analisi descrittiva dell' areale nel suo insieme (approccio classico)

Di seguito vengono riassunti i risultati di un'analisi statistica classica descrittiva effettuata sulle misure chimico-fisiche ed idrauliche contenute nella banca dati realizzata.

Tabella (11.1): Analisi descrittiva dei dati chimico-fisici relativi all'intero areale (100 siti, orizzonte di superficie); CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min	Max	Dev.Std	CV%
argilla%	17,47	16,96	6,70	32,91	4,68	26,77
limo%	36,08	35,42	12,55	60,06	9,57	26,52
sabbia%	46,56	46,72	10,72	72,52	11,49	24,67
pH_H2O	6,54	6,50	4,83	7,93	0,69	10,53
pH_CaCl2	6,30	6,22	4,64	7,88	0,78	12,35
Cond. 1/5 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	115,36	97,50	31,50	303,00	58,61	50,81
CO (gr/kg)	12,68	11,42	2,65	41,86	6,15	48,46
N tot (gr/kg)	1,47	1,35	0,45	4,12	0,56	38,44
CN	8,51	8,42	4,29	15,25	1,15	13,50
Dens_app+	1,45	1,51	0,43	1,73	0,22	15,45
Ti (mg/kg)	1912,89	1915,35	518,76	3464,23	450,70	23,56
Ni (mg/kg)	67,22	66,12	45,61	110,49	12,87	19,15
Al (mg/kg)	24768,57	24942,62	15216,00	40605,58	4765,41	19,24
Mn (mg/kg)	460,32	450,36	232,94	774,24	120,99	26,28
Fe (mg/kg)	18104,88	17340,09	10865,31	28613,64	3622,12	20,01
Cr (mg/kg)	35,02	34,07	20,02	57,82	8,12	23,18
Mg (mg/kg)	3807,93	3158,92	1595,92	17251,00	2225,49	58,44
Ca (mg/kg)	3559,67	2254,55	1012,50	41314,74	5739,90	161,25
Zn (mg/kg)	29,66	26,60	11,59	199,09	19,70	66,41
Si (mg/kg)	592,90	567,07	316,89	1631,97	171,04	28,85

I dati tessiturali riportati in tabella 11.1 mostrano la natura tendenzialmente franca/franco-sabbiosa dei suoli presenti nell'areale di studio. E' possibile inoltre osservare una variabilità limitata in quasi tutte le proprietà misurate. La conducibilità elettrica (Cond. 1/5), il contenuto in carbonio organico(CO), la concentrazione in Mg, Ca e Zn, ad esempio, presentano coefficienti di variazione (CV%) più elevati. Facendo intravedere la presenza di suoli geochimicamente molto diversi e quindi anche ambienti pedogenetici molto diversi.

Gli istogrammi delle classi tessiturali riportate in figura 11.11 evidenziano una distribuzione pressoché normale della variabili sabbia, limo e argilla. La sabbia, tuttavia, sembrerebbe presentare una distribuzione bimodale dei dati; anche questo comportamento tende ad indicare la presenza di ambienti pedogenetici differenti.

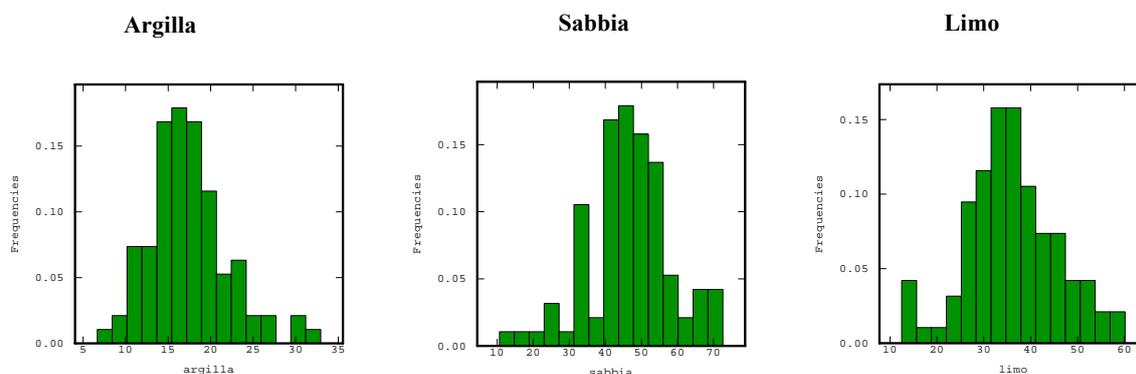


Fig.: (11.11): Distribuzione delle frequenze di Argilla, Sabbia e Limo. Dati relativi all'intero areale.

Tabella (11.2): analisi descrittiva dei dati idrologici relativi all'intero areale (40 siti, orizzonte di superficie); CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev.Std	CV%
Dens_app (g/cm ³)	1,52	1,53	1,07	1,85	0,16	10,25
θs (cm ³ /cm ³)	0,43	0,43	0,31	0,64	0,06	14,38
alfa	0,02	0,01	0,00	0,18	0,03	155,49
n	1,38	1,33	1,17	1,96	0,15	11,18
m	0,28	0,25	0,15	0,72	0,09	33,68

In tabella (11.2) sono riportati degli indici statistici descrittivi relativi a parametri fisici quali i parametri della curva di ritenzione (modello van Genuchten) ottenuti dalle analisi degli orizzonti di superficie campionati in 40 siti. I valori medi di densità apparente, di θ_s ed “n” (parametro maggiormente correlato alla struttura) sono coerenti con i risultati ottenuti dalle analisi sulla tessitura e cioè che ci si trova in presenza di suoli tendenzialmente franchi/franco-sabbiosi. Anche in questo caso come nei casi precedenti, è possibile osservare un grado di variabilità piuttosto basso dei valori osservati (CV%). Spicca tuttavia il parametro “alfa” con un coefficiente di variazione pari a 155,49. Quest’ultimo risultato è senz’altro dovuto al fatto che il parametro alfa, nelle procedure di ottimizzazione, è il parametro che presenta maggiore indeterminatezza, dovuta al ridotto numero di punti di misura nei dintorni del valore di potenziale corrispondente all’entrata d’aria nel suolo (*air bubbling pressure*). Il parametro alfa è quindi da definirsi empirico più che fisico, a differenza degli altri.

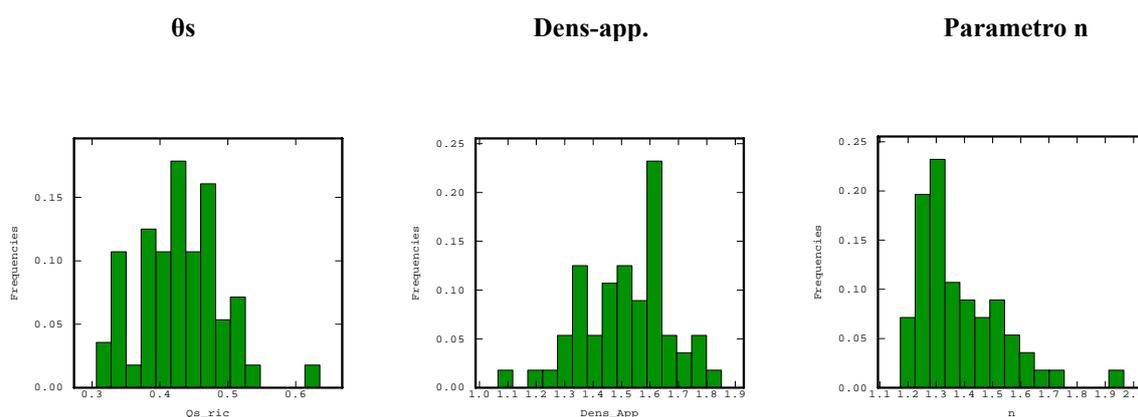


Fig. 11.12: Distribuzione di frequenza di theta-s, densità apparente e parametro n . Dati relativi all'intero areale

La distribuzione bimodale e multimodale, osservabile in particolare sugli istogrammi della densità apparente e del parametro n degli orizzonti superficiali (fig. 11.12), conferma una variabilità pedogenetica in cui l'azione dell'uomo svolge un contributo importante influenzando con le lavorazioni la struttura del suolo. Il parametro θ_s , rispetto agli altri è quello che presenta una maggior variabilità.

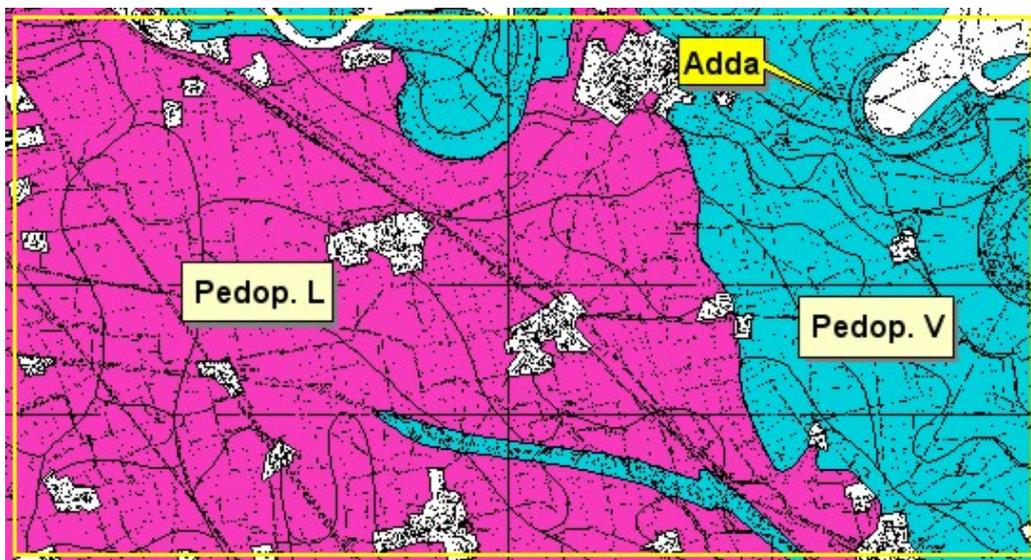
In tabella 11.3 sono riportati i dati penetrometrici relativi a 4 livelli di profondità. Appare chiara, osservando i coefficienti di variazione (CV%), la maggiore variabilità dei dati nei primi 20 cm di suolo. Questo risultato è da relazionare all'effetto delle lavorazioni superficiali in un areale con una gestione agronomica relativamente omogenea. La diminuzione di variabilità alla profondità di 40cm è senz'altro dovuta alla presenza di una suola d'aratura.

Tabella (11.3): analisi descrittiva dei dati penetrometrici relativi all'intero areale (100 siti);
CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev.Std	CV%
Pen15 (kPa/cm2)	1088,1	1086,0	161,3	2315,9	486,8	44,7
Pen20 (kPa/cm2)	1076,6	1051,6	174,0	2352,7	478,1	44,4
Pen40 (kPa/cm2)	2107,7	2031,3	492,3	4484,3	658,1	31,2
Pen55 (kPa/cm2)	2271,5	2120,8	1043,0	4530,3	771,1	33,9

11.3.1.2 Analisi descrittiva organizzata per sistemi di paesaggio.

E' stata effettuata un'indagine sui due grandi sistemi di paesaggio nell'area di indagine; il sistema dei terrazzi alluvionali antichi (pedopaesaggio L) ed il sistema dei terrazzi alluvionali recenti (pedopaesaggio V) Di seguito è riportata un'analisi descrittiva di alcuni suoli indagati nei due sistemi.



I due pedoambienti. *Ped. L* : il livello dei terrazzi alluvionali antichi.
Ped. V: il livello dei terrazzi alluvionali recenti.

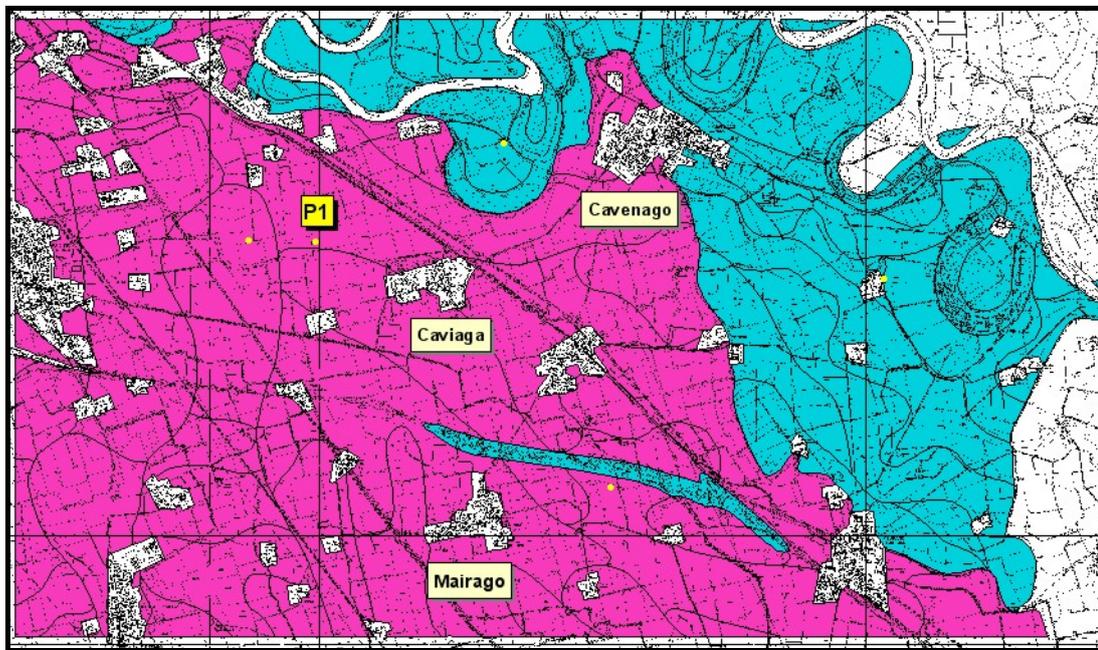
11.3.1.2 a Approccio Pedopaesaggistico

All'interno dei due sistemi di paesaggio sono stati studiati 5 profili. Di seguito vengono riportati, a titolo d'esempio, la morfologia e le principali caratteristiche chimiche e fisiche di un profilo di riferimento per ognuno dei due sistemi.

Un suolo rappresentativo del livello fondamentale della pianura (Pianura alluvionale Würmiana -ERSAL-)

PROFILO 1

Località: Cascina Casoni di Caviaga (Az.Elias)



Il profilo n°1 ricade nell'unità di paesaggio (Carta dei Suoli del Lodigiano-Ersal) LF2, caratterizzata da superficie modale stabile, pianeggiante o leggermente ondulata, intermedia tra le aree più rilevate (dossi) e depresse (conche e paleoalvei). Trattasi di sedimenti fluviali fini, solitamente privi di pietrosità in superficie e di scheletro nel suolo.

Località: Cascina Casoni di Caviaga
Comune: Caviaga
Provincia: Lodi
UTM: 32T0543947/5013673
Uso del suolo: coltivazione da foraggio
Pendenza: pianura
Quota: 72 m s.l.m.
Origine morfologia: depositi di piena a bassa ed alta energia
Roccia: sedimenti fini
Forma: terrazzo fluviale a probabile superficie ondulata, sottoposta a livellamento artificiale
Pietrosità: presenza di ghiaia di dimensioni medie (7,5-25mm)
Rocciosità: assente
Substrato: sedimenti sabbiosi
Vegetazione: Mais



(Profilo 1)

Orizzonte	Profondità	Descrizione	
A_p	0-33 cm	Colore 2,5Y 4/4 (localizzazione sulla massa); umido; percentuale volume scheletro <1%, ghiaia media; rivestimenti assenti; aggregazione di tipo poliedrico subangolare di dimensioni media con grado di aggregazione molto debole; friabile da umido; concrezioni assenti; pori comuni di dimensioni da medie (2-5 mm) a grandi (5-10 mm); effervescenza assente; screziature 0%; radici poche, erbacee con andamento casuale di dimensioni fini (1-2mm); attività biologica da formiche abbastanza evidente. Limite inferiore chiaro, ondulato.	
BA	33-50 cm	Colore 10YR 5/6 (localizzazione sulla massa); umido; rivestimenti di limo e argilla occasionali sulle facce della struttura prismatica e rivestimenti di argilla rari sulle facce degli aggregati; aggregazione di tipo poliedrico subangolare di dimensioni medie con grado di aggregazione debole, riunita in strutture prismatiche con grado di aggregazione debole; moderatamente resistente da umido; concrezioni assenti; effervescenza assente; screziature assenti. Limite inferiore diffuso.	
B_t	50-90/100 cm	Colore 10YR 4/6 (localizzazione sulla massa); umido; rivestimenti di limo, argilla e sabbia sulle facce degli aggregati; aggregazione di tipo prismatica con grado di aggregazione moderato, moderatamente resistenti da umidi; concrezioni assenti; pori comuni di dimensioni fini (1-2mm); effervescenza assente; screziature assenti; radici erbacee scarse di dimensioni molto fini; attività biologica da formiche, scarsa. Limite inferiore chiaro, ondulato.	
2B_{tb}	90-100/110-125 cm	Colore 7,5 YR 4/6 (localizzazione sulla massa); umido; percentuale volume scheletro <1% ghiaie fini arrotondate; rivestimenti di argilla sulle facce dei grani e a ponte fra i grani, discontinui di colore 7,5 YR 3/3, rivestimenti di Fe e Mn occasionali; aggregazione di tipo prismatico di dimensioni fini, friabile da umido; concrezioni assenti; effervescenza assente; attività biologica: tane di lombrico rivestite con rivestimenti provenienti dall'orizzonte superiore. Limite inferiore graduale, ondulato.	
2CB_b	110/125-180cm	Colore 7,5YR 4/4 (localizzazione sulla massa); umido; percentuale volume scheletro 0%; rivestimenti sui grani e a ponte fra i grani, che diminuiscono in profondità; aggregazione assente, materiale non strutturato, sciolto, costituito da lenti sabbiose con ghiaia fine e leggera cementazione da ossidi; molto friabile da umido; concrezioni assenti; effervescenza assente; screziature assenti;	

Note generali (P1)

-In Ap presenza di piccoli frammenti di mattoni

-In Bt presenza di frammenti di carbone non rielaborati

-In superficie, croste sedimentarie di circa 5mm di spessore nelle interfile e croste strutturali sulle file

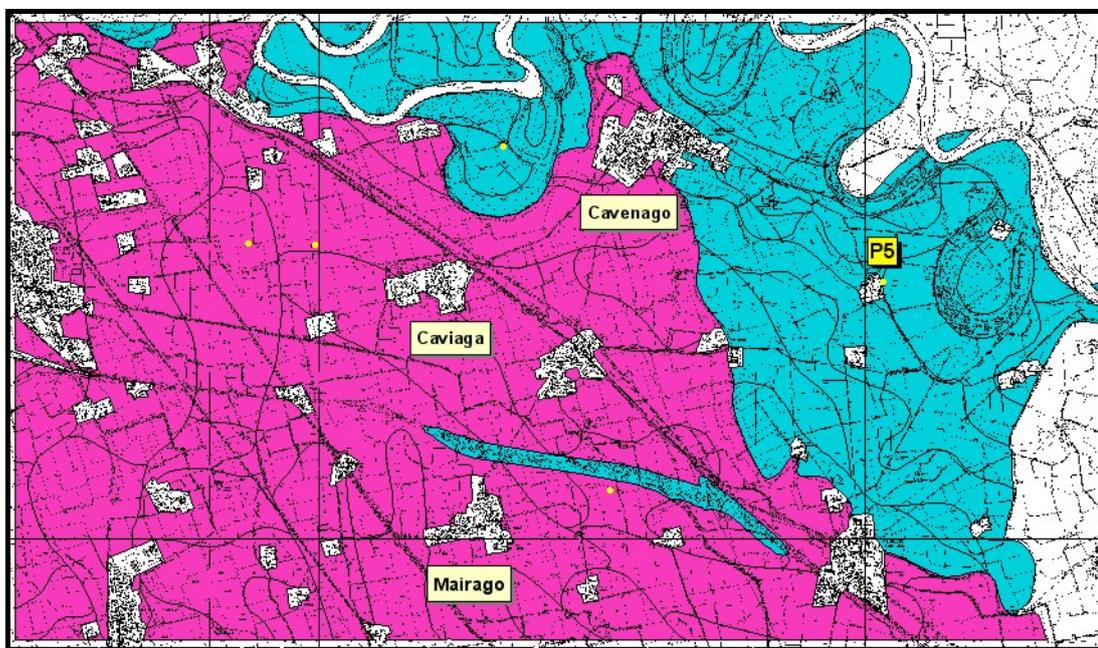
Orizzonte		Ap ₁	BA	Bt	2Btb	2CBb
<i>Densità apparente</i>	g/dm ³	1,52	nd	nd	nd	nd
<i>Scheletro (> 2,0 mm)</i>	%	<1	nd	nd	<1	0
<i>Sabbia (2,0-0,2 mm)</i>	%	70,0	55,6	45,1	49,7	77,1
<i>Limo (0.2-0.02 mm)</i>	%	22,2	28,3	30,0	23,7	3,1
<i>Argilla (< 0.02 mm)</i>	%	7,7	16,0	24,7	26,5	19,7
<i>C organico</i>	g/kg	10,73	3,23	2,01	1,37	1,26
<i>Sostanza organica</i>	g/kg	18,50	5,57	3,47	2,35	2,18
<i>N-Kjeldhal</i>	g/kg	1,22	0,52	0,44	0,38	0,38
<i>C/N</i>		8,8	6,1	4,5	3,5	3,3
<i>pH CaCl₂ (0,02 N)</i>		5,58	6,23	6,48	6,70	6,76
<i>pH H₂O</i>		5,90	6,27	6,53	6,72	6,85
<i>Conducibilità</i>	μS/cm	100,3	85,50	74,70	78,80	95,50
<i>Cu (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd
<i>Ti (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	1866	2335	2261	2800	1515
<i>Ni (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	62	67	87	110	86
<i>Al (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	25832	22481	37311	38863	36494
<i>Mn (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	795	927	746	754	688
<i>Fe (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	14686	19263	29795	32452	21621
<i>Cr (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	50	43	58	62	36
<i>Mg (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	3634	3274	4861	4932	2568
<i>Na (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd
<i>Ca (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	2457	2142	2915	3077	1129
<i>Zn (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	34	29	35	38	11
<i>K (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	nd	nd	nd	nd	nd
<i>Si (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	638	383	457	713	506

Analisi chimiche e chimico-fisiche relative al profilo 1 (Cascina Casoni di Caviaga – Caviaga). Abbrev.: nd= non determinato.

Un suolo rappresentativo della pianura alluvionale recente

PROFILO 5

Località: Cascina delle Donne (Cavenago d'Adda)



Il profilo n°5 ricade nell'unità di paesaggio (Carta dei Suoli del Lodigiano-Ersal) VA8, caratterizzata da piane alluvionali inondabili con dinamica prevalentemente deposizionale costituite da sedimenti recenti o attuali. Trattasi del fondovalle del fiume Adda ad alto rischio di inondazione; i depositi ed i substrati variano da limosi a sabbiosi. I suoli presentano leggere o spiccate evidenze di idromorfia, legate alla presenza di una falda persistente moderatamente profonda o profonda .

Località: Cascina delle Donne
Comune: Cavenago d'Adda
Provincia: Lodi
UTM: 32T0549151/5013330
Uso del suolo: coltura da foraggio
Pendenza: pianura
Quota: 55 m s.l.m.
Origine morfologia: depositi fluviali
Rocce: depositi limosi e sabbiosi
Pietrosità: 3%
Rocciosità: assente
Substrato: sedimenti sabbiosi e limosi
Vegetazione: Mais



(Profilo 5)

Orizzonte	Profondità	Descrizione	
A _{p1}	0-30 cm	Colore 10Y 3/2 (localizzazione sulla massa); umido; percentuale volume scheletro 10%, minuto e arrotondato; rivestimenti assenti; aggregazione di tipo poliedrico angolare di dimensione grossolana con grado di aggregazione debole; friabile da umido; concrezioni assenti; pori pochi di dimensioni fini (1-2 mm) e comuni di dimensioni molto fini (< 1mm); effervescenza assente; screziature 0%; drenaggio lento; radici scarse di dimensioni da molto fini (< 1mm) a fini (1-2mm). Limite inferiore chiaro, lineare.	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 A _{n1} A _{n2} C _g
A _{p2}	30-45 cm	Colore 3,5Y 4/2 (localizzazione sulla massa); umido; percentuale volume scheletro 10%, minuto di tipo piatto e arrotondato; rivestimenti assenti; aggregazione di tipo poliedrico angolare di dimensioni medie e grossolane con grado di aggregazione moderata; resistente da umido; concrezioni poche (<2%), di tipo Fe-Mn, soffici e contorno netto; pori pochi di dimensioni molto fini (<1 mm) e medie (2-5mm); effervescenza molto debole; screziature 5%, evidenti, di dimensioni da 2 a 5 mm e colore 7,5YR 4/4, drenaggio lento; radici scarse di dimensioni fini. Limite inferiore abrupto, lineare.	
C _g	45-83+ cm	Colore 2,5Y 3/2 (localizzazione sulla massa); umido; percentuale volume scheletro 0%; rivestimenti assenti; aggregazione di tipo massiva; presenza di facce di pressione comuni di dimensioni ≥ 1cm; concrezioni assenti; pori pochi di dimensioni da molto fini (< 1mm) a fini (1-2mm); effervescenza assente; screziature 3%, evidenti, 5-15mm dal colore 7,5YR 4/4; drenaggio impedito; radici assenti.	

Note generali (P5)

- Presenza di frammenti di mattoni fino a 35cm di profondità
- Tasca di ciottoli sopra i 45cm
- In Ap2 e Cg presenza di carboni
- In Cg presenza di materia organica molto frequente
- Il Cg potrebbe essere interpretato come Bg
- Presenza di falda a circa 90cm

Orizzonte		Ap₁	Ap₂	Cg
<i>Densità apparente</i>	g/dm ³	nd	nd	nd
<i>Scheletro (> 2,00 mm)</i>	%	10	10	0
<i>Sabbia (2,0-0,2 mm)</i>	%	64,4	59,0	48,2
<i>Limo (0,2-0,02 mm)</i>	%	26,8	30,7	39,5
<i>Argilla (< 0.02 mm)</i>	%	8,6	10,1	12,1
<i>C organico</i>	g/kg	20,16	12,88	24,10
<i>Sostanza organica</i>	g/kg	34,75	22,20	41,55
<i>N-Kjeldhal</i>	g/kg	2,28	1,47	2,25
<i>C/N</i>		8,8	8,7	10,6
<i>pH CaCl₂ (0,02 N)</i>		7,41	7,72	7,70
<i>pH H₂O</i>		7,40	7,40	7,80
<i>Conducibilità</i>	μS/cm	169	167	253
<i>Cu (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	nd	nd	Nd
<i>Ti (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	1667	1229	1079
<i>Ni (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	84	67	80
<i>Al (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	27769	33647	39026
<i>Mn (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	509	433	235
<i>Fe (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	21698	27790	20535
<i>Cr (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	55	56	46
<i>Mg (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	3773	5554	7888
<i>Na (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	nd	nd	nd
<i>Ca (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	4865	3994	8379
<i>Zn (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	36	24	16
<i>K (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	nd	nd	nd
<i>Si (HNO₃/HCl)</i>	mg/kg	546	351	388

Analisi chimiche e chimico-fisiche relative al profilo 5 (Cascina delle Donne – Cavenago d'Adda). Abbrev.: nd= non determinato

Queste indagini esemplificative hanno confermato la presenza di due o più differenti pedoambienti, tra l'altro già documentati nella cartografia di base.

Appare infatti evidente, osservando i dati morfologici, chimici e fisico-chimici riportati nelle precedenti schede descrittive, la marcata differenza tra i profili 1 e 5, indicante i due diversi ambienti pedogenetici. In particolare il profilo (1) del livello fondamentale descrive un suolo profondo, moderatamente strutturato, con colore della matrice che varia da bruno scuro (munsell umido: 7.5 YR 4/4) a bruno giallastro scuro (munsell umido 10 YR 4/6:); e la reazione tende all'acidità. Questo suolo ha orizzonti Bt ed ha sempre un buon sviluppo pedogenetico.

Il profilo 5 evidenzia un suolo molto meno profondo e pedogeneticamente meno sviluppato rispetto al precedente (orizzonte C a 45 cm), il colore della matrice varia da bruno grigiastro molto scuro (munsell umido: 10YR 3/2) a bruno grigiastro scuro (munsell umido: 3.5 Y 4/2), la tessitura evidenzia un minor contenuto in sabbia e la reazione tende alla neutralità. Il profilo 5 è inoltre caratterizzato da segni di idromorfia e dalla presenza di una falda superficiale a circa 90cm di profondità.

11.3.1.2.b Approccio classico

Allo scopo di valutare la variabilità spaziale dei suoli nelle unità cartografiche e tipologiche della Carta dei suoli del Lodigiano è stata indagata la statistica descrittiva relativa ai dati ottenuti dai 100 punti campionati per l'analisi della variabilità (i) nei due sistemi di paesaggio e (ii) in alcune unità cartografiche e tipologiche.

Di seguito si riportano i risultati di un'indagine statistica effettuata sui dati suddivisi nei due principali sistemi di paesaggio. In tabella 11.4 sono riportate le statistiche descrittive dei dati chimici e chimico-fisici relativi al pedopaesaggio *L*. I dati riportati in tabella 11.5 si riferiscono invece al pedopaesaggio *V*.

Tabella (11.4): analisi descrittiva dei dati chimico-fisici relativi al pedopaesaggio *L*; CV = Dev.Std/Media

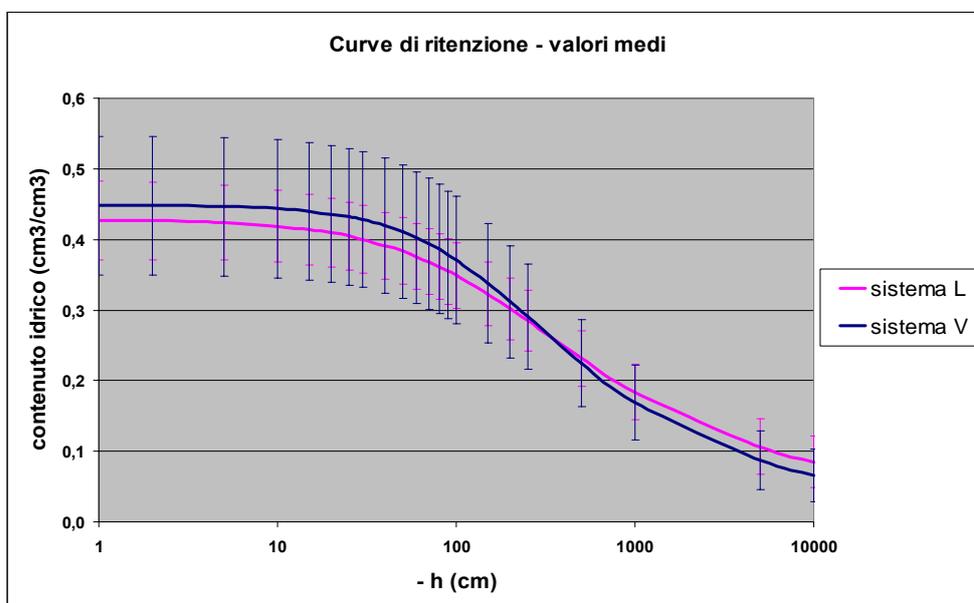
Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev_std	CV%
argilla%	16,8	16,8	9,0	30,1	3,7	21,9
limo%	36,7	35,7	12,6	60,1	9,0	24,5
sabbia%	46,6	46,8	18,4	72,5	10,3	22,0
pH H2O	6,3	6,3	4,8	7,6	0,6	9,0
pH CaCl2	6,0	6,2	4,6	7,3	0,6	10,6
Cond. 1/5 (µS/cm)	101,6	92,0	31,5	303,0	50,9	50,1
CO (gr/kg)	11,8	10,6	2,6	41,9	6,0	50,7
N tot (gr/kg)	1,4	1,3	0,5	4,1	0,5	38,5
C/N	8,5	8,4	4,3	15,2	1,2	14,1
Ti (mg/kg)	1994,2	1974,8	1312,9	3464,2	394,9	19,8
Ni (mg/kg)	63,0	63,2	45,6	102,6	10,2	16,1
Al (mg/kg)	23872,9	23677,7	15216,0	33853,7	3787,0	15,9
Mn (mg/kg)	452,0	443,2	232,9	795,4	119,9	26,5
Fe (mg/kg)	16940,5	16298,0	10865,3	28325,2	2753,6	16,3
Cr (mg/kg)	33,1	33,1	20,0	50,9	6,4	19,3
Mg (mg/kg)	2985,6	2959,1	1595,9	5378,0	583,5	19,5
Ca (mg/kg)	2058,6	1931,6	1012,5	3197,6	575,6	28,0
Zn (mg/kg)	27,4	25,2	11,6	51,7	9,5	34,8
Si (mg/kg)	587,7	561,3	316,9	1632,0	180,0	30,6

Tabella (11.5): analisi descrittiva dei dati chimico-fisici relativi al pedopaesaggio V; CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev_std	CV%
argilla%	19,3	19,8	6,7	32,9	6,4	33,1
limo%	33,9	32,7	13,7	56,4	11,1	32,7
sabbia%	46,8	46,7	10,7	69,9	14,7	31,4
pH H2O	7,0	7,2	5,7	7,9	0,7	9,4
pH CaCl2	6,9	7,1	5,7	7,9	0,7	10,6
Cond. 1/5 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	155,6	160,9	50,9	273,0	67,2	43,2
CO (gr/kg)	15,4	12,7	9,0	26,9	5,7	36,8
N tot (gr/kg)	1,8	1,6	1,0	3,3	0,6	31,4
C/N	8,7	8,6	7,3	11,7	0,9	10,5
Ti (mg/kg)	1731,1	1725,4	732,3	2529,7	459,6	26,5
Ni (mg/kg)	78,1	78,7	49,8	110,5	12,5	16,0
Al (mg/kg)	26392,5	26119,1	16352,5	40605,6	5769,8	21,9
Mn (mg/kg)	501,7	487,6	249,9	774,2	140,3	28,0
Fe (mg/kg)	20657,1	20827,1	13526,3	28613,6	3818,1	18,5
Cr (mg/kg)	40,7	37,9	24,5	57,8	9,5	23,2
Mg (mg/kg)	5732,7	4371,2	2788,3	17251,0	3582,8	62,5
Ca (mg/kg)	7746,8	3019,5	1485,7	49370,2	11740,6	151,6
Zn (mg/kg)	41,4	33,2	17,5	199,1	41,3	99,8
Si (mg/kg)	602,0	562,0	442,2	971,8	139,5	23,2

Osservando le tabelle 11.4 ed 11.5 è possibile effettuare un confronto tra i risultati delle analisi chimiche e chimico-fisiche ottenute nei due grandi sistemi di paesaggio. Si evince una maggiore variabilità generale dei dati nel sistema *V* dei terrazzi alluvionali recenti. Questo risultato può essere correlato alla forte dinamica geomorfologia dell'ambiente della pianura alluvionale recente. In linea generale, i suoli del sistema *V* risultano avere una reazione tendente alla neutralità, con un pH più elevato rispetto ai suoli dei terrazzi alluvionali antichi, questi dati confermano ciò che è stato osservato nelle analisi relative ai profili 1 e 5. Non vengono confermati invece i risultati delle analisi tessiturali. Si osserva infatti in questo senso, una omogeneità tra i due pedopaesaggi, a dispetto di quanto riportato nelle schede descrittive dei profili.

Nel grafico in basso si osservano le curve di ritenzione (valori medi \pm dev. st.) relative ai due pedoambienti. Il comportamento idrologico dei suoli nei due sistemi appare simile. E' possibile osservare la maggior variabilità dei dati che caratterizza il sistema dei terrazzi alluvionali recenti (sistema V). Inoltre, lo stesso presenta una pendenza della curva lievemente più alta rispetto al pedopaesaggio L.



Le tabelle 11.6 ed 11.7 riassumono l'analisi statistica sui parametri delle curve di ritenzione (eq. 6.13) ottenute in laboratorio sui campioni indisturbati. Anche l'analisi dei parametri non sembra evidenziare sostanziali differenze tra i due sistemi. Probabilmente ciò è dovuto al numero esiguo di orizzonti indagati nel sistema V. In accordo con quanto visto nel grafico precedente nel sistema V il valore medio/mediano più elevato del parametro "n", indicatore della pendenza della curva, sembrerebbe indicare la presenza di suoli meno strutturati in quest'ambiente. Tale risultato è in accordo con ciò che ci si aspetterebbe di osservare in un ambiente di recente formazione alluvionale. Nessuna relazione è invece emersa dal semplice confronto di questi dati medi con le caratteristiche tessiturali presenti in questi ambienti.

Tabella (11.6): analisi descrittiva dei dati idrologici relativi al pedopaesaggio L; CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev_Std.	CV%
Dens_app (g/cm ³)	1,53	1,53	1,20	1,85	0,14	9,19
θs (cm ³ /cm ³)	0,43	0,43	0,31	0,54	0,06	13,04
alfa	0,02	0,01	0,00	0,18	0,03	157,04
n	1,37	1,31	1,17	1,96	0,15	11,21
m	0,27	0,25	0,15	0,72	0,10	35,04

Tabella (11.7): analisi descrittiva dei dati idrologici relativi al pedopaesaggio V; CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev_Std.	CV%
Dens_app (g/cm ³)	1,43	1,41	1,07	1,80	0,23	16,12
θs (cm ³ /cm ³)	0,45	0,43	0,34	0,64	0,10	21,82
alfa	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	65,54
n	1,47	1,53	1,26	1,68	0,17	11,46
m	0,31	0,35	0,20	0,41	0,08	25,74

Osservando le tabelle 11.8 ed 11.9 dove vengono riportati i dati penetrometrici relativi a quattro livelli di profondità (si tratta di valori mediati su 3 punti di misura) è ancora confermata la maggior variabilità degli ambienti alluvionali recenti. E' interessante osservare in ambedue i sistemi un "salto" di resistenza alla penetrazione nel passaggio tra i 20 ed i 40 cm di profondità, associato ad una riduzione della variabilità. Questo comportamento è estremamente interessante, anche perché coerente in tutto il territorio, e conferma la presenza di una suola di aratura a circa 40 cm di profondità.

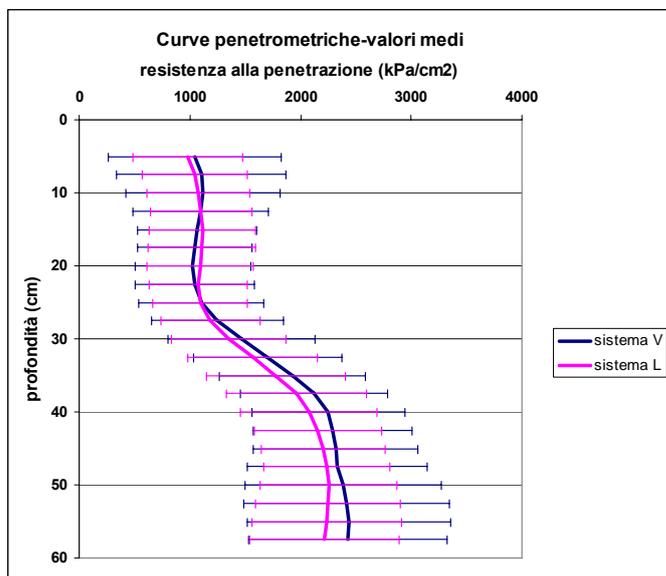
Tabella (11.8): analisi descrittiva dei dati penetrometrici relativi al sistema di paesaggio L; CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev_Std.	CV%
Pen15 (kPa/cm ²)	1114,78	1074,67	161,33	2315,89	481,58	43,20
Pen20 (kPa/cm ²)	1092,64	1023,17	179,00	2352,67	476,22	43,58
Pen40 (kPa/cm ²)	2074,94	2091,78	492,33	3524,33	616,84	29,73
Pen55 (kPa/cm ²)	2240,99	2127,17	1043,00	4186,33	676,80	30,20

Tabella (11.9): analisi descrittiva dei dati penetrometrici relativi al sistema di paesaggio V; CV = Dev.Std/Media

Dati	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev_Std.	CV%
Pen15 (kPa/cm ²)	1024,90	1088,67	187,00	1813,67	502,46	49,03
Pen20 (kPa/cm ²)	1038,47	1058,33	174,00	1921,33	489,44	47,13
Pen40 (kPa/cm ²)	2185,36	2008,33	1106,33	4484,33	753,75	34,49
Pen55 (kPa/cm ²)	2346,47	2060,17	1217,67	4530,33	976,71	41,62

Il grafico in basso mostra i profili penetrometrici (valori medi) nei due sistemi. Non si evidenziano sostanziali differenze se non la maggior variabilità che caratterizza il sistema V. E' molto chiaro il "salto" di resistenza nel passaggio tra i 20 ed i 40 cm di profondità. (suola d'aratura).



Profili penetrometrici (valori medi) relativi ai due sistemi di paesaggio.

L'analisi descrittiva di entrambi i pedopaesaggi non ha evidenziato marcate differenze nei valori medi di importanti caratteri del suolo (ad es. granulometria, parametri idraulici, caratteristiche fisiche, etc.) fra i due ambienti. E' senz'altro evidente la maggior variabilità, comune alla quasi totalità dei dati, registrata nel pedoambiente dei terrazzi alluvionali più recenti rispetto a quello del "livello fondamentale della pianura".

A questo punto è sembrato necessario indagare la variabilità all'interno dei pedopaesaggi L e V costituiti al loro interno da diverse unità di paesaggio.

11.3.1.3 Analisi descrittiva organizzata per unità di paesaggio (UDP)

11.3.1.3.a Approccio classico

Dopo aver analizzato l'andamento dei dati chimici e fisici nei diversi sistemi di paesaggio si è voluto quindi procedere a valutare la variabilità dei suoli all'interno di alcune unità di paesaggio. Quella che segue è quindi un'analisi descrittiva di alcune variabili organizzate per unità di paesaggio. Nell'ambito delle UdP analizzate (8 in totale) si riportano i dati delle UdP 11-13-21, ove ricadono 25 punti di osservazione. Tali unità sono state scelte anche in considerazione del fatto che esse sono caratterizzate (è ciò che si evince dalla carta dei suoli redatta dall'ERSAL nel 2000), in modo quasi esclusivo, da un'unica unità tipologica (tipologia di suolo).

In tabella 11.10 vengono riportati i coefficienti di variazione calcolati sui alcuni dati chimici e chimico-fisici di tre unità di paesaggio ricadenti nel sistema dei terrazzi alluvionali antichi (sistema L). La figura 11.13 ne mostra la localizzazione. Osservando la tabella appare evidente che a differenza di quanto ci si dovrebbe attendere, i coefficienti di variazione relativi alle singole UdP (colonne A-C) non risultano essere sempre inferiori a quelli osservati sull'intero dataset selezionato (colonna D).

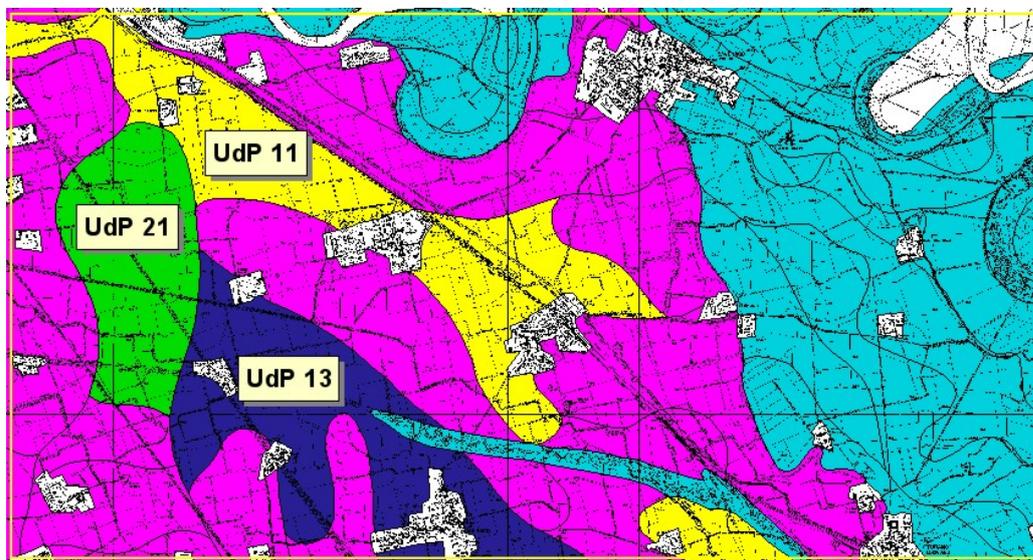


Figura (11.13): Localizzazione delle UdP 11-13-21.

Tabella (11.10): Coefficienti di variazione delle variabili chimiche e fisico-chimiche relativi a tre UdP ricadenti nel pedopaesaggio L. (colonne A-C). In colonna D, i CV dell'intero dataset selezionato.

	A	B	C	D
Dati	CV% (UdP11)	CV%(UdP13)	CV%(UdP21)	CV% UdP ₍₁₁₋₁₃₋₂₁₎
argilla%	22,72	31,13	14,71	24,09
limo%	30,33	13,15	28,43	27,88
sabbia%	24,67	9,92	37,76	25,13
pH H2O	7,56	10,82	2,00	8,21
pH CaCl2	9,05	12,28	4,50	9,50
Cond. 1/5 (µS/cm)	31,83	35,06	32,28	32,62
CO (gr/kg)	37,29	24,61	42,76	35,53
N tot (gr/kg)	35,77	22,66	35,95	33,96
C/N	6,10	7,00	16,58	9,35
Ti (mg/kg)	22,38	28,54	19,47	23,66
Ni (mg/kg)	11,11	27,54	13,98	16,98
Al (mg/kg)	18,37	14,26	21,51	18,46
Mn (mg/kg)	32,13	31,45	19,98	30,92
Fe (mg/kg)	11,25	18,74	13,30	14,39
Cr (mg/kg)	25,09	15,35	15,33	21,46
Mg (mg/kg)	12,22	20,82	21,05	18,07
Ca (mg/kg)	26,50	14,80	19,56	29,21
Zn (mg/kg)	26,94	10,19	28,53	32,09
Si (mg/kg)	9,94	65,04	27,90	41,72

Come nel caso precedente in tabella 11.11 sono messi a confronto i coefficienti di variazione dei parametri idraulici relativi alle stesse tre UdP. Anche in questo caso la variabilità osservata nelle singole unità di paesaggio non risulta essere sempre inferiore a quella dell'intero data set selezionato (colonna D).

Tabella (11.11): Coefficienti di variazione dei parametri idraulici relativi a tre UdP ricadenti nel pedopaesaggio L. (colonne A-C). In colonna D, i CV dell'intero dataset selezionato.

	A	B	C	D
Dati	CV% (UdP 11)	CV% (UdP 13)	CV% (UdP 21)	CV% UdP ₍₁₁₋₁₃₋₂₁₎
Dens_app (g/cm ³)	10,12	4,42	8,20	16,19
θs (cm ³ /cm ³)	13,47	15,75	9,30	14,56
alfa	61,39	98,33	58,35	11,65
n	14,97	13,56	3,07	27,40
m	30,80	41,78	10,47	56,94

I risultati dell'analisi descrittiva condotta sui dati chimico-fisici ed idrologici raccolti nella banca dati, non hanno consentito di individuare chiare differenze tra i due pedoambienti riportati nella cartografia di base. In particolare, i dati relativi ai profili 1 e 5 scelti come profili di riferimento dei pedopaesaggi L e V rispettivamente, così come i suoli riportati nella cartografia dei suoli, non sempre hanno trovato conferma nelle analisi effettuate sui campioni sciolti. In particolare il fatto che molti caratteri dei suoli abbiano CV% più elevati all'interno di una unità di paesaggio che tra diverse unità di paesaggio attesta la non adeguatezza della rappresentazione cartografica per diversi scopi applicativi, almeno limitatamente alla piccola

area d'indagine. L'analisi dei coefficienti di variazione alla scala delle unità di paesaggio ha così evidenziato la necessità di adoperare tecniche di indagine alternative per l'analisi della distribuzione spaziale dei suoli, ciò nel tentativo di individuare con maggior precisione la struttura spaziale delle variabili investigate.

Tra questi metodi alternativi si indagheranno l'approccio deterministico continuo e l'approccio geostatistico.

11.3.2 Approccio deterministico continuo

L'approccio prevede il poter disporre di variabili territoriali ad alta risoluzione spaziale, da usare come supporto per l'estensione areale di altre variabili (generalmente più costose da determinare) disponibili ad una risoluzione spaziale più grossolana.

Nell'areale in questione al fine di ottenere le suddette variabili ad alta risoluzione, si è proceduto alla realizzazione di un modello digitale del terreno, nella figura in basso se ne ripropone una visualizzazione in prospettiva (fig. 11.14). Grazie ad esso è stato possibile "studiare" la morfologia del territorio confrontandone le caratteristiche con alcuni dei dati ottenuti dalle analisi puntuali di laboratorio e di campo. Questa tecnica è definita "environmental correlation" (McKenzie et al., 1989; Odeh et al., 1994, McBratney et al., 2000) oppure "soil-landscape analyses" (Hewitt, 1993) e consiste nell'individuare le correlazioni, qualora esistessero, tra variabili discrete (ad es. dati puntuali di tessitura) e variabili continue (ad es. una qualsiasi variabile che descriva la forma del territorio). Per le elaborazioni il DEM è stato elaborato nel software SAGA(Böhner et. al., 2002). In figura 11.15 è riportato uno schema riepilogativo che mostra alcuni degli outputs ottenibili (variabili territoriali ad alta risoluzione spaziale).

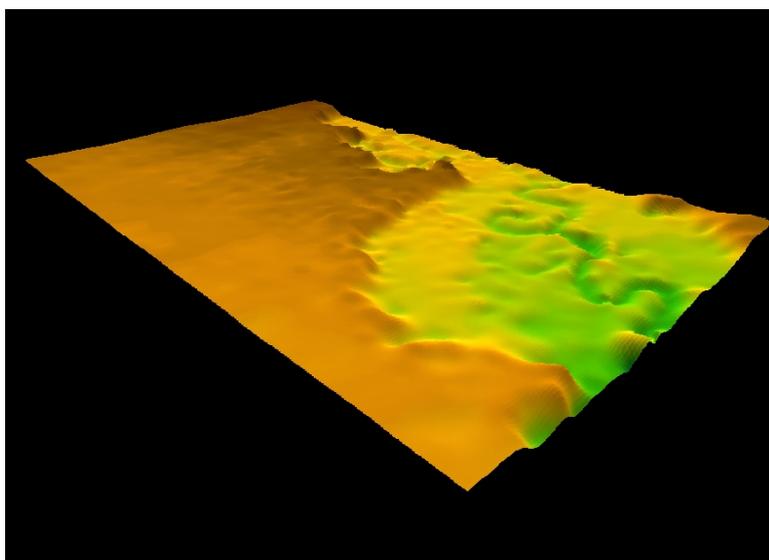


Fig. (11.14): il DEM realizzato.

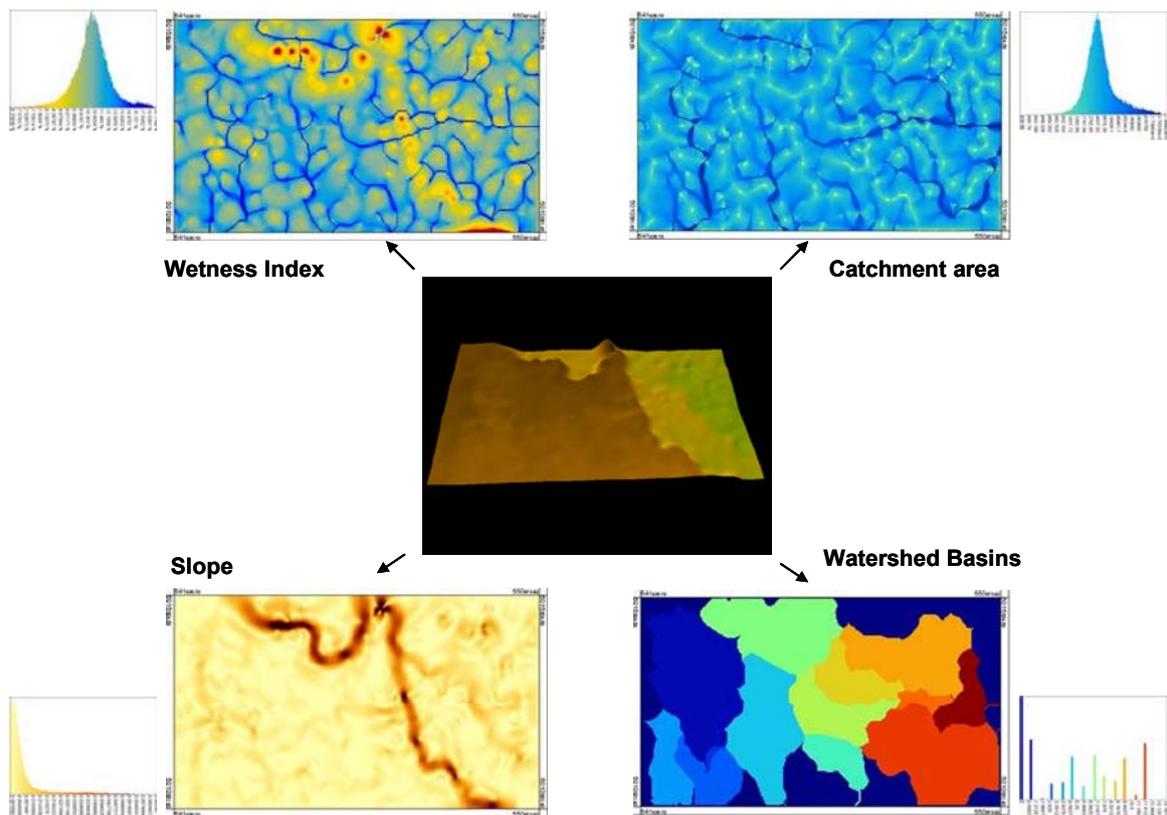
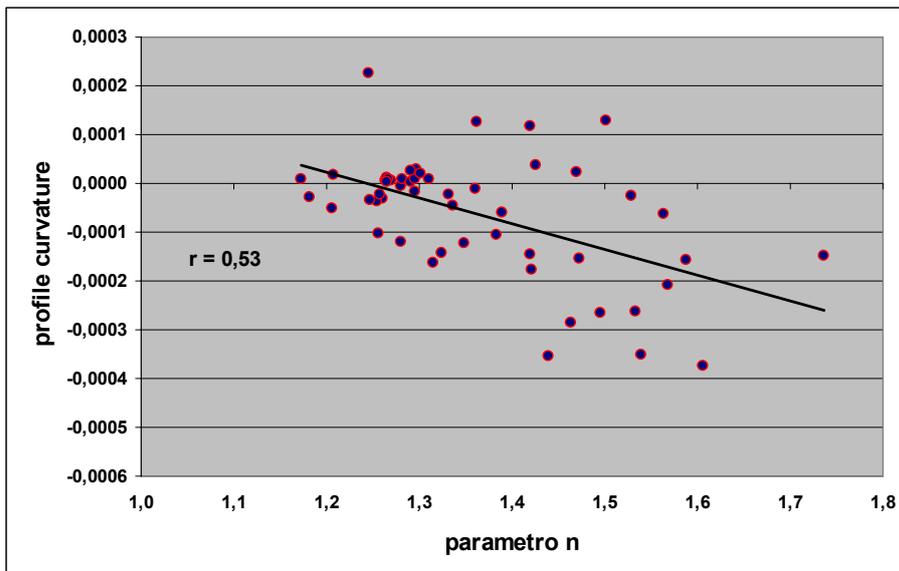


Fig. (11.15): alcuni degli outputs ottenuti dalle elaborazioni del software SAGA.

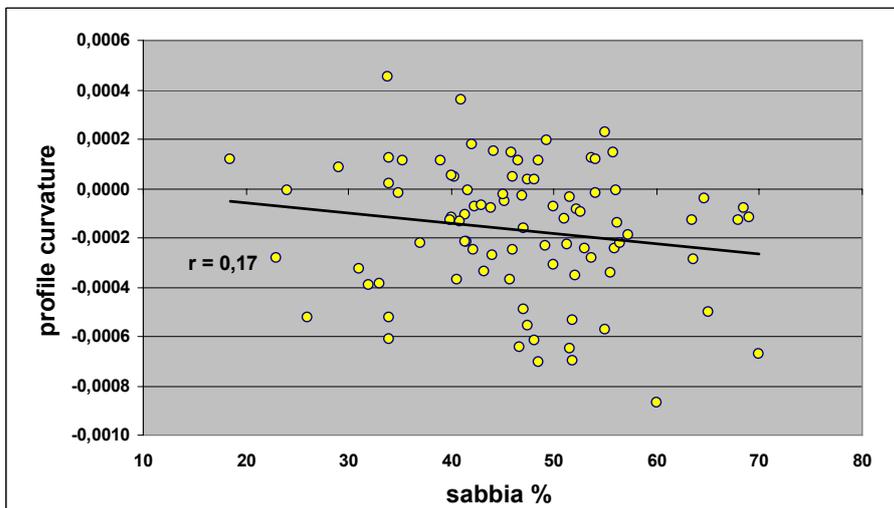
Quella che segue è una descrizione di alcuni dei risultati più interessanti ottenuti in seguito all'elaborazione dei dati.

Nel grafico successivo è possibile osservare un'interessante relazione inversa tra il parametro “ n ” della curva di ritenzione ed il parametro “profile curvature” o “curvatura in profilo” derivato dall'elaborazione del DEM. . Si tratta di un indice di concavità/convessità calcolato lungo la direzione di massima pendenza, esso assume valori negativi in caso di concavità e positivi in caso di convessità. Dal grafico si evince che il parametro “ n ” aumenta all'aumentare della concavità della superficie. Questo induce a pensare ad un accumulo delle particelle più grossolane in corrispondenza delle forme depresse, il che potrebbe tradursi in una differenziazione del comportamento idrologico dei suoli relativamente alla morfologia del territorio. Queste e le successive elaborazioni sono state ottenute sovrapponendo le informazioni puntuali (analisi chimiche e chimico-fisiche dei campioni) al raster derivato dall'elaborazione del DEM.



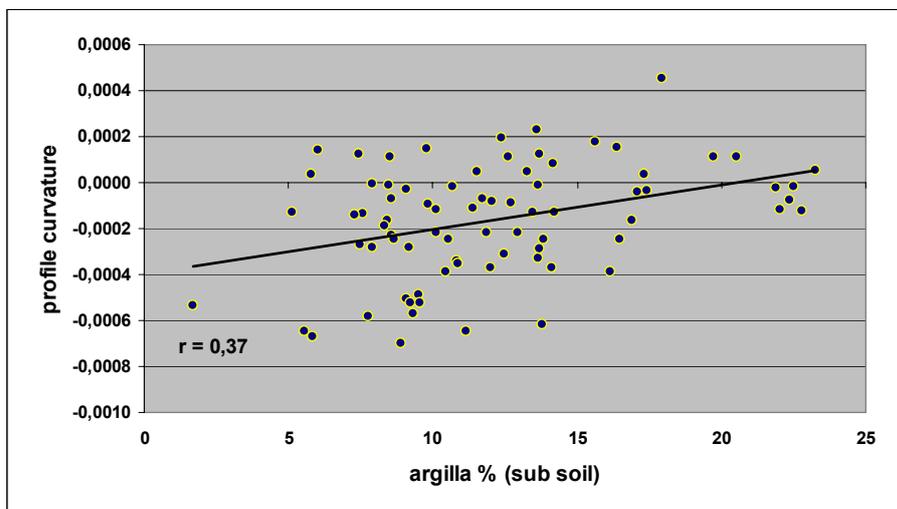
Correlazione tra il parametro n delle curve di ritenzione e l'indice di curvatura in profilo.
 $r = 0,53$; $P < 0,01$

Nel grafico successivo si osserva una relazione tra la % di sabbia presente nell'orizzonte superficiale ed il parametro morfologico "profile curvatures". Questo risultato tende a confermare che la relazione precedentemente indagata tra "n" e curvatura non può essere spiegata con la presenza di una granulometria più grossolana nelle aree depresse ma è piuttosto da relazionare con un sistema dei pori meno articolato nella zone concave che generalmente corrispondono ai paesaggi delle alluvioni più recenti.



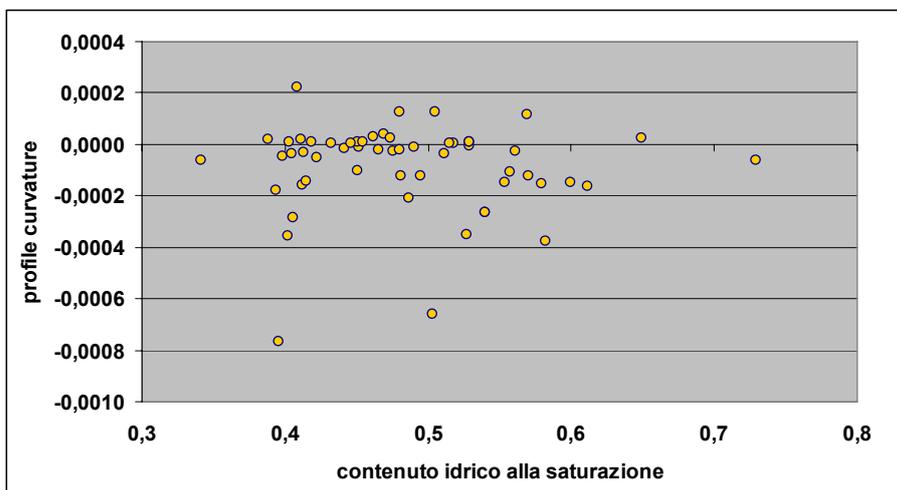
Correlazione tra la % in sabbia dell'orizzonte di superficie e l'indice di curvatura in profilo.
 $r = 0,17$;

Nel grafico in basso è possibile osservare la relazione esistente tra la % di argilla relativa all'orizzonte sottosuperficiale e l'indice di curvatura in profilo.



Correlazione tra la % in argilla dell'orizzonte sottosuperficiale e l'indice di curvatura in profilo.
 $r = 0,37$.

Tra le variabili investigate non tutte hanno condotto a risultati definibili positivi. Nel grafico che segue si riporta a titolo d'esempio una delle analisi condotte sulla variabile θ_s . Non sembrano evidenziarsi correlazioni o trend tra questa variabile e l'indice di curvatura in profilo.



Correlazione tra l'indice di curvatura in profilo ed il contenuto idrico alla saturazione (θ_s)

In sintesi dai risultati illustrati si evince che la metodologia di indagine adoperata costituisce un ottimo strumento potenziale per la distribuzione areale di variabili altrimenti ricavabili a costi elevati (ad es. variabili idrauliche). Tuttavia i risultati ottenuti (indici di correlazione bassi) non hanno consentito di sfruttare questa tecnica della correlazione ambientale per stimare, con sufficiente grado di accuratezza, la distribuzione spaziale di alcune importanti variabili investigate.

Queste considerazioni tendono ad evidenziare che il controllo topografico (determinismo relativo al DEM) sulla distribuzione dei suoli non è sufficientemente forte per fungere da supporto all'estensione areale dei più importanti dati edafici.

In seguito a tali considerazioni si è scelto di indagare la struttura spaziale dei dati ricorrendo ad un approccio di tipo geostatistico.

11.3.3 Approccio geostatistico

Vengono di seguito riportati i risultati delle analisi geostatistiche effettuate su alcuni dati (ad es. granulometria, parametri idraulici, etc.) di grande rilevanza per l'applicazione dei modelli su base fisica che saranno utilizzati nelle applicazioni territoriali.

11.3.3.1 I dati tessiturali

In figura 11.16 è riportato il semivariogramma sperimentale ed il modello ad esso adattato della variabile argilla. I dati appaiono strutturati, segno dell'esistenza di una relazione spaziale tra i valori misurati nei diversi siti campionati, che può essere osservata alla scala del campionamento effettuato. Osservando l'istogramma si può apprezzare la distribuzione di frequenza pressoché normale di questa variabile, il che non farebbe pensare immediatamente all'esistenza di due pedoambienti differenti.

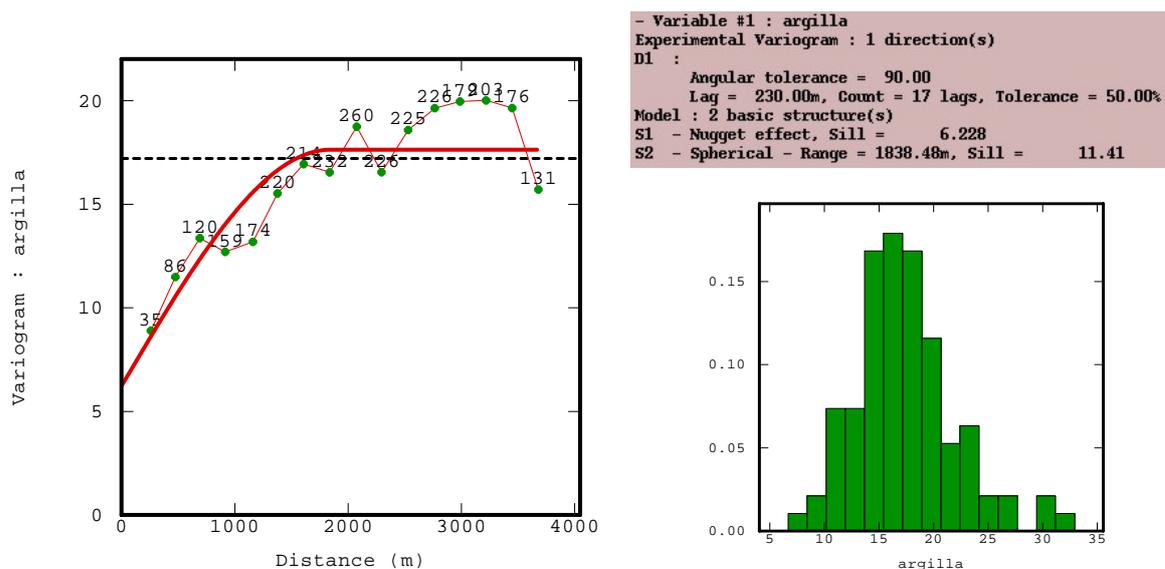
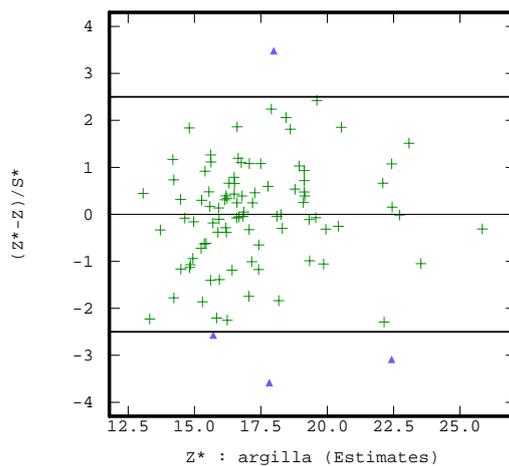
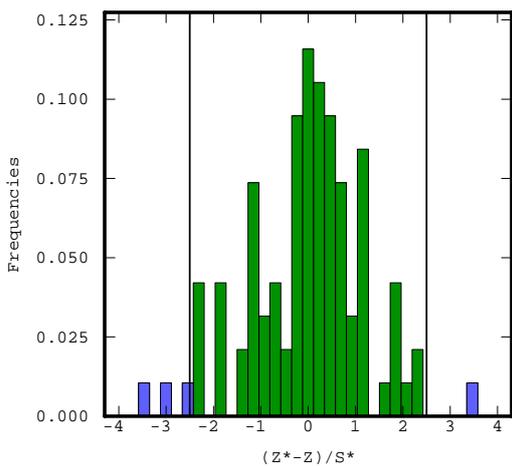
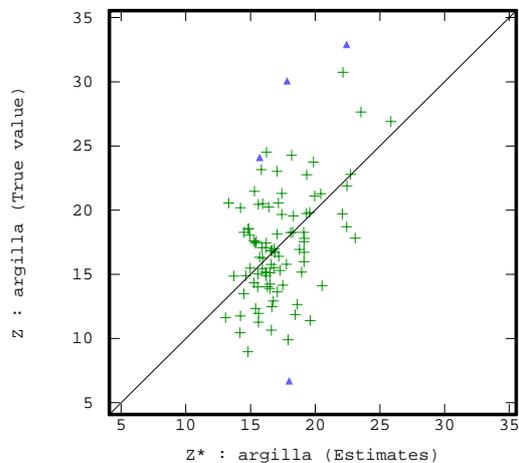
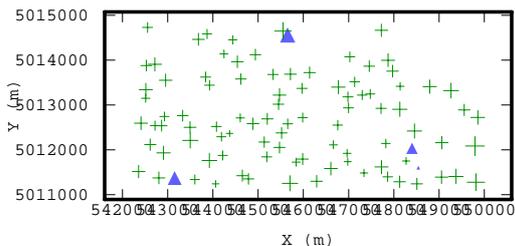


Fig. (11.16): semivariogramma della variabile argilla ed il modello ad esso adattato, comprendente un effetto nugget e una struttura di tipo sferico: Nugget= 35,3 (%); Range=1838,5 m; Sill= 64,7 (%).

Qui in basso vi sono i risultati della cross-validation effettuata sulla variabile argilla. Sono evidenziati alcuni outliers e la loro localizzazione sulla mappa.



Cross validation statistics based on 100 test data		
	Mean	Variance
Error	-0.13472	17.12408
Std. Error	-0.03221	1.49926
Cross validation statistics based on 96 robust data		
	Mean	Variance
Error	0.07759	12.85640
Std. Error	0.02959	1.11401

A data is robust when its Standardized Error lies between -2.500000 and 2.500000

La figura 11.17 mostra la distribuzione spaziale, ottenuta mediante kriging ordinario, della variabile argilla (valori %) riferita all'orizzonte di superficie. L'argilla appare distribuita in modo da concentrarsi negli ambienti alluvionali recenti (sistema V).

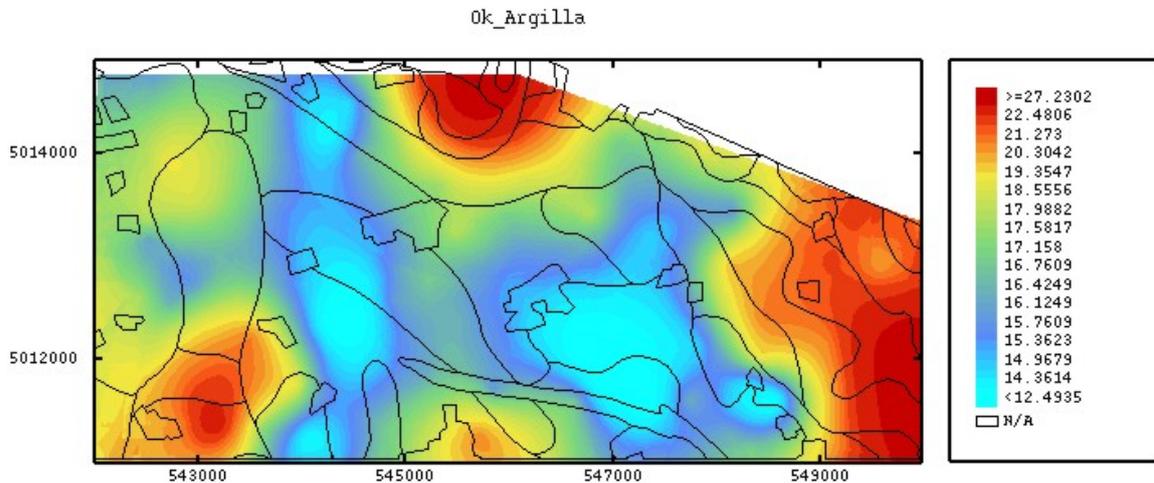


Fig. (11.17): distribuzione spaziale della variabile argilla. Valori espressi in %. Interpolazione mediante Kriging ordinario.

In figura (11.18) è riportato il semivariogramma sperimentale ed il modello ad esso adattato della variabile sabbia. Anche in questo caso i dati appaiono strutturati. E' possibile osservare la presenza di una variazione improvvisa dei valori di semivarianza ad una distanza di circa 1800mt, probabilmente dovuta alla presenza dei due ambienti pedogenetici (sistema V ed L). Questo sarebbe confermato anche dalla distribuzione di frequenza della variabile che presenta un aspetto bimodale.

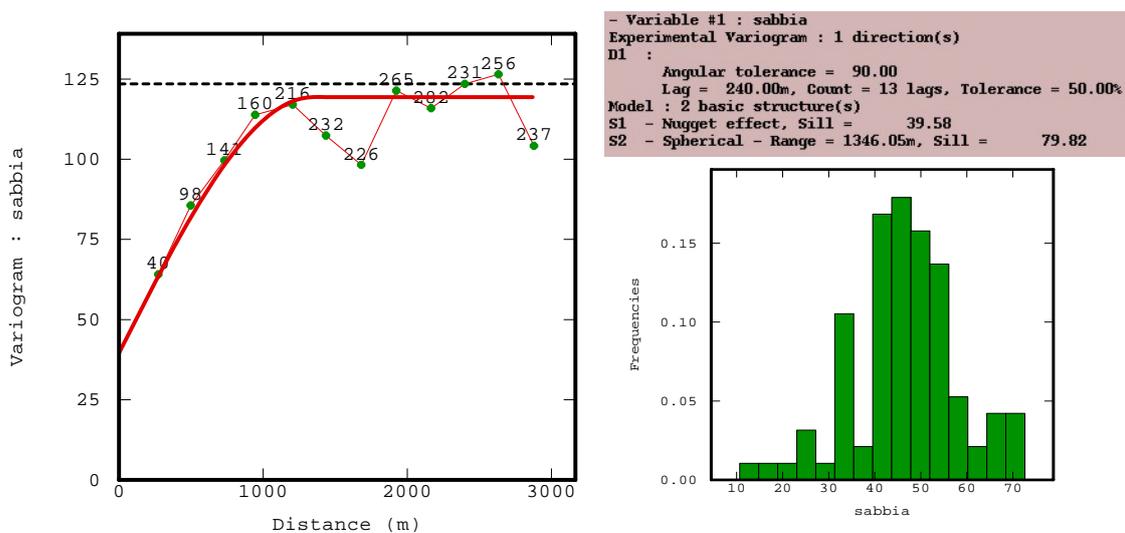
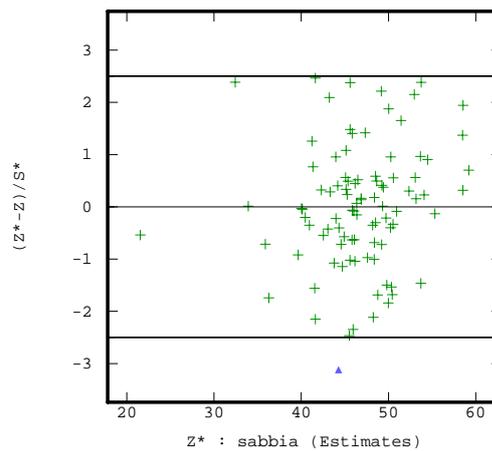
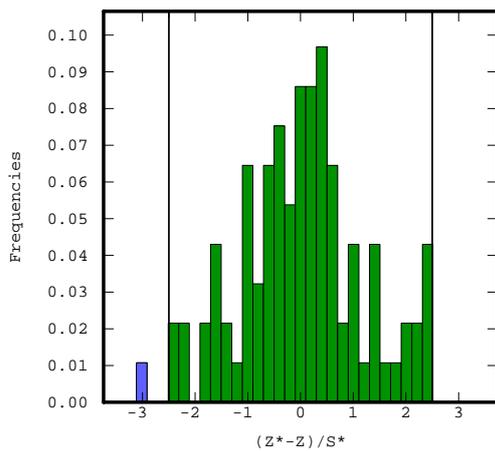
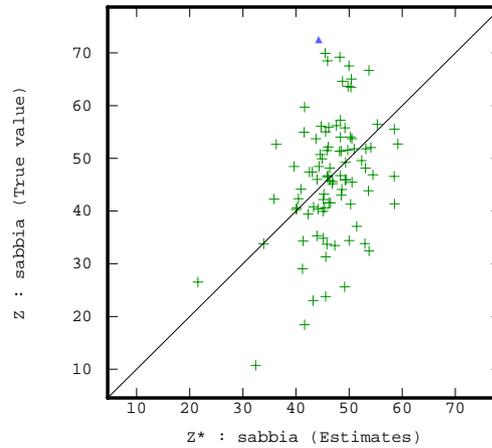
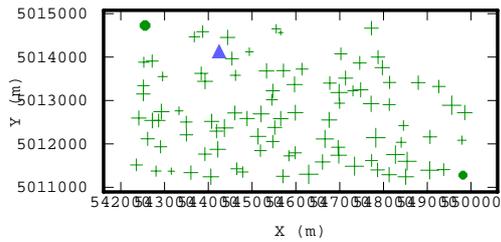


Figura (11.18): semivariogramma della variabile sabbia ed il modello ad esso adattato, comprendente un effetto nugget e una struttura di tipo sferico: Nugget= 33,1 (%); Range=1346 m; Sill= 66,9 (%).

Qui in basso vi sono i risultati della cross-validation effettuata sulla variabile sabbia. E' evidenziato un outlier e la sua localizzazione sulla mappa.



Cross validation statistics based on 100 test data		
	Mean	Variance
Error	0.10303	119.49819
Std. Error	0.01083	1.39515
Cross validation statistics based on 99 robust data		
	Mean	Variance
Error	0.41119	111.96573
Std. Error	0.04482	1.30283

A data is robust when its Standardized Error lies between -2.50000 and 2.50000

La sabbia come è possibile osservare in figura 11.19 appare più concentrata nel sistema di paesaggio L. E' interessante osservare una bassa concentrazione in corrispondenza delle zone limitrofe i corsi d'acqua principali, ed in particolare in corrispondenza di quello che è stato classificato come "paleoalveo" nella zona ad ovest del peopaesaggio L.

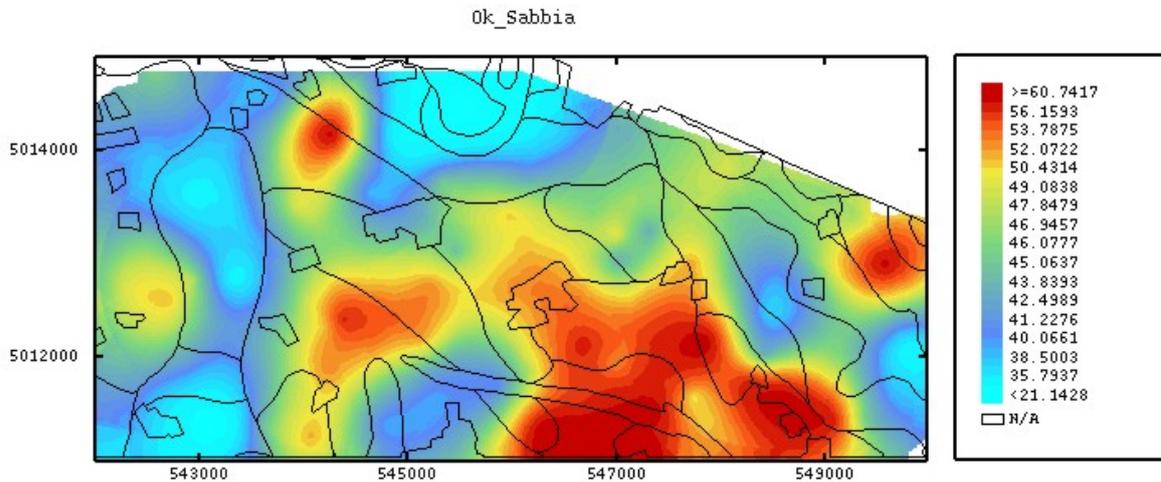


Fig (11.19): distribuzione spaziale della variabile sabbia. Valori espressi in %. Interpolazione mediante Kriging ordinario.

11.3.3.2 I parametri idraulici

In figura 11.20 sono riportati i risultati dell'analisi strutturale del parametro n delle curve di ritenzione. Anche questo parametro presenta una buona struttura spaziale, nonostante il numero limitato di siti campionati.

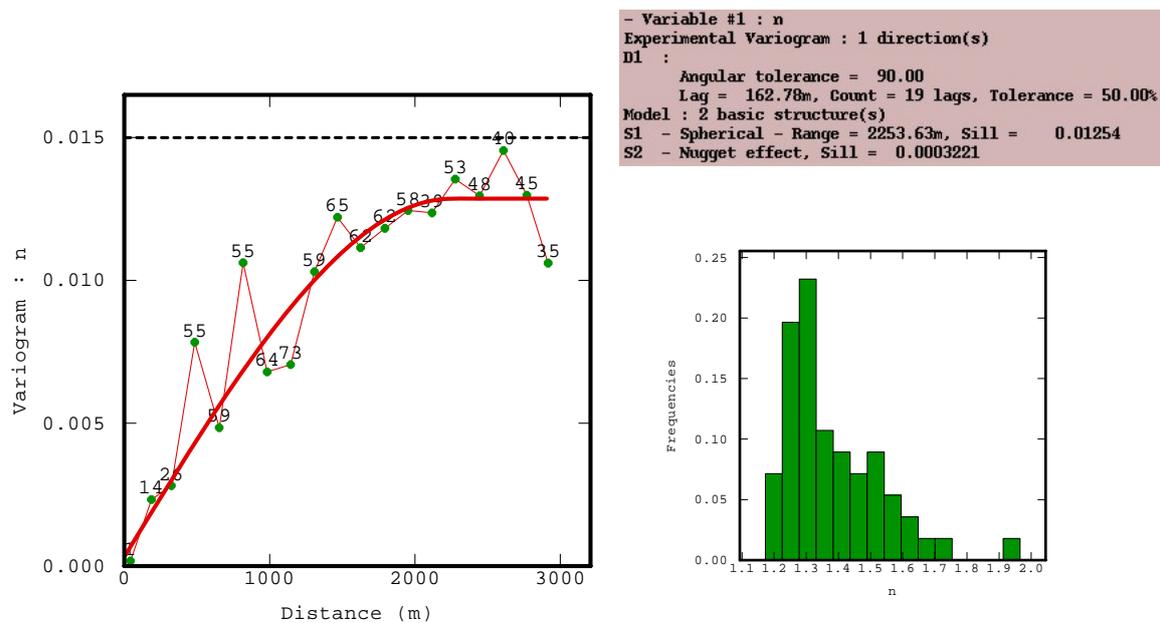
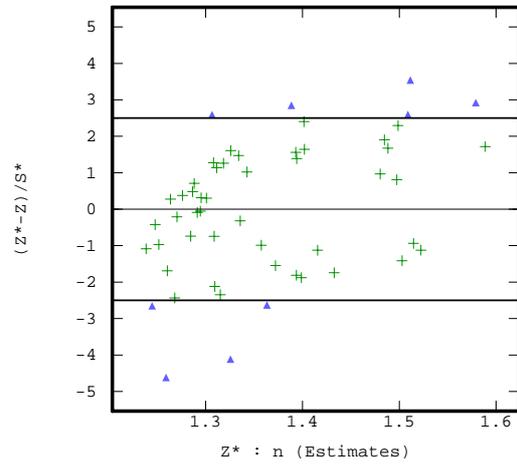
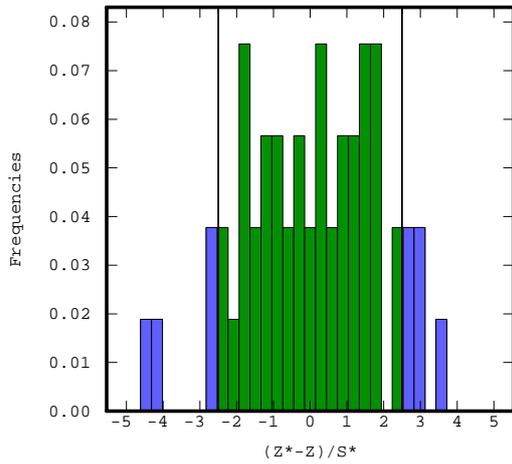
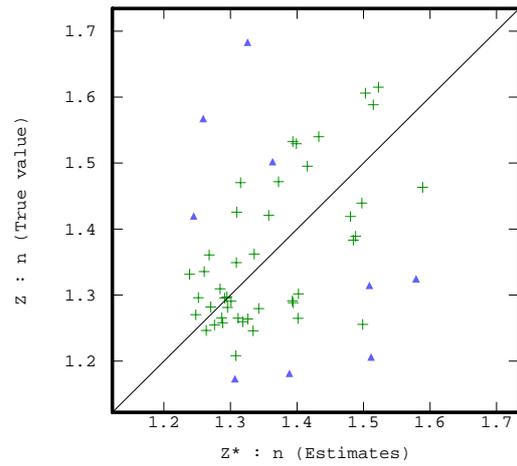
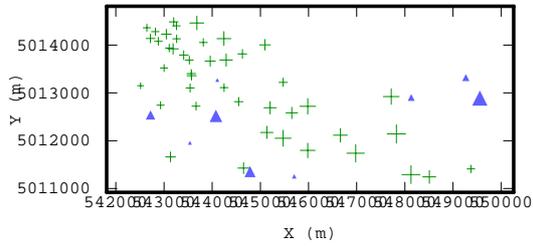


Fig. 11.20: semivariogramma della variabile n ed il modello ad esso adattato, comprendente un effetto nugget e una struttura di tipo sferico: Nugget=2,5 (%); Range=2253,6 m; Sill= 97,5 (%).

La distribuzione di frequenze (istogramma) farebbe pensare alla necessità di effettuare una trasformazione dei dati (ad es. logaritmica). Tuttavia, il “mascheramento” di alcuni outliers durante la fase di analisi strutturale dei dati ha consentito di procedere senza ricorrere a trasformazioni. Il parametro n presenta una variabilità a raggio superiore rispetto le precedenti variabili (sabbia e argilla). Questo induce a pensare che le strutture spaziali dei dati dipendano da processi attivi a scale differenti, sui quali sarebbe interessante effettuare ulteriori indagini. Inoltre viene messo in evidenza un altro aspetto interessante e cioè che l'estensione dei parametri di struttura spaziale derivati da proprietà tessiturali, a proprietà idrauliche, può indurre errori di valutazione anche rilevanti.

In basso, i risultati della cross-validation sul parametro n



Cross validation statistics based on 53 test data		
	Mean	Variance
Error	0.00346	0.01647
Std. Error	0.02446	3.32515
Cross validation statistics based on 44 robust data		
	Mean	Variance
Error	0.00157	0.00783
Std. Error	0.01806	1.85047

A data is robust when its Standardized Error lies between -2.500000 and 2.500000

L'errore della stima sul parametro n è apparso maggiore rispetto alle precedenti due variabili; il motivo risiede senz'altro nel minor numero di dati disponibili

Nella figura 11.21 è riportato il risultato dell'interpolazione della variabile n . La distribuzione spaziale manifestata da questo parametro, sembra essere coerente con i dati tessiturali, in particolare, i valori più elevati si registrano nelle zone dove maggiore è la concentrazione delle particelle più grossolane.

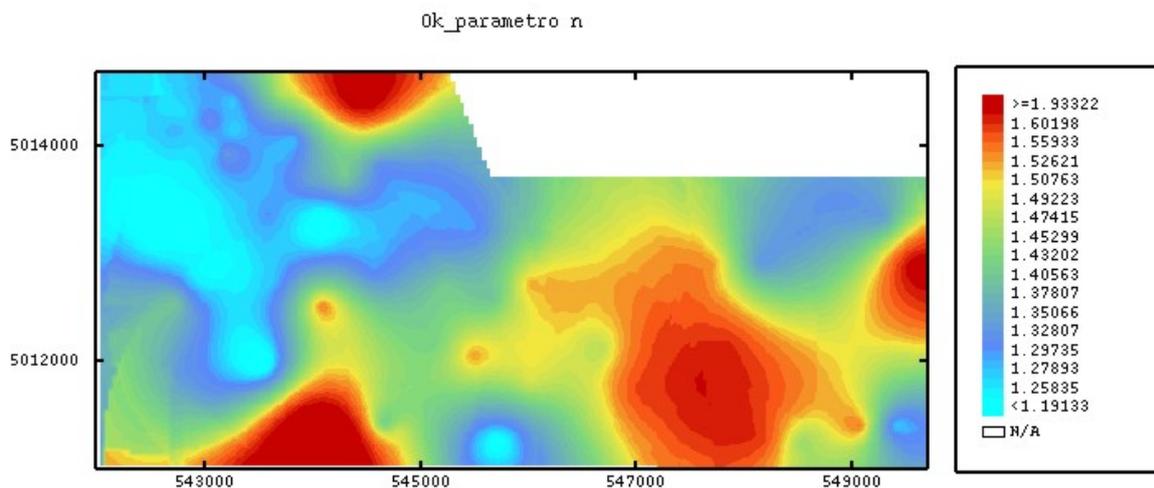
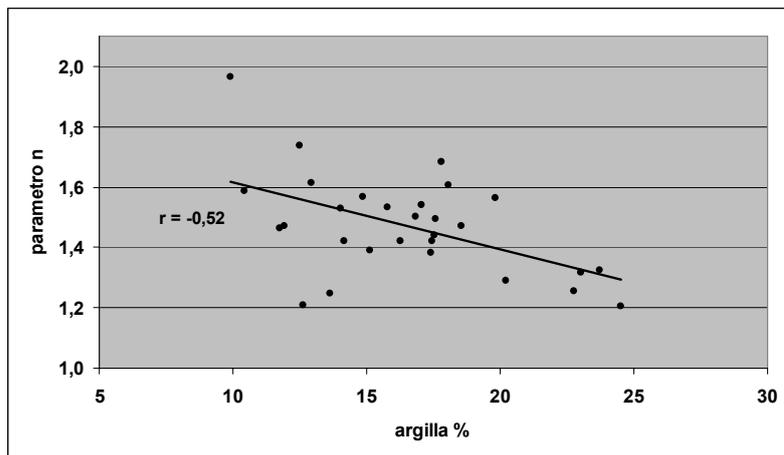


Fig. (11.21): distribuzione spaziale della variabile n . Interpolazione mediante Kriging ordinario.

Questi risultati sono coerenti con quanto ci si sarebbe aspettato. A titolo d'esempio si riporta, in basso, un grafico di correlazione tra il parametro n e la variabile argilla misurati in 30 campioni.



Correlazione tra il parametro n e la % di argilla. $r = -0,52$;

Tuttavia, non tutte le variabili investigate hanno condotto a risultati entusiasmanti. E' il caso, ad esempio, del contenuto idrico alla saturazione. In figura 11.22 si osservano i risultati dell'analisi strutturale effettuata su questa variabile. Essa non ha dimostrato avere alcuna struttura spaziale (effetto nugget).

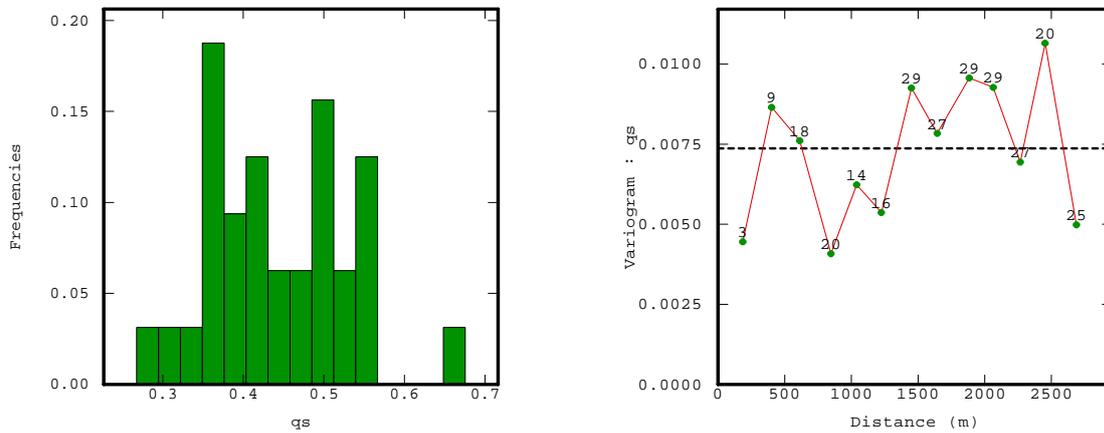


Fig. (11.22): analisi strutturale della variabile θ_s .

11.3.3.3 I dati chimici

Lo studio della distribuzione spaziale delle variabili chimiche ha invece condotto a risultati molto interessanti.

A titolo d'esempio si riporta in figura 11.23 l'analisi strutturale delle variabili Ferro (Fe) ed Alluminio (Al) estratte in acqua regia relative all'orizzonte superficiale (contenuto totale espresso in mg/Kg). Si è ritenuto necessario, al fine di ridurre l'errore di stima, ricorrere ad un Co_Kriging in fase di interpolazione.

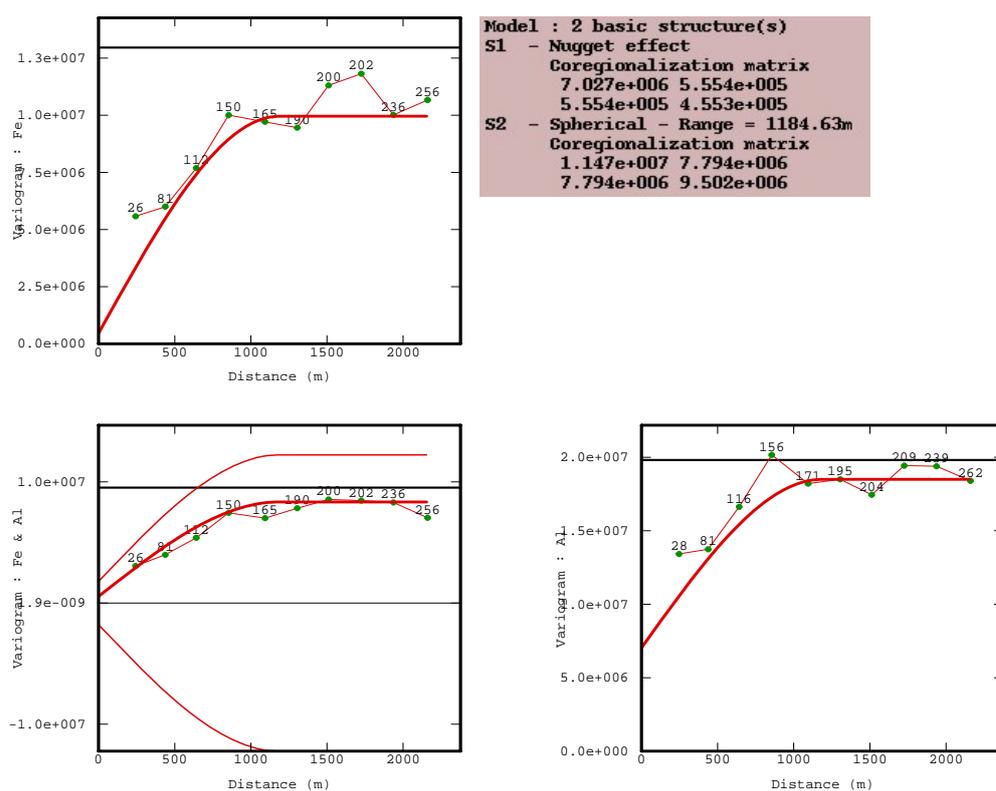


Fig. (11.23): analisi strutturale delle variabili Fe ed Al. Semivariogrammi di Fe ed Al e semivariogramma incrociato delle due variabili.

Nelle figure 11.24 e 11.25 sono riportati i risultati dell'interpolazione mediante Co-Kriging relativi alle due variabili precedentemente citate.

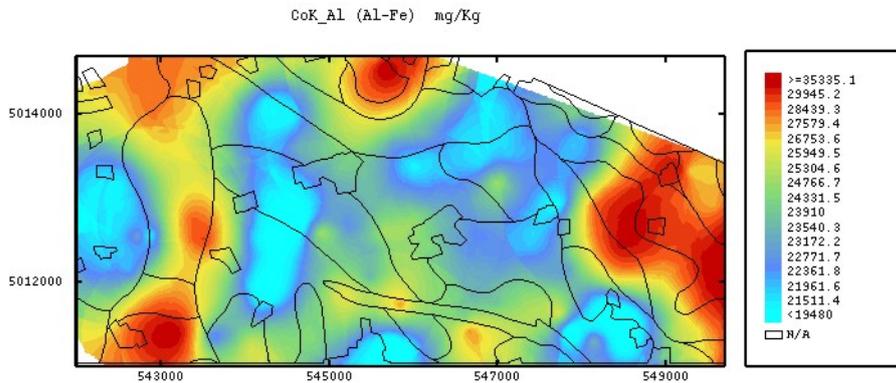


Fig.(11.24): la distribuzione della variabile Al. Dati espressi in mg/kg.

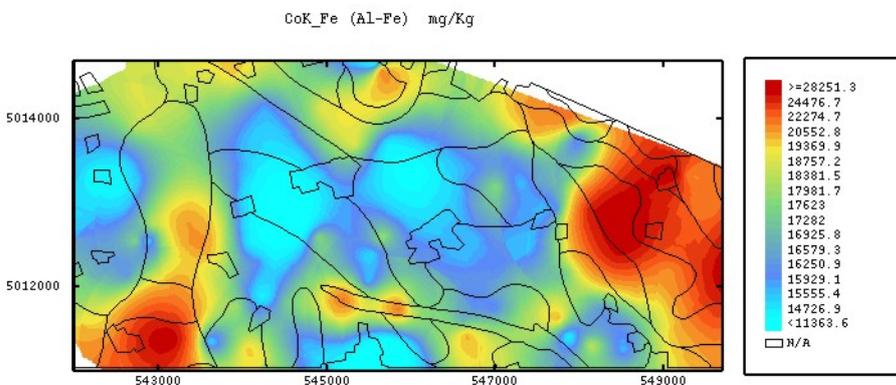


Fig.(11.25): la distribuzione della variabile Fe. Dati espressi in mg/kg.

Dalle mappe precedenti appare evidente che il comportamento del ferro e dell'alluminio è molto simile.

In figura 11.26 è possibile osservare (si tratta tuttavia di una valutazione visiva) le distribuzioni spaziali dei due precedenti elementi e di un terzo elemento, il titanio, messe a confronto con il modello digitale del terreno prodotto. Appare chiara la maggiore concentrazione dei tre elementi in corrispondenza del paleoalveo delimitato nell'immagine. In particolare questo comportamento è osservabile nella distribuzione del titanio, in basso nell'immagine. Il ferro e l'alluminio nelle due immagini in alto tendono a concentrarsi anche in prossimità del corso del fiume Adda (pedopaesaggio V dei terrazzi alluvionali recenti).

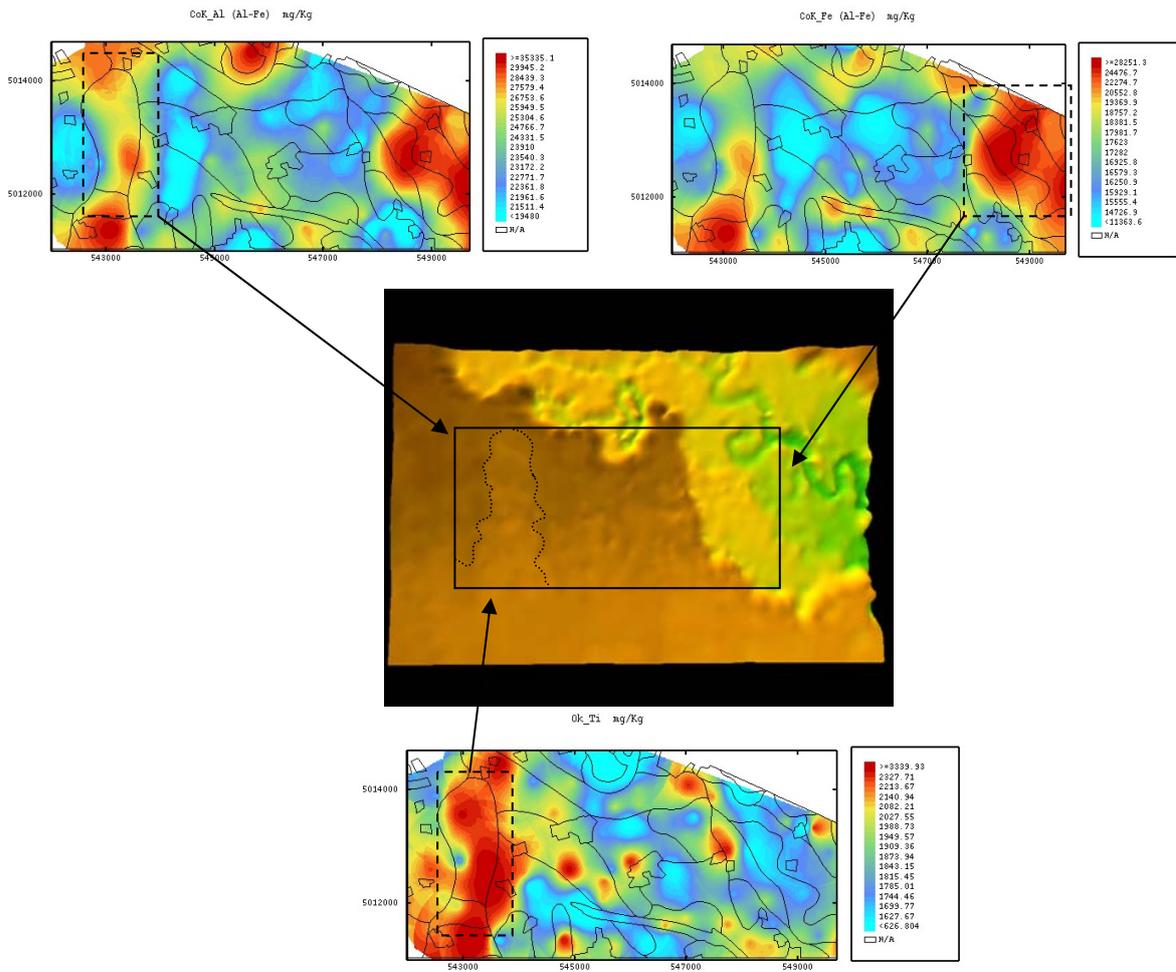


Fig.(11.26): confronto visivo tra morfologia del territorio e distribuzione spaziale delle variabili FE e Al, stimate mediante CoKriging e la variabile Ti, stimata mediante Kriging ordinario.

11.3.4 Valutazioni sui risultati degli approcci di distribuzione spaziale prodotti (geostatistico e deterministico continuo)

Lo studio della variabilità spaziale delle proprietà dei suoli ha quindi consentito una migliore caratterizzazione dei pedopaesaggi, in particolare per le variabili investigate è stato possibile stimarne la distribuzione spaziale e visualizzarla tramite mappe. Ciò ha consentito di ottenere informazioni aggiuntive altrimenti non ricavabili dalle indagini statistiche classiche. Ciononostante alcune importanti proprietà dei suoli (K_0 , α , densità apparente) necessarie per il proseguimento del lavoro (input dei modelli di simulazione) non sono risultate idonee ad una loro estensione areale, come osservato nel caso del θ_s , perché non (o poco) correlate con altre variabili ambientali disponibili ad alta risoluzione o perché non (o poco) strutturate spazialmente.

Alla luce di queste considerazioni si è scelto di proseguire il lavoro utilizzando i modelli di simulazione in tutti i siti di osservazione presenti nell'area di studio e successivamente, facendo uso di tecniche geostatistiche, spazializzare i dati di output nel caso in cui questi avessero presentato una buona struttura spaziale.

11.4. Le applicazioni territoriali

11.4.1 Le applicazioni modellistiche

Oggi, parallelamente alla diffusione di tecniche produttive sempre più complesse e precise, l'interesse si è rivolto ad approcci alla land evaluation in grado di dare risposte di tipo quantitativo. I recenti sviluppi avutisi nel settore delle simulazioni mediante computer, hanno aperto la strada alla diffusione di tali sistemi anche negli studi di valutazione territoriale (M.Littleboy, *et al.*,1996).

Nel lavoro presentato sono stati adoperati i modelli CropSyst e SWAP per i seguenti scopi: effettuare una Land Evaluation del territorio lodigiano, in particolare verificare l'attitudine dei suoli alla coltivazione del mais (Land Suitability per il mais), tramite l'applicazione di una metodica caratterizzata da una maggiore base fisica (rispetto alle tecniche classiche di Land Evaluation) nel definire il comportamento idrologico dei suoli presenti nell'areale di studio.

I modelli sono stati applicati nei 100 siti campionati mediante trivellata ed il lavoro si è svolto secondo le seguenti fasi: 1) calibrazione dei modelli; 2) utilizzazione delle PTFs; 3)

applicazione del modello SWAP, applicazione del modello CropSyst: estensione areale dei dati di output:

11.4.1.1 Calibrazione dei modelli

I modelli, le cui simulazioni si riferiscono agli anni 2002, 2003, 2004, sono stati calibrati sui dati raccolti nel sito di monitoraggio in continuo delle proprietà idrauliche. Qui sono stati ottenuti anche i dati di input per l'implementazione del modulo suolo, del modulo pianta e delle condizioni al contorno superiore ed inferiore.

Segue una descrizione sintetica delle diverse fasi di calibrazione, mentre per una descrizione dettagliata delle differenze sostanziali tra i due modelli utilizzati (SWAP, CropSyst), in riferimento ai principi di funzionamento e quindi ai dati di input, si rimanda alla tesi di Bonfante, 2005.

11.4.1.2 Modulo suolo

Le proprietà idrauliche per ogni orizzonte sono state determinate seguendo un processo di evaporazione su campioni di suolo indisturbati. La metodologia di calcolo fa riferimento al metodo di Wind (Tamari et al., 1993)

11.4.1.3 Modulo pianta

La parametrizzazione della pianta (mais nel caso specifico), è stata eseguita grazie a misurazioni effettuate sui valori di accrescimento radicale, sull'evoluzione del LAI (leaf area index) mediante due misure annuali con LI-COR 2000 e sulla produzione di biomassa aerea.

11.4.1.4 Condizioni al contorno superiore (dati climatici)

I dati climatici sono stati raccolti da stazioni presenti sul territorio e prossime all'area di studio (fonte ERSAF). Si tratta di dati giornalieri termici (temperature minima e massima in °C), pluviometrici (mm), di radiazione solare (W/m^2), di velocità del vento (m/s) e di umidità relativa (minima e massima). La stazione meteorologica di riferimento per il sito di calibrazione dei modelli è quella di Caviaga, sita a circa 1 Km dal sito dalla quale si è ottenuta la maggior parte dei dati relativi al periodo 2002-2004. Per sopperire alla mancanza di talune informazioni e con lo scopo di creare una banca dati giornaliera completa, si è ricorso ad una procedura di ricostruzione sfruttando le stazioni meteorologiche (Capralba, Codogno,

S. Angelo, S. Colombano) limitrofe a quella di Caviaga. La procedura è consistita in un'analisi statistica dei dati per l'individuazione delle migliori correlazioni tra i diversi dataset disponibili (stazione di riferimento e quelle ausiliarie) e la successiva ricostruzione dei dati mancanti mediante l'applicazione di regressioni lineari. Nelle figure 11.27 e 11.28 a titolo d'esempio, vengono riportate alcune fasi della ricostruzione dei dati termici.

	CAV_Tmin	SANG_Tmin	SCOL_Tmin	COD_Tmin	CAP_Tmin
CAV_Tmin	1,00				
SANG_Tmin	0,99	1,00			
SCOL_Tmin	0,96	0,97	1,00		
COD_Tmin	0,99	0,96	0,94	1,00	
CAP_Tmin	0,98	0,99	0,95	0,96	1,00

Fig. (11.27): Indici di correlazione r tra i valori della Tmin rilevati nella stazione meteo di Caviaga e nelle stazioni ausiliarie.

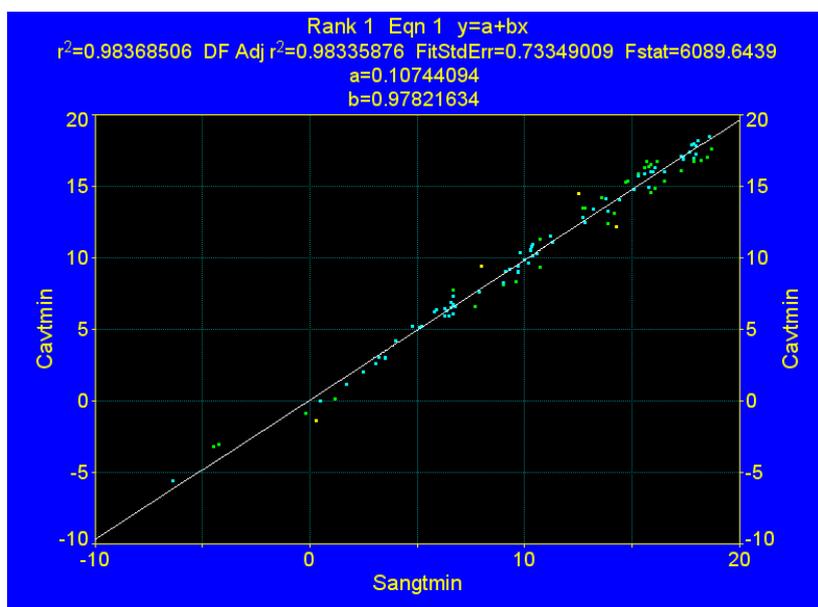


Fig.(11.28): la funzione lineare di regressione tra la stazione di S.Angelo e quella di Caviaga. Dati: temperatura minima giornaliera

11.4.1.5 Condizioni al contorno inferiore

Nei due modelli le condizioni al contorno inferiore possono essere impostate in vario modo secondo le condizioni locali del campo di moto. Nel sito di sperimentazione l'assenza di falda superficiale e di strati impermeabili all'acqua, ha permesso di impostare la condizione di drenaggio libero.

11.4.1.6 Applicazione dei modelli nei 100 siti campionati

I modelli calibrati sono stati applicati nei 100 siti di campionamento ed osservazione. Per queste simulazioni le condizioni al contorno superiore del campo di moto e la parametrizzazione della coltura sono rimaste invariate rispetto a quelle utilizzate in fase di calibrazione. Riguardo invece le condizioni di moto al contorno inferiore, i dati di input sono stati ottenuti mediante il seguente approccio:

dai dati bibliografici (ERSAL) è stato possibile ottenere informazioni riguardo l'eventuale presenza di falde superficiali in corrispondenza dei siti campionati. Laddove presenti, sulla base delle informazioni disponibili (ad es.: profondità falda estiva ed invernale), ad esse è stato imposto un andamento temporale di tipo sinusoidale. Nei siti dove la falda non era stata rilevata si è imposta la condizione di drenaggio libero. Riguardo le proprietà chimico-fisiche ed idrauliche dei suoli si è fatto riferimento alla banca dati creata (PRIN 2001-2003-ARMOSA). Nei siti dove queste ultime (proprietà idrauliche) non erano disponibili si è ricorso all'utilizzo di funzioni di pedotrasferimento.

Nel paragrafo successivo verranno illustrate le modalità di selezione ed applicazione delle PTFs.

11.4.1.7 Utilizzazione delle PTFs

L'utilizzazione delle PTF ha consentito di adoperare i modelli in tutti i siti di osservazione. Infatti, di questi, 40 erano stati campionati in superficie per le proprietà idrauliche (campioni indisturbati), dei restanti orizzonti profondi e dei restanti 60 siti di campionamento si disponeva delle sole proprietà chimico-fisiche. A partire da queste, mediante l'applicazione delle pedofunzioni, è stato possibile ricavare le proprietà idrauliche sull'intero set di dati. In figura 11.29 è riproposta la distribuzione sul territorio dei 100 siti nei quali sono stati applicati i modelli di simulazione.

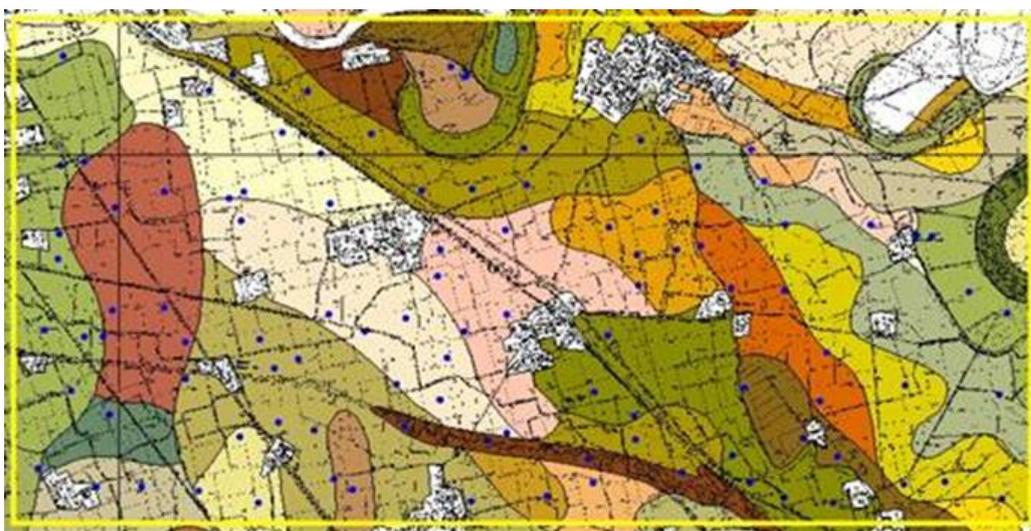


Fig.(11.29): i 100 siti nei quali sono stati applicati i modelli SWAP e CropSyst.

Dettagliatamente, le PTF testate sono state adoperate per l'utilizzo del modello SWAP, nel quale le proprietà idrauliche dei suoli sono definite dalla curva di ritenzione secondo la formulazione di van Genuchten e dalla curva di conducibilità idraulica secondo la formulazione di Mualem-van Genuchten. Di seguito sono riproposte le suddette formulazioni:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + |\alpha h|^n \right]^{-m} \quad h < 0$$

$$\theta = \theta_s \quad h \geq 0$$

La funzione di ritenzione secondo van Genuchten

$$K_r(S_e) = \frac{K(S_e)}{K_0} = S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2$$

La curva di conducibilità secondo Mualem van Genuchten

La selezione delle funzioni da applicare per la stima dei parametri della curva di ritenzione, è stata preceduta da una fase preliminare di valutazione su un subset di campioni, delle PTF più utilizzate in letteratura per la scelta delle più affidabili. Queste sono risultate la funzione di Vereecken (Vereecken et al., 1989) e la funzione HYPRES (Wösten et al., 1999), scelte anche perché risultate efficaci in precedenti studi condotti negli stessi ambienti. Il confronto tra le due è avvenuto mediante il calcolo dei seguenti indici statistici (Pachepsky et al., 2004):

$$RME = \frac{1}{n} \sum_n \frac{Ei - Mi}{Mi} \quad \text{Errore medio relativo}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Mi)^2}{n}} \quad \text{Errore quadratico medio}$$

$$RRMSE = RMSE \frac{100}{\bar{M}} \quad \text{Errore quadratico medio relativo}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ri)^2}{\sum_{i=1}^n (Mi - \bar{M})^2} \quad \text{Indice di efficienza}$$

dove: Ei = valore stimato; Mi = valore misurato; n = numero di coppie di dati; \bar{M} = valore medio dati misurati; $Ri = (Ei - Mi)$.

Nei grafici in basso è possibile osservare per ambedue le pedofunzioni, le correlazioni tra valori di contenuti idrici volumetrici stimati e misurati a tre differenti valori di potenziale matriciale (-10 cm, -100 cm, -1000 cm).

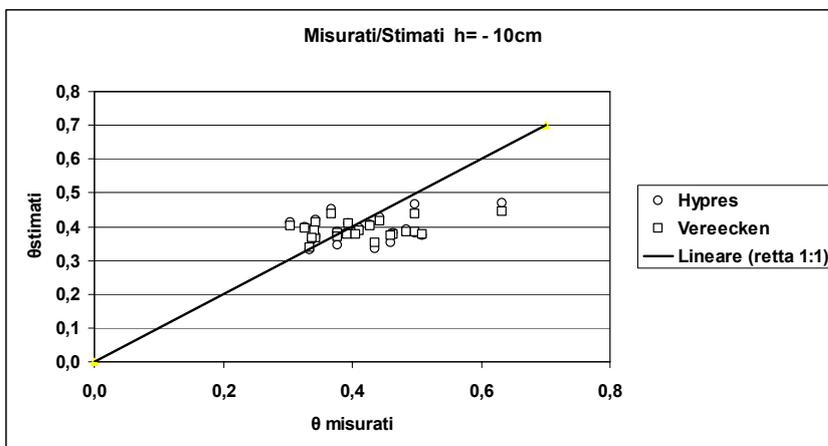
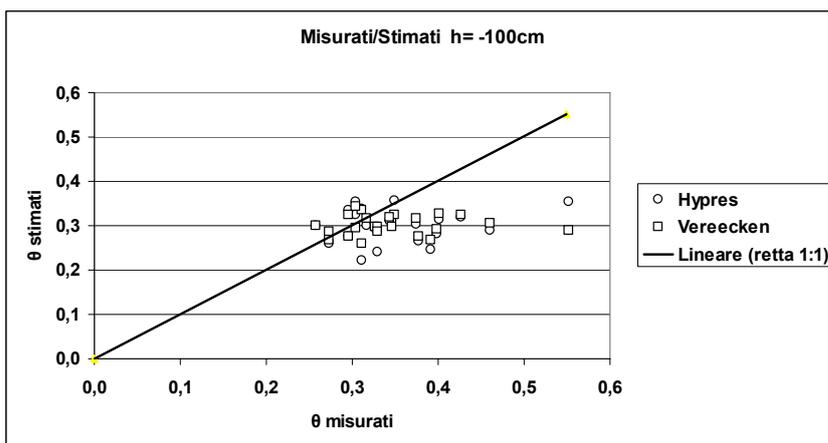


Grafico (11.1)Contenuto idrico volumetrico stimato vs misurato al potenziale $h = -10\text{cm}$; $r(\text{Vereecken}) = 0,34$; $r(\text{Hypres}) = 0,31$.



Grafico(11.2):Contenuto idrico volumetrico stimato vs misurato al potenziale $h = -100\text{cm}$; $r(\text{Vereecken}) = 0,03$; $r(\text{Hypres}) = 0,21$.

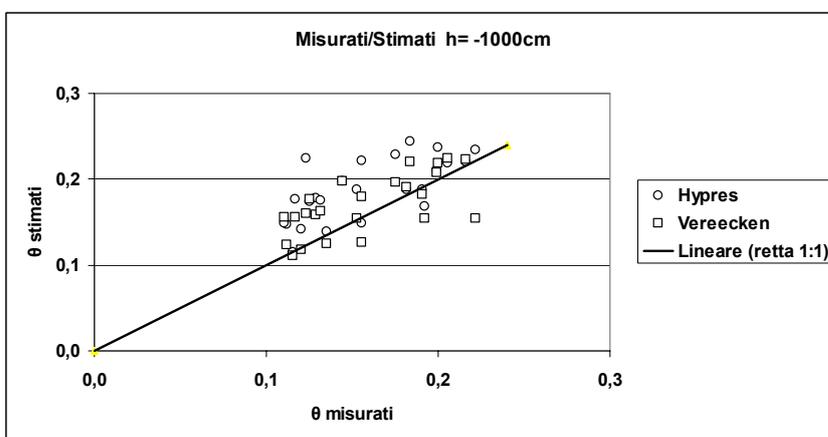


Grafico (11.3):Contenuto idrico volumetrico stimato vs misurato al potenziale $h = -1000\text{cm}$; $r(\text{Vereecken}) = 0,67$; $r(\text{Hypres}) = 0,68$.

Il calcolo dei coefficienti di correlazione tra dati misurati e stimati a tre valori di potenziale (grafici:11.1; 11.2; 11.3) ha condotto a risultati contrastanti. La PTF di Vereecken appare più efficiente a valori di potenziale prossimi la saturazione, mentre a potenziale pari a -100cm è la funzione Hypres a fornire i migliori risultati. In corrispondenza del terzo valore di potenziale investigato ($h = -1000\text{cm}$), le due PTF stimano meglio i contenuti idrici ed hanno simile efficienza. Tuttavia nella valutazione delle pedofunzioni adoperate per la stima della curva di ritenzione, è importante non tanto la coincidenza tra la stima e la misura di singoli valori di contenuto idrico in corrispondenza di un determinato potenziale, quanto piuttosto il contenuto idrico su tutto il campo di potenziali della curva. Per tale motivo si è proceduto al calcolo degli indici di errore precedentemente definiti. Nella tabella che segue vengono riportati i risultati ottenuti:

Tab. (11.12): Risultati della validazione delle PTFs sull'intero campo di esistenza delle funzioni di ritenzione.

HYPRES			Vereecken		
RME	RRMSE	EF	RME	RRMSE	EF
34,7%	28,8%	0,41	22,0%	22,7%	0,7

Sulla base di questi risultati si è scelto di utilizzare la PTF di Vereecken come pedofunzione per la stima dei parametri della curva di ritenzione di van Genuchten.

Il modello SWAP come visto in precedenza, utilizza la formulazione di Mualem-van Genuchten per descrivere la conducibilità nel non saturo. Il modello richiede un valore di scalatura della conducibilità idraulica relativa, solitamente posto uguale al valore della conducibilità in condizioni sature K_0 . Al fine di stimare quest'ultimo valore nei punti non campionati, si è ricorso all'applicazione della pedofunzione HYPRES. Per la risoluzione dei calcoli la funzione HYPRES necessita tra i dati di input, del valore della densità apparente la quale, quando non disponibile, è stata derivata applicando la PTF di Rawls & Brakensiek (Rawls, et al., 1985)

Nel modello CropSyst invece le proprietà idrauliche dei suoli sono definite dalla curva di ritenzione e di conducibilità secondo la formulazione di Campbell di seguito riportata.

$$\psi = a \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad K(\psi) = K_s \left(\frac{a}{\psi} \right)^{2+\frac{3}{b}}$$

I cui parametri sono stati derivati attraverso l'applicazione della PTF di Rawls & Brakensiek , modificata da Saxton (Rawls, et al., 1982) ed implementata automaticamente nel modello.

11.4.1.8 Estensione areale degli output

L'applicazione dei modelli nei siti distribuiti sul territorio ha consentito di ottenere diversi output (ad es. produzioni della coltura, deflussi idrici, flussi traspirativi delle piante, etc). Gli output sono stati organizzati in una banca dati (in fig. 11.30 un esempio) e poi sottoposti ad un'analisi della struttura spaziale. In figura 11.31 è possibile osservare, a titolo di esempio, la distribuzione sul territorio dei 100 siti (fonte: software ISATIS) ed i relativi output di produzione (granella-t/ha) simulati dal modello CropSyst.

ID	CoordX UTM32 WGS84	CoordY UTM32 WGS84	yield2002
P_arr	544016,08	5013081,00	21,67
P1	543947,33	5013673,47	22,56
P2	543337,01	5013674,85	21,41
P3	546652,16	5011407,08	19,96
P5	549151,88	5013330,25	21,01
P7	545672,22	5014575,16	17,37
t103	543924,79	5013440,58	20,08
t104	542715,89	5013907,73	20,46
t105	544540,50	5013963,82	20,67
t106	545969,75	5013369,54	20,10
t107	546662,10	5012114,02	18,84
t108	549371,96	5011409,47	20,20
t109	547337,26	5011486,98	18,14
t110	545653,09	5012581,87	18,19
t111	544368,66	5012366,41	19,42
t112	542514,92	5013151,28	24,06
t113	546758,70	5012551,67	20,95
t115	545471,83	5012053,53	23,81
t116	547725,51	5014663,92	23,49
t117	547134,25	5013515,07	19,05
t118	543495,78	5012501,23	21,68
t119	548792,31	5013409,92	18,59
t120	545713,81	5013688,75	19,77
t121	545472,53	5013222,49	21,88
t122	547716,60	5012924,22	21,33
t123	546977,96	5011737,83	17,60
t124	542615,15	5012118,17	20,90
t125	548402,04	5012035,39	20,61
t126	546138,46	5013722,01	20,18
t127	549052,62	5011393,63	22,76
t128	544216,86	5011876,58	19,13
t129	543601,60	5011340,16	18,87
t130	549059,89	5012161,59	15,51
t131	544440,21	5014450,28	21,14
t132	543155,74	5011373,46	20,04
t133	544938,63	5014120,96	22,80
t134	544651,35	5011428,16	20,17
t135	547477,77	5013245,20	21,33
t136	547024,25	5014073,19	20,24

Fig. (11.30): Output del modello CropSyst. Produzioni simulate nell'anno 2002 (t/ha) e relative coordinate geografiche.

yield2002

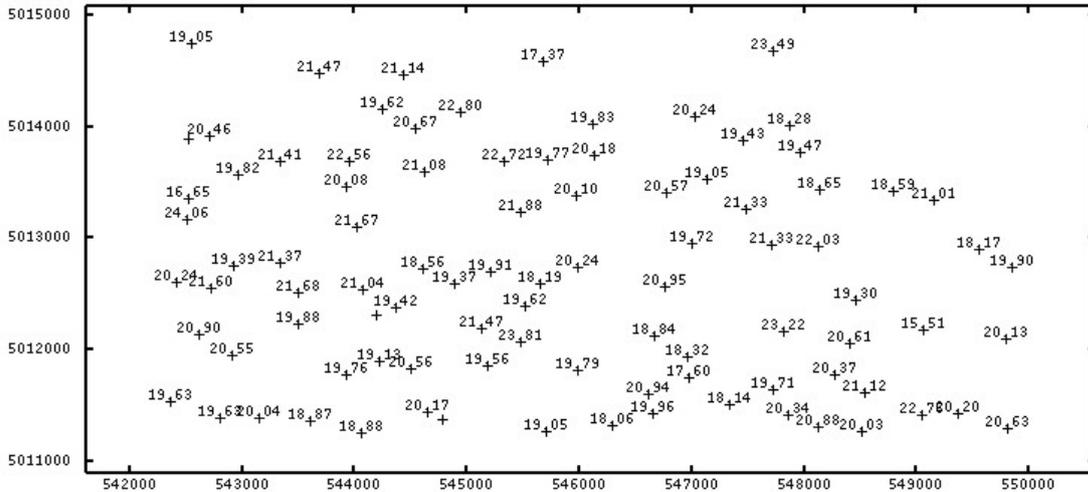


Fig.(11.31): Localizzazione dei 100 siti ed i relativi livelli produttivi simulati dal modello CropSyst. Produzioni simulate nell'anno 2002 (t/ha)

In figura (11.32) una fase dell'analisi strutturale dei dati puntuali.

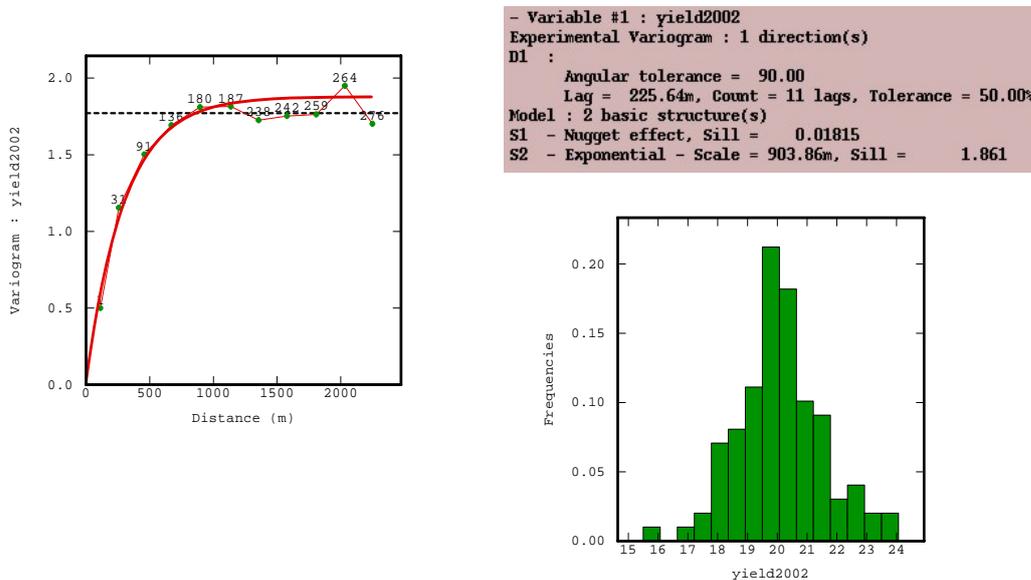


Fig.: (11.32): Semivariogramma della variabile yield2002 ed il modello ad esso adattato, comprendente un effetto nugget e una struttura di tipo esponenziale: Nugget= 0,9 (%); Scale=903,8 m; Sill= 99,1 (%).

L'analisi strutturale dei dati di output dei modelli ha dimostrato che questi ultimi generalmente presentavano una buona struttura spaziale; ciò ha consentito di procedere all'estensione areale mediante interpolazione (Kriging).

11.4.1.9 L'applicazione del modello CropSyst

Con il modello CropSyst è stato possibile ottenere stime sulle produzioni di mais (t/ha di granella) nell'areale di studio. I dati puntuali sono stati successivamente spazializzati mediante interpolazione (Kriging). Nella figura 11.33 sono riportate le mappe delle simulazioni prodotte. L'anno 2002 è stato chiaramente un anno più produttivo e questo risultato è imputabile alle condizioni climatiche favorevoli. Le maggiori produzioni vengono stimate lungo una fascia con andamento sud-est_nord-ovest, ricadente nel pedopaesaggio dei terrazzi alluvionali antichi. In corrispondenza del pedopaesaggio V dei terrazzi alluvionali recenti, si osservano livelli di produttività più bassi.

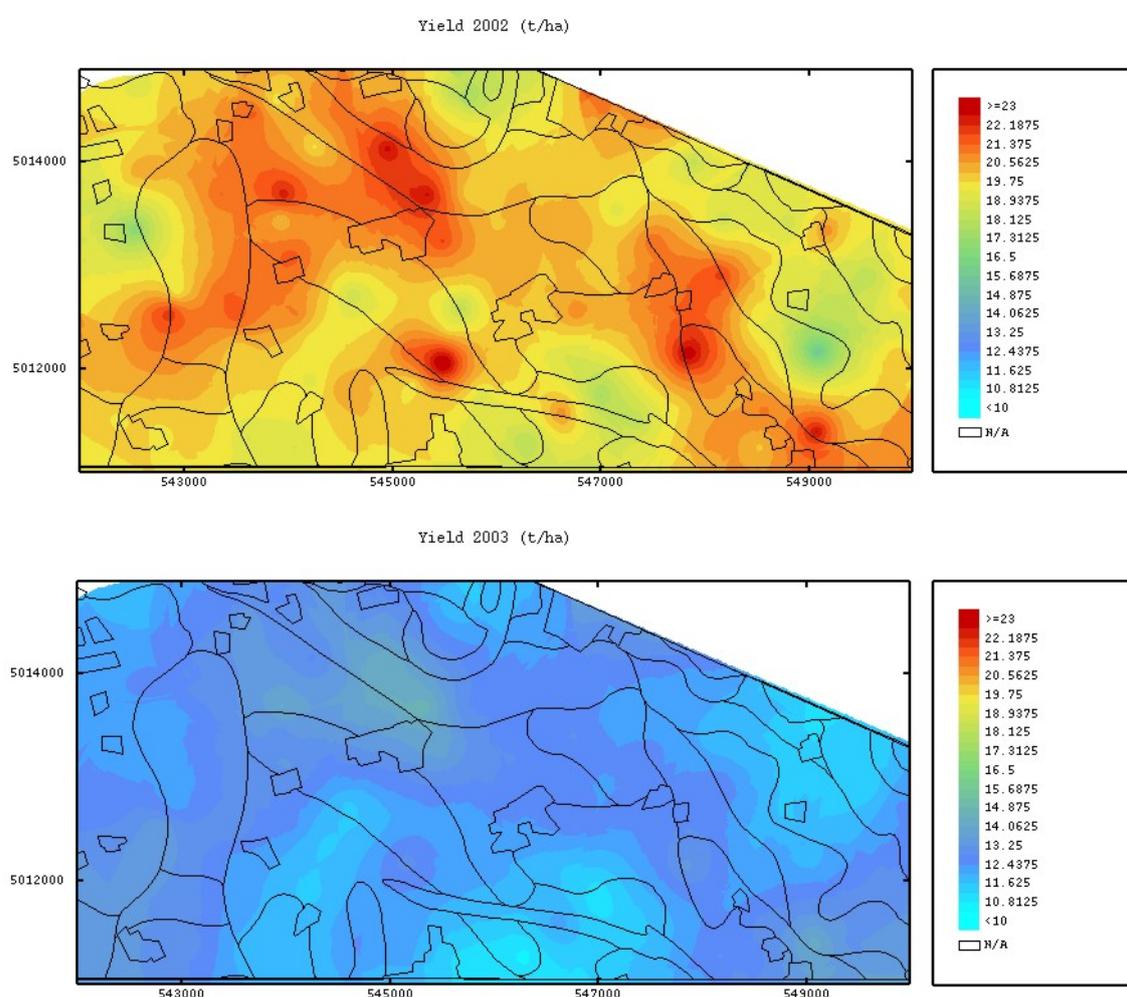


Fig. (11.33): Distribuzione areale delle produzioni stimate mediante il modello CropSyst. Nella parte superiore i risultati relativi all'anno 2002, in quella inferiore i risultati relativi all'anno 2003.

11.4.1.10 L'applicazione del modello SWAP

L'applicazione del modello SWAP ha consentito di stimare interessanti processi legati al comportamento idrologico dei suoli, come ad esempio i bilanci annuali dei deflussi idrici. Essi rappresentano sostanzialmente la quantità d'acqua che si allontana dal pedon per drenaggio, al netto dei flussi in ingresso legati alla risalita di falda. In figura 11.34 è riportata la mappa dei deflussi riferita all'anno 2002. Altra applicazione interessante è stata quella di stimare, in termini quantitativi (cm/anno), le irrigazioni necessarie nell'areale di studio per l'intero ciclo di coltivazione del mais. Sono state così individuate le aree le quali, per le particolari proprietà idrauliche dei suoli che le caratterizzano, necessitano di maggiori o minori apporti irrigui. Per questa applicazione il modello ha simulato l'intervento irriguo ogni qualvolta venisse raggiunta e superata una particolare soglia indice di stress per la coltura. Nelle mappe riportate in figura 11.35 è possibile osservare i risultati ottenuti dalle simulazioni riferite agli anni 2002-2003. E' evidente la maggiore entità degli interventi irrigui stimati per l'anno 2003. Questo risultato è chiaramente dovuto alle differenti condizioni climatiche che hanno caratterizzato i due anni. E' possibile inoltre differenziare chiaramente delle aree caratterizzate da livelli più bassi di richiesta irrigua. Corrispondono in particolare alle zone limitrofe i corsi d'acqua attivi (sistema dei terrazzi alluvionali recenti ed il grande canale della muzzza) e all'unità pedologica delimitante il paleoalveo nella zona ad ovest dell'area di studio.

Un confronto tra i deflussi idrici e le irrigazioni simulate nel 2002 (figure 11.34 e 11.35) evidenzia che esiste una corrispondenza tra le aree a minore richiesta irrigua e le aree a minori deflussi. Questo risultato è dovuto sia alla presenza delle falde superficiali (risalita di falda) che alle proprietà idrauliche dei suoli (capacità di ritenzione idrica).

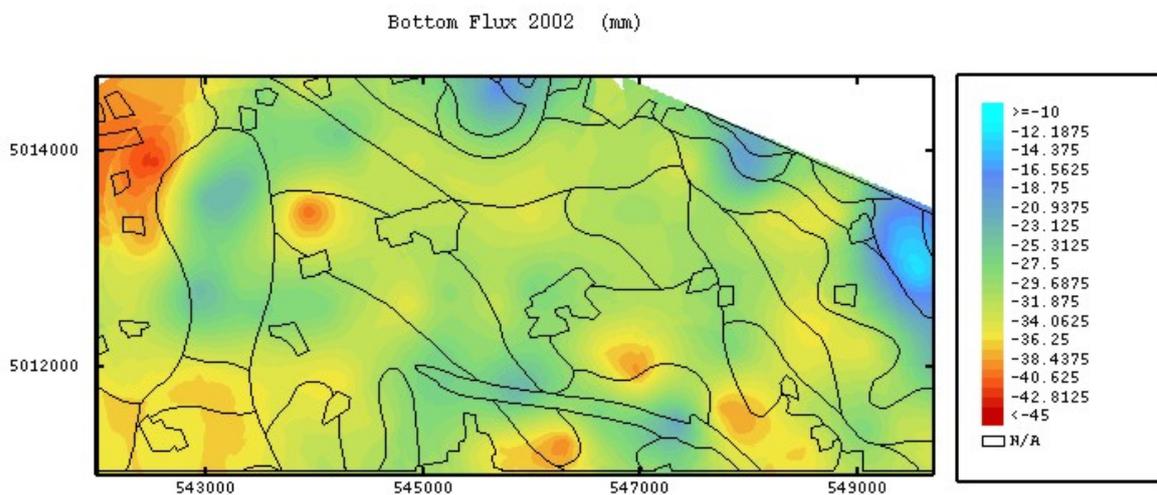


Fig:(11.34): Deflussi idrici stimati dal modello SWAP nell'anno 2002

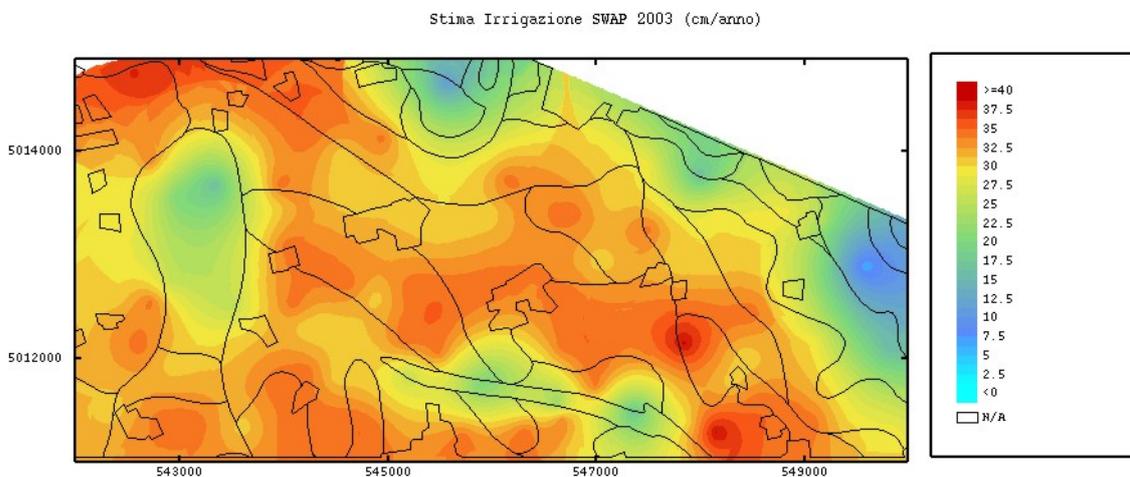
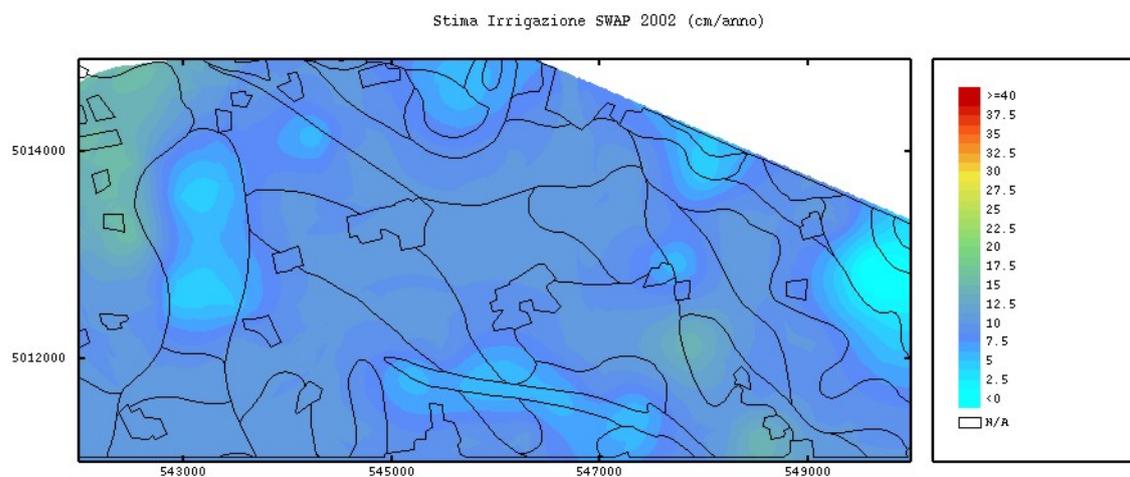


Fig. (11.35): Distribuzione areale della richiesta irrigua stimata mediante il modello SWAP. Nella parte superiore i risultati relativi all'anno 2002, in quella inferiore i risultati relativi all'anno 2003.

11.4.1.11 La valutazione dei risultati

I risultati ottenuti con gli approcci modellistici SWAP e Cropsyst sono apparsi certamente molto interessanti, anche nelle implicazioni della loro estensione spaziale. Ciononostante, la complessità della procedura, l'incertezza delle variabili (input dei modelli), la calibrazione effettuata in un solo punto del comprensorio e diversi altri fattori rendono necessaria una valutazione indipendente sull'affidabilità dei risultati prodotti dai modelli.

Quindi, al fine di valutare i dati di produzione ottenuti dalle simulazioni con il modello CropSyst si è proceduto mediante il seguente approccio:

1. confronto fra dati produttivi simulati e dati produttivi ottenuti dalle interviste ai coltivatori della zona
2. confronto fra i dati di biomassa simulati ed i dati di biomassa derivabili da immagini telerilevate (ad es. NDVI) e calcolo del coefficiente di correlazione fra dati simulati ed i valori dell'indice NDVI.

1) confronto fra dati produttivi simulati e dati produttivi ottenuti dalle interviste ai coltivatori della zona

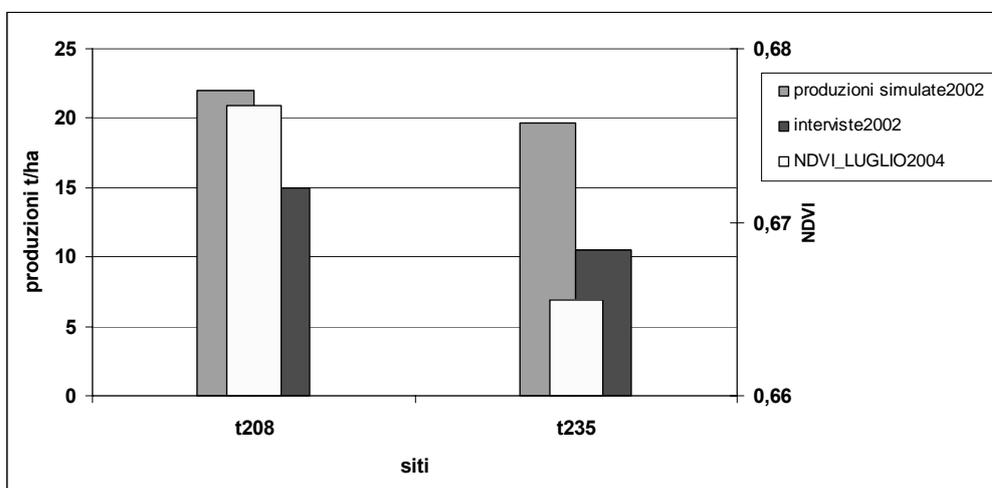
Questa fase è definita di confronto in quanto il numero esiguo di informazioni ottenute dalle interviste ai coltivatori non ha consentito di effettuare indagini statistiche significative.

Le tabelle che seguono sono riassuntive delle informazioni ottenute dalle interviste effettuate in due aziende. La prima, l'azienda Pompola, ricadente nel pedopaesaggio dei terrazzi alluvionali antichi; l'altra l'azienda Belvignatino, ricadente nel pedopaesaggio dei terrazzi alluvionali recenti. Nelle tabelle sono riportate anche le osservazioni (punti) effettuate all'interno delle suddette aziende durante le campagne pedologiche, in totale sono 5 ma suddivisibili in due gruppi, infatti a punti ricadenti nella stessa azienda sono associate produzioni uguali.

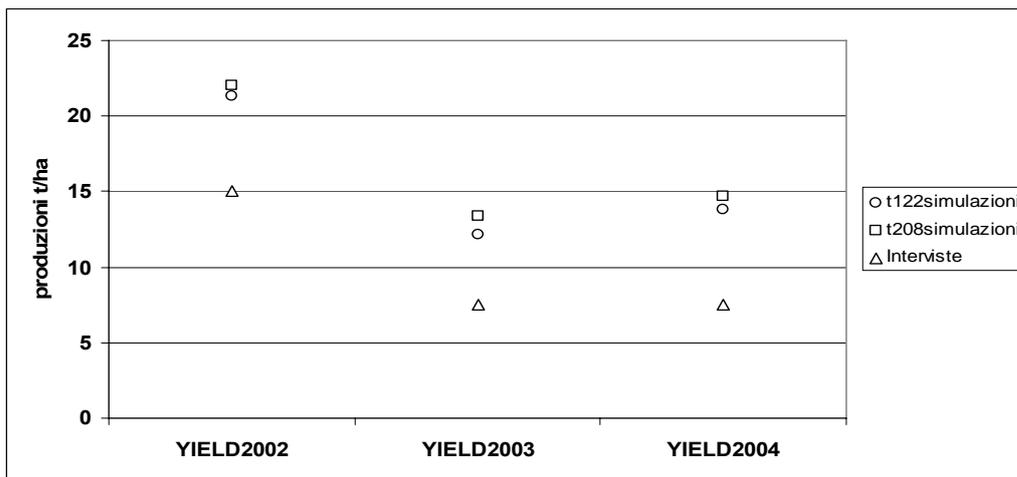
Azienda Pompola				
rese granella (t/ha)				
punti	anno 2002	anno 2003	anno 2004	anno 2005
t105	10,5	no dati	no dati	14
t137	10,5	no dati	no dati	14
t235	10,5	no dati	no dati	14

Azienda Belvignatino				
rese granella (t/ha)				
punti	anno 2002	anno 2003	anno 2004	anno 2005
t122	15	7,5	7,5	15
t208	15	7,5	7,5	15

Nel grafico in basso sono messi a confronto i risultati delle simulazioni nel 2002, i dati di produzione del 2002 ottenuti dalle interviste ai coltivatori ed i valori di NDVI registrati nel mese di Luglio 2004. I dati si riferiscono ai siti t208 e t235 ricadenti rispettivamente nell'azienda Belvignatino e nell'azienda Pompola. Tale confronto è stato effettuato con il solo scopo di mostrare l'andamento dei dati. Le simulazioni del modello CropSyst appaiono coerenti con quanto dichiarato dai coltivatori e lo stesso dicasi per i valori registrati di NDVI nei due siti. Riguardo quest'ultima informazione è necessario sottolineare che essa si riferisce ad un anno differente rispetto ai dati sulle produzioni. Tuttavia, qualora fosse dimostrato che i due siti in questione siano caratterizzati da livelli produttivi mediamente differenti e coerenti con quanto dichiarato dai coltivatori, questo risultato tenderebbe a dimostrare l'applicabilità del modello adoperato come strumento per la classificazione del territorio.



Nel grafico che segue sono visualizzati i dati di produzione simulati dal modello CropSyst nei siti t122 e t208, messi a confronto con i dati di produzione ottenuti dalle interviste fatte ai coltivatori e riferiti all'azienda nella quale i suddetti punti ricadono. I dati si riferiscono agli anni 2002-2004 ed anche in questo caso come nel caso precedente, è possibile apprezzare il comportamento simile fra essi. In particolare, il modello ha simulato produzioni molto simili nei due siti limitrofi e questo risultato rispecchia quanto ci si aspetterebbe. Il modello anche in questo caso sovrastima le produzioni dichiarate.



2) Confronto fra i dati di biomassa simulati ed i dati di biomassa derivabili da immagini telerilevate (ad es. NDVI)

Per effettuare un confronto a scala territoriale fra dati di biomassa simulati ed i dati di biomassa derivabili da immagini telerilevate si è proceduto ad acquisire immagini che potessero fornire indici di vegetazione fortemente correlati alla biomassa fotosinteticamente attiva prodotta. (Malingreau, 1989). Tra questi indici il più classico e maggiormente diffuso è certamente l'NDVI; tale indice è stato così utilizzato come riferimento per questa indagine. E' anche noto che gli indici di vegetazione (e anche l'NDVI) offrono le più importanti prospettive di indagine se disponibili in una serie temporale.

Gli strati informativi acquisiti ai fini di questa indagine valutativa sono:

- Immagini Modis dell'NDVI (serie multitemporale relativa al periodo marzo-settembre del 2004), risoluzione spaziale 231 m
- Immagini Quick Bird del visibile (RGB) e del vicino IR dalle quali è stato ottenuto l'NDVI (le immagini erano relative rispettivamente al 05 giugno e al 21 luglio 2004), risoluzione spaziale 2,4 m.

La procedura è consistita nel correlare i dati puntuali delle simulazioni con i valori di NDVI corrispondenti.

Segue una descrizione delle diverse fasi affrontate.

A) Elaborazione della serie multitemporale dei dati Modis

Dalla elaborazione delle immagini multitemporali NDVI del satellite Modis sono stati ottenuti alcuni livelli informativi correlati diversamente alla produzione di biomassa fotosinteticamente attiva:

- 1) una immagine nella quale ad ogni pixel è stato assegnato il valore del massimo incremento di NDVI o della derivata massima, ottenuta calcolando la differenza tra un'immagine e quella immediatamente precedente per l'intero periodo marzo-settembre (modis_dermax);
- 2) una immagine nella quale ad ogni pixel è stato assegnato il valore somma dell'NDVI, ottenuta sommando tutte le immagini Modis disponibili nel periodo marzo-settembre (modis_somma);
- 3) una immagine nella quale ad ogni pixel è stato assegnato il valore massimo di NDVI raggiunto durante il periodo considerato (modis_max);
- 4) una immagine nella quale ad ogni pixel è stato associato il valore somma di NDVI raggiunto nel periodo di crescita della coltura. Questa è stata ottenuta sommando le immagini satellitari disponibili per il solo periodo marzo-luglio (modis_somma_1-9);

5) una immagine nella quale ad ogni pixel è stato associato il valore somma di NDVI raggiunto nel periodo di maturazione della coltura. Questa è stata ottenuta sommando le immagini satellitari disponibili per il solo periodo luglio-settembre (modis_somma_9-13);

Tutti gli strati informativi così prodotti avrebbero un elevato valore informativo se non fosse per la risoluzione spaziale grossolana. In particolare la presenza di pixel di circa 231 m di lato fa sì che molti dei pixels dell'immagine NDVI si riferiscano a coperture vegetali complesse (ad es. diverse specie agrarie, diverse % di terreno nudo, manufatti, etc.) ed abbiano quindi un valore NDVI artefatto da queste contaminazioni spettrali. Tale problematica deve essere affrontata se si vuole utilizzare in maniera proficua questa tipologia informativa.

In figura 11.36 a titolo d'esempio si riporta la mappa dell'NDVI ricavata da una delle elaborazioni effettuate sulle immagini multispettrali del satellite Modis.

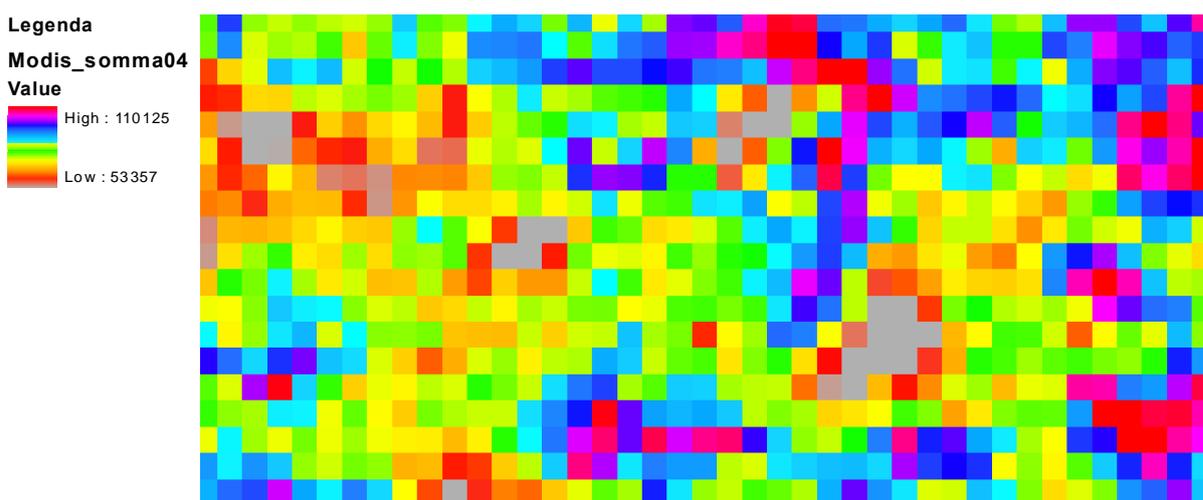


Fig.(11.36): mappa della distribuzione dell'NDVI (modis_somma) nell'areale di studio.

B) Elaborazione delle immagini Quick Bird e creazione della maschera.

Le immagini Quick Bird sono state utilizzate sia (i) per ottenere le informazioni sull'NDVI per i due diversi momenti di giugno e luglio, che (ii) per selezionare, nell'ambito dell'areale di interesse, esclusivamente le aree con presenza di mais. Infatti ove si potesse disporre di una classificazione ad alta risoluzione spaziale delle sole aree coltivate a mais nell'area di studio allora si potrebbero meglio utilizzare i dati Modis separando i pixel buoni (quelli con una copertura di mais completa) dai pixel con artefatti (quelli con copertura di mais non completa).

E' stata così approntata una procedura di classificazione supervisionata che, grazie alla risoluzione molto elevata delle immagini, ha permesso di selezionare tutte le aree classificabili come aree "vegetate a mais", tale procedura ha quindi permesso di escludere dalle elaborazioni statistiche tutte le aree in cui non era presente tale coltura.

Questa stessa "maschera" è stata così utilizzata sulle immagini Modis, allo scopo di evitare di utilizzare, nelle elaborazioni statistiche riguardanti questo strato informativo, i pixels in cui l'uso del suolo non fosse omogeneo.

In figura 11.37 a titolo d'esempio si riporta la mappa dell'NDVI ricavata dall'elaborazione effettuata sulle immagini del satellite Quick Bird relative al mese di luglio 2004..



Fig.(11.37): mappa della distribuzione dell'NDVI (Quick Bird 21 luglio 2004) nell'areale di studio.

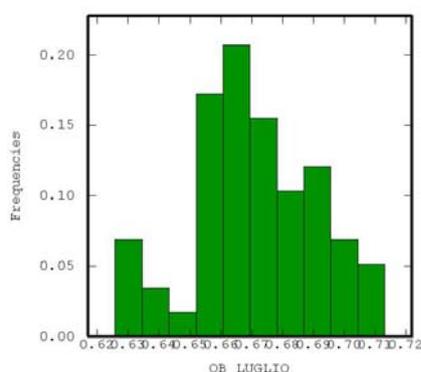
C) Selezione dei punti

Ricorrendo all'utilizzo del software SAGA si è potuta effettuare una sovrapposizione tra le immagini NDVI mascherate (sia dati Modis che Quik Bird) ed i dati puntuali delle simulazioni. In questo modo si è ottenuta una banca dati nella quale ad ogni dato di produzione simulata, corrispondeva un valore (pixel) di NDVI. Riguardo il quik bird, da tale banca dati sono stati eliminati i pixel prossimi a manufatti (ad es. strade o sentieri) per escludere artefatti dovuti all'effetto "bordo". Nel caso del Modis invece (minore risoluzione spaziale) sono stati esclusi tutti i pixel relativi ad aree non omogenee dal punto di vista dell'uso del suolo o aree miste (ad es. presenza di strade o abitazioni).

D) Elaborazioni

Dopo queste fasi si è proceduto ad un'analisi statistica dei dati.

La distribuzione di frequenze riportata qui in basso è riferita ai valori di NDVI, limitatamente ai punti selezionati con la procedura descritta precedentemente, ottenuti dall'immagine Quick Bird del mese di luglio 2004. E' interessante notare la distribuzione bimodale dell'istogramma, che farebbe pensare alla presenza di due ambienti differenti dal punto di vista del vigore vegetativo. In effetti questa ipotesi è rafforzata dal fatto che la quasi totalità dei punti relativi alla sub-popolazione di dati distinguibile alla sinistra dell'istogramma, ricade nel pedopaesaggio dei terrazzi alluvionali recenti o pedopaesaggio V. Questo risultato è coerente con quanto emerso dalla spazializzazione dei dati di output del modello CropSyst, visibile in figura 11.33, nella quale è possibile osservare aree a minor livello produttivo concentrate nel pedopaesaggio V, nella zona ad est dell'areale di studio.



Nel grafico 11.4 sono messi a confronto i valori dell'indice NDVI registrati dal Quick Bird nel mese di Luglio 2004 e le produzioni simulate dal modello CropSyst nello stesso anno. Il coefficiente di correlazione riportato ($r = 0,63$ $P < 0,01$) è risultato dall'indagine statistica

Nella tabella 11.12, visibile nella pagina successiva, sono riportati i risultati dell'indagine statistica effettuata sull'intero set di dati, dai quali sono state sottratte le osservazioni t123 e t210.

Tabella (11.12): risultati dell'indagine statistica sull'intero set di dati. Eliminate le osservazioni t123 e t210

Correlations

		YIELD2002	BIOMASSA02	YIELD2003	BIOMASSA03	YIELD2004	BIOMASSA04	QB_GIUGNO	QB_LUGLIO	MODIS_D ERMAX	MODIS_MAX	MODIS_S OMMA	MODIS_S OMMA1-9	MODIS_S OMMA9-13
YIELD2002	Pearson Correlation	1	,976**	,918**	,944**	,719**	,719**	,028	,497**	,134	,082	,198	,176	,313
	Sig. (2-tailed)	,	,000	,000	,000	,000	,000	,840	,000	,607	,755	,447	,499	,221
	N	96	96	96	96	65	65	56	56	17	17	17	17	17
BIOMASSA02	Pearson Correlation	,976**	1	,912**	,945**	,713**	,726**	,078	,482**	,130	,094	,195	,178	,315
	Sig. (2-tailed)	,000	,	,000	,000	,000	,000	,568	,000	,618	,720	,454	,495	,218
	N	96	96	96	96	65	65	56	56	17	17	17	17	17
YIELD2003	Pearson Correlation	,918**	,912**	1	,983**	,773**	,786**	,137	,587**	,242	,135	,325	,339	,342
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,	,000	,000	,000	,314	,000	,350	,606	,203	,184	,179
	N	96	96	96	96	65	65	56	56	17	17	17	17	17
BIOMASSA03	Pearson Correlation	,944**	,945**	,983**	1	,769**	,779**	,148	,581**	,243	,134	,310	,324	,335
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,	,000	,000	,275	,000	,348	,608	,226	,204	,188
	N	96	96	96	96	65	65	56	56	17	17	17	17	17
YIELD2004	Pearson Correlation	,719**	,713**	,773**	,769**	1	,985**	,036	,636**	,127	,329	,424	,429	,442
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,	,000	,792	,000	,628	,198	,090	,085	,075
	N	65	65	65	65	65	65	56	56	17	17	17	17	17
BIOMASSA04	Pearson Correlation	,719**	,726**	,786**	,779**	,985**	1	,048	,627**	,145	,320	,451	,444	,474
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,	,723	,000	,580	,210	,069	,074	,055
	N	65	65	65	65	65	65	56	56	17	17	17	17	17
QB_GIUGNO	Pearson Correlation	,028	,078	,137	,148	,036	,048	1	-,018	-,287	,285	,180	,115	,305
	Sig. (2-tailed)	,840	,568	,314	,275	,792	,723	,	,898	,366	,369	,575	,721	,336
	N	56	56	56	56	56	56	56	56	12	12	12	12	12
QB_LUGLIO	Pearson Correlation	,497**	,482**	,587**	,581**	,636**	,627**	-,018	1	,206	,217	,533	,620*	,213
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,898	,	,521	,498	,074	,031	,507
	N	56	56	56	56	56	56	56	56	12	12	12	12	12
MODIS_DERMAX	Pearson Correlation	,134	,130	,242	,243	,127	,145	-,287	,206	1	,099	,025	,050	-,031
	Sig. (2-tailed)	,607	,618	,350	,348	,628	,580	,366	,521	,	,705	,925	,848	,905
	N	17	17	17	17	17	17	12	12	17	17	17	17	17
MODIS_MAX	Pearson Correlation	,082	,094	,135	,134	,329	,320	,285	,217	,099	1	,707**	,660**	,807**
	Sig. (2-tailed)	,755	,720	,606	,608	,198	,210	,369	,498	,705	,	,001	,004	,000
	N	17	17	17	17	17	17	12	12	17	17	17	17	17
MODIS_SOMMA	Pearson Correlation	,198	,195	,325	,310	,424	,451	,180	,533	,025	,707**	1	,948**	,809**
	Sig. (2-tailed)	,447	,454	,203	,226	,090	,069	,575	,074	,925	,001	,	,000	,000
	N	17	17	17	17	17	17	12	12	17	17	17	17	17
MODIS_SOMMA1-9	Pearson Correlation	,176	,178	,339	,324	,429	,444	,115	,620*	,050	,660**	,948**	1	,649**
	Sig. (2-tailed)	,499	,495	,184	,204	,085	,074	,721	,031	,848	,004	,000	,	,005
	N	17	17	17	17	17	17	12	12	17	17	17	17	17
MODIS_SOMMA9-13	Pearson Correlation	,313	,315	,342	,335	,442	,474	,305	,213	-,031	,807**	,809**	,649**	1
	Sig. (2-tailed)	,221	,218	,179	,188	,075	,055	,336	,507	,905	,000	,000	,005	,
	N	17	17	17	17	17	17	12	12	17	17	17	17	17

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Il confronto tra i dati delle simulazioni del modello CropSyst e le informazioni sui livelli produttivi ottenute dalle interviste ai coltivatori, seppur effettuato su un numero limitato di punti, ha portato a risultati piuttosto incoraggianti. Ma ancora più incoraggianti sono i dati riportati nella tabella (11.12), dove appare evidente la correlazione tra l'indice NDVI (ed alcune sue elaborazioni) ed i dati di biomassa e produzione simulati dal modello CropSyst. Nel dettaglio, riguardo i dati del Quick Bird, è interessante notare la debole correlazione ottenuta confrontando i valori di NDVI relativi al mese di giugno 2004, con i dati delle simulazioni riferiti ai tre anni 2002-2004, che diventa forte e significativa nel confronto tra le stesse simulazioni ed i valori di NDVI riferiti al mese di luglio 2004. Questo risultato è senz'altro dovuto al fatto che mentre il mese di giugno rappresenta per la coltura (mais nel caso specifico) un periodo di accrescimento, durante il quale possono essere molto differenti i livelli di crescita (e quindi di produzione di biomassa) raggiunti dalle diverse piantagioni in ragione anche di semine anticipate o ritardate, il mese di luglio rappresenta invece per le colture un periodo di avvicinamento al massimo accrescimento e quindi a quella che sarà la produzione massima (o di fine ciclo) di biomassa. E' ragionevole attendersi che in questo periodo vi sia anche una riduzione, rispetto al mese di giugno, di quella parte di variabilità osservabile nei livelli di crescita raggiunti dalle diverse coltivazioni, dovuta a semine avvenute in periodi differenti. Il tutto si traduce, appunto, in una maggiore correlazione tra l'indice di vegetazione ottenuto nel mese di luglio e le simulazioni prodotte dal modello CropSyst. E' interessante notare inoltre che le suddette correlazioni tendono ad aumentare passando dai dati delle simulazioni del 2002 a quelli delle simulazioni del 2004, che rappresenta l'anno in cui sono state acquisite le immagini satellitari.

Osservando invece i risultati ottenuti dal confronto tra le simulazioni del modello e gli indici derivati dalle immagini Modis, appare interessante notare che le correlazioni più forti si hanno con l'indice definito "modis 9-13", che rappresenta in pratica un indice direttamente proporzionale alla durata del periodo compreso tra il massimo accrescimento e la senescenza della coltura (fase di maturazione). Per cui, a valori più elevati del suddetto indice, corrispondono fasi più lunghe e quindi più lente di maturazione. Il che comporta produzioni maggiori. Anche in questo caso le migliori correlazioni sono riferite ai dati del 2004.

Nel complesso, la valutazione di affidabilità dei dati prodotti dalle simulazioni ha condotto a risultati positivi che incoraggiano a definire opportuna la scelta fatta di adoperare il modello CropSyst per stimare le produzioni nell'areale di studio. Un altro aspetto molto interessante emerso da questa analisi è che gli indici di correlazione ottenuti tra i dati acquisiti dai satelliti

ed i dati delle simulazioni riferiti ad anni precedenti le acquisizioni satellitari, rafforzano l'attendibilità generale dell'approccio modellistico alla Land Suitability per la coltivazione del mais.

11.4.2 L'approccio classico alla Land Evaluation

Al fine di effettuare un confronto tra approcci per la valutazione dell'attitudine dei suoli alla coltivazione del mais, nell'areale di studio è stato applicato anche uno schema classico (di tipo qualitativo) di valutazione del territorio (Land Suitability per la coltivazione del mais) alla scala di unità cartografica. La metodica alla quale si è fatto riferimento è quella adottata dalla Regione Lombardia (ERSAL 1991- I suoli del parco Ticino Abbatense). In figura 11.38 è possibile osservare i risultati ottenuti. Nel territorio studiato si distinguono 2 sole classi di attitudine (ottima e buona), che identificano l'area nel suo insieme, come un ambiente particolarmente idoneo alla coltivazione del mais; un risultato coerente con quella che è la realtà agricola della provincia lodigiana. Tuttavia, come si vedrà nel prossimo paragrafo, osservando la distribuzione spaziale delle classi attitudinali, emergono marcate differenze tra i risultati ottenuti con questo approccio classico alla Land Evaluation e quelli ottenuti mediante l'approccio combinato (modellistico-geostatistico).

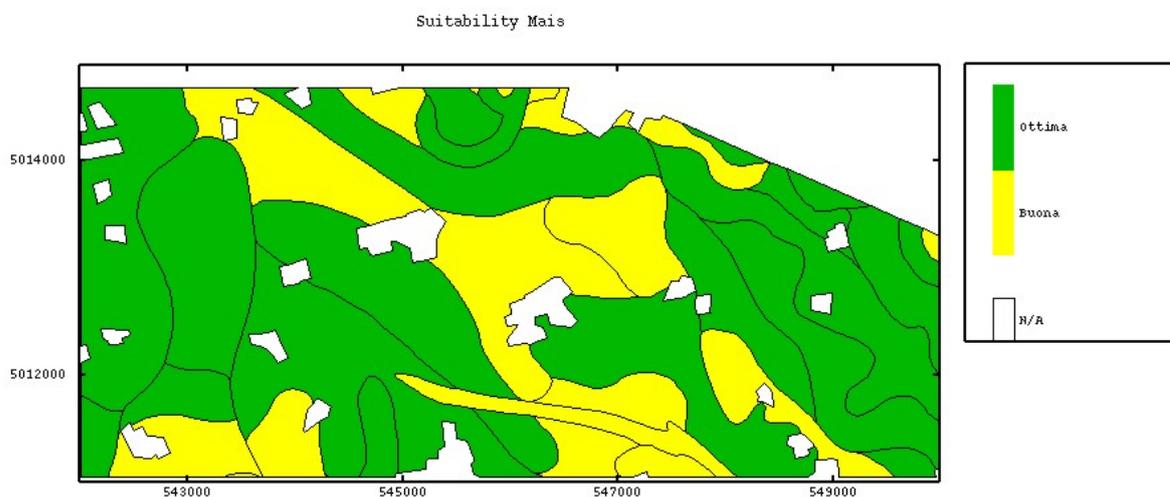


Fig. (11.38): land suitability per la coltivazione del mais nell'areale lodigiano; in verde le unità cartografiche classificate come "ottime", in giallo quelle classificate "buone".

11.4.3 I risultati a confronto

Osservando i risultati ottenuti (in fig. 11.39 sono messi a confronto) in seguito all'utilizzazione dei due differenti approcci alla land evaluation (land suitability per il mais), è possibile concludere che essi conducano a valutazioni pressoché contrapposte. Infatti, le aree che risultano essere maggiormente produttive secondo le stime ottenute con il modello CropSyst (e la successiva distribuzione areale), corrispondono spesso alle unità cartografiche classificate come meno idonee alla coltivazione del mais (schema classico land evaluation- Regione Lombardia). E' da sottolineare la possibilità di apprezzare, mediante l'approccio combinato modellistico-geostatistico, il maggior dettaglio territoriale delle informazioni e una più articolata classificazione del territorio.

In figura (11.40) sono riportati i valori medi dell'indice NDVI (Quick bird Luglio 2004) relativi alle due classi (Buona, Ottima) di attitudine alla coltivazione del mais individuate con l'approccio classico presentato. Essi sono stati calcolati suddividendo l'intero set di dati adoperato per la valutazione del modello CropSyst, in due sub-set, ognuno dei quali costituito dai valori di NDVI ricavati nei punti ricadenti all'interno della classe di appartenenza. Appare evidente che i valori medi calcolati all'interno delle due classi sono praticamente identici, così come i valori della deviazione standard ad essi associati. Non vi è, in pratica, alcuna relazione tra i valori ricavati di NDVI e le classi di attitudine individuate con l'approccio classico alla land suitability. Questo risultato tende a confermare, almeno per questo caso studio, che applicare procedure standard negli studi di valutazione territoriale, può condurre a risultati forvianti. Ciò è dovuto al fatto che nelle procedure standard spesso non vengono presi in considerazione importanti processi che sono attivi nel suolo e che variano sia nello spazio che nel tempo.

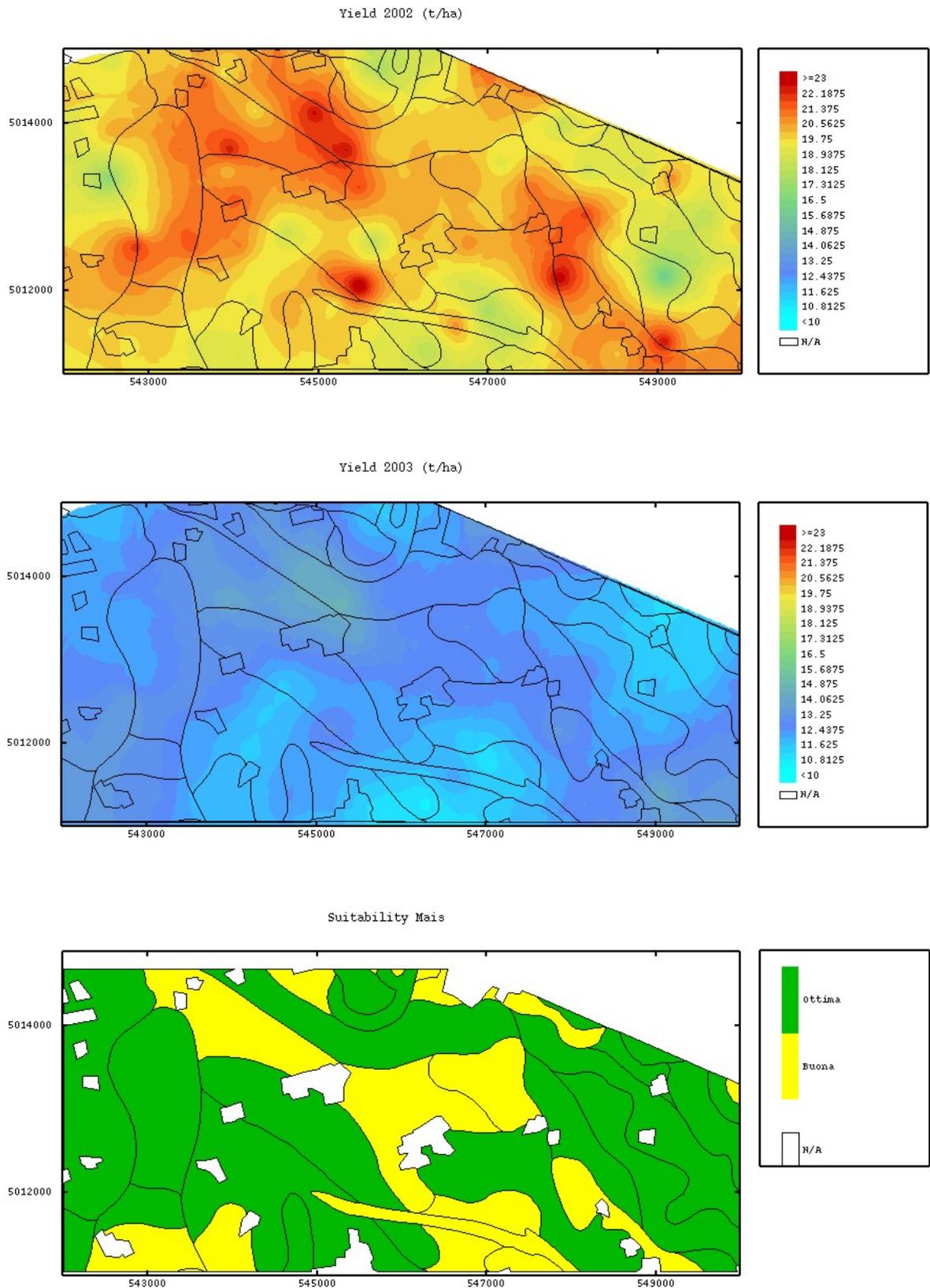


Fig.(11.39): il confronto tra gli approcci. Le produzioni stimate dal modello CropSyst negli anni 2002-2003 e la land suitability secondo l'approccio classico.

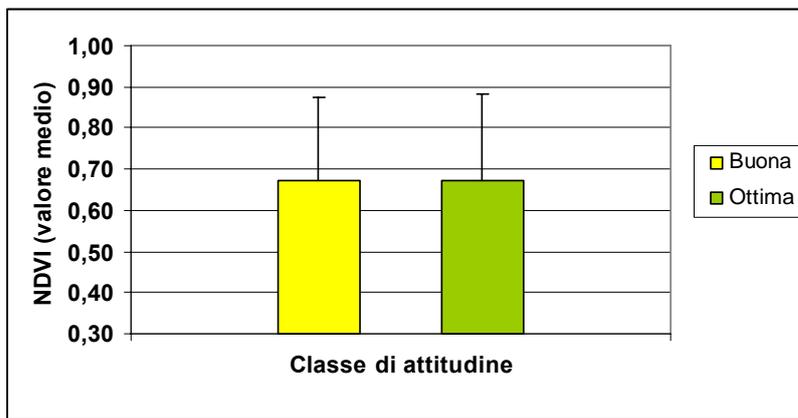


Fig.(11.40): confronto tra NDVI (quick bird valore medio) e classi attitudinali (Land Suitability per il mais-approccio classico).

12. Considerazioni conclusive

La valutazione del territorio secondo i metodi classici (FAO, 1976), rappresenta ancora oggi la base di partenza di qualsiasi pianificazione territoriale. Tale approccio oggi inizia ad evidenziare delle importanti limitazioni messe in evidenza dal crescente interesse delle Istituzioni e dei singoli individui per approcci quantitativi piuttosto che qualitativi, in grado di dare risposte a problematiche sempre più complesse. L'interesse è quello di passare da approcci empirici ad approcci che abbiano una base fisica, una valutazione dell'errore e siano quindi meglio esportabili a scala territoriale. Solitamente infatti si ricorre all'applicazione di modelli empirici sviluppati e talvolta validati con successo in un unico ambiente, la cui utilizzazione in ambienti differenti può condurre a risultati fuorvianti. Ciò generalmente implica che tali modelli, per funzionare bene, necessitano di nuove calibrazioni e nuove validazioni per ogni diverso ambiente.

Questo limite può essere superato ricorrendo ad approcci o modelli basati principalmente su concetti fisici e leggi universalmente valide (ad es. bilanci di massa ed energia, leggi di diffusione, convezione e dispersione, leggi della cinetica, etc), quindi teoricamente applicabili in qualsiasi contesto ambientale.

Il lavoro presentato si inserisce in quest'ambito e vorrebbe rappresentare un approccio moderno ed alternativo alla *land evaluation* con l'obiettivo di migliorare il processo di valutazione del territorio.

La metodologia utilizzata ha mostrato l'idoneità dell'utilizzo di modelli fisicamente basati nelle applicazioni di Land Evaluation.

Ciò richiede una conoscenza dei suoli, così come disponibile nelle cartografie dei suoli al semidettaglio (1:50.000), ma anche un'accurata indagine di idrologia del suolo o quanto meno di valutazione, in alcuni punti del territorio, della bontà delle stime semplificate delle proprietà idrauliche attraverso Pedo Transfer Functions o funzioni di pedotrasferimento. Tale indagine è però spesso assente nelle banche dati suolo disponibili nelle diverse regioni del territorio europeo.

L'utilizzo di una land evaluation caratterizzata da una maggiore base fisica nel processo di valutazione, come quella condotta in questa tesi, consente migliori estensioni areali dei dati ottenuti e prospettive migliori per la simulazione di nuovi scenari agroambientali. Infatti, l'applicazione di modelli in grado di simulare i processi che avvengono in un sistema, consente di stimarne le risposte quando posto in differenti condizioni.

Gli studi di variabilità spaziale, nonostante gli oltre 100 siti di campionamento in 2000 ha, hanno mostrato una notevole difficoltà nell'estensione areale delle proprietà fisiche la cui

variabilità era poco strutturata e quindi inadatta ad essere trattata con tecniche geostatistiche. Questo risultato ha messo in evidenza, almeno per ciò che riguarda questo caso studio, i limiti di applicabilità del solo approccio geostatistico per lo studio della variabilità spaziale delle proprietà dei suoli. Migliori risultati si sarebbero probabilmente ottenuti intensificando il numero di osservazioni sul territorio, a scapito ovviamente dei costi del rilevamento. Oggi infatti l'interesse comune è rivolto ad approcci tramite i quali ottenere il maggior numero di informazioni al minor costo. In questa direzione vanno senz'altro tutte le tecniche di indagine territoriale che prevedono l'utilizzo di variabili ausiliarie, disponibili ad altissima risoluzione e a basso costo, da adoperare come covariate per la stima delle variabili di interesse. Tra tali tecniche vi sono approcci combinati geostatistici-deterministici (ad es. regression kriging), alternativi agli approcci standard adoperati nel presente lavoro, oppure approcci deterministici come l'environmental correlation. Nel tentativo di ricorrere a tali tecniche per lo studio della struttura spaziale di importanti variabili di input dei modelli (ad es. tessitura, contenuto d'acqua alla saturazione, etc.), è stato prodotto un DEM ad alta risoluzione dell'area di studio. Esso tuttavia ha consentito di ottenere informazioni utili (per esempio ad ipotizzare alcune dinamiche di trasporto alluvionale), ma purtroppo non esaustive per gli scopi prefissati. Il risultato ottenuto è comunque molto incoraggiante se si considera la natura pressoché pianeggiante del territorio lodigiano, ed apre nuove prospettive per studi futuri. L'applicazione dei modelli digitali del terreno è infatti oggi molto diffusa in studi territoriali di ambienti collinari o di montagna (McBratney et al., 2003; McKenzie et al., 2000), nei quali i processi geomorfologici sono molto più evidenti, ma poco si sa sulla loro applicazione in pianura.

Alla luce dei risultati ottenuti ulteriori indagini, con l'ausilio di altri strati informativi (DEM ad altissima risoluzione spaziale, evoluzione temporale degli indici di vegetazione ad alta risoluzione spaziale, radiometria gamma, etc.) e di altre procedure di elaborazione (ad es. geostatistica multivariata, etc.) sono necessarie.

Nonostante questi limiti, l'applicazione di modelli per la simulazione della crescita delle colture e dei processi idrologici, ha condotto a risultati molto interessanti e validi a scala territoriale (le correlazioni con gli indici di vegetazione telerilevati sono buone) per l'interpretazione della distribuzione areale dei pedambienti nell'area di studio, aprendo prospettive interessanti verso nuovi approcci alla *Land Evaluation*. L'applicazione dei modelli di simulazione, infatti, potrebbe anche costituire un'integrazione agli schemi classici già esistenti. Come nel caso del *Land Capability system*, la cui classificazione del territorio potrebbe essere coadiuvata dalle stime di produzione effettuate per differenti tipi di

coltivazioni, oppure del *Land Classification for Irrigated Agriculture*, che potrebbe prevedere l'utilizzo di modelli su base Ritchards per il calcolo di indici di efficienza delle irrigazioni.

Bibliografia

- A Framework for Land Evaluation, FAO. Rome 1976.
- Austin, M.P., McKenzie, N.J., 1988. Data analysis. In: Gunn, R.H., Beattie, J.A., van der Graff, R.H.M. Eds. , Australian Soil and Land Survey Handbook. Guidelines for Conducting Surveys, Chap. 11. Inkata Press, Melbourne.
- Beckett, P., Webster, R., 1971. Soil variability: a review. *Soils and Fertilizers* 34, 1 – 15.
- Beek, K.J., 1980 From soil survey interpretation to land evaluation
- Belmans C, Wesseling J.G., Feddes R.A., 1983 – *Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE*. *J. Hydrol.*, 63, pp. 271-286
- Bloemen, W., 1980. Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.*, 43, 581-605.
- Böhner, J., Conrad, O., Ringeler, A. (2002): SAGA, System for Automated Geoscientific Analyses. Version 1.2. Saga Team, Göttingen 2002.
- Borlaug, N.E. and Dowsell, C.R. (1994). Feeding a human population that increasingly crowds a fragile planet. 15th Congress International Soil Science Society, Acapulco, July 10-16 1994.
- Bouma J., Droogers P., *Comparing different methods for estimating the soil moisture supply capacity of a soil series subjected to different types of management*, *Geoderma* (1999) 92, 185-197.
- Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9:177–213.
- Bouma, J. and Bregt, A.K. (eds) 1989. *Land Qualities in space and time*. Wageningen. 352pp
- Bouma, J. *The land Use Systems approach to planning sustainable land management at several scales*. *ITC Journal* 1997 3/4
- Bouma, J., Land evaluation for landscape units. *In: Handbook of Soil Science / ed. by M.E. Sumner. - Florida CRC Press LLC 1999 G393-412.*
- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J. e Stephenson, G.R., 1984. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. ASAE Paper No.PNR-84-302, St. Joseph, Michigan.
- Briggs L.J., Shantz H.L., *The wilting coefficient for different plants and its indirect determination*, USDA Bur. Plant Ind., Bull. (1912) 230, Washington, DC.

- Brinkman, R. and A.J.Smith (Eds.) (1973). *Land evaluation for rural purposes*. Summary of an expert consultation, Wageningen. Publ. 17, ILRI.
- Brooks R.H. e Corey A.T., *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology paper no.3, Colorado State University, Fort Collins, 1964.
- Campbell, G.S. e Shiozawa, S., 1992. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. In: van Genuchten M.Th., Leij, F.J. and Lund, L.J. (Editors), *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*; Riverside, California, October 11-13, 1989, pp. 317-328.
- Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, 117:311-314
- Campbell, G.S., 1985. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems*. 150 pp., Elsevier, New York.
- Cassel, D.K., Kachanoski R.G., Topp G.C. (1994). Practical considerations for using a TDR cable tester. *Soil technology*, 7(2): 113-126.
- Castrignanò, A., Giugliarini, L., Martinelli, N. e Risaliti, R., 2000a. Study of spatial relationships among soil physical-chemical properties using Multivariate Geostatistics. *Geoderma*, 97: 39-60.
- Castrignanò, A., Goovaerts, P., Lulli, L., Bragato, G. e Gardin, L., 2000b. A geostatistical approach to estimate probability of occurrence of *Tuber melanosporum* in relation to some soil properties. *Geoderma*, 98: 95-113.
- Castrignanò, A., Stelluti, M., (2001), Applicazione della geostatistica all'analisi dei dati spaziali. Seminario di Geostatistica. Sezione di Geopedologia e Meccanica Agraria. Dipartimento di Scienze Agroambientali e della Produzione Vegetale.
- Cavazza L., *Acqua disponibile e acqua facilmente utilizzabile*, in "Metodi di Analisi Fisica del Suolo", Ministero per le Politiche Agricole, Osservatorio Nazionale Pedologico e per la Qualità del Suolo (coord. M. Pagliai), FrancoAngeli, (1997) Parte VIII, 8, 139-141.
- Christakos, G. 1992, *Random Field Models in Earth Sciences*, Academic Press, San Diego, CA, USA, 474 p.
- Cook, S.E., Corner, R.J., Grealish, G.J., Gessler, P.E., Chartres, C.J., 1996a. A rule based system to map soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1893-1900.
- Cornelis, W., M., Ronsyn, J., Van Meirvenne, M., Hartmann, R. (2001). Evaluation of Pedotransfer Functions for Predicting the Soil Moisture Retention Curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:638-648 (2001).
- Cosby, B.J., Homberger, G.M., Clapp, R.B. e Glinn, T.R., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20, 682-690.
- Cressie, N.A.C., 1991. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley and Sons, New York, 900 pp.

- Dalton FN, van Genuchten MTh (1986). The time domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38: 237-250.
- Dane J.H., Hopmans J.W., *Pressure cell*, in “*Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods, Third Edition*” (a cura di J.H. Dane e G.C. Topp), SSSA, Madison WI, USA (2001) (in stampa).
- Denmead O.T., Shaw R.H., *Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions*, *Agron. J.* (1962) 54, 385-389.
- Desio A., 1965 – I rilievi isolati della Pianura Lombarda ed i movimenti tettonici del Quaternario. *Rend. Istituto Lombardo (Rendiconti Scienze A)*, vol. 99, pp 881-894, Milano
- Diepen, C. A. van, Keulen, H. van, Wolf, J., & Berkhout, J. A. A. (1991). "Land evaluation: from intuition to quantification". In: B. A. Stewart (Eds.), *Advances In Soil Science* (pp. 139-204). New York: Springer.
- ERSAF,2004 – Suoli e Paesaggi della Provincia di Lodi. Prima edizione Milano, febbraio 2004 Copyright 2004 ERSAF.
- ERSAL (Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia), 1991. Progetto “Carta Pedologica” *I suoli del Parco Ticino Abbatense*.
- ERSAL (Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia), 1995. Progetto “Carta Pedologica” *Interpretazioni pedologiche per la gestione del territorio agricol.* Collana di Agrometeorologia e Pedologia Applicata, 1995.
- Fox, D.G., 1981. Judging air quality model performance : a summary of the AMS workshop on dispersion models performance . *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 62, 599-609
- Friend, A.L., Eide, M.R., Hinckley, T.M., 1990. Nitrogen stress alters root proliferation in Douglas-fir seedlings. *Can. J. For. Res.* 20, 1524-1529.
- Gardner W.R., Hillel D., Benyamini Y., *Post irrigation movement of soil water: I. Redistribution*, *Water Resour. Res.* (1970) 6, 851-861.
- Gardner, W.R., 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85, 228-232.
- Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., Ryan P.J. Soil–landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. Geogr. Info. Sys.* 1995;4:421-432.
- Goovaerts, P. e Journel, A.G., 1995. Integrating Soil Map Information In Modelling The Spatial Variation Of Continuous Soil Properties. *European Journal Of Soil Science*, 46: 397-414.
- Goovaerts, P., 1997, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford Univ. Press, New York, 483 pp.
- Goovaerts, P., 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89:1-45.

- Halvorson, G.A., and E.C. Doll. 1991. Topographic effects on spring wheat yields and water use. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1680–1685.
- Hangsheng, L., 2003. *Hydropedology: Bridging Disciplines, Scales, and Data.* *Vadose Zone Journal* 2:1–11 (2003).
- Hewitt, A., 1993. Predictive modelling in soil survey. *Soils and Fertilizers* 56, 305-314.
- Hillel D., *Environmental soil physics*, Academic Press (1998) San Diego, CA.
- Isaaks E H; Srivastava R M (1989). *Applied Geostatistics.* Oxford University Press, New York, NY. 561 pp
- Jarvis, N.J., Hollis, J.M., Nicholls, P.H. Mayr, T. and Evans , S. P. 1997. MACRO-DB: a decision-support tool for assessing pesticide fate and mobility in soils. *Environmental Modelling and Software*, 12, 251-265.
- Kravchenko, A. N., Bullock, D., G., 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. Published in *Agron. J.* 92:75–83 (2000).
- Kunze, R.J.; Uehara, G. e Graham, K., 1968. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 760-765.
- Kutilek, M., 2004. Soil Water in the System of Hydropedology. EUROSOIL 2004, Sept. 4th to 12th, Freiburg, Germany, Conference Proceeding
- Lange O.L., Nobel P.S., Osmond C.B., Ziegler H. (a cura di), *Physiological plant ecology, II, Water Relations and carbon assimilation*, (1982) Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Lin, H. et al., 2004. *Advances in Hydropedology.* *Advances in Agronomy*, in press.
- Littleboy, M., Smith, D.M., Bryant, M.J. (1996). *Simulation modelling to determine suitability of agricultural land.* *Ecological Modelling* 86 (1996) 219-225
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contamin. Hydrol.* 7, 51-53
- Lulli L., Lorenzoni P., Leoni G., Delogu F., 1980. Un esempio di cartografia pedologica applicata alla pianificazione territoriale. Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo (Firenze). Estratto da “Annali” – anno 1980- Volume XI.
- Malingreau, J.P., 1989. *The vegetation index and the study of vegetation. Applications of Remote Sensing to Agrometeorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 285-303.
- Mapa, R.B., and S. Pathmarajah. 1995. Contrasts in the physical properties of three soils of an Alfisol catena in Sri Lanka. *Soil Use Manage.* 11:90–93.
- Matheron, G., 1965, *Les variables Régionalisées et leur Estimation.* Ed. Masson, Paris.

- McBratney, A.B., Hart, G.A., McGarry, D., 1991. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *J. Soil Sci.*, 42 : 513-532.
- McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117 (2003) 3-52.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293-327.
- McKensie, N.J., McLeod, D.A., 1989. Relationships between soil morphology and soil properties relevant to irrigated and dryland agriculture. *Aust. J. Soil Res.*, 29:235-258
- McKenzie N.J., Austin M.P. A quantitative Australian approach to medium and small-scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation. *Geoderma* 1993;57:329-355.
- McKenzie, N.J., Gessler, P.E., Ryan, P.J., O'Connell, D., 2000. The role of terrain analysis in soil mapping. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis—Principles and Applications*. Wiley, New York, pp. 245– 265.
- McKenzie, N.J., Ryan, P.J., (1999) Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89 1999 67–94.
- McSweeney, K., Gessler, P.E., Slater, B., Hammer, R.D., Bell, J., Petersen, G.W., 1994. Towards a new framework for modelling the soil –landscape continuum. In: Amundson, R.G., Harden, J.W. (Eds.), *Factors of Soil Formation: A Fiftieth Anniversary Retrospective*. Soil Science Society of America, Madison, pp. 1 –13.
- Millington , R.J. e Quirk, J.P., 1961. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, 57, 1200-1207.
- MiPa, 1997. metodi di analisi fisica del suolo. Osservatorio Nazionale Pedologico e per la Qualità del suolo
- MiPAF, 2000. Metodi di analisi chimica del suolo. Osservatorio Nazionale Pedologico e per la Qualità del suolo
- Nielsen, D.R., J.W. Hopmans, and K. Reichardt. 1998. An emerging technology for scaling field soil-water behavior. p. 136–166. *In* G. Sposito (ed.) *Scale dependence and scale invariance in hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Odeh I.O.A., McBratney A.B., Chittleborough D.J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma* 1994;63:197-214.
- Oliver, M.A., Webster, R., 1986. Semi-variograms for modelling the spatial pattern of landform and soil properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 11, 491–504.
- Pachepsky Ya. A., Timlin D.J., Rawls W.J. 2001. Soil Water Retention as Related to Topographic Variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1787–1795 (2001).

- Pachepsky Ya., Rawls W.J. (2004). Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. In *Developments in Soil Science*, vol. 30.
- Pereira L.S., van den Broek B.J., Kabat P., Allen R.G. (a cura di), *Crop-water-simulation models in practice*, Selected papers of the 2nd Workshop on Crop-Water-Models. (1995) Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands.
- Ratliff L.F., Ritchie J.T., Cassel D.K., Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties, *Soil Sci. Soc. Am. J.* (1983) 47, 770-775.
- Rawls W J; Brakensiek D L; and Saxton, 1982 - K E Estimation of Soil Water Properties Transactions of the ASAE Vol 25, No 5, p 1316-1320, 1328, September/October, 1982.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. e Saxton, K.E., 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE*, 25, 1316-1320.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrological modelling. In Jones, E. and Ward, T.J. (eds.): *Proceedings of the ASCE Symposium Watershed Management in the Eighties*, Denver, CO, 30 Apr. -2 May 1985, pp. 293-299.
- Ritchie J.T., Burnett E., Henderson R.C., Dryland evaporative flux in a subhumid climate, III, *Soil water Influence*, *Agron. J.* (1972) 64, 168-173.
- Ritchie J.T., Gerakis A., Suleiman A., Simple model to estimate field-measured soil water limits, *Trans. ASAE* (1999) 42, 1609-1614.
- Ritchie J.T., *Soil water availability*, *Plant Soil* (1981) 58, 327-338.
- Robert, P.C., R.H. Rust, and W.E. Larson. 1996. *Precision Agriculture*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Rogowski, A.S. and J.K. Wolf. 1994. Incorporating variability into soil mapping units. *SSSA J* 58: 163-174.
- Rossiter, D.G. (2003). *Biophysical Models in land Evaluation*. Encyclopedia of Life Support System (EOLSS), 2003. Section 1.5 *Land Use and Land Cover*; Topic 1.5.27.
- Rossiter, D.G., 2005. Digital soil mapping: Towards a multiple-use Soil Information System. *Semana de la Geomática Santa Fé de Bogotá*, Colombia 08–August–2005.
- Russo, D., 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: on the selection of a model for the hydraulic properties. *Water Resources Research*, 24, 453-459.
- Sanesi, G. 1977, *Guida alla descrizione del suolo*, CNR, *Progetto finalizzato conservazione del suolo*, n. 11, Firenze.
- Santini A., *Presupposti teorici delle misure idrologiche ed idrauliche nel terreno agrario e forestale*, Atti dell'incontro di studio su "Misure idrologiche ed idrauliche nel terreno agrario e forestale", 1ª Sez. A.I.G.R., Milano, 3-4 ottobre, A1, 11-42, 1975

- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. e Papendick, R.I., 1986. Estimating generalised soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1031-1036.
- Scheinost A.C., Sinowski, W. E Auerswald, K., 1997a. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, 78, 129-143.
- Scheinost A.C., Sinowski, W. E Auerswald, K., 1997b. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. *Geoderma*, 78, 145-159.
- Shepherd, K. D. & Walsh, M. G. 2002. *Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties*. *Soil Science Society of America Journal* 66(3):988–998
- Simota, C. e Mayr, T., 1996. Pedotransfer function. In: Loveland, P.J. e Rounsevell, M.D.A. (Editors), *Agro-Climatic Change and European Soil Suitability (EuroACCESS)- A spatially distributed, soil, agro-climatic and soil hydrological model to predict the effects of climatic change on land-use within the European Community*. Commission of the European Communities, Directorate-General XII Science, Research and Development, pp. 234.
- Soil Science Society of America, Glossary of soil science terms, SSSA (1997) Madison, USA.
- Stockle C.O.and Nelson R., 2005 – *CropSyst for Windows vers. 3.04.08 (Mar 29, 2005)* Department of Biological Systems. Washington State University.
- Stockle C.O.and Nelson R., 2005 – *CropSyst for Windows vers. 3.04.08 (Mar 29, 2005)* Department of Biological Systems. Washington State University.
- Tamari S., L. Bruckler, J.M. Halbertsma & J. Chadoeuf, 1993, A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57 :642-651.
- Tiscareno-Lopez M., Lopes V.L., Stone J.J., Lane L.J., Sensitivity of the WEPP watershed model for rangeland applications, I: Hillslope processes, *Trans. ASAE* (1993) 36, 1659-1672.
- Topp GC, Davis JL (1985). Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 19-24.
- Topp GC, Davis JL, Annan AP (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16 (3): 574-582.
- Ungaro F., 1997. Modelli per la descrizione del flusso di soluti nel suolo: approcci, struttura e finalità. Progetto SINA "Modelli e pedofunzioni per la stima delle qualità dei suoli influenti sulla vulnerabilità delle acque". Rapporto 1.1 (1997)

- van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P.E.V., Groenendijk P., and van Diepen C.A., 1997 – *Theory of SWAP version 2.0*. Report 71, Dpt. of Water Resources, WAU, Wageningen, The Netherlands.
- van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P., Groenendijk P., & van Diepen C.A., 1997 – *Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Atmosphere-Plant environment. Theory of SWAP 2.0*. Technical Document 45 DLO-SC, 168 pp
- van Genuchten, M. Th., F. j. Leij, & S. R. Yates, 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065, R.S.Kerr Environ. Res. Lab., U.S. Environmental Protection Agency, OK, USA, 93pp.
- 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
- 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.
- Veihmeyer F.J., Hendrickson A.H., Soil moisture conditions in relation to plant growth, Plant Physiol. (1927) 2, 71-78.
- Veihmeyer F.J., Hendrickson A.H., The permanent wilting percentage as a reference for the measure of soil moisture, Trans. Am. Geophys. Union (1948) 29, 887-896.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. Soil Science 148, 389-403.
- Vereecken, Maes, J. and Feyen, J., 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149, 1-12.
- Verity, G.E., and D.W. Anderson. 1990. Soil erosion effects on soil quality and yield. Can. J. Soil Sci. 70:471–484. Sci. 150:867–873.
- Wackernagel, H. 2003. Multivariate Geostatistics: an introduction with Applications. Springer- Verlag, Berlin, 3rd ed., 388 pp.
- Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Adv. Soil Sci. 3:1–70.
- Webster, R., 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advances in Soil Science, 3 : 2-70.
- Webster, R., 1997. Soil resources and their assessment. Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. B 352,963–973.
- Webster, R., and M.A. Oliver. 1990. Statistical methods for soil and land resource survey. Oxford Univ. Press, Oxford, UK.
- Wilding, L.P., 1984. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: Nielsen, D.R., Bouma, J. (Eds.), Soil Spatial Variability. Pudoc, Wageningen, pp. 166– 193.

- Williams, R.D., Ahuja, L.R., Naney, J.W., 1992. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from limited texture, bulk density and limited data. *Soil Sci.* 153, 172-184.
- Zegelin SJ, White I, Russell GF (1992). A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. In *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America Madison, Wisconsin: 187-208