



RegioneLombardia



Modellizzazione della dinamica dell'acqua e dell'azoto nei suoli agricoli lombardi

Quaderni della ricerca



n. 65 - giugno 2007



Sperimentazione condotta nell'ambito del progetto di ricerca ARMOSA-Idro
"Attivazione di una rete per il monitoraggio della qualità del sistema suolo/acqua della Lombardia"
Realizzato nell'ambito della convenzione con la Regione Lombardia - ERSAF per l'anno 2004
(d.g.r. n. 17703 del 04/06/2004)

Finanziato da Direzione Generale Agricoltura e Direzione Generale Reti e Servizi di Pubblica Utilità
e Sviluppo Sostenibile

A cura di
Marco Acutis¹
Angelo Basile²
Stefano Brenna³
Fabio Terribile⁴

Foto a cura di
Archivio fotografico ERSAF

Per informazioni

Regione Lombardia - Direzione Generale Agricoltura
Struttura Ricerca e Innovazione Tecnologica
Via Pola, 12 - 20124 Milano
Tel. 02 6765 2525 - Fax 02 6765 2557
e-mail: agri_ricerca@regione.lombardia.it

Referenti

Gianpaolo Bertoncini - tel. 02 6765 2524
e-mail: gianpaolo_bertoncini@regione.lombardia.it

Marisa Meda - tel. 02 6765 8037
e-mail: marisa_meda@regione.lombardia.it

Regione Lombardia - Direzione Generale Reti e Servizi di Pubblica Utilità
e Sviluppo Sostenibile
U.O. Regolazione mercato e programmazione
Attuazione pianificazione acque

Referente

Nadia Chinaglia - tel. 02 6765 2917
e-mail: nadia_chinaglia@regione.lombardia.it

ERSAF - Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste
Dipartimento dei Servizi all'Agricoltura
Struttura Sviluppo Rurale, Suoli e Supporto alla Filiera Vitivinicola
Tel. 02 674 041 - Fax 02 674 04 299
e-mail: info@ersaf.lombardia.it

¹ Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Produzione Vegetale

² CNR - Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo

³ ERSAF - Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste

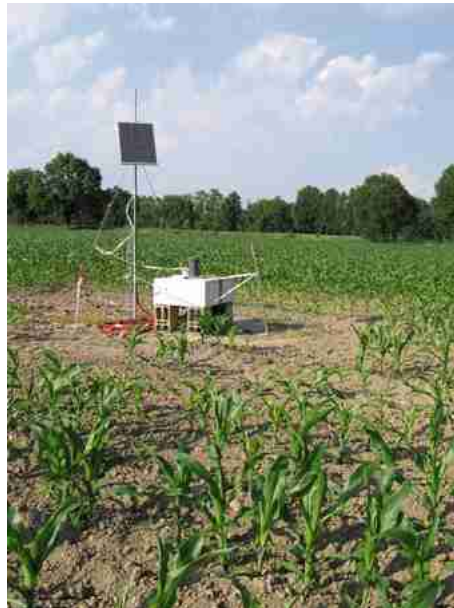
⁴ Università degli Studi di Napoli - Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta, dell'Ambiente e delle Produzioni Animali



Regione Lombardia



Modellizzazione della dinamica dell'acqua e dell'azoto nei suoli agricoli lombardi ARMOSA



*Quaderni della ricerca
n. 65 - giugno 2007*

Sommario

	pagina
Presentazione	4
Riassunto	7
1 Introduzione	9
2 I siti sperimentali	13
2.1 Localizzazione	13
2.2 I suoli indagati: caratteri pedologici e idrologici	16
2.2.1 Il suolo di Carpaneta 1	16
2.2.2 Il suolo di Carpaneta 2	18
2.2.3 Il suolo di Caviaga	20
2.2.4 Il suolo di Ghisalba 1	22
2.2.5 Il suolo di Ghisalba 2	24
2.2.6 Il suolo di Landriano 1	26
2.2.7 Il suolo di Landriano 2	28
2.2.8 Il suolo di Luignano	30
2.2.9 Il suolo di Pietole 1	32
2.2.10 Il suolo di Pietole 2	34
3 Tecniche di misura	37
3.1 Messa a punto e assemblaggio delle stazioni di monitoraggio	37
3.2 Acquisizione dati e post elaborazione	41
3.3 Analisi di laboratorio	44
3.4 Biomassa, produzioni e indice di area fogliare	44
3.5 Le stazioni meteorologiche	45

	pagina
4 Il modello di simulazione ARMOSA	47
4.1 Introduzione	47
4.2 Dinamiche e modellistica dell'acqua	50
4.2.1 Principi generali	50
4.2.2 Modelli idrologici valutati	51
4.2.3 Dinamiche dell'acqua e applicazioni modellistiche	54
4.3 Dinamiche e modellistica dell'azoto	62
4.3.1 Principi generali	62
4.3.2 Modelli di bilancio azotato valutati	66
4.3.3 Dinamiche dell'azoto e applicazioni modellistiche	70
4.4 Stima della lisciviazione	88
4.4.1 Metodo Lord e Shepherd	88
4.4.2 Stima della lisciviazione con i modelli	89
5 Scenari applicativi	93
5.1 Confronto tra itinerari tecnici differenti	93
5.2 Esempi a scala comunale	98
Allegato A Materiali e metodi	100
Allegato B Schede pedologiche	104
Bibliografia	124

Presentazione



Un territorio a forte vocazione produttiva come quello lombardo ha bisogno oggi più che mai di strumenti moderni ed efficienti per misurare l'impatto che le stesse attività produttive, tra le quali quelle agricole, hanno sul suolo e sulle acque sotterranee, parte delle quali vengono destinate al consumo umano.

Questo Quaderno della Ricerca racchiude i risultati delle attività sperimentali ottenute nell'ambito del progetto ARMOSA, sostenuto dalle Direzioni Generali "Agricoltura" e "Reti e Servizi di Pubblica Utilità e Sviluppo Sostenibile" della Regione Lombardia e coordinato dall' Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste.

La ricerca ha delineato un percorso che prevede di allestire un sistema di valutazione della qualità del suolo, un sistema che si avvale delle più recenti metodologie scientifiche disponibili a livello mondiale.

I risultati ottenuti dai dati rilevati in dieci siti sperimentali della pianura lombarda hanno portato alla messa a punto di un sistema di modelli che consentiranno di migliorare la capacità di predizione sul movimento dell'acqua nel suolo situato in una determinata zona, suolo soggetto a specifici usi agricoli.

Il sistema ARMOSA potrà quindi essere utilizzato per migliorare la nostra conoscenza sul movimento delle acque e degli elementi solubili provenienti da attività agricole. Questo approfondimento è la base per creare una rete regionale permanente di monitoraggio e verifica del comportamento dei sistemi suolo-clima-culture che può essere utile per quanto riguarda le tematiche connesse con il rilascio nell'ambiente di composti azotati.

Allo stesso modo, i risultati del progetto vanno ad arricchire la serie di strumenti sui quali questa Regione ha deciso di puntare per dare risposte concrete agli appuntamenti fissati dall'Unione Europea in tema di protezione del suolo, ma anche al mondo produttivo lombardo che giustamente si aspetta di ricevere corrette linee di comportamento.

*Viviana Beccalossi
Vicepresidente della Regione Lombardia
Assessore all'Agricoltura*

*Massimo Buscemi
Assessore alle Reti e Servizi di Pubblica Utilità e Sviluppo Sostenibile*

Riassunto

Il progetto **ARMOSA** (Attivazione di una Rete di Monitoraggio della qualità del sistema suolo/acque della Lombardia) è stato realizzato, in linea con le indicazioni contenute nel PTUA (Programma di Tutela e Uso delle Acque) della Regione Lombardia, allo scopo di allestire un sistema di valutazione della qualità e vulnerabilità dei suoli con particolare attenzione alle dinamiche delle acque e dei nutrienti.

Risultato del progetto è stata la messa a punto di un "sistema modellistico modulare" con capacità predittive la cui adeguatezza ed affidabilità sono confermate da un ampio set di dati rilevati e misurati in una serie di siti sperimentali rappresentativi delle situazioni pedoclimatiche e colturali che caratterizzano la pianura lombarda.

Il "sistema modellistico **ARMOSA**" potrà essere utilizzato per effettuare gli approfondimenti sulla vulnerabilità delle acque sotterranee ai nitrati provenienti da fonte agricola richiesti per l'attuazione della "direttiva nitrati" (direttiva 91/676/CE); i siti sperimentali attrezzati nel progetto potranno inoltre diventare l'ossatura base di una rete regionale permanente di monitoraggio e verifica del comportamento dei sistemi suolo-clima-culture.

Il progetto **ARMOSA**, sostenuto dalle Direzioni Generali Agricoltura e Reti e Servizi di Pubblica Utilità della Regione Lombardia, è stato sviluppato grazie alla collaborazione scientifica tra ERSAF (Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste della Lombardia), Università di Milano (Dipartimento di Produzione Vegetale), Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-ISAFOM) e Università di Napoli Federico II (Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta, dell'Ambiente e delle Produzioni Animali).





Introduzione

La conoscenza del bilancio idrico e della dinamica dell'acqua nel suolo è la base indispensabile per valutare in modo appropriato la produttività delle colture e verificare la sostenibilità del sistema agricolo.

Considerando in particolare il dilavamento dei nitrati dai terreni è possibile affermare che esso è principalmente controllato dalla capacità di assimilazione delle colture, ma è in certa misura fisiologico e non può essere completamente impedito; va inoltre considerato che sul rilascio dei nitrati, a parità di azoto apportato, incide maggiormente l'uso più o meno efficiente dei fertilizzanti, in termini di quantità, tempi e modalità di applicazione; minore importanza assume il tipo di fertilizzante utilizzato (concime minerale o effluente d'allevamento). In ogni caso, quantificare l'effettivo contributo all'arricchimento in nutrienti delle acque sotterranee e superficiali attribuibile all'agricoltura è difficile.

E' quindi necessario, per la programmazione di interventi tecnici e per la definizione di provvedimenti legislativi correttivi orientati al miglioramento della qualità delle acque, disporre di strumenti oggettivi per la stima dei rilasci da fonti diffuse.

Nel 1991 è stata adottata dalla Commissione Europea una specifica direttiva (Dir. 91/676/CE¹) relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole, che, a tal fine, richiede la designazione, affidata agli Stati membri, delle "zone vulnerabili" e l'adozione di specifici Programmi d'Azione².

In Lombardia la materia è stata inizialmente disciplinata con la legge regionale 37/93 ("Norme per il trattamento, la maturazione e l'utilizzo dei reflui zootecnici"), con la quale gli effluenti di allevamento sono stati definitivamente riconosciuti non come un rifiuto da smaltire, ma come una risorsa da valorizzare agronomicamente nell'ambito di piani di gestione e conservazione della fertilità dei terreni, basati sul bilancio dell'azoto e sull'asportazione da parte delle colture.

Successivamente, le zone vulnerabili ai nitrati di origine agricola sono state ridefinite, a seguito della emanazione a livello nazionale del Decreto legislativo 152/99³, nel quadro del Programma di Tutela e Uso delle Acque regionale⁴.

Infine a seguito delle osservazioni pervenute dalla Commissione Europea e di ulteriori disposizioni normative nel frattempo introdotte a livello nazionale⁵ le zone vulnerabili sono state ulteriormente aggiornate ed è stato approvato il programma d'azione per le aziende che in esse ricadono⁶.

Note a pagina 11

Il progetto **ARMOSA** (Modellizzazione della dinamica dell'acqua e dell'azoto nei suoli agricoli lombardi) nasce in questo contesto, con le seguenti finalità:

- 1 mettere a punto un sistema modellistico per la conoscenza dei flussi di acqua e azoto nel suolo con capacità predittive adeguate ed affidabili, verificate attraverso il set di dati rilevati e misurati nella rete di siti sperimentali
- 2 misurare in una serie di siti sperimentali rappresentativi il rilascio di nitrati verso le acque sotterranee dai sistemi agropedoclimatici presenti in Lombardia

Sono stati pertanto individuati, in aziende reali, 10 siti rappresentativi dei sistemi pedoclimatici ed agronomici che contraddistinguono l'agricoltura della pianura lombarda. Tutti i siti sono stati caratterizzati dal punto di vista pedologico, analizzando inoltre nel dettaglio le proprietà fisiche ed idrologiche degli orizzonti costituenti i diversi suoli.

I siti sono stati quindi attrezzati con sensori e strumentazioni per la misura del contenuto d'acqua e per il prelievo di campioni di soluzione circolante a diverse profondità, dalla superficie fino a 150 cm. In alcuni siti sono stati inoltre monitorati anche i valori della temperatura e del potenziale dell'acqua nel suolo. Infine sono stati sistematicamente registrati i parametri climatici e i dati relativi alla gestione agronomica delle colture praticate nei siti ed effettuate le determinazioni di laboratorio necessarie.

Le attività di rilevamento e misura, e le relative analisi, sono proseguite per 4-5 anni nei primi due siti sperimentali allestiti e per un periodo variabile da tre a due anni negli altri.

La grande massa di dati e di informazioni raccolte ha quindi consentito di analizzare e confrontare le potenzialità predittive, applicate alla specifica realtà lombarda, di modelli matematici di simulazione del destino ambientale dell'azoto, scegliendoli tra quelli più comunemente usati e per i quali era disponibile una ampia documentazione scientifica. Per la dinamica dell'acqua sono stati presi in considerazione in particolare i modelli SWAP, CropSyst e MACRO, per la dinamica dell'azoto i modelli CropSyst, LeachN, ANIMO e SOILN; il modello CropSyst è stato utilizzato inoltre per la simulazione di crescita e sviluppo delle colture e del loro assorbimento di azoto.

Il risultato finale è stato lo sviluppo di un "sistema modellistico modulare" le cui componenti, integrate da soluzioni e ulteriori moduli appositamente studiati nel corso del progetto, derivano da modelli diversi.

Gli esiti delle calibrazioni e dei test di verifica resi possibili dalla frequenza e qualità dei dati misurati nella rete di siti sperimentali dimostrano che il "sistema modellistico **ARMOSA**" presenta l'affidabilità sufficiente per effettuare gli approfondimenti sulla vulnerabilità delle acque sotterranee ai nitrati provenienti da fonte agricola richiesti a livello tecnico e normativo.

In particolare, **ARMOSA** potrebbe pertanto essere utilizzato in futuro per:

- valutare l'impatto degli attuali modelli agrozootecnici, individuando i fattori critici che, nelle diverse situazioni, di più incidono sul rilascio dei nitrati;
- individuare itinerari tecnici alternativi per una gestione sostenibile dell'azoto nelle aziende agricole, adatti alle differenti caratteristiche pedoclimatiche e dell'agricoltura regionale;
- esaminare in modo più articolato e dettagliato la vulnerabilità del territorio regionale ai nitrati provenienti da fonti diffuse, attraverso stime del carico di azoto rilasciato dall'agricoltura.

La disponibilità di un modello di simulazione dei flussi idrici nel suolo potrà inoltre rivelarsi utile anche in applicazioni legate ad altre tematiche, quali la gestione dell'irrigazione e delle carenze idriche o la contaminazione delle acque da parte di fitofarmaci e altre sostanze.

I siti sperimentali allestiti nel progetto possono, infine, diventare l'ossatura base di una rete regionale permanente di monitoraggio e verifica del comportamento dei sistemi suolo-clima-culture per quanto concerne le tematiche connesse con il rilascio nell'ambiente di composti azotati; le attività di ricerca, oltre che alla lisciviazione dei nitrati verso le acque sotterranee, potrebbero così essere indirizzate anche alla perdita di nutrienti (nitrati e fosforo) verso le acque superficiali e alla emissione in atmosfera di ammoniaca.

¹ La direttiva 91/676/CE nota come "direttiva nitrati" è stata pubblicata sulla GU L 375 del 31.12.1991.

² Oltre a prescrizioni e limitazioni all'uso degli effluenti di allevamento, i Programmi d'Azione prevedono le misure e i controlli attuati ai fini del raggiungimento degli obiettivi fissati dalla "direttiva nitrati"; i programmi devono inoltre essere accompagnati da azioni di formazione e di informazione degli agricoltori e dalla applicazione di un Codice di Buona Pratica Agricola; quest'ultimo è stato adottato con decreto ministeriale 19 aprile 1999 ed è stato pubblicato sul S.O. della G.U. n. 102 del 4 maggio 1999.

³ Il decreto legislativo 11 maggio 1999 n.152, recante "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonte agricola", comprensivo delle disposizioni correttive ed integrative introdotte con il decreto legislativo 18 agosto 2000 n. 258, è stato pubblicato sulla G.U. n. 246 del 20.10.2000 Suppl. Ordinario n.172..

⁴ La proposta di PTUA (programma di Tutela e Uso delle Acque) è stata approvata dalla Regione Lombardia con dgr n.19359 del 12.11.04 e pubblicata sul 1° Suppl. Straordinario del BURL n. 47 del 16.11.04; l'approvazione definitiva è avvenuta con dgr n. 2244 del 29.03.06, dopo il parere di conformità rilasciato dall'Autorità di Bacino del Po.

⁵ Decreto legislativo n. 152 del 3 aprile 2006 recante "Norme in materia ambientale" pubblicato sul S.O della G.U. n. 88 del 14 aprile 2006 e D.M. del 7 aprile 2006 di disciplina dei criteri e delle norme tecniche generali per l'utilizzazione degli effluenti d'allevamento da parte delle aziende agricole ricadenti in zone vulnerabili.

⁶ Le zone vulnerabili sono state aggiornate con dgr n.3297 del 11.10.06; il programma d'azione per le aziende localizzate in zone vulnerabili è stato approvato con dgr n. 3439 del 7.11.06 e integrato con dgr n. 5215 del 2.08.07.

⁷ Si confronti in proposito la direttiva NEC "National Emission Ceilings" (direttiva 81/2001/CE) recepita con decreto legislativo 21 maggio 2004 n.171. Tale direttiva stabilisce i limiti nazionali di emissioni di ossidi di azoto, biossido di zolfo, ammoniaca e composti organici volatili da rispettare a partire dal 2010; essa riguarda l'agricoltura (fertilizzanti e zootecnia) in particolare in relazione alle misure da mettere in atto per ridurre le emissioni di NH₃.



2

I siti sperimentali

2.1 Localizzazione

La Lombardia si differenzia considerevolmente per caratteristiche climatiche, pedologiche e di uso e gestione dei suoli. La scelta dei siti sperimentali è stata quindi effettuata al fine di individuare situazioni differenziate e rappresentative delle diverse realtà agricole e ambientali della pianura.

I siti sono stati collocati in “aziende agricole reali”, ove per tutta la durata del progetto hanno continuato ad essere attuate le ordinarie pratiche gestionali già in uso.

Ciò ha reso necessari uno sforzo e una attenzione particolari nella rilevazione dei dati relativi alla conduzione agronomica, ma ha consentito di misurare i flussi idrici e verificare la dinamica e il movimento dell’azoto nella forma solubile in condizioni reali.

A conclusione di una preliminare indagine territoriale, che ha tenuto conto delle differenze pedoclimatiche che contraddistinguono la pianura lombarda, senza peraltro trascurare i vincoli organizzativi dettati dalla necessità di visite frequenti (da 1 a 2 a settimana) nelle aziende, sono stati identificati 10 siti sperimentali rappresentativi, la cui localizzazione è riportata in Figura 2.1 e le cui caratteristiche ambientali ed agronomiche sono riassunte in Tabella 2.1.

Tutti i siti sperimentali ricadono sul “livello fondamentale della pianura”, costituito da sedimenti fluvioglaciali di età pleistocenica (Pleistocene Superiore). I suoli, in questo ambiente, sono variamente evoluti e presentano una granulometria più grossolana (franco-sabbiosa e in alcune zone anche sabbiosa) nella porzione occidentale e sempre più fine (da franco fine a limoso fine e fine, con elevati contenuti, quindi, in limo ed argilla) spostandosi verso l’area sud-orientale; inoltre, nell’alta pianura, dal margine prealpino fino alla fascia dei fontanili, i suoli sono spesso ricchi in scheletro fin dagli strati superficiali, scheletro che è invece assente nei suoli della bassa pianura.

Nella rete dei siti sperimentali del progetto **ARMOSA** la variabilità nelle proprietà dei suoli e, conseguentemente, nel comportamento fisico-idrologico a queste correlato è ampiamente rappresentato, analogamente alla variabilità climatica. Nei siti individuati, infatti, la temperatura media annua è oscillata, nel periodo di durata del progetto, da 12,3°C a 15,2°C e le precipitazioni sono variate da 1000-1200 mm/anno, nei siti più a nord e ovest, a 550-600 mm/anno in quelli più orientali, in accordo con l’andamento climatico medio.

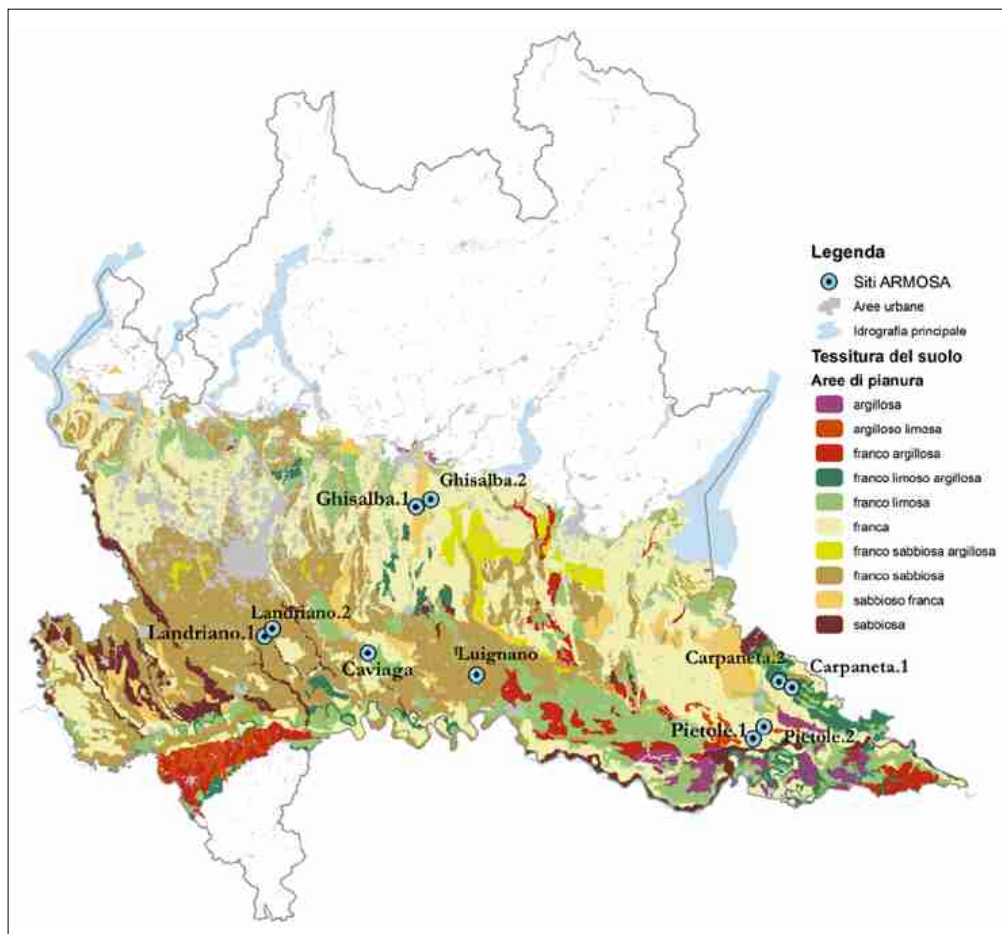


Figura 2.1 Localizzazione dei 10 siti di monitoraggio ARMOSA

Dal punto di vista agronomico, invece, si è preferito che in tutti i siti sperimentali fosse coltivato mais, da granella o da trinciato; il mais, infatti, può essere considerato la coltura guida, in Lombardia, negli ordinamenti colturali cerealicolo-zootecnici e, essendo dotata della maggiore capacità di asportazione di azoto dal terreno, è anche quella che viene più fortemente concimata.

Unica eccezione il sito di Carpaneta 2 dove era stato recentemente effettuato un impianto boschivo e l'obiettivo è stato, in presenza di suoli molto simili, la comparazione tra un sistema seminaturale e un sistema agricolo intensivo (sito di Carpaneta 1). In alcuni siti, inoltre, è stata ordinariamente attuata una rotazione stretta mais-loiessa e nel sito di Caviaga, dove i rilievi e le misurazioni si sono protratti più a lungo, a quattro anni di mais è succeduto frumento nell'ultimo anno di indagine.

Sempre nel sito di Caviaga, in sintonia con le pratiche adottate in azienda, i terreni sono stati preparati utilizzando la tecnica del "minimum tillage", negli altri siti si è invece fatto ricorso a lavorazioni tradizionali. L'irrigazione è stata per aspersione nei due siti di Pietole e per scorrimento negli altri.

Tabella 2.1 Caratteristiche agronomiche e ambientali principali dei siti di monitoraggio ARMOSA

Sito	Ordinamento culturale	Suolo		Meteo		Gestione		
		Tessitura sup.	Note	P. annue mm	T media annua °C	Lavorazioni	Fertilizzazioni	Irrigazione
Carpaneta 1	mais granella	franco sabbiosa	calcareo - CaCO_3 prof. ~60% alcalino - pH 8-8.7 s. organica sup. - 1.9% segni di ristagno idrico	550	14,1	normali lavorazioni (40 cm)	concimi inorganici	scorrimento (2/3 interventi annui)
Carpaneta 2	bosco (nuovo impianto)	franca	molto calcareo - CaCO_3 prof. ~63% da neutro a subalcalino - pH 7.7-8.5 s. organica sup. - 2.1% mal drenato in prof.	550	14,1	-	-	-
Caviaga	mais trinciato	franca	ben drenato sabbioso in prof. - sabbia ~85% mod. acido - pH 6.0-7.0 s. organica sup. - 1.4%	750	13,6	minimum tillage	concimi inorganici; fanghi di depurazione urbana	scorrimento (2/4 interventi annui)
Ghisalba 1	mais trinciato	franca	ghiaia in sup. drenaggio mediocre s. organica sup. abb. - 3.2% alcalino - pH 7.5-8.5 sabbioso in prof. - sabbia ~86%	1200	13,5	normali lavorazioni (40 cm)	concimi inorganici; liquami bovini	scorrimento (7/10 interventi annui)
Ghisalba 2	mais trinciato	franco limosa	molto scheletro in prof. - >40% ben drenato calcareo in prof. - CaCO_3 ~30% s. organica sup. - 2.1% neutro/alcalino - pH 6.9-8.8	1200	13,5	normali lavorazioni (40 cm)	concimi inorganici; liquami bovini	scorrimento (7/10 interventi annui)
Landriano 1	mais granella (o trinciato) / loiessa	franco sabbiosa	ben drenato scheletro in profondità med. neutro - 7.3-7.7 s. organica sup. - 1.9% (2.6% a 50 cm)	1000	12,3	normali lavorazioni (40 cm)	concimi inorganici; liquami bovini	scorrimento (1/2 interventi annui)
Landriano 2	mais granella (o trinciato) / loiessa	franca	ben drenato franco argilloso a 40 cm neutro/subalcalino - 7.3-8.5 screziature in prof.	1000	12,3	normali lavorazioni (40 cm)	concimi inorganici; borlanda	scorrimento (1/2 interventi annui)
Luignano	mais trinciato	franca	ben drenato franco argilloso nel B e sabbioso in prof. s. organica sup. - 2.5%	760	12,6	normali lavorazioni (35 cm)	concimi inorganici	scorrimento (3/4 interventi annui)
Pietole 1	mais granella	franco argillosa	ben drenato argilloso in prof. calcareo in prof. - CaCO_3 ~40% s. organica sup. - 1.9% caratteri vertici alcalino - 8.1-8.7	600	15,2	normali lavorazioni (35/40 cm)	concimi inorganici; liquami bovini e suini; letame bovino	aspersione (2/7 interventi annui)
Pietole 2	mais granella	franco argillosa limosa	drenaggio mediocre molto calcareo - CaCO_3 11-70% s. organica sup. - 2.9% alcalino - 8.2-8.8	600	15,2	normali lavorazioni (35/40 cm)	concimi inorganici; liquami bovini e suini; letame bovino	aspersione (2/7 interventi annui)

Per la fertilizzazione, infine, sono state rilevate nelle aziende soluzioni differenziate, con uso di concimi minerali, vari tipi di effluenti di allevamenti zootecnici (bovini e suini) e, in un sito, di concime organico “borlanda” e in un altro di fanghi di depurazione urbana.

2.2 I suoli indagati: caratteri pedologici e idrologici

Nei seguenti paragrafi vengono descritti i principali caratteri distintivi dei suoli indagati nei siti di monitoraggio di **ARMOSA**. Vengono quindi descritte, per ciascun sito, le principali caratteristiche pedologiche e quelli che si sono ritenuti più importanti fra i caratteri micromorfologici e mineralogici, perchè attinenti all'approfondimento dello studio dei processi di movimento e trasporto nel suolo. Infine sono sintetizzati i principali caratteri e comportamenti idrologici di ciascun suolo attraverso l'interpretazione delle curve di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica.

2.2.1 Il suolo di Carpaneta 1

Il sito è localizzato in un ambiente in cui la pietrosità di superficie è assente e il substrato pedogenetico è costituito da sedimenti fluviali limoso-sabbiosi, calcarei.

Il suolo è profondo ed è caratterizzato da due orizzonti Ap che ricoprono un orizzonte arricchito da carbonato di calcio (Ck); seguono un orizzonte CB, un orizzonte Cg profondo con segni di ristagno idrico. Il suolo è molto calcareo in tutti gli orizzonti ed ha scheletro assente.

La tessitura è franco sabbiosa in superficie e varia da franco-limosa a limosa in profondità. La struttura è poliedrica moderatamente sviluppata in superficie e poliedrica debolmente sviluppata o massiva in profondità.

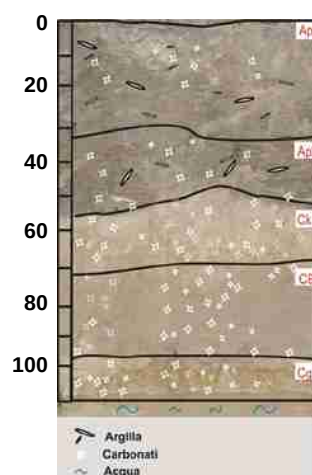
Il colore nell'orizzonte più alterato di superficie è bruno e diventa bruno giallastro e giallo pallido muovendosi verso gli orizzonti meno alterati di profondità.

La sostanza organica è molto variabile nei primi 50 cm, a causa delle lavorazioni del suolo e decresce poi linearmente con la profondità, mentre la reazione del suolo rimane subalcalina in tutto il profilo anche a causa del contenuto in CaCO_3 sempre superiore al 19%.

La capacità di scambio cationico è alta in superficie (maggiore di 23 cmol kg^{-1}) e decresce marcatamente in profondità. Il complesso di scambio è sempre completamente saturo.

Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *coarse silty over sandy or sandy skeletal, carbonatic, mesic, Aquic Calcustept*. Secondo WRB (1998): *Hypercalcic Calcisol*.

Dal punto di vista pedogenetico si tratta di un suolo formatosi in ambiente alluvionale caratterizzato da sedimenti fluviali sabbioso-limosi. Il suolo presenta marcate discontinuità, evidenziabili dalla variabilità verticale del contenuto di CaCO_3 , dalla granulometria e dalla capacità di scambio cationico. Tutte queste discontinuità verticali sono riferibili a diverse fasi di sedimentazione alluvionale. Si notano, con evidenza, relitti di superfici erosionali all'interno del suolo. I processi pedogenetici dominanti sono la lisciviazione del carbonato di calcio dagli orizzonti di superficie verso gli orizzonti profondi, la neogenesi di minerali argillosi negli orizzonti di superficie ed il ristagno idrico negli orizzonti profondi, evidenziato anche dalla presenza di screziature di ferro. Il suolo ha una moderata fertilità per l'elevato contenuto di CaCO_3 . La capacità di protezione degli acquiferi è elevata.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici

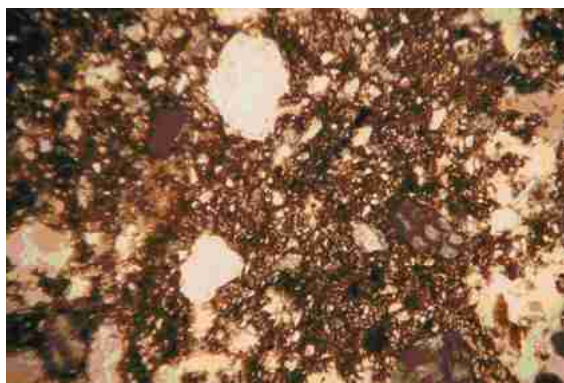
L'analisi microscopica evidenzia la presenza di un orizzonte di superficie a basso sviluppo pedogenetico con una matrice debolmente anisotropa e con diffuse concrezioni di carbonato di calcio.

La frazione sabbiosa è costituita da feldspati e quarzo. L'orizzonte profondo Bk evidenzia una microstruttura con pori di forme e dimensioni diverse e stabilizzati da pellicole di carbonato di calcio illuviale.

Le pellicole di carbonato sono di generazioni diverse e stabilizzano vecchi e nuovi biopori.

L'analisi mineralogica della frazione argillosa degli orizzonti Ap2 e CB ha consentito l'individuazione di minerali argillosi della tipologia delle illiti in ambedue questi orizzonti.

Grazie all'utilizzo di trattamenti specifici dei campioni (solvatazione con glicole etilenico e riscaldamento a 550°C) è stato possibile individuare in Ap2 minerali argillosi interstratificati illite/smectite (con prevalenza dei termini smectitici) e in misura minore vermiculite/smectite e in CB interstratificati clorite/vermiculite. Generalmente, le smectiti (la tipologia prevalente in questi suoli) derivano dall'alterazione delle miche e tipicamente sono dotate di elevata espandibilità e



capacità di circondarsi di numerosi strati molecolari d'acqua.

Le smectiti hanno dimensioni molto piccole, il che ne aumenta la superficie specifica (700-800 m²/g), ma sono dotate di carica inferiore rispetto alle vermiculiti. Per questa ragione, nei suoli in cui sono presenti smectiti è possibile osservare una moderata ritenzione dello ione NH₄⁺ all'interno del suolo ed una sua possibile presenza nelle soluzioni circolanti.

Caratteri idrologici

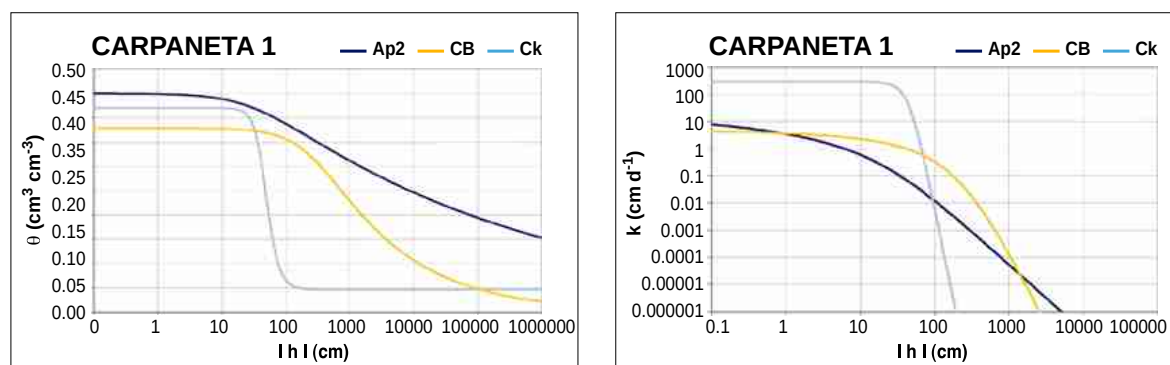


Figura 2.2 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

In questo suolo gli orizzonti di superficie fino a 50 cm presentano una chiara discontinuità pedologica con l'orizzonte Ck ed un'ulteriore discontinuità con l'orizzonte CB a 70 cm. Tali discontinuità si evidenziano anche nelle curve di ritenzione e di conducibilità idraulica Figura 2.2. Infatti, le tre curve di ritenzione mostrano andamenti e pendenze completamente diversi come atteso per le marcate variazioni granulometriche e del carbonato di calcio. A parità di tensione l'orizzonte Ap presenta valori di contenuto d'acqua maggiori degli altri orizzonti; ciò è dovuto in particolare ai maggiori contenuti di argilla e all'effetto strutturante del carbonato di calcio e della sostanza organica.

Nel caso specifico dell'orizzonte CB la forma della curva di ritenzione idrica è coerente con la granulometria sabbiosa ma gli elevati contenuti d'acqua alla saturazione possono essere spiegati solo da un effetto strutturante prodotto dalla ridistribuzione del carbonato di calcio.

Anche la funzione di conducibilità idraulica rispecchia quanto già visto con le funzioni di ritenzione idrica; in particolare è interessante notare il valore molto elevato alla saturazione dell'orizzonte CB e degli andamenti simili degli orizzonti Ap e Ck.

2.2.2 Il suolo di Carpaneta 2

Il sito è localizzato in un ambiente in cui la pietrosità superficiale è assente e il substrato pedogenetico è costituito da sedimenti fluviali limoso sabbiosi calcarei.

Il suolo è profondo, moderatamente drenato in superficie e poco drenato in profondità, molto calcareo in tutti gli orizzonti. Il profilo è caratterizzato da due orizzonti Ap (0-50 cm), un orizzonte Bw ed un orizzonte C che ricopre il relitto di un antico suolo sepolto caratterizzato dagli orizzonti Bk, CB, Cg.

Lo scheletro è assente e la tessitura è franca in superficie, diventa franco-sabbiosa a 50 cm e sabbiosa nell'orizzonte C. A maggiore profondità, nel relitto di suolo sepolto, la tessitura varia da franco-limosa a limosa.

L'orizzonte organo-minerale di superficie è lavorato, presenta uno spessore di 50 cm ed ha un colore bruno giallastro; il colore rimane bruno giallastro anche negli orizzonti più profondi B e C.

La sostanza organica decresce irregolarmente nei primi 50 cm, anche a causa delle lavorazioni, e decresce drasticamente in profondità, mentre la reazione del suolo è neutra in superficie e subalcalina in profondità.

La capacità di scambio cationico è moderatamente elevata fino a 50 cm ed ha un decremento irregolare con la profondità.

La saturazione in basi è sempre del 100% ed è dominata dallo ione calcio.

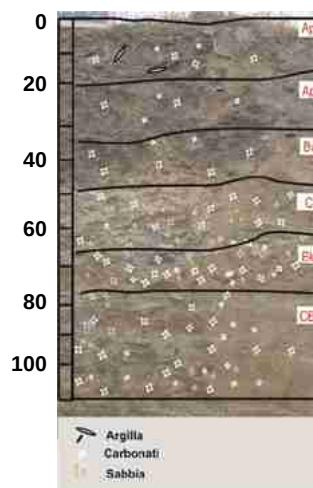
Secondo la Soil Taxonomy (USDA, 2003) il suolo è stato classificato: *coarse silty, carbonatic, mesic, Aquic Calciustept*. Secondo WRB (1998): *Hypercalcic Calcisol*.

Il suolo è stato campionato a circa 100 m di distanza dal suolo Carpaneta 1. Si è formato dalla pedogenesi di sedimenti fluviali limoso sabbiosi ricchi in carbonato di calcio.

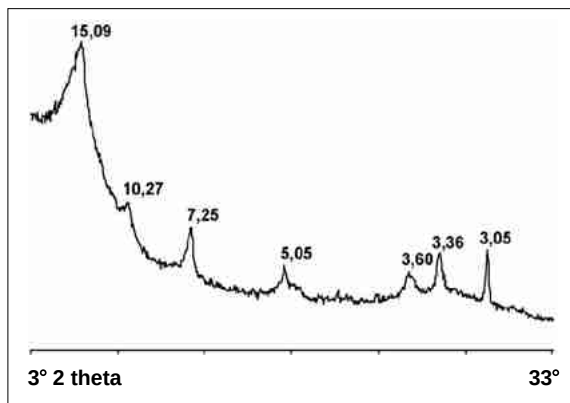
Le discontinuità verticali, pur se presenti ed evidenziabili dalla variabilità della tessitura e della capacità di scambio cationico, tuttavia sono meno evidenti che nel suolo Carpaneta 1. In questo suolo, tra l'altro, non si evidenziano delle chiare superfici erosionali.

I processi pedogenetici sono poco marcati; tra essi si evidenzia un'incipiente lisciviazione di carbonato di calcio anche se esso rimane estremamente elevato anche negli orizzonti di superficie. Il suolo ha una fertilità moderata per l'eccessiva presenza di carbonati.

La capacità di protezione degli acquiferi è elevata.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici



In figura, diffrattogramma della frazione argillosa dell'orizzonte Ap2 (Carpaneta 2). Campione orientato non trattato.

La solubilizzazione del carbonato di calcio sembra anche in questo caso essere il processo pedogenetico dominante.

Infatti l'orizzonte profondo Bk evidenzia una microstruttura con pori di forme e dimensioni diverse, stabilizzati da pellicole di carbonato di calcio illuviale.

L'analisi mineralogica della frazione argillosa dell'orizzonte Ap2 ha consentito l'individuazione di caolinite (7.25 Å, 3.60 Å), poca illite (10.27 Å, 5.05 Å) e calcite (3.05 Å).

Grazie all'utilizzo di trattamenti specifici dei campioni (solvatazione con glicole etilenico e riscaldamento a 550°C) è stato possibile individuare anche la presenza di minerali argillosi interstratificati illite/smectite (con prevalenza dei termini smectitici).

Caratteri idrologici

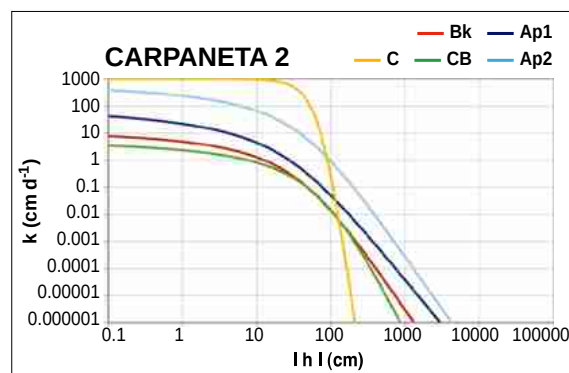
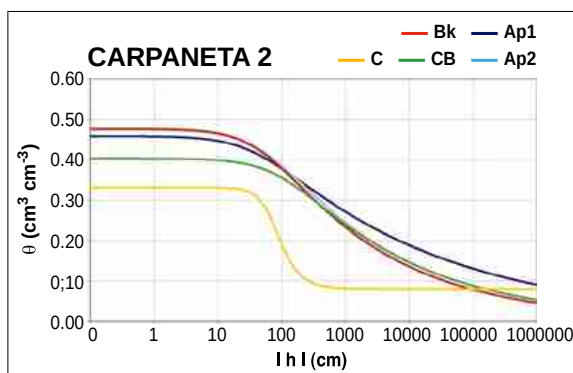


Figura 2.3 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Una forte discontinuità a 60 cm divide gli orizzonti più superficiali da un suolo sepolto.

L'orizzonte C che segue questa discontinuità è molto conduttivo quando il suolo è prossimo alla saturazione, ma diventa praticamente impermeabile per valori di potenziali minori di -100 cm.

Tale discontinuità determina nel suo complesso una elevata capacità di protezione dell'acquifero da parte di questo suolo.

Gli altri orizzonti presentano in genere, nelle curve, pendenze non eccessivamente dissimili sia per la ritenzione idrica che per la conducibilità idraulica (Fig. 2.3).

Differenze si notano soltanto alla saturazione dove l'orizzonte CB si attesta su valori più bassi di ritenzione (circa 0,4 cm³ cm⁻³) e di conducibilità (<5 cm d⁻¹) mentre l'orizzonte Ap2, come atteso, si attesta su valori più elevati di ritenzione (circa 0,48 cm³ cm⁻³) e di conducibilità (~250 cm d⁻¹).

2.2.3 Il suolo di Caviaga

Il sito è localizzato in un ambiente caratterizzato da pietrosità assente e da un substrato pedogenetico costituito da sedimenti fluviali limosi e sabbiosi, non calcarei, derivati dall'accumulo di materiali esondati dai fiumi nella piana in tempi successivi. Il suolo è profondo, umido e ben drenato, non calcareo, con scheletro assente.

La tessitura è franca in superficie (fino a 45 cm) e diviene progressivamente più sabbiosa con la profondità (da franco sabbiosa fino a sabbiosa oltre i 110 cm).

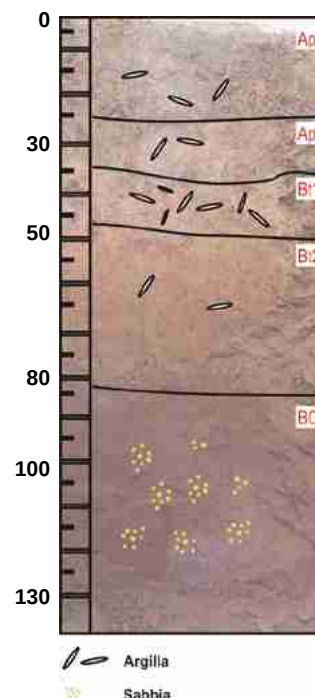
La struttura ha un grado di aggregazione moderato in superficie e debole lungo tutto il profilo, fino a divenire incoerente nell'orizzonte più profondo.

L'orizzonte organo-minerale di superficie è lavorato, presenta uno spessore di 35 cm e colore bruno grigiastro scuro, l'orizzonte minerale ha un colore da bruno a bruno-giallastro scuro e presenta poche pellicole di argilla fino a circa 80 cm di profondità. La sostanza organica decresce regolarmente lungo il profilo e la reazione del suolo è moderatamente acida in superficie e da debolmente acida a neutra già al di sotto dei 45 cm di profondità.

La capacità di scambio cationica è moderata in superficie, ma decresce con la profondità, al ridursi della componente organica e di quella argillosa.

Il complesso di scambio è insaturo in superficie con valori del 23%, ma la saturazione del 50% si ha già al di sotto dei 20 cm fino a 45 cm di profondità, al di sotto dei quali la saturazione raggiunge il 100%, con un complesso di scambio dominato dallo ione calcio.

Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *coarse loamy, mixed, superactive, mesic, Ultic Haplustalf*. Secondo WRB (1998): *Haplic Luvisol*.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici

Gli orizzonti di superficie mostrano una porosità alquanto complessa e diversificata, prodotta dalla lavorazione minima del suolo.

Negli orizzonti Bt si evidenzia un processo di trasporto meccanico (illuviazione) di materiale sabbioso fine e limoso (minerale ed organico) in tutto il suolo. Tale illuviazione si evidenzia con pellicole, riempimenti e segregazioni.

Nell'orizzonte franco sabbioso BC si evidenziano dominanti pellicole di argilla che ricoprono tutti i grani sabbiosi (vedi figura).

Le pellicole mostrano una "gioventù deposizionale" come si evince dall'andamento delle linee d'estinzione. L'assenza delle pellicole di argilla negli orizzonti immediatamente sovrastanti, in combinazione con la presenza dominante delle stesse negli orizzonti più profondi, evidenzia la presenza di imponenti flussi laterali di trasporto di materiali argillosi.



Condizioni di ristagno idrico temporaneo si palesano per la presenza di una dinamica del ferro attestata dalle rare concrezioni di ferro, a contorno diffuso, negli orizzonti più profondi. L'analisi mineralogica ha messo in evidenza la presenza di quarzo, miche e/o illiti e albite/anortite nella frazione sabbiosa degli orizzonti di superficie e di profondità. L'analisi della frazione argillosa degli stessi orizzonti, mediante trattamenti specifici, ha consentito di individuare, oltre a quarzo e illite, anche la presenza di vermiculiti.

Le vermiculiti sono scambiatori del suolo ad elevata carica di superficie, capaci di creare forti legami con i cationi presenti nella soluzione del suolo.

Questa carica non è influenzata dalla concentrazione e dal tipo di ioni presenti in soluzione. Ioni poco idratati come K^+ ed NH_4^+ vengono ritenuti molto fortemente. Per questa ragione, nei suoli in cui sono presenti le vermiculiti è possibile osservare una forte ritenzione dello ione NH_4^+ all'interno del suolo ed una sua scarsa presenza nelle soluzioni circolanti.

Caratteri idrologici

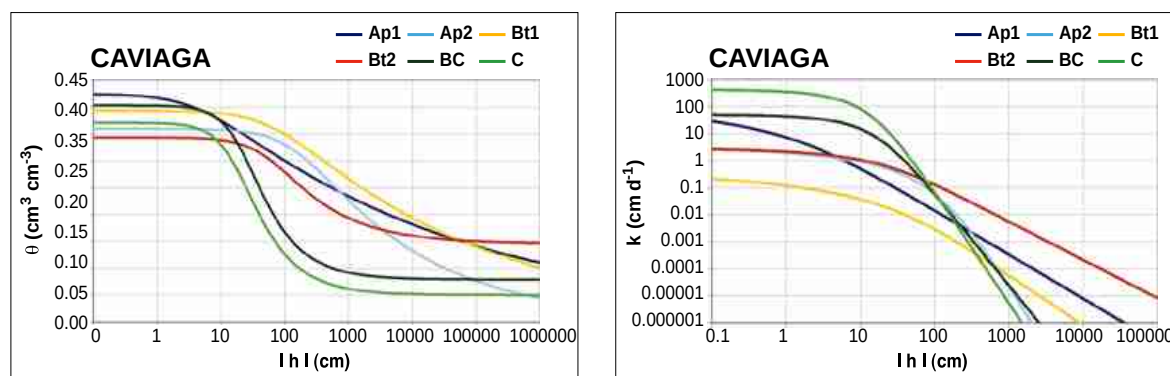


Figura 2.4 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Gli orizzonti di superficie Ap1 ed Ap2 mostrano differenze a causa della lavorazione minima del suolo. In particolare, l'orizzonte Ap2 risulta essere compattato mentre l'orizzonte sovrastante Ap1, così come evidenziato nell'analisi micromorfologica, risulta avere una porosità molto diversificata da un punto di vista dimensionale. Tali differenze sembrano evincersi dall'andamento delle curve di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica (Fig. 2.4) nei pressi della saturazione in cui l'orizzonte Ap2 mostra valori di contenuto d'acqua e di conducibilità idraulica minori del sovrastante orizzonte Ap1.

E' ovvio che in questo suolo, come in tutti gli altri indagati, le caratteristiche idrologiche dell'orizzonte Ap1 sono variabili in funzione sia dell'epoca di campionamento che in relazione alla conduzione agronomica del sito.

L'orizzonte Bt1 così come si evince dal maggiore contenuto di argilla, e dalla presenza di pellicole illuviali di limo ha un comportamento idrologico diverso. Infatti, la curva di ritenzione ha una pendenza più bassa e valori di contenuto d'acqua più elevati degli altri orizzonti, indice di una maggiore strutturazione del suolo con una più articolata distribuzione dimensionale dei pori.

Tale comportamento si riflette sulla curva di conducibilità che risulta considerevolmente più bassa delle altre nella zona prossima alla saturazione mentre l'orizzonte diventa più conduttivo per valori di potenziale minori di 500 cm.

Gli orizzonti più profondi BC e C pur essendo franco sabbiosi hanno mostrato all'analisi micromorfologica la presenza di pellicole di argille all'esterno dei grani minerali ed all'interno di macro pori, tali argille sono tipicamente di dimensioni inferiori a 0,2 micron.

Questa tipologia dimensionale dell'argilla potrebbe spiegare le interessanti proprietà idrologiche di questi orizzonti. Infatti le curve di ritenzione mostrano un andamento in cui si riconoscono una frazione di micro-pori poco strutturati e una evidente macro porosità la cui strutturazione può essere attribuita alla presenza di queste argille illuviali. Infatti questi orizzonti presentano un valore alto di contenuto d'acqua alla saturazione, più elevato di quello che ci si aspetterebbe dal loro contenuto in sabbia.

2.2.4 Il suolo di Ghisalba 1

Il sito è localizzato in un ambiente caratterizzato da presenza di ghiaia e ciottoli in superficie e da substrato pedogenetico costituito da sedimenti ghiaioso-sabbiosi a componente calcarea, talvolta parzialmente cementati. Si tratta di un suolo molto profondo e umido, con drenaggio buono.

I colori bruni in superficie divengono bruno giallastri con la profondità (oltre i 75 cm). Lo scheletro è presente in superficie fino a 50 cm di profondità e la tessitura è franca fino a 100 cm e diviene sabbiosa con la profondità.

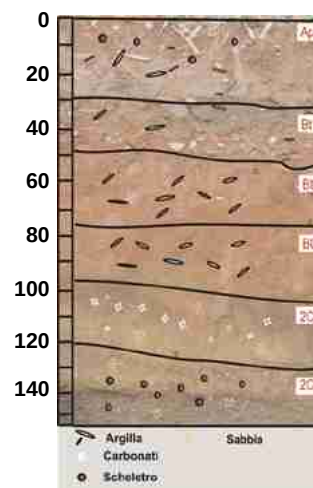
La struttura ha un forte grado di aggregazione solo tra 35 e 75 cm di profondità, ma si riduce con la profondità fino a diventare incoerente al di sotto dei 100 cm. Il contenuto di carbonati nella matrice è da scarso ad assente fino a 100 cm di profondità, ma aumenta fortemente al di sotto, costituendo anche dei “pendant” di CaCO_3 a 120 cm.

Il contenuto di sostanza organica è elevato in superficie (circa il 3%) e decresce abbastanza regolarmente lungo il profilo. Il pH del suolo aumenta lungo il profilo: è debolmente alcalino negli orizzonti superficiali, moderatamente alcalino lungo il profilo e fortemente alcalino sotto i 120 cm. La capacità di scambio cationica è più elevata in superficie, ma risulta piuttosto bassa lungo tutto il profilo, anche in corrispondenza degli orizzonti più argillosi. Il complesso di scambio è saturo e dominato dallo ione calcio; la concentrazione dello ione Na^+ è piuttosto elevata lungo tutto il profilo, ma non raggiunge valori tali da rendere sodici questi suoli.

Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *fine loamy, mixed, superactive, mesic, Typic Hapludalf*. Secondo WRB (1998): *Haplic Luvisol*.

Dal punto di vista pedogenetico si tratta di un suolo alluvionale formatosi sia da sedimenti grossolani che da sedimenti fini. Il suolo è caratterizzato da alcune discontinuità legate all'ambiente geomorfologico di formazione. Nonostante la presenza di ghiaia e ciottoli, il suolo ha una marcata pedogenesi con la presenza di colori bruni forti degli orizzonti Bt, con pellicole di argilla ben evidenti e con un'aggregazione fortemente sviluppata fino a 75 cm di profondità. E' un suolo di ambiente alluvionale stabile, infatti i processi pedogenetici dominanti, illuviazione di argilla all'interno del profilo e rubefazione, sono processi tipici di ambienti geomorfologicamente stabili.

La fertilità di questi suoli è moderata anche a causa della non elevata capacità di scambio cationico. Le importanti discontinuità verticali della granulometria del suolo, specie negli orizzonti più profondi, rappresentano un fattore pedologico di protezione degli acquiferi.



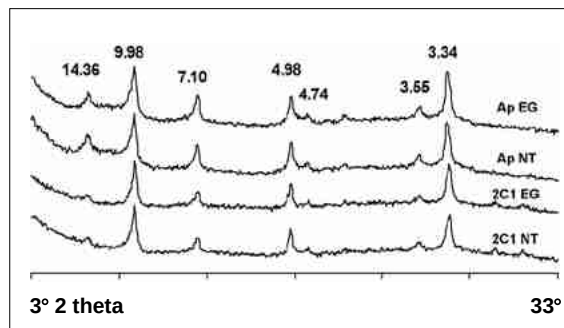
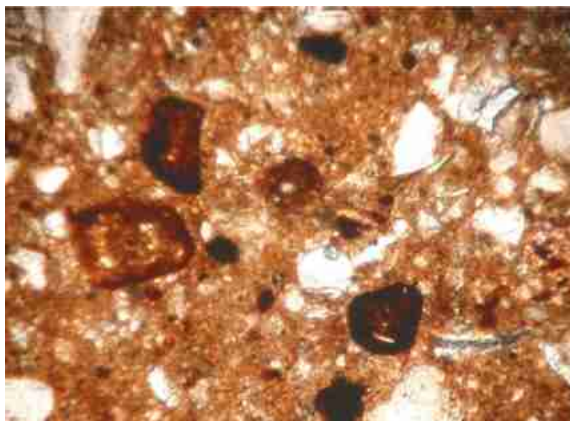
I principali caratteri micromorfologici e mineralogici

L'analisi microscopica evidenzia la presenza di minerali come miche, feldspati e quarzo a vario grado di alterazione. In particolare oltre a minerali “freschi” si evidenziano grani sabbiosi di feldspati e plagioclasti completamente alterati e contornati da imponenti anelli di alterazione. In superficie sono molto frequenti le concrezioni di ferro, indici di una marcata alternanza umido-secco (vedi figura pagina a fronte).

In profondità si rinvengono invece segregazioni di ferro e pellicole di argilla.

La matrice è anisotropa. La presenza di micro-laminazioni di limo, con microstruttura massiva ed estremamente compatta, all'esterno di alcuni rari grani sabbiosi, evidenzia la lunga storia pedogenetica (relativamente ad altri suoli indagati) di questi suoli. Il suolo evidenzia una marcata pedogenesi.

I principali caratteri micromorfologici e mineralogici



In figura, diffrattogramma della frazione argillosa degli orizzonti Ap e 2C1 (Ghisalba 1). Campioni orientati non trattati (NT) e trattati con glicole etilenico (EG).

L'analisi mineralogica della frazione sabbiosa di un orizzonte di profondità (2C1) conferma la presenza di quarzo, miche e/o illiti e albite/anortite, ed evidenzia la presenza anche di calcite e dolomite.

I risultati delle analisi condotte sulla frazione argillosa dell'orizzonte di superficie (Ap) e di quello profondo (2C1) hanno evidenziato la presenza di quarzo (3.34 Å) ed illite (9.98, 4.98Å) anche in questa frazione.

Nell'Ap, ed in misura ridotta nel 2C1, è stata riconosciuta anche presenza di clorite.

Le cloriti, minerali a struttura compatta e non espandibile, di grosse dimensioni, presentano una capacità di ritenere i cationi molto bassa.

La presenza di cloriti nei suoli di Ghisalba determina una bassa ritenzione dello ione NH_4^+ nel suolo ed un conseguente arricchimento in esso nella soluzione circolante.

Caratteri idrologici

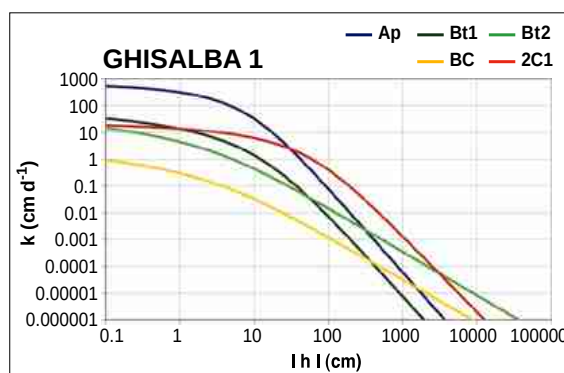
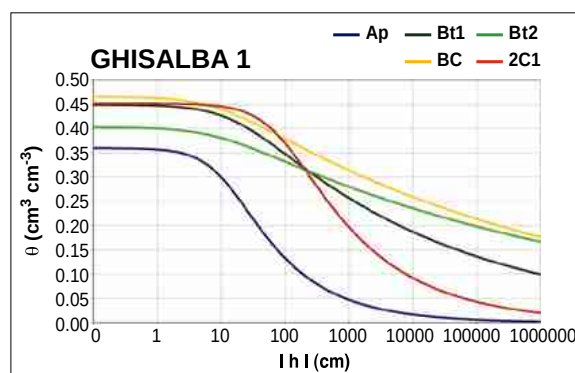


Figura 2.5 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Le curve di ritenzione e di conducibilità, in accordo con la marcata pedogenesi, mostrano una buona strutturazione (Fig. 2.5). In particolare, tutti gli orizzonti presentano valori alla saturazione superiori a $0,4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e pendenze della curva di ritenzione non eccessive.

Anche l'orizzonte profondo 2C1, a tessitura fortemente sabbiosa (86%), pur presentando una discontinuità idrologica rispetto agli orizzonti sovrastanti presenta una buona strutturazione dovuta all'effetto del calcare presente in notevole quantità (28%).

Il Bt1 mostra ai più bassi potenziali valori di contenuto d'acqua leggermente inferiori rispetto agli orizzonti Bt2 e BC, ciò in accordo con il minore contenuto di argilla. Per quanto attiene la conducibilità si possono fare considerazioni analoghe con gli orizzonti Bt2 e BC che rallentano il moto dell'acqua in condizioni di elevati contenuti d'acqua mentre, per i più bassi contenuti d'acqua, sono il Bt1 e l'orizzonte sabbioso profondo gli orizzonti che rallentano il flusso. L'alternanza di orizzonti con proprietà leggermente diverse e la loro buona strutturazione ne fanno un suolo a buona capacità protettiva dell'acquifero.

2.2.5 Il suolo di Ghisalba 2

Il sito è localizzato in un ambiente caratterizzato da presenza di ghiaia e ciottoli in superficie e da substrato pedogenetico costituito da sedimenti ghiaioso-sabbiosi a componente calcarea, talvolta parzialmente cementati.

Si tratta di un suolo profondo e umido, con drenaggio buono (tendente al moderatamente rapido). I colori sono bruni in superficie, ma divengono bruno giallastri, progressivamente più chiari con la profondità (oltre i 105 cm).

Lo scheletro è scarso in superficie, ma diviene estremamente abbondante al di sotto dei 55 cm e la tessitura, franca in superficie, diviene progressivamente più sabbiosa con la profondità (orizzonte sabbioso al di sotto dei 105 cm).

La struttura è sviluppata solo in superficie, fino a 55 cm di profondità, poiché al di sotto il suolo diviene massivo.

Il contenuto di carbonati nella matrice è da scarso ad assente fino a 105 cm di profondità, ma al di sotto diviene molto calcareo; a 55 cm iniziano ad essere presenti “pendant” di CaCO_3 che diventano moltissimi con la profondità.

Il contenuto di sostanza organica è molto basso in superficie e si mantiene tale lungo tutto il profilo.

Il pH aumenta regolarmente lungo il profilo: da neutro a debolmente alcalino negli orizzonti superficiali, diviene fortemente alcalino al di sotto dei 110 cm.

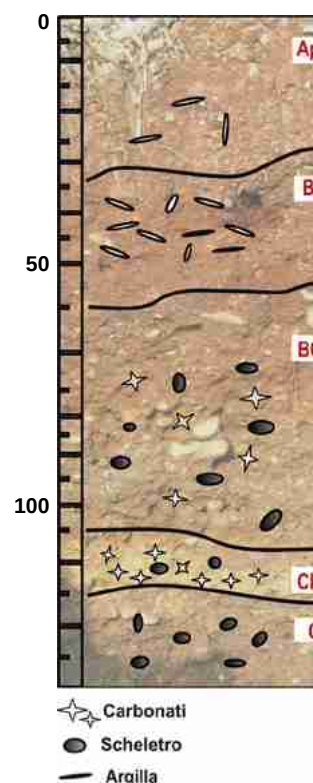
La capacità di scambio cationica è moderata in superficie, mentre risulta piuttosto bassa lungo il resto del profilo.

Il complesso di scambio è saturo e dominato dallo ione calcio; la concentrazione dello ione Na^+ è moderata lungo tutto il profilo, ma non raggiunge valori tali da rendere sodici questi suoli.

Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *loamy skeletal, mixed, superactive, mesic, Inceptic Hapludalf*. Secondo WRB (1998): *Haplic Luvisol*.

Il profilo è ubicato a 100 m dal profilo Ghisalba 1 ed è anch'esso formato sia da sedimenti grossolani che da sedimenti fini. In questo caso i sedimenti grossolani, caratterizzati da ghiaie calcaree, sono predominanti e sono molto importanti nel deprimere i processi pedogenetici e quindi nell'influenzare le proprietà di questi suoli. Anche in questo caso si evidenziano delle discontinuità all'interno del profilo, dovute alle diverse deposizioni alluvionali. Il processo pedogenetico dominante è l'illuviazione di argilla all'interno del profilo.

La fertilità di questi suoli è moderata per la presenza elevata di scheletro e per la ridotta capacità di scambio cationico. Le importanti discontinuità verticali della granulometria del suolo, specie negli orizzonti più profondi, sono un fattore pedologico di protezione degli acquiferi.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici

L'analisi microscopica evidenzia la presenza di minerali come miche, feldspati e quarzo a vario grado di alterazione, anche se la pedogenesi non è particolarmente evidente (se raffrontata al suolo di Ghisalba 1). In superficie sono molto frequenti le concrezioni di ferro (condizioni umido/secco) mentre in profondità si rinven- gono segregazioni di ferro e pellicole di argilla. La matrice è anisotropa.

L'analisi mineralogica della frazione argillosa degli orizzonti Ap2 e Bt ha confermato la presenza di abbon- dante mica e/o illite e quarzo.

E' stato inoltre possibile individuare la presenza di clorite e, in particolare nel Bt, di minerali interstratificati illite/vermiculite (o illite/smectite).

Caratteri idrologici

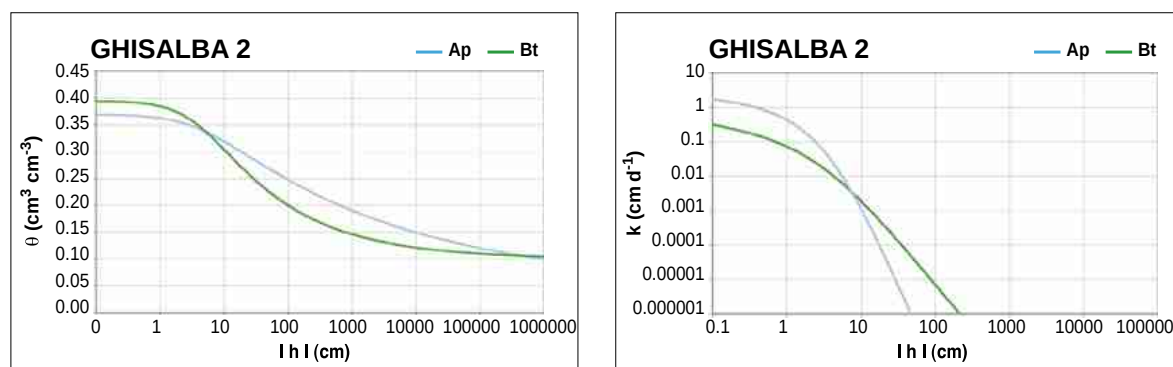


Figura 2.6 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Le curve di ritenzione (Fig. 2.6) mostrano pendenze non eccessive indicative di una buona strutturazione del suolo.

I valori di ritenzione idrica non particolarmente elevati alla saturazione (per questa tipologia di suolo) possono essere spiegati con la metodologia di campo utilizzata (infiltrometria a tensione).

Infatti, con la presenza di pori ciechi e di macropori non saturati in campo la metodologia adottata conduce a valori di contenuto d'acqua minori del 5-10% rispetto

a quelli ottenibili in laboratorio, dove si riesce invece ad ottenere la completa saturazione del mezzo poroso. Per quanto attiene gli orizzonti profondi a tessitura fortemente sabbiosa con notevoli quantitativi di calcare si possono ipotizzare comportamenti simili ai corrispondenti orizzonti del sito Ghisalba 1.

L'alternanza di orizzonti con proprietà leggermente diverse e la loro buona strutturazione ne fanno un suolo a discreta capacità protettiva dell'acquifero nonostante l'elevata quantità di scheletro presente.

2.2.6 Il suolo di Landriano 1

Il sito è localizzato in un ambiente con pietrosità superficiale assente, in cui il substrato pedogenetico è costituito da sedimenti fluviali sabbioso-ghiaiosi di origine alluvionale. Il suolo è profondo e ben drenato fino a 90 cm, ma la falda è presente a circa 105 cm di profondità.

Si tratta di un suolo poco calcareo, con scheletro scarso in superficie ed abbondante in profondità.

La tessitura è franco sabbiosa fino a 90 cm e diviene sabbiosa nell'orizzonte profondo Cg.

La struttura varia da poliedrica debolmente strutturata in superficie ad incoerente in profondità.

L'orizzonte organo-minerale di superficie è lavorato, presenta uno spessore di 40 cm ed ha un colore che varia da bruno a bruno giallastro scuro.

La sostanza organica decresce irregolarmente con la profondità avendo un incremento brusco nell'orizzonte B; ciò è imputabile alla presenza di un relitto di suolo sepolto.

La reazione del suolo è generalmente vicina alla neutralità. La capacità di scambio cationico è molto bassa in tutto il profilo mentre la saturazione in basi è sempre del 100%.

Secondo la Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *loamy skeletal, mixed, superactive, mesic, Oxyaquic Haplustept*. Secondo WRB (1998): *Endoskeleti-Fluvic Luvisol (eutric)*.

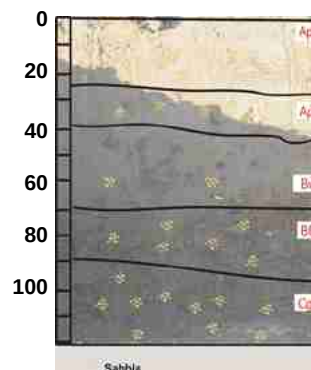
Dal punto di vista pedogenetico, si tratta di un suolo che si sviluppa a partire dai sedimenti fluviali sabbioso-ghiaiosi degli ambienti alluvionali della pianura lombarda Milanese-Pavese. I sedimenti sono privi di carbonato di calcio ed hanno una granulometria grossolana.

A circa 40 cm di profondità si evidenzia la presenza di un relitto di un suolo sepolto.

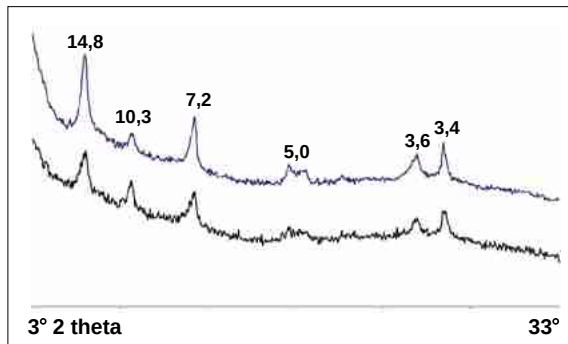
In sintesi si tratta di un suolo a basso sviluppo pedogenetico in cui i processi prevalenti sono di incipiente alterazione dei minerali presenti nella frazione sabbiosa del suolo e dinamica del ferro prodotta dal ristagno idrico nell'orizzonte più profondo.

La fertilità del suolo è moderatamente bassa, sia a causa della granulometria grossolana che per la bassa capacità di scambio cationico.

La capacità di protezione degli acquiferi è da considerarsi bassa a causa della granulometria grossolana di questo suolo.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici



In figura, il diffrattogramma della frazione argillosa degli orizzonti Ap2 (nero) e B (blu), in cui si evidenziano i picchi della caolinite (7.2 Å, 3.6 Å) dell'illite (10.3 Å) e della vermiculite (14.8 Å).

Lo studio microscopico del suolo evidenzia la presenza di frammenti di rocce metamorfiche e di cristalli di feldspati, quarzo e miche.

Tutti questi minerali non evidenziano segni di alterazione. La matrice del suolo è isotropa. Non si evidenziano dinamiche del ferro ed altre figure pedogenetiche.

Sono ancora evidenti le microlaminazioni di sedimenti a diversa granulometria, da relazionarsi alla dinamica alluvionale.

L'analisi mineralogica della frazione argillosa ha evidenziato la presenza di caolinite, di poca e mal cristallizzata illite e di vermiculite.

Caratteri idrologici

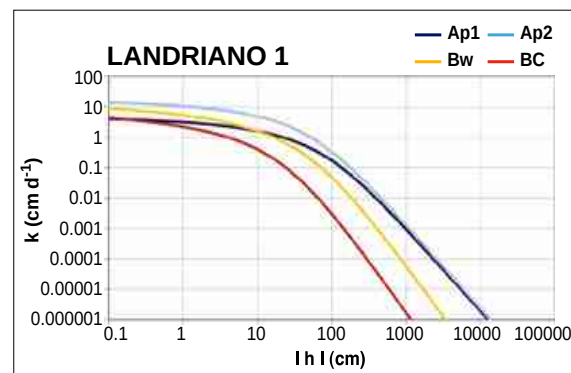
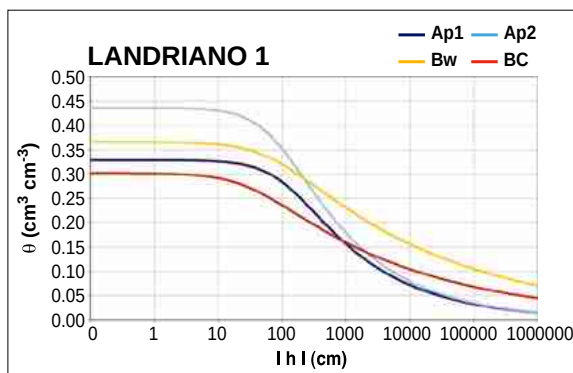


Figura 2.7 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Il profilo pedogenizzato mostra una certa omogeneità nella forma delle curve di conducibilità idraulica (Fig. 2.7) in accordo con la mancanza di discontinuità granulometriche negli orizzonti A e B.

I valori massimi alla saturazione, compresi fra 5 e 16 cm d⁻¹, risultano essere non eccessivamente elevati per la classe granulometrica di appartenenza.

Per quanto attiene la forma della curva di ritenzione gli orizzonti B sono molto simili fra loro con l'orizzonte Bw traslato verso l'alto in accordo ai minori contenuti di sabbia e più elevati di sostanza organica. Interessanti risultano essere le curve di ritenzione degli orizzonti Ap in cui è evidente l'effetto del compattamento dell'orizzonte superficiale.

Tale compattamento è a carico dei pori più grandi così come si evince dalle differenze di ritenzione che sono massime alla saturazione per poi ridursi gradualmente per i più bassi valori di potenziale a cui corrispondono pori più piccoli.

La capacità protettiva degli acquiferi di questo suolo è sicuramente superiore a quella deducibile dalla semplice analisi granulometrica e comunque rimane un fattore secondario per la presenza della falda superficiale che rende il sistema vulnerabile.

2.2.7 Il suolo di Landriano 2

Il sito è localizzato in un ambiente in cui la pietrosità superficiale è assente e il substrato pedogenetico è costituito da sedimenti fluvioglaciali sabbiosi, con limo e ghiaia.

Il suolo è profondo, con drenaggio mediocre, non calcareo e con scheletro assente. Il suolo consiste di una sequenza di orizzonti Ap-Bw-C sovrapposta in discontinuità ad orizzonti 2Ck e 3Cg.

La tessitura varia da franca a franco-sabbiosa in superficie e diviene franco-argillosa nell'orizzonte Bw, mentre in profondità è sabbiosa.

La struttura è poliedrica angolare moderatamente sviluppata in superficie e diviene debolmente sviluppata e poi massiva in profondità. Si evidenziano marcate screziature negli orizzonti più profondi. L'orizzonte organo-minerale di superficie è lavorato, presenta uno spessore di circa 40 cm, ha un colore che varia da bruno a bruno-giallastro scuro.

Il colore è invece bruno forte nel sottostante orizzonte Bw e bruno nell'orizzonte C.

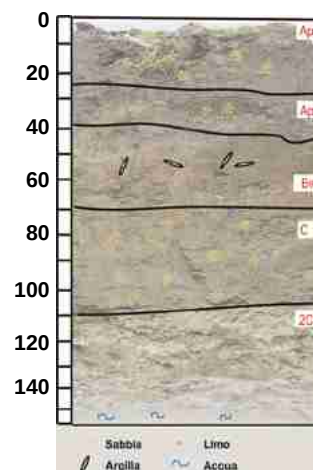
La sostanza organica decresce con regolarità dalla superficie in profondità e la reazione del suolo è generalmente neutra in superficie e subalcalina oltre i 70 cm. La capacità di scambio cationico è bassa in tutto il profilo, ad eccezione dell'orizzonte B, mentre la saturazione in basi è sempre del 100%.

Secondo la Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *coarse silty, mixed, superactive, mesic, Oxyaquic Haplustept*. Secondo WRB (1998): *Gley-Fluvic Luvisol (eutric)*.

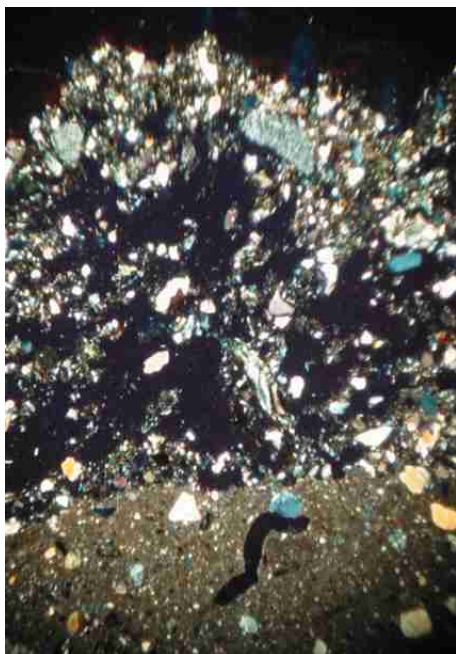
Il suolo, sviluppatosi su sedimenti fluviali sabbioso-ghiaiosi non calcarei, presenta un'importante differenziazione verticale, in termini di granulometria e di capacità di scambio cationico, ascrivibile a discontinuità litologiche all'interno del suolo.

Il processo pedogenetico dominante è quello dell'alterazione dei minerali e la dinamica del ferro con concrezioni e screziature negli orizzonti più profondi. Si evidenzia una ridistribuzione di carbonato di calcio limitatamente agli orizzonti più profondi.

La fertilità del suolo è moderatamente bassa sia a causa della granulometria grossolana che per la bassa capacità di scambio cationico. La capacità di protezione degli acquiferi è da considerarsi bassa a causa della granulometria grossolana.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici



In questo suolo, che evidenzia una modesta pedogenesi, si evidenzia un orizzonte con presenza sia di concrezioni di ferro che di carbonato di calcio.

I minerali sabbiosi non evidenziano segni di alterazione e la matrice è debolmente anisotropa.

Negli orizzonti di superficie sono ancora osservabili laminazioni, che evidenziano una certa "gioventù pedogenetica" del suolo.

L'analisi mineralogica della frazione argillosa dell'orizzonte Bw1 ha consentito l'individuazione di caolinite, di poca illite e poco quarzo.

L'utilizzo di trattamenti specifici ha consentito l'individuazione di interstratificati illite/smectite (con circa il 90% dei termini smectitici).

In figura, orizzonte Ap2 (XPL): microstruttura con particolare di microlaminazioni sovrapposte di limo (sotto) e sabbia (sopra).

Caratteri idrologici

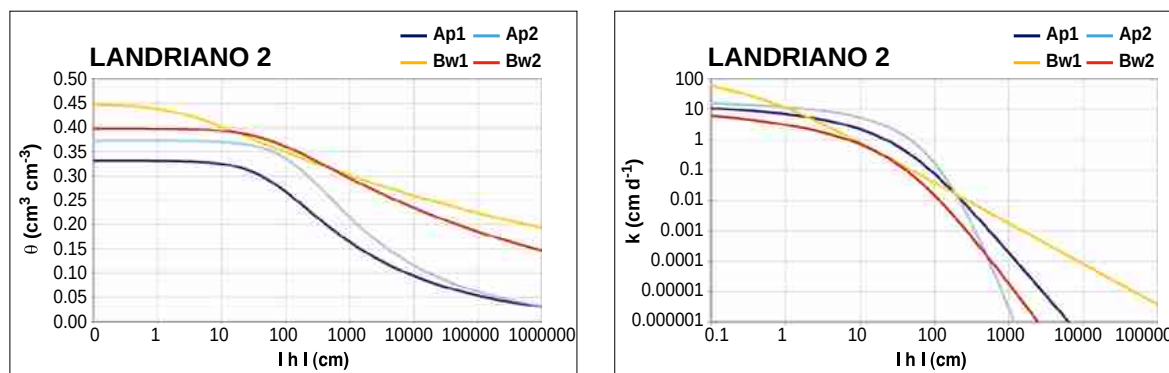


Figura 2.8 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Dal punto di vista idrologico il sito di Landriano 2 presenta alcune importanti differenze rispetto al sito di Landriano 1: in particolare nella discontinuità verticale fra gli orizzonti Ap e l'orizzonte B. Come mostrato nel grafico (Fig. 2.8) le curve di ritenzione degli orizzonti Ap sono molto simili fra loro, anche se l'orizzonte Ap1 risulta più compattato rispetto all'Ap2 con la diminuzione di porosità a carico dei pori più grandi. Le curve di ritenzione dell'orizzonte Bw, campionato a due diverse profondità, presentano valori alla saturazione più elevati e pendenze minori come atteso per il più elevato contenuto della frazione argillosa (28,5%) e per la presenza all'interno di questa di notevoli quantitativi di smectite così come risultante dall'analisi mineralogica.

Inoltre, la presenza di illite/smectite, evidenziata dalle analisi mineralogiche, determina elevati valori di ritenzione ($\sim 0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) per potenziali molto bassi vicino al punto di appassimento ($\sim 15000 \text{ cm}$).

Anche le curve di conducibilità idraulica riproducono la stessa variabilità mostrata dalle curve di ritenzione. Tali discontinuità, anche per la presenza al di sotto del Bw dell'orizzonte C molto sabbioso, determinano una più accentuata protezione da parte del suolo dell'acquifero rispetto al suolo più omogeneo del sito Landriano 1. In ogni caso, la capacità di protezione complessiva da parte del suolo della falda risulta limitata data la risalita della stessa a profondità non elevate ($\sim 150 \text{ cm}$).

2.2.8 Il suolo di Luignano

Il sito è localizzato in un ambiente in cui la pietrosità di superficie è variabile, da scarsa a nulla, e dove il substrato pedogenetico è costituito da intercalazioni di sedimenti fluviali limosi e sabbiosi, variamente calcarei.

Il suolo è profondo, ben drenato, non calcareo, con scheletro assente. La tessitura è franca in superficie, franco-argillosa nell'orizzonte B e franco-sabbiosa e franco-limosa in profondità. La struttura è debolmente sviluppata in superficie, diviene moderatamente sviluppata nell'orizzonte Bt.

La tipologia strutturale varia da poliedrica angolare grande in superficie e diviene sempre più massiva andando in profondità.

L'orizzonte organo-minerale di superficie è lavorato (40 cm) ed ha un colore bruno giallastro scuro sia in superficie che nell'orizzonte B, diventando bruno pallido nell'orizzonte C e verde grigiastro nell'orizzonte Cg.

La sostanza organica decresce irregolarmente con la profondità mentre la reazione del suolo è neutra fino a 145 cm.

La capacità di scambio cationico è molto elevata nell'orizzonte di superficie e decresce linearmente con la profondità mentre la saturazione in basi è generalmente superiore al 100% con il complesso di scambio dominato dallo ione calcio.

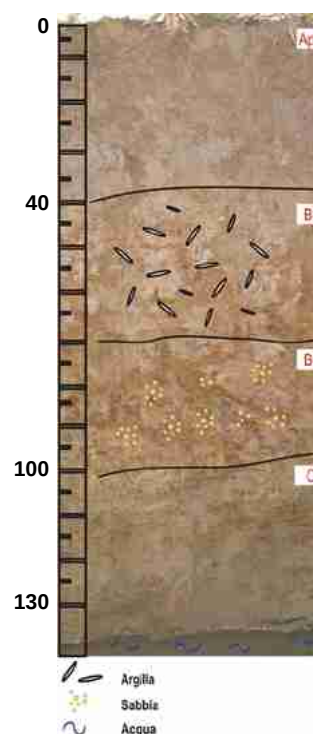
Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *fine silty, mixed, superactive, mesic, Inceptic Haplustalf*. Secondo WRB (1998): *Haplic Luvisol*.

Dal punto di vista pedogenetico, bisogna considerare che si tratta di un suolo tipico delle depressioni a drenaggio difficile, presente in diversi ambienti alluvionali.

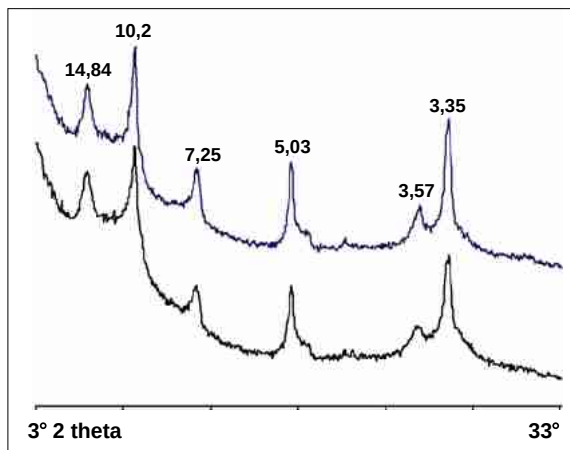
Il suolo si è formato a partire da sedimenti fluviali limosi e sabbiosi. Questi sedimenti sono pressoché privi di carbonato di calcio e non evidenziano discontinuità verticali.

Il processo pedogenetico dominante sembra essere la dinamica del ferro e del manganese in tutti gli orizzonti del profilo, indotta dall'alternanza delle condizioni ossidanti e riducenti legate al ristagno idrico.

La fertilità è buona anche in relazione all'elevata capacità di scambio cationico ed all'ottima saturazione in basi. La capacità di protezione degli acquiferi è discreta anche in considerazione di importanti variazioni del contenuto in sabbia negli orizzonti profondi.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici



L'analisi microscopica mostra una frazione sabbiosa costituita principalmente da feldspati, quarzo e miche. Negli orizzonti profondi BC si evidenziano alcune pellicole di argilla nei pori ed all'esterno di alcuni grani sabbiosi. Le frequenti segregazioni e pellicole di ferro palesano condizioni di ristagno idrico già a partire da 70 cm. La struttura degli orizzonti profondi è chiaramente massiva.

Nell'orizzonte Bw si evidenziano alcune pellicole di argilla e di ferro.

L'analisi mineralogica della frazione argillosa degli orizzonti Ap e BC conferma la presenza di abbondante mica/illite (10.21 Å) e quarzo (3.35 Å).

I trattamenti specifici dei campioni hanno consentito di individuare anche la presenza di clorite (14.84 Å).

Caratteri idrologici

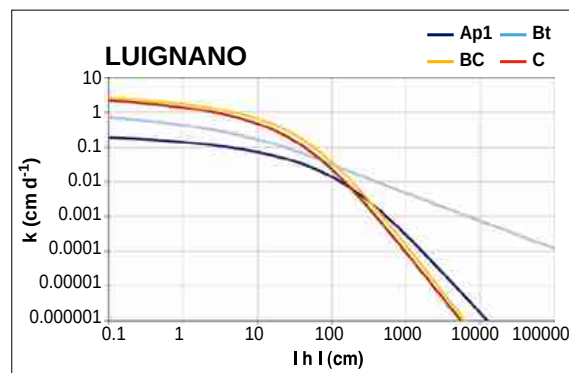
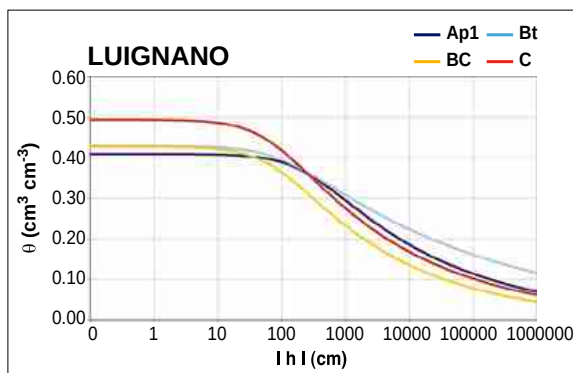


Figura 2.9 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Il suolo di questo sito presenta una relativa omogeneità nelle curve di ritenzione (Fig. 2.9). Si riscontrano valori più elevati di contenuto d'acqua alla saturazione nell'orizzonte C in seguito ai minori valori di sabbia presenti e una minore pendenza dell'orizzonte Bt con valori di contenuto d'acqua più elevati ai più bassi valori di potenziale in seguito al più elevato contenuto in argilla. La differenza fra l'orizzonte Bt e gli altri orizzonti risulta ancora più marcata nelle curve di conducibilità.

Tale comportamento si potrebbe imputare a differenze nella tortuosità del sistema dei pori così come suggerito dal basso valore del parametro l (indicatore della tortuosità nel sistema dei pori) risultante dalla procedura di adattamento dell'equazione di van Genuchten-Mualem (-10,1 contro -0,4, 1,2 e 1,2 degli altri orizzonti).

La presenza di una discontinuità nell'orizzonte Bt e i relativamente bassi valori di conducibilità alla saturazione determinano una discreta capacità di questo suolo nella protezione dell'acquifero anche se i segni di ristagno idrico a 70 cm e la presenza di una falda superficiale sono elementi importanti nella valutazione della vulnerabilità.

2.2.9 Il suolo di Pietole 1

Il sito è localizzato in un ambiente caratterizzato da pietrosità superficiale assente, in cui il substrato pedogenetico è costituito da alternanze di sedimenti fluviali sabbiosi e limosi, a componente calcarea, talvolta parzialmente cementati.

Si tratta di un suolo profondo, umido, con drenaggio mediocre. I colori bruni in superficie divengono giallastri con la profondità. Lo scheletro è assente e la tessitura è franco-argillosa in superficie (fino a 25 cm) e diviene più argillosa con la profondità fino a 70 cm, al di sotto dei quali il contenuto di argilla si riduce e la tessitura diviene sabbiosa oltre i 90 cm.

La struttura ha un debole grado di aggregazione lungo tutto il profilo. Al di sotto dell'orizzonte lavorato di superficie (di circa 25 cm di spessore) è presente un orizzonte minerale con facce di pressione e scivolamento, seguito da un orizzonte calcico. Infatti, il contenuto di carbonati è moderato fino a 50 cm di profondità, decresce appena al di sotto, per poi aumentare fortemente a 70 cm di profondità, ove si situa l'orizzonte calcico.

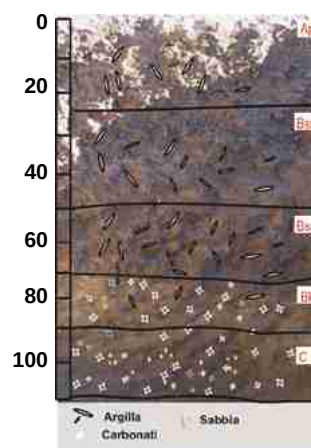
La sostanza organica decresce regolarmente lungo il profilo e la reazione del suolo è moderatamente alcalina fino a 70 cm e diviene fortemente alcalina in profondità.

La capacità di scambio cationica è moderata dalla superficie fino alle medie profondità, ove è presente il più elevato contenuto di argilla, ma decresce fortemente in profondità. Il complesso di scambio è saturo e dominato dallo ione calcio.

Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *fine, mixed, active, mesic, Typic Calciustept*. Secondo WRB (1998): *Haplic Calcisol*.

Dal punto di vista pedogenetico, si tratta di un tipico suolo argilloso di ambiente alluvionale, formatosi da sedimenti fini. Il suolo ha chiari caratteri vertici a causa dell'elevato contenuto in argille espandibili, è ricco in carbonato di calcio ed ha un'elevata capacità di scambio cationico. I processi pedogenetici dominanti sono la lisciviazione di carbonato di calcio e la pedoturbazione.

In sintesi, si tratta di un suolo di elevata fertilità con elevata capacità di ritenere nutrienti ed acqua. La granulometria fine e la presenza di un orizzonte calcico di profondità con un sistema di pori molto diverso dagli orizzonti sovrastanti contribuiscono all'elevata capacità di protezione degli acquiferi di questi pedoambienti.

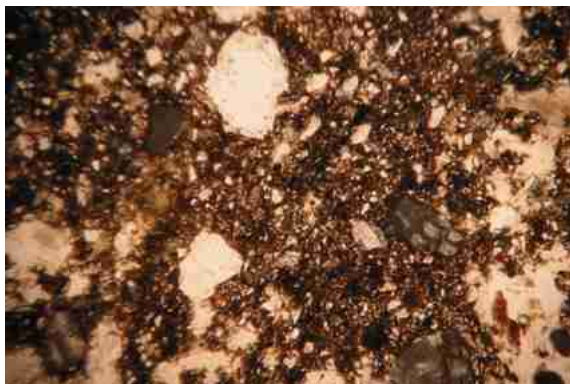


I principali caratteri micromorfologici e mineralogici

L'analisi microscopica ha evidenziato una matrice fine moderatamente anisotropa, con concrezioni ferro manganesifere (vedi foto a sinistra, pagina a fronte).

Vi sono molte figure pedogenetiche relative alla dinamica di solubilizzazione e precipitazione di carbonato di calcio; tra esse si evidenziano le concrezioni e le segregazioni micritiche.

In profondità, l'orizzonte calcico (Bk) mostra una microstruttura ben formata e caratterizzata da pori molto diversificati, sia in forma che in dimensione. Tali pori sono stabilizzati dalla deposizione di carbonato di calcio sulle pareti degli stessi (vedi foto a destra, pagina a fronte).



Negli orizzonti Bss si evidenziano aureole anisotrope e segni di pedoturbamento (frammentazione di concrezioni di ferro) che attestano le dinamiche di contrazione ed espansione di questi suoli.

L'analisi mineralogica ha messo in evidenza la presenza di quarzo, miche e/o illiti, calcite, dolomite e albite/anortite nella frazione sabbiosa dell'orizzonte Bk.

L'analisi della frazione argillosa degli orizzonti Ap e Bk ha consentito l'individuazione di quarzo e di illite anche in questa frazione, di evidenziare presenza di calcite in Bk ed il riconoscimento, in seguito ai trattamenti specifici, di vermiculite e di minerali espandibili della tipologia delle smectiti.

Caratteri idrologici

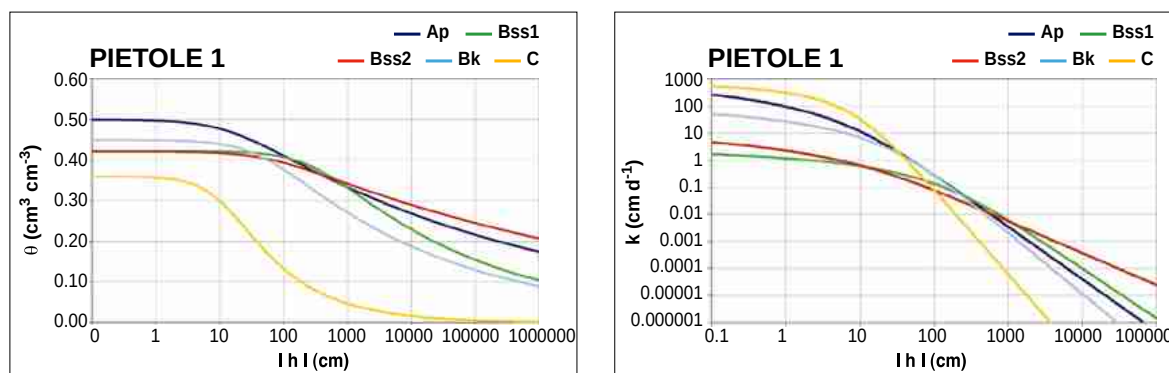


Figura 2.10 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Il sito di Pietole 1 dalla forma delle curve di ritenzione degli orizzonti pedogenizzati (Fig 2.10) evidenzia una buona strutturazione, così come descritto dall'analisi morfologica e micromorfologica.

E' interessante notare che l'orizzonte Bk, con contenuto in argilla notevolmente inferiore ai due Bss sovrastanti, presenta valori alla saturazione abbastanza elevati ($\sim 0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) grazie all'effetto strutturante del carbonato di calcio che si deposita sulle pareti dei pori. Anche dalle curve di conducibilità si possono dedurre le stesse considerazioni riguardo l'uniformità del profilo pedogenizzato, con differenze evidenti alla saturazione dove gli orizzonti Bss presentano valori di conducibilità più bassi.

Completamente diverse sono le curve di ritenzione e conducibilità dell'orizzonte C in accordo con l'elevato contenuto in sabbia (88%).

Ciononostante anche in questo caso il carbonato di calcio sembra giocare un ruolo, anche se secondario, sulla formazione di una porosità diffusa in questo orizzonte.

Per valori inferiori ai -100 cm di potenziale l'orizzonte profondo limita i flussi verso il basso comportandosi, in queste condizioni idrologiche, come elemento di protezione dell'acquifero, mentre ai più alti valori di contenuto d'acqua sono gli orizzonti Bss a svolgere questo ruolo di protezione.

2.2.10 Il suolo di Pietole 2

Il sito è localizzato in un ambiente con pietrosità superficiale assente, il cui substrato pedogenetico è costituito da alternanze di sedimenti fluviali sabbiosi e limosi, a componente calcarea, talvolta parzialmente cementati. Si tratta di un suolo molto profondo e umido, che diviene molto umido al di sotto dei 100 cm di profondità, e con drenaggio mediocre.

I colori bruni in superficie divengono giallastri con la profondità, fino ad assumere toni grigiastri al di sotto dei 130 cm.

Lo scheletro è assente e la tessitura è franco-argilloso-limosa fino a 100 cm e diviene franco limosa con la profondità.

La struttura ha un grado di aggregazione da debole a forte fino ad 80 cm di profondità, mentre il suolo diviene massivo negli orizzonti più profondi.

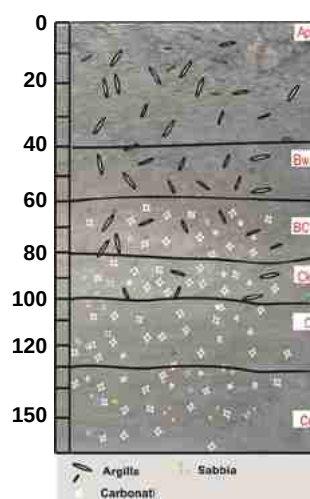
Il contenuto di carbonati nella matrice è scarso fino a 60 cm di profondità, ma al di sotto dell'orizzonte di superficie sono già presenti concrezioni di CaCO_3 ; i carbonati aumentano rapidamente con la profondità e l'elevata concentrazione determina la presenza di un orizzonte calcico ad 80 cm di profondità. Il contenuto di sostanza organica è elevato in superficie (circa il 3%) e decresce regolarmente lungo il profilo. La reazione del suolo è moderatamente alcalina fino a 60 cm e diviene fortemente alcalina negli orizzonti sottostanti. La capacità di scambio cationica è più elevata in superficie, ma risulta moderata lungo tutto il profilo. Il complesso di scambio è saturo e dominato dallo ione calcio; la concentrazione dello ione Na^+ è piuttosto elevata lungo tutto il profilo, ma non raggiunge valori tali da far considerare "sodici" questi suoli.

Secondo Soil Taxonomy (USDA 2003) il suolo è stato classificato: *fine silty, mixed, carbonatic, mesic, Typic Calciustept*. Secondo WRB (1998): *Haplic Calcisol*.

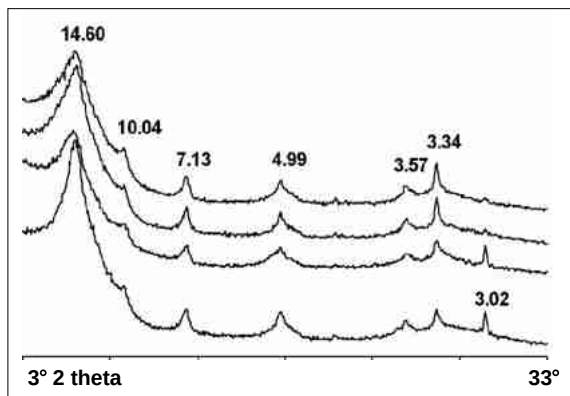
Dal punto di vista pedogenetico, si tratta di un suolo argilloso tipico degli ambienti alluvionali, formati da sedimenti fini e calcarei. I caratteri vertici sono chiari ma non così evidenti come nel profilo Pietole 1, il contenuto in carbonato di calcio è estremamente elevato in profondità e la CSC è molto elevata.

Il processo pedogenetico dominante sembra essere la lisciviazione del carbonato di calcio dagli orizzonti di superficie a quelli più profondi e la neogenesi di minerali argillosi, soprattutto negli orizzonti di superficie.

In sintesi, si tratta di un suolo di elevata fertilità con elevata capacità di ritenere elementi nutritivi ed acqua. La granulometria fine e la presenza di un orizzonte calcico di profondità, con un sistema di pori molto diverso dagli orizzonti sovrastanti, contribuiscono alla elevata capacità di protezione degli acquiferi di questi pedoambienti.



I principali caratteri micromorfologici e mineralogici



In figura, il diffrattogramma della frazione argillosa degli orizzonti Bw e BC. Campioni orientati non trattati (NT) e trattati con glicole etilenico (EG).

Il suolo è caratterizzato da diffuse concrezioni di ferro e da una matrice molto ricca in carbonato di calcio. In questa matrice si evidenziano, anche in profondità, alcuni pedorelitti.

Il carbonato di calcio è finemente distribuito nella matrice ed è anche presente in forme di segregazioni e concrezioni.

Chiari segni di pedoturbamento si evidenziano per la rottura e la conseguente dislocazione di alcune concrezioni di ferro.

L'analisi mineralogica della frazione sabbiosa dell'orizzonte Bw ha messo in evidenza la presenza di quarzo, miche e/o illiti, calcite, dolomite e albite/anortite.

L'analisi della frazione argillosa degli orizzonti Bw e BC ha consentito l'individuazione, in ambedue gli orizzonti, di quarzo (3.34 Å) e di illite (10.04, 4.99 Å) ed il riconoscimento di minerali argillosi; in BC è presente anche calcite (3.02 Å).

In seguito ai trattamenti specifici dei campioni, nell'orizzonte Bw si evidenzia inoltre la presenza di minerali argillosi della tipologia delle vermiculiti e in quello BC sia di vermiculiti che di ridotte quantità di minerali espandibili del tipo smectiti.

Caratteri idrologici

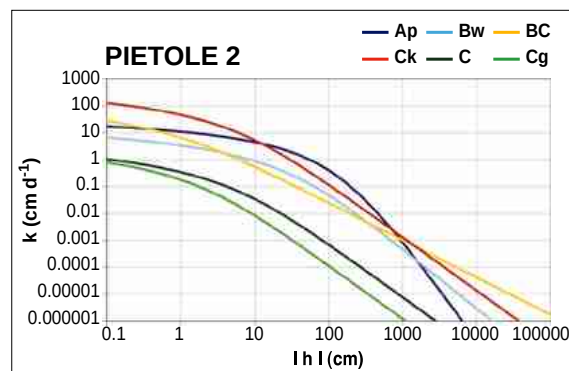
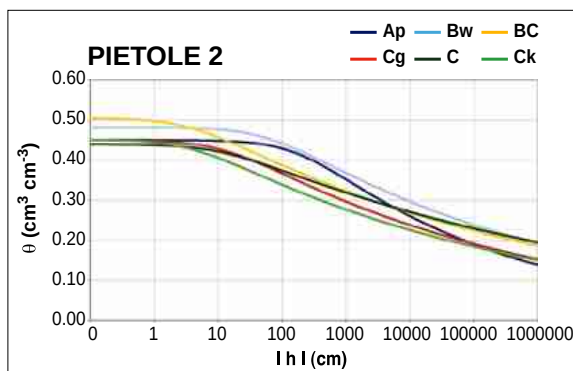


Figura 2.11 Curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica degli orizzonti del suolo

Il suolo di Pietole 2 presenta una certa omogeneità nei caratteri idrologici in particolare per le curve di ritenzione (Fig. 2.11).

Tutti gli orizzonti risultano ben strutturati con valori alla saturazione compresi fra 0,45 e 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e valori a -15000 cm (punto di appassimento) superiori a 0,2 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Le funzioni di conducibilità idraulica, per gli orizzonti più profondi caratterizzati da una struttura massiva, presentano valori relativamente bassi di conducibilità per tutto il range di potenziali, favorendo la protezione dell'acquifero sottostante.



3

Tecniche di misura

3.1 Messa a punto e assemblaggio delle stazioni di monitoraggio

Allo scopo di monitorare i processi di moto dell'acqua e dei soluti all'interno dei suoli dei siti sperimentali, sono state attrezzate stazioni automatiche per l'acquisizione dei dati di contenuto d'acqua, dei potenziali dell'acqua e delle temperature nel suolo nonché per il prelievo della soluzione del suolo per l'analisi dei nitrati.

Le caratteristiche delle strumentazioni e la periodicità di acquisizione sono state diversificate in funzione della tipologia del sito e delle specifiche necessità legate al monitoraggio delle dinamiche di acqua e azoto e di calibrazione-validazione dei modelli matematici (Tabella 3.1). Tutte le acquisizioni sono riferite a diverse profondità lungo il profilo.

Per il monitoraggio dei contenuti d'acqua è stata utilizzata la tecnica TDR (*Time Domain Reflectometry*) basata sulla stretta relazione fra contenuto d'acqua e caratteristiche dielettriche del suolo (Topp et al., 1980). La strumentazione adottata consiste in un riflettometro che emette un segnale elettromagnetico in multifrequenza e lo rileva dopo le attenuazioni che ha subito nell'attraversamento del suolo attraverso delle sonde (REF).

Tali sonde, autocostruite, sono di tipo trifilare, con una lunghezza delle guide d'onda d'acciaio variabile tra i 10 cm ed i 20 cm.

Tabella 3.1 Schema dei siti sperimentali

Campo sperimentale	Provincia	Contenuto d'acqua del suolo	Potenziale del suolo	Temperatura del suolo	Nitrati (freq. di camp.)
Carpaneta 1	Mantova	Manuale		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Carpaneta 2	Mantova	Manuale		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Caviaga	Lodi	Automatico	Automatico	Automatico	7 / 14 gg
Ghisalba 1	Bergamo	Automatico	Automatico	Automatico	7 / 14 gg
Ghisalba 2	Bergamo	Manuale		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Landriano 1	Pavia	Manuale		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Landriano 2	Pavia	Automatico		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Luignano	Cremona	Manuale ogni 15 gg		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Pietole 1	Mantova	Automatico / Manuale ogni 15 gg		Manuale ogni 15 gg	14 / 21 gg
Pietole 2	Mantova	Automatico	Automatico	Automatico	7 / 14 gg

Per ogni sonda sono stati preliminarmente determinati i parametri caratteristici, in particolare la lunghezza del cavo, la lunghezza elettrica delle guide, la costante di cella Kc per la eventuale determinazione della conducibilità elettrica (CE) e il tempo di transito del segnale nel supporto della sonda.

Per ogni sito sperimentale con monitoraggio automatico, ad un unico riflettometro sono state collegate, tramite un sistema di multiplexer, da 18 a 36 sonde TDR, infisse a varie profondità in funzione dell'orizzontazione pedologica.

I valori dei potenziali dell'acqua lungo i profili pedologici studiati sono stati monitorati con l'uso di tensiometri e di trasduttori di pressione. In particolare sono stati utilizzati tensiometri con punto di bolla a 1,5 bar e trasduttori termocompensati di tipo relativo con campo di pressioni da 0 a 1 bar.

Per ogni singolo trasduttore è stata effettuata in laboratorio la calibrazione determinandone le costanti della retta tramite un calibratore di pressione di precisione (-1 ± 1 bar; accuratezza 0,025% FS).

Per la misura delle temperature nel suolo le stazioni di monitoraggio sono state equipaggiate con 3-5 sonde poste a diversa profondità. Sono state adoperate sia termocoppie di tipo E che termistori del tipo PT100.

Per l'assemblaggio generale del sistema di acquisizione, nei siti di Pietole 1 e Caviaga 1 sono state adoperate delle cabine poste a bordo campo (Figura 3.1 sopra) in cui giungeva l'alimentazione elettrica a 220V supportata da un gruppo di continuità.

In ognuna di tali cabine è stato posto un PC con software dedicato per il controllo, via interfaccia seriale, del TDR e la relativa acquisizione dei dati.

In campo, in prossimità dei profili analizzati, è stato posto un contenitore stagno (Figura 3.1 sotto) in cui sono stati alloggiati il TDR, il multiplexer delle sonde TDR, il datalogger per l'acquisizione dei dati dei trasduttori di pressione, con relativo multiplexer, e delle sonde di temperatura e una ventola per la circolazione forzata dell'aria.

La lunghezza massima dei cavi delle sonde TDR è stata di circa 12 m, al fine di limitare i fenomeni dissipativi dei segnali.

I cavi di collegamento tra il box stagno e la cabina per la trasmissione dati e per le alimentazioni elettriche sono stati interrati ad una profondità tale da non interferire durante le normali pratiche agronomiche. Infine, un sistema di timer nel box e nella cabina ha evitato la presenza della tensione di 220V (necessaria per la ricarica delle batterie del TDR) durante le fasi di acquisizione, escludendo così eventuali fenomeni di interferenza.

Nei siti sperimentali di Ghisalba 1, Pietole 2 e Landriano 2 la strumentazione adottata è stata assemblata in un unico box posto in campo ed alimentato da una batteria ricaricata da un pannello solare. L'acquisizione e la registrazione dei dati è stata affidata ad un unico datalogger sia per i dati TDR che per le misure dei trasduttori di pressione.

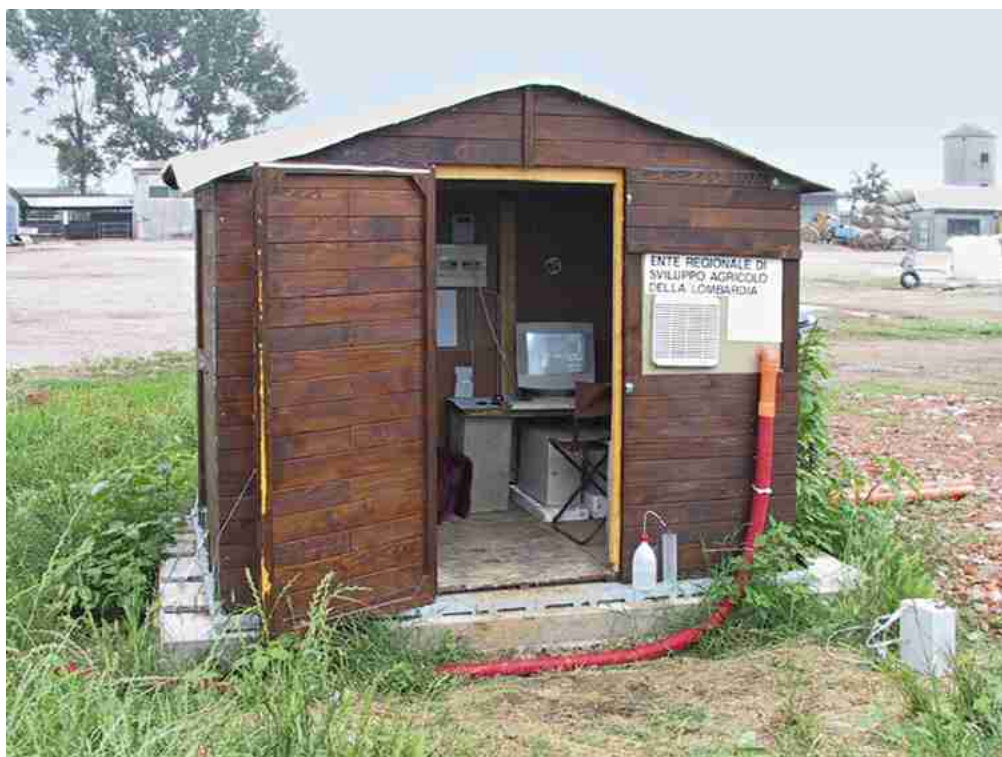


Figura 3.1 Esempio di sistema di campo di una stazione di monitoraggio



Figura 3.2
installazione delle sonde TDR



Figura 3.3
installazione dei tensiometri

Per i siti in cui non è stata realizzata una stazione di acquisizione automatica la lettura dei segnali TDR è stata eseguita manualmente tramite un computer portatile ed un riflettometro corredato di batteria.

Per il campionamento delle soluzioni del suolo sono state adoperate coppe porose del diametro di 31 mm e pressione di entrata dell'aria pari a 1,5 bar poste all'estremità di tubi in pvc di lunghezza variabile in dipendenza della profondità da analizzare.

Per tutti i siti indagati l'allestimento in campo delle stazioni di misura si è svolto in varie fasi. Un primo intervento è consistito nella messa in posto delle sonde TDR nei vari orizzonti pedologici posti al di sotto delle profondità tipiche di lavorazione (Figura 3.2).

Le buche sono state poi richiuse, si è atteso che venissero svolte dai vari conduttori le dovute pratiche agricole, così da non intralciare in alcun modo la normale gestione dei suoli e successivamente si è proceduto all'installazione dei tensiometri (Figura 3.3), delle coppe porose e delle sonde di temperatura e TDR superficiali.



3.2 Acquisizione dati e post elaborazione

Successivamente alla fase di assemblaggio ed installazione delle stazioni è stata avviata la fase di acquisizione dei dati e di prelievo dei campioni di soluzione del suolo. Sono inoltre state reperite, durante tutto il periodo di sperimentazione, tutte le informazioni legate alla gestione agronomica (semina, raccolta, trattamenti, irrigazioni, lavorazioni, spandimento di concime minerale e/o organico, ecc.) assieme al campionamento delle acque irrigue, dei concimi e delle biomasse.

La frequenza di acquisizione delle stazioni automatizzate per i siti principali è stata di 4 ore (6 dati/giorno) per i segnali TDR e di 2 ore (12 dati/giorno) per i potenziali dell'acqua e per le temperature. La struttura dei files registrati, in particolare per i dati TDR, è stata leggermente differente tra il sistema acquisito tramite PC o tramite datalogger. In entrambi i casi comunque, sono presenti la data e l'ora dell'acquisizione, il numero della sonda con i relativi parametri e la forma dell'onda attraverso 256 punti campionati a partire dalla fine del cavo di ogni sonda.

Per l'analisi dei dati di contenuto d'acqua è stato messo a punto nell'ambito di questo progetto un software specifico (WACO) la cui peculiarità, rispetto ad analoghi software presenti nella comunità tecnico-scientifica, risiede, principalmente, nella versatilità di analisi delle onde sia in automatico, con diverse opzioni, che manualmente, direttamente a video attraverso tools specifici (Figura 3.4).

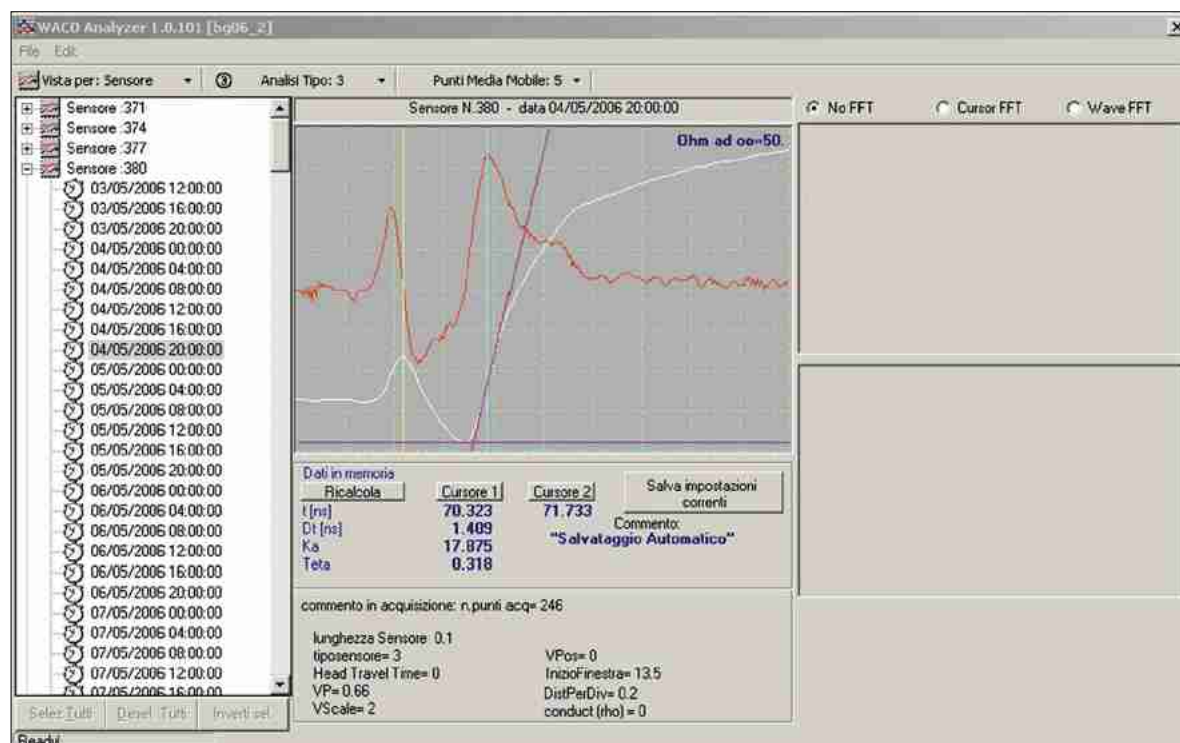


Figura 3.4 Software di analisi dei dati TDR

Con tale software i dati acquisiti, indipendentemente dal sistema di acquisizione adoperato, vengono importati e sono automaticamente organizzati per sensore o per data di acquisizione. Sono state implementate 6 combinazioni diverse delle tecniche di analisi accreditate in letteratura (Robinson et al., 2003).

Tutte le informazioni compreso il tipo di analisi, il sensore e la data sono salvate in un database in ACCESS da cui sono facilmente esportate come file testo.

I dati provenienti dai trasduttori sono stati salvati dal software di gestione dei datalogger in files di testo.

I valori misurati, corrispondenti ai mV in uscita dai trasduttori, sono stati importati in fogli di calcolo e trasformati in valori di tensione applicando le equazioni delle rette di calibrazione corrispondenti.

Di seguito sono mostrati alcuni esempi dei dati giornalieri di contenuto d'acqua (Figura 3.5), potenziale (Figura 3.6), temperatura del suolo (Figura 3.7) rilevati nel corso delle campagne di misura nel sito sperimentale di Caviaga.

Per il campionamento dei soluti, una volta installate, le coppe porose sono state ciclicamente messe in depressione al fine di raccogliere la soluzione del suolo. La cadenza dei campionamenti è stata di 7÷21 giorni, con un intervallo tra l'imposizione della depressione e la raccolta della soluzione di circa 2 giorni. Nei casi in cui non si riusciva ad estrarre la soluzione del suolo sono stati effettuati campionamenti di suolo con trivelle manuali.

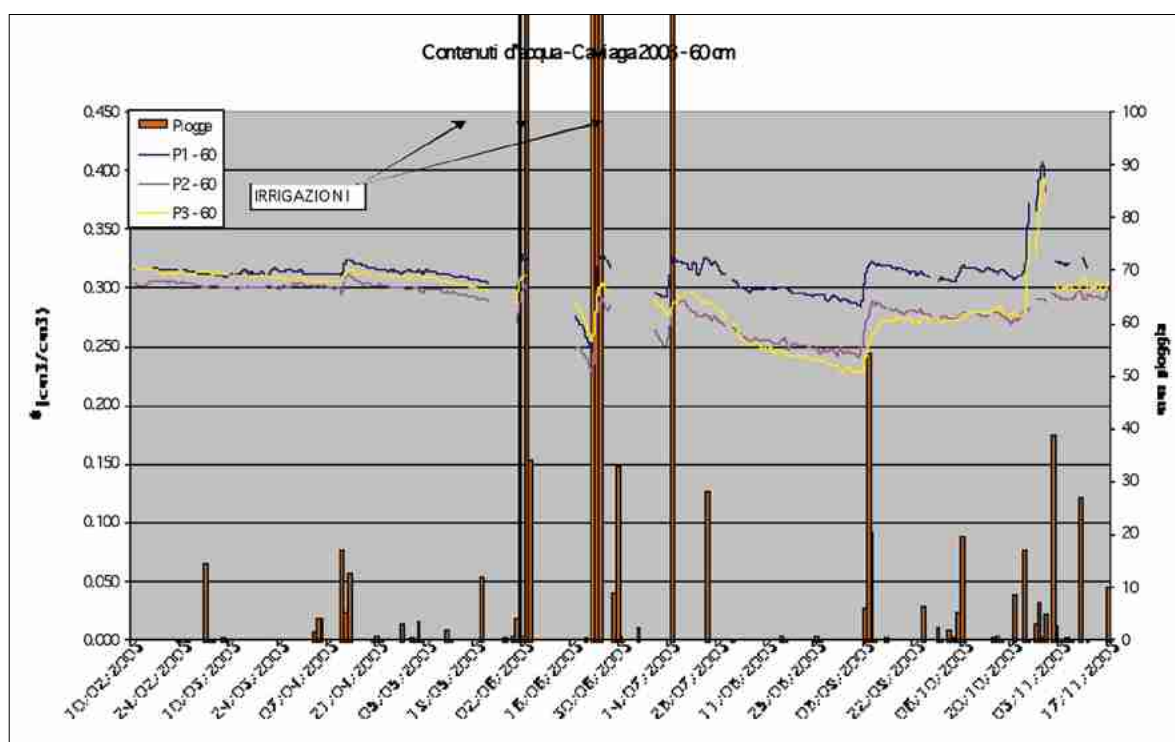


Figura 3.5 Esempio di dati tdr campionati

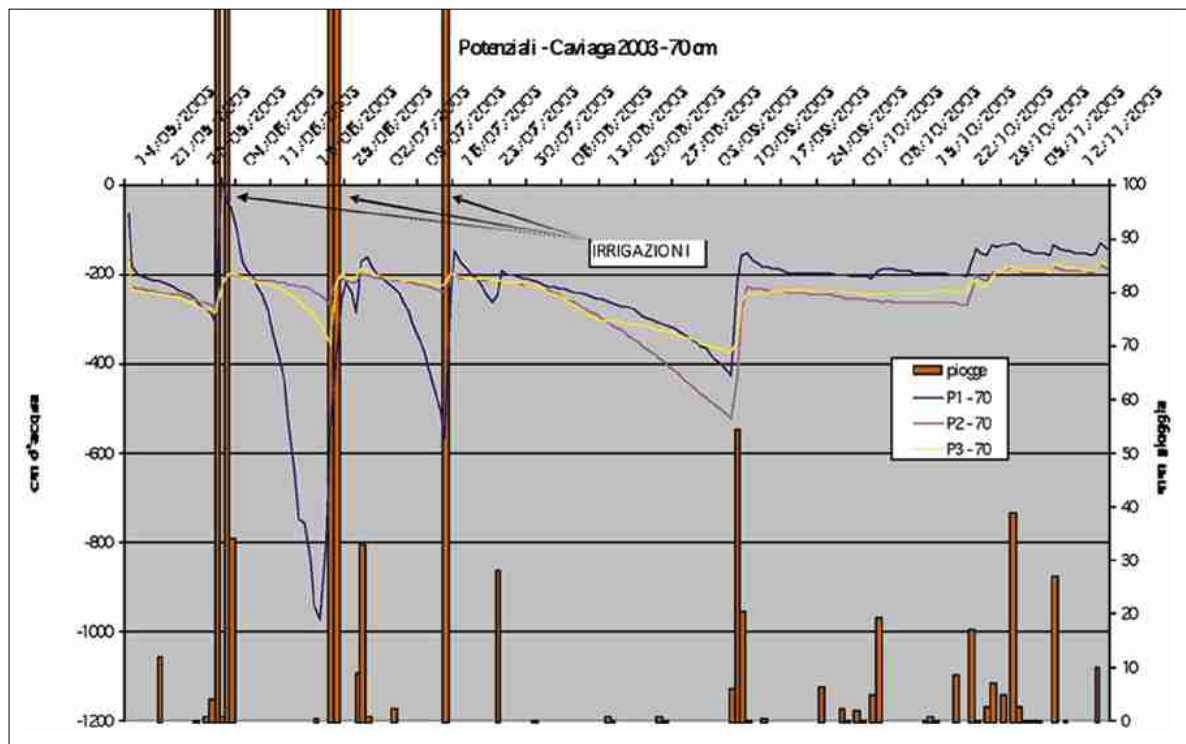


Figura 3.6 Esempio di dati di potenziale campionati

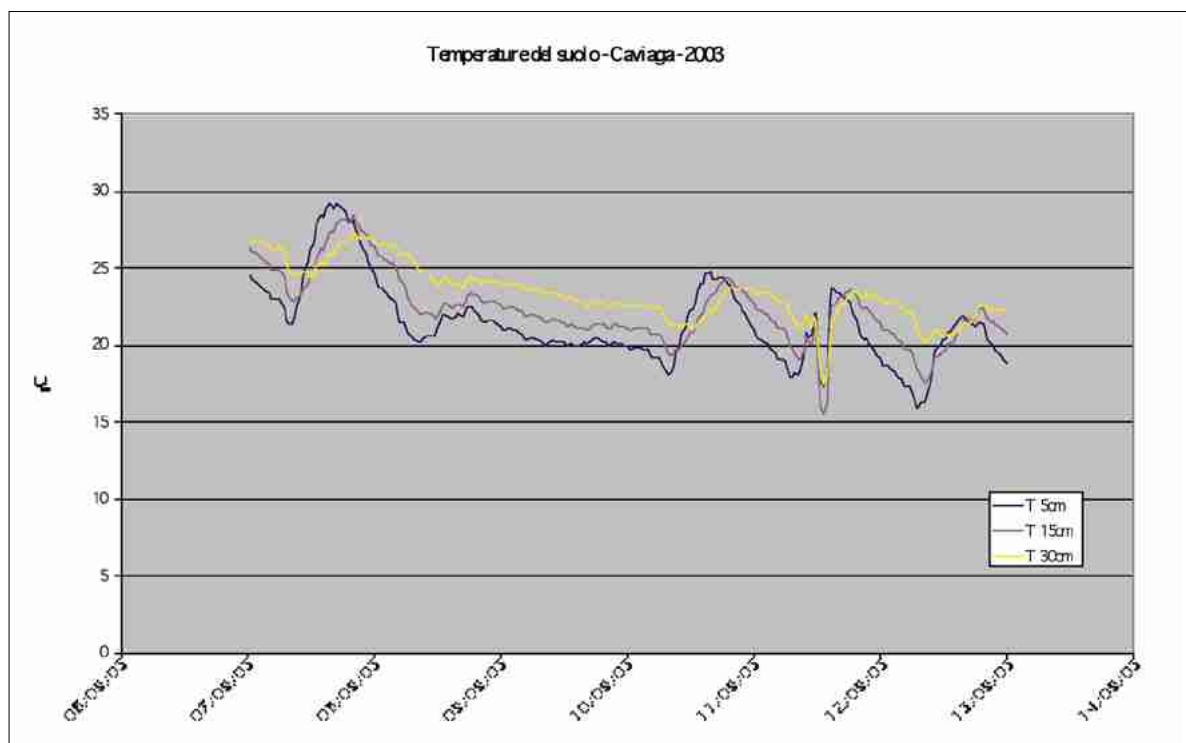


Figura 3.7 Esempio di dati di temperatura del suolo

3.3 Analisi di laboratorio

Le analisi chimico fisiche riguardanti i campioni di suolo e di acqua sono state effettuate presso il laboratorio di ERSAF sede operativa di Mantova.

In tutti i siti di monitoraggio, con maggiore o minore intensità a seconda delle esigenze, sono state condotte attività di monitoraggio che hanno previsto il campionamento e le analisi chimiche per acque, suoli, vegetazione e fertilizzazioni con effluenti d'allevamento e fanghi.

Per quanto riguarda le acque (campioni di soluzione del suolo, acque irrigue, acque meteoriche) sono stati analizzati i contenuti di azoto nitrico e ammoniacale e la conducibilità elettrica. Per i campioni di suolo sono stati determinati i contenuti di azoto nitrico e ammoniacale, l'umidità del campione, l'azoto totale e la sostanza organica. Per la caratterizzazione degli effluenti d'allevamento sono state eseguite le seguenti analisi: sostanza secca, sostanza organica, azoto totale e ammoniacale, contenuto in fosforo, pH, sostanza volatile, rapporto NH_4/NTK e rapporto solidi volatili/sostanza secca.

I fanghi sono stati analizzati per i seguenti parametri: azoto totale, carbonio organico, rapporto ceneri/solidi volatili, fosforo, potassio, sostanza secca, pH, metalli pesanti (rame, piombo, nichel, mercurio, cadmio, zinco), rapporto SVSS e rapporto C/N.

N. di campioni prelevati	Soluzione del suolo	Acque irrigue	Acque meteoriche	Suolo	Fanghi / effluenti
Siti di Caviaga	1250	23	20	435	6
Siti di Ghisalba	410	1	n. r.	148	2
Siti di Carpaneta	86	86	n. r.	n. r.	n. r.
Siti di Landriano	318	n. r.	19	284	n. r.
Siti di Luignano	105	n. r.	15	125	n. r.
Siti di Pietole	912	4	9	567	8
Totali parziali	3081	114	63	1559	16
Totale generale	4833				

3.4 Biomassa, produzioni e indice di area fogliare

La biomassa totale è stata rilevata, per il mais, attraverso la pesata in campo di spezzoni di 5 m di lunghezza prelevati da 3 diverse file di mais. Dalla massa raccolta venivano prelevate 4 piante, rapidamente trinciate e insacchettate per la determinazione della sostanza secca, separatamente per spiga e stocco.

Venivano inoltre sgranate 10 spighe, e, dopo essiccazione, determinata la produzione granellare e l'harvest index.

L'indice di area fogliare veniva determinato su 3 gruppi di 3 piante adiacenti, misurando le dimensioni di tutte le foglie e applicando le equazioni di Pellerin et al. (2000) per la stima della superficie fogliare.

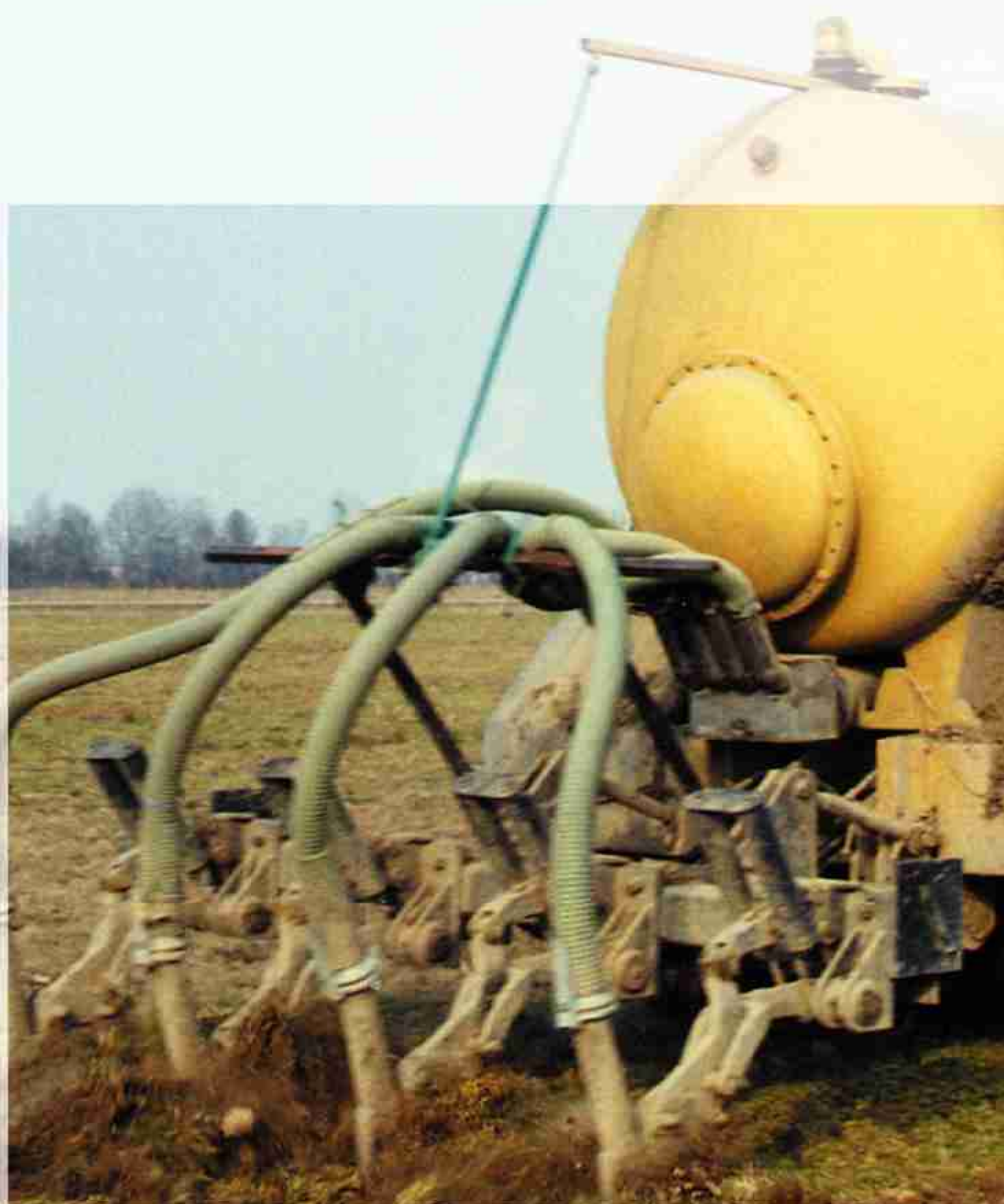
3.5 Le stazioni meteorologiche

Il monitoraggio delle variabili agrometeorologiche si è basato su una rete di stazioni meteorologiche localizzate nelle immediate vicinanze dei siti (la distanza massima è di 10 km, anche se per alcuni siti è stato possibile disporre della stazione entro i 500 m).

Le stazioni sono tutte di tipo automatico e consentono il monitoraggio di precipitazioni, temperature minime e massime dell'aria e del suolo (a diverse profondità), radiazione solare minima e massima, umidità relativa minima e massima e velocità e direzione del vento.

In alcuni siti sono stati inoltre installati dei pluviometri manuali che hanno consentito di ottenere dati sito specifici, utili per sopperire ad eventuali malfunzionamenti delle stazioni di riferimento; l'acqua dei pluviometri è stata inoltre campionata per la misura dei contenuti di azoto da considerarsi quale apporto atmosferico.





4

Il modello di simulazione ARMOSA

4.1 Introduzione

La necessità di prevedere la presenza di azoto nelle acque comporta, innanzitutto, la comprensione della dinamica della molecola all'interno dei vari comparti ambientali e del tipo di forma molecolare coinvolta, e quindi l'analisi del ciclo biogeochimico dell'azoto.

Per ottenere un'adeguata stima del bilancio dell'azoto nel sistema suolo agricolo è in primo luogo necessario conoscere e comprendere il bilancio e le dinamiche dell'acqua, essendo quest'ultima il principale vettore dei nitrati verso le acque sotterranee. Inoltre la corretta stima dei contenuti idrici nel suolo è anche elemento essenziale per una accurata valutazione della produzione agraria, fattore determinate nell'ambito di un'analisi della reale sostenibilità del sistema agricolo. Le difficoltà legate alla stima dei movimenti dell'acqua nel suolo sono legate alla complessità ed all'interazione dei processi coinvolti (fisici, chimici e biologici) che avvengono a scale spaziali e temporali differenti.

Per descrivere le dinamiche dell'acqua nel suolo spesso vengono utilizzate equazioni differenziali di notevole complessità, inevitabile perché propedeutica alla corretta descrizione dei flussi idrici e dei soluti, per la cui risoluzione diventa quindi fondamentale l'utilizzo dei modelli matematici di simulazione (Wagehenkel e Mirschel, 2005). Parimenti le dinamiche dell'azoto devono essere comprese a livello di dettaglio per la messa a punto di interventi accurati di protezione ambientale e in particolare delle acque sotterranee, dato che solo interventi fortemente "site-specific", frutto dell'analisi della complessa interazione tra suolo, clima e sistema colturale, possono conciliare la compatibilità ambientale con la redditività dell'attività agricola.

La complessità del sistema descritto ben evidenzia quindi l'opportunità di adottare strumenti di tipo modellistico, purché solidamente fondati e verificati su dati sperimentali reali di alta qualità e affidabilità (Acutis et al., 2000); approccio che ben sintetizza la metodologia che si ritrova nel progetto **ARMOSA**: reperire dati di estrema qualità e variabilità (temporale, spaziale e riferiti a tipologie pedologiche e ambientali differenti) al fine di ottimizzare e verificare strumenti necessari alla modellizzazione di un sistema estremamente complesso quale è il ciclo dell'azoto nel suolo ed i suoi movimenti verso le acque sotterranee. Riconoscendo quindi i modelli di simulazione della dinamica dell'azoto nel suolo come un valido strumento nello studio dei rilasci in falda di nitrati lisciviati dai suoli agricoli, resta comunque importante individuare quelli che maggiormente si adattano alle condizioni locali lombarde.

Esistono infatti numerosi modelli che simulano, con maggior o minor livello di dettaglio, i processi propri dell'azoto. Con l'intento di simulare la dinamica dell'azoto (e quindi dell'acqua) e di mettere a punto un sistema di valutazione con capacità predittive adeguate ed affidabili, si è deciso di testare diversi modelli di simulazione, già disponibili "sul mercato", in grado di rappresentare con elevato grado di dettaglio tutti i processi coinvolti, pur bilanciando le richieste di input (in riferimento a diverse tipologie di dati) con le reali disponibilità fornite dai database regionali. E' anche vero che la scelta di includere tutti quegli elementi del sistema colturale che sono influenti sulla dinamica dell'azoto e di descriverli in modo sufficientemente accurato, pur evitando un dettaglio spinto sui singoli processi, richiederà in future applicazioni a scala regionale, opportune integrazioni delle banche dati della Regione Lombardia (Meteo, pedologica, uso del suolo, qualità delle acque, ecc.) con specifiche misure sito specifiche quali, ad esempio, andamento dell'azoto minerale nel tempo, parametri idrologici del suolo di dettaglio, misure delle produzioni, che potrebbero in prospettiva entrare a far parte di un programma di monitoraggio permanente.

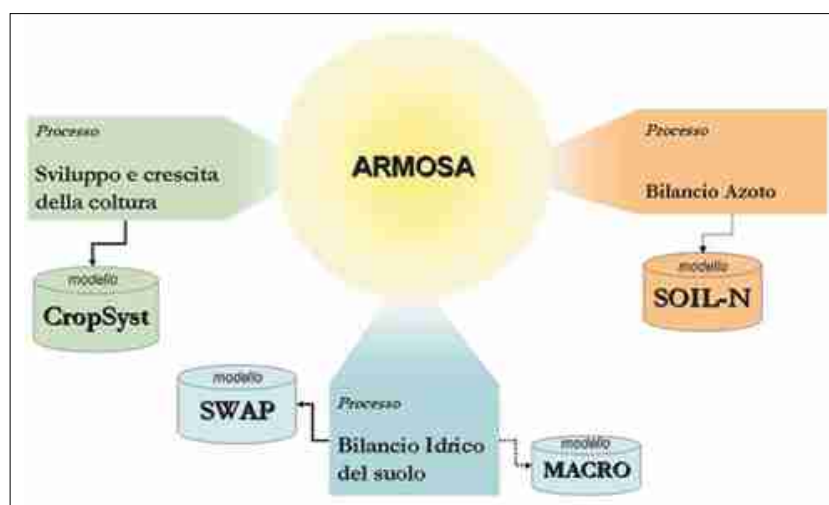


Figura 4.1 Schema generale del modello ARMOSA

Il modello **ARMOSA** (Figura 4.1) è stato sviluppato implementando algoritmi di distinti modelli matematici di simulazione, ognuno dei quali è caratterizzato da una propria specificità nella rappresentazione di diversi ambiti legati al sistema suolo-cultura. Sono stati valutati diversi approcci modellistici per la simulazione della crescita e dello sviluppo della coltura, del bilancio dell'acqua e dell'azoto nel suolo. Tra i diversi modelli di simulazione esaminati, nessuno è risultato completamente soddisfacente nella simulazione della dinamica dell'acqua, della crescita delle colture e della dinamica dell'azoto.

Si è proceduto quindi alla valutazione dei diversi algoritmi presenti nei modelli e, per ogni processo, sono stati scelti e implementati nel modello **ARMOSA** quelli più confacenti agli scopi della sperimentazione e maggiormente confermati dai dati del monitoraggio.

Per quanto riguarda la simulazione dello sviluppo e della crescita colturale si è scelto di utilizzare gli algoritmi di CropSyst (Stöckle et al., 2003). CropSyst è un modello di simulazione dei sistemi colturali multi-annuale, multi-culturale, con un intervallo di integrazione della simulazione giornaliero, sviluppato come strumento analitico per studiare l'effetto di clima, suoli e gestione sulla produttività dei sistemi colturali e sull'ambiente. CropSyst simula la fenologia della coltura, la crescita della copertura vegetale e delle radici, la produzione di biomassa e la produzione granellare e l'assorbimento di azoto da parte delle colture.

Per la simulazione del bilancio idrico del suolo si è scelto di implementare il modello SWAP (van Dam et al., 1997) in quanto per la stima dei movimenti dell'acqua nel suolo adotta l'equazione differenziale di Richards risolta utilizzando un metodo numerico particolarmente accurato. Inoltre per la simulazione del bilancio dell'acqua si è scelto di poter utilizzare in alternativa anche il modello MACRO (Jarvis et al., 1994) in grado di considerare l'influenza della macroporosità nel determinare l'entità effettiva del flusso idrico e del trasporto di soluti ed inquinanti nel suolo. I macropori, infatti, possono diventare una via preferenziale per i movimenti dell'acqua all'interno del terreno e possono assumere particolare importanza nei suoli con caratteri vertici.

SOILN (Eckersten et al., 1996; Larsson et al., 1999) è stato scelto come modello di riferimento per la simulazione del bilancio dell'azoto nel suolo in quanto ha fornito qualità di simulazione di buon livello, unitamente a una ragionevole richiesta di input. Inoltre l'implementazione del ciclo dell'azoto usata da SOILN è utilizzata anche in altri modelli quali LeachN e Wave, rendendolo uno dei modelli più usati e con maggiore disponibilità di tecniche per stimare i parametri specifici di input richiesti. SOILN è anche l'unico modello che ha opzionalmente un approccio differenziato per micro e macropori, e che non richiede quindi adattamenti specifici nel caso di interfaccia con il modello MACRO.

Di seguito vengono presentati i risultati del monitoraggio delle dinamiche di acqua e azoto nel suolo e i confronti con i risultati delle simulazioni modellistiche per 2 dei 10 siti attivati in **ARMOSA**, per i quali sono disponibili serie di dati estese e su cui si è fortemente focalizzata la fase di test e calibrazione dei modelli matematici stessi. Si è inoltre cercato di dare maggiore spazio ai risultati relativi alle dinamiche dell'azoto essendo quest'ultimo l'elemento di maggiore interesse ai fini applicativi e gestionali e soprattutto, perché, come peraltro già detto, la corretta simulazione dell'acqua deve essere considerata quale elemento essenziale e propedeutico alla corretta stima e modellizzazione dell'azoto e del suo ciclo.

Come si potrà osservare dai dati presentati nei paragrafi successivi, le acquisizioni sperimentali molto circostanziate a livello di caratteristiche dei suoli, di dinamica dell'acqua e dell'azoto e di crescita delle colture condotte in diverse località, hanno consentito di raggiungere delle valutazioni oggettive sui diversi modelli di simulazione, e di ottenere un nuovo modello (o sistema modellistico) che nel complesso fornisce prestazioni superiori ai modelli di partenza, e richiede

calibrazioni ridotte, per grandi categorie pedo-climatiche, mentre per le colture si avvale della notevole esperienza già acquisita in Regione con l'uso del modello CropSyst. Bisogna comunque evidenziare la notevole gamma di valori di lisciviazione dei nitrati misurata, che dipende da molti fattori interagenti, come suolo e andamento climatico, ma che è anche fortemente condizionata dalla gestione agronomica degli appezzamenti. Infatti il risultato finale, sia di resa produttiva, sia di impatto ambientale, si origina dall'interazione con il pedoclima delle scelte agronomiche quali tipo di coltura e rotazione adottata, gestione dell'irrigazione e della fertilizzazione.

Si può quindi affermare che il progetto, oltre a dati sperimentali e modellistici di sicuro interesse, ha consentito di mettere a punto uno strumento (il modello **ARMOSA**) che, almeno per l'areale Lombardo, offre prestazioni migliorative per l'analisi dei sistemi colturali e per la stima dei nitrati persi per lisciviazione rispetto a strumenti già esistenti. Tale strumento potrà quindi essere utilizzato per valutazioni a scala territoriale, per confronti e analisi di itinerari tecnici alternativi ed in generale a supporto della corretta e migliore gestione dell'azoto in agricoltura.

4.2 Dinamiche e modellistica dell'acqua

4.2.1 Principi generali

Gli approcci più ampiamente adottati per la modellizzazione del moto dell'acqua nel suolo sono basati sull'equazione di Richards che, per moto unidimensionale verticale e in mezzo poroso supposto isotropo assume la seguente forma facendo riferimento al potenziale di pressione dell'acqua h come variabile dipendente:

$$C(h) \frac{(\partial h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} - k(h) \right] - S$$

in cui t è il tempo e z la coordinata verticale. La soluzione di tale equazione richiede la conoscenza della funzione $C(h)$ (la derivata prima della curva di ritenzione idrica $\theta(h)$) e della funzione di conducibilità idraulica $k(h)$. Il termine S che tiene conto dei fenomeni legati all'attingimento idrico radicale è la portata idrica estratta per unità di volume di suolo. Precisate le condizioni iniziali e quelle al contorno del campo di moto è possibile procedere alla integrazione dell'equazione di Richards una volta note le proprietà idrauliche degli orizzonti del suolo.

La non linearità dell'equazione, dovuta alla forte dipendenza di k ed h da θ , rende di fatto impraticabile il ricorso a soluzioni analitiche mentre sono oramai ampiamente diffuse soluzioni numeriche di integrazione alle differenze finite o agli elementi finiti.

Tali soluzioni numeriche sono rese più agevoli se le proprietà idrauliche sono rappresentate attraverso espressioni analitiche in cui compaiono alcuni parametri da definire con riferimento ad ognuno degli orizzonti di suolo oggetto del campo di moto.

4.2.2 Modelli idrologici valutati

Nell'ambito del lavoro proposto sono stati utilizzati tre modelli di simulazione: SWAP 2.07, CropSyst e MACRO 5.0. Tali modelli presentano una differente complessità di descrizione del sistema suolo-pianta-atmosfera e di seguito ne vengono riportate le differenze salienti:

Proprietà idrauliche

Il modello SWAP (van Dam et al., 1997) ver. 2.07 e il modello MACRO (Larsbo e Jarvis, 1993) ver. 5.0 utilizzano per la ritenzione idrica l'espressione empirica a più parametri proposta da van Genuchten (1980):

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_r + (\theta_o - \theta_r) [1 + |\alpha h|^n]^{-m} & h < 0 \\ \theta &= \theta_o & h \geq 0\end{aligned}$$

in cui α (cm^{-1}), n e m sono parametri di adattamento del modello ai dati sperimentali. In particolare, α^{-1} (cm) corrisponde approssimativamente al potenziale di entrata dell'aria per bassi valori del rapporto m/n , mentre per i valori alti di m/n esso è approssimativamente uguale al potenziale nel punto di flesso della curva; il parametro m viene spesso posto uguale a $1-1/n$ il quale determina la pendenza della curva; θ_o e θ_r rappresentano rispettivamente il contenuto d'acqua alla saturazione e quello residuo e possono essere fissati o trattati anch'essi come parametri di adattamento da ottimizzare.

Formalmente, θ_r può essere definito come il contenuto d'acqua a cui sia $d\theta/dh$ che k tendono a zero per valori di h tendenti all'infinito. Si tratta di un valore estrapolato e quindi non necessariamente rappresentativo dell'effettivo minor contenuto d'acqua possibile. θ_o rappresenta invece il massimo contenuto d'acqua ed il suo valore è generalmente leggermente diverso dal valore alla saturazione. La funzione di conducibilità idraulica $k(S_e)$, con $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_o - \theta_r)$, è descritta con il modello probabilistico di Mualem (1976) basato sulla distribuzione dei diametri equivalenti dei pori. Utilizzando l'eq. di van Genuchten e ponendo $m = 1 - 1/n$, si ottiene:

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

dove k_r è la conducibilità idraulica relativa, k_0 è un fattore di scalatura, generalmente posto pari alla conducibilità idraulica alla saturazione o a un suo valore prossimale e τ è un parametro empirico funzione principalmente della tortuosità del sistema poroso.

Il modello MACRO si caratterizza per la possibilità di simulare, in maniera molto semplice, i flussi preferenziali che avvengono nei macropori.

MACRO suddivide la porosità totale del suolo in due diversi domini interagenti fra loro, microporosità e macroporosità e assume il flusso nei macropori guidato dal solo potenziale gravitazionale.

La conducibilità idraulica nel dominio dei macropori k_{ma} è espressa attraverso la semplice funzione di potenza proposta da Beven e Germann (1981):

$$k_{ma} = (k_{st} - k_{smi}) S_{ma}^{n^*}$$

dove k_{st} e k_{smi} rappresentano rispettivamente la conducibilità idraulica alla saturazione totale dei micropori. S_{ma} è il grado di saturazione nel dominio dei macropori e l'esponente n^* è legato alla distribuzione dimensionale, alla tortuosità ed alla continuità dei pori.

Nel modello CropSyst il moto dell'acqua può essere descritto attraverso (i) la soluzione dell'equazione di Richards e (ii) un modello a cascata. Nel primo caso il modello utilizza per la funzione di ritenzione idrica il modello di Campbell (1985):

$$h = h_b \cdot (\theta / \theta_s)^{-\lambda}$$

dove h_b è il potenziale di entrata dell'aria, θ_s è il contenuto d'acqua alla saturazione e λ è una grandezza caratteristica del mezzo legata alla distribuzione dei pori nel campione di suolo e determina la pendenza della curva. Generalmente i valori di λ sono maggiori per suoli con distribuzione dimensionale dei pori uniforme, mentre in suoli con pori di dimensioni molto variabili i valori sono più bassi. La funzione di conducibilità idraulica è espressa sempre attraverso la seguente relazione (Campbell, 1985):

$$k(h) = k_0 \left(\frac{h_b}{h} \right)^{2+3/\lambda}$$

in cui compare, oltre ai parametri h_b e λ della curva di ritenzione, anche k_0 che analogamente al modello di Mualem è un fattore di scalatura, generalmente posto pari alla conducibilità idraulica alla saturazione.

Nel secondo caso il modello CropSyst utilizza il modello "a cascata" detto anche "a serbatoio" che rappresenta un approccio più semplice e in alcuni casi efficace per simulare la redistribuzione dell'acqua nel profilo. Tale approccio si basa sul principio di una infiltrazione simulata dove ogni strato del suolo raggiunge la capacità idrica di campo (CC) prima che l'acqua muova a quello successivo. La quantità di acqua che muove da un orizzonte i -esimo all'altro (W_{out}) è data da:

$$W_{out}(i) = W_{in}(i) - LTH_i [CC(i) - CAI(i)]$$

dove W_{out} è l'acqua che lascia l'orizzonte i -esimo (cm), W_{in} è l'acqua che raggiunge la sommità dell'orizzonte i -esimo (cm), LTH_i è lo spessore dell'orizzonte (cm), CC è la capacità idrica di campo ($cm^3 cm^{-3}$) e CAI è il contenuto d'acqua iniziale ($cm^3 cm^{-3}$). Il quantitativo d'acqua W_{out} che lascia lo strato del suolo i -esimo è quella in entrata, W_{in} , dello strato successivo $i+1$.

Attingimento radicale e traspirazione

In tutti e tre i modelli il processo di attingimento e quindi traspirazione avviene solo nei compartimenti con la presenza di radici.

Nel modello SWAP l'estrazione radicale potenziale massima (S_p), integrata per la profondità radicale, è posta uguale alla traspirazione potenziale T_p , governata dalle condizioni meteo. L'attingimento idrico radicale ad una determinata profondità (z) viene calcolato da parametri di densità e geometria radicale fissati per ogni profondità (L_{root}) (van Dam et al., 1997):

$$S_p(z) = \frac{I_{root}(z)}{\int_{-D_{root}}^0 I_{root}(z) dz} \cdot T_p$$

dove D_{root} è lo spessore dello strato di radici. Lo stress idrico è gestito attraverso la funzione empirica proposta da Feddes et al., (1978) come fattore di riduzione della traspirazione potenziale S_p .

$$S(z) = \alpha(h) S_p(z)$$

Dove $\alpha(h)$, specifica per ogni coltura, varia da 0 a 1 ed è funzione del potenziale dell'acqua nel suolo. L'integrazione della $S(z)$ lungo la profondità radicale determina la traspirazione reale. CropSyst definisce la traspirazione della coltura tenendo conto del potenziale fogliare:

$$WU_i = K \cdot C_i / 1.5 \cdot (\psi_{s_i} - \psi_l)$$

dove WU_i è l'attingimento idrico radicale nel comparto i-esimo, ψ_{s_i} è il potenziale dell'acqua nel suolo nel comparto i-esimo, ψ_l è il potenziale fogliare, C_i la conduttanza radicale nel comparto i-esimo di suolo e K il passo temporale espresso in secondi. Per ottenere la traspirazione totale si sommano le traspirazioni relative realizzate di tutti i comparti del suolo (n).

$$WU = \sum_{i=1}^n WU_i$$

La densità radicale è assunta decrescere linearmente con la profondità. E' da rimarcare che il modello CropSyst simula la crescita dell'apparato radicale in accordo con la crescita della coltura.

Nel modello MACRO l'evapotraspirazione potenziale giornaliera E_p , una delle variabili guida del modello, viene suddivisa nelle sue due componenti $E_{p(soil)}$ e $E_{p,v}$, l'evaporazione potenziale dal suolo e la traspirazione potenziale dalla copertura vegetale. Il prelievo da parte dell'apparato radicale è calcolato a partire dalla domanda evaporativa, dalla distribuzione delle radici, e dal contenuto idrico del suolo usando una funzione empirica descritta da Jarvis (1989).

Si assume che il rapporto tra il prelievo potenziale e attuale da parte dell'apparato radicale (E_a/E_p), vari in funzione di un indice di stress idrico, con andamento lineare crescente fino al valore unitario in corrispondenza di uno specifico valore di stress idrico ω^* (fattore di adattabilità radicale).

Condizioni al contorno del campo di moto

Le condizioni al contorno superiore del campo di moto nei tre modelli necessitano ovviamente delle informazioni sugli apporti idrici, per pioggia o irrigazioni, e sull'evapotraspirazione potenziale giornaliera. Quest'ultima è calcolata dall'evapotraspirazione di riferimento, stimata a sua volta da dati meteo standard applicando a seconda dei dati e degli ambienti i modelli più idonei (Penman-Monteith, Priestly-Taylor, Hargraves, ecc.), e dallo specifico coefficiente per la coltura in atto (K_c).

Di particolare interesse nel modello MACRO è la gestione della ripartizione, fra i due differenti domini di pori, degli apporti idrici che giungono alla superficie del suolo: l'acqua entrerà nei macropori aperti in superficie solo se l'intensità di pioggia sarà superiore alla conducibilità satura dei micropori e il potenziale dell'acqua in superficie maggiore del potenziale di entrata dell'aria.

Le condizioni al contorno inferiore del campo di moto che possono essere impostate nei tre modelli sono molteplici: flusso impedito alla base del profilo per la presenza di uno strato impermeabile, definizione di gradienti idraulici, altezza della falda, drenaggio libero, ecc.

Nelle simulazioni effettuate si è fatto ricorso generalmente all'imposizione dell'altezza di falda, laddove era stata riscontrata la presenza di una falda superficiale, e in alternativa alla imposizione della condizione di drenaggio libero (o gradiente unitario), condizione spesso riscontrata in molti suoli e per processi che si evolvono alla scala di campo (Libardi et al., 1980).

4.2.3 Dinamiche dell'acqua e applicazioni modellistiche

Il progetto **ARMOSA** ha prodotto una quantità notevole di dati idrologici. In questa nota ne verranno mostrati solo alcuni rappresentativi dei principali processi avvenuti in campo. Nella Tabella 4.1 sono stati riportati due indici statistici per confrontare in modo agevole i dati simulati con quelli misurati.

L'errore quadratico medio (RMSE) calcola la bontà dell'adattamento in termini di differenze fra i valori misurati e simulati ed esprime l'errore medio assoluto commesso nella stima. Il coefficiente di correlazione (R) di Pearson calcola la correlazione fra la serie di dati simulati e misurati ed esprime come i dati simulati seguono le variazioni riscontrate nei dati misurati.

In Figura 4.2 sono riportati gli andamenti nel tempo dei contenuti d'acqua misurati e simulati con il modello SWAP per tre diversi orizzonti (Ap1, Bt1, e C) nel sito sperimentale di **Caviaga**. Il modello è stato calibrato sui dati del 2003 e validato sui dati degli anni successivi.

La dinamica dell'acqua è più spinta in superficie e si riduce man mano che ci si approfondisce nel suolo: ciò è ovviamente dovuto alla numerosità dei processi che avvengono in superficie (evaporazione, traspirazione, infiltrazione delle acque irrigue e meteoriche, redistribuzione) rispetto a quelli che avvengono nella parte basale del profilo (redistribuzione, drenaggio). Tale considerazione è generalmente valida per tutti i siti studiati.

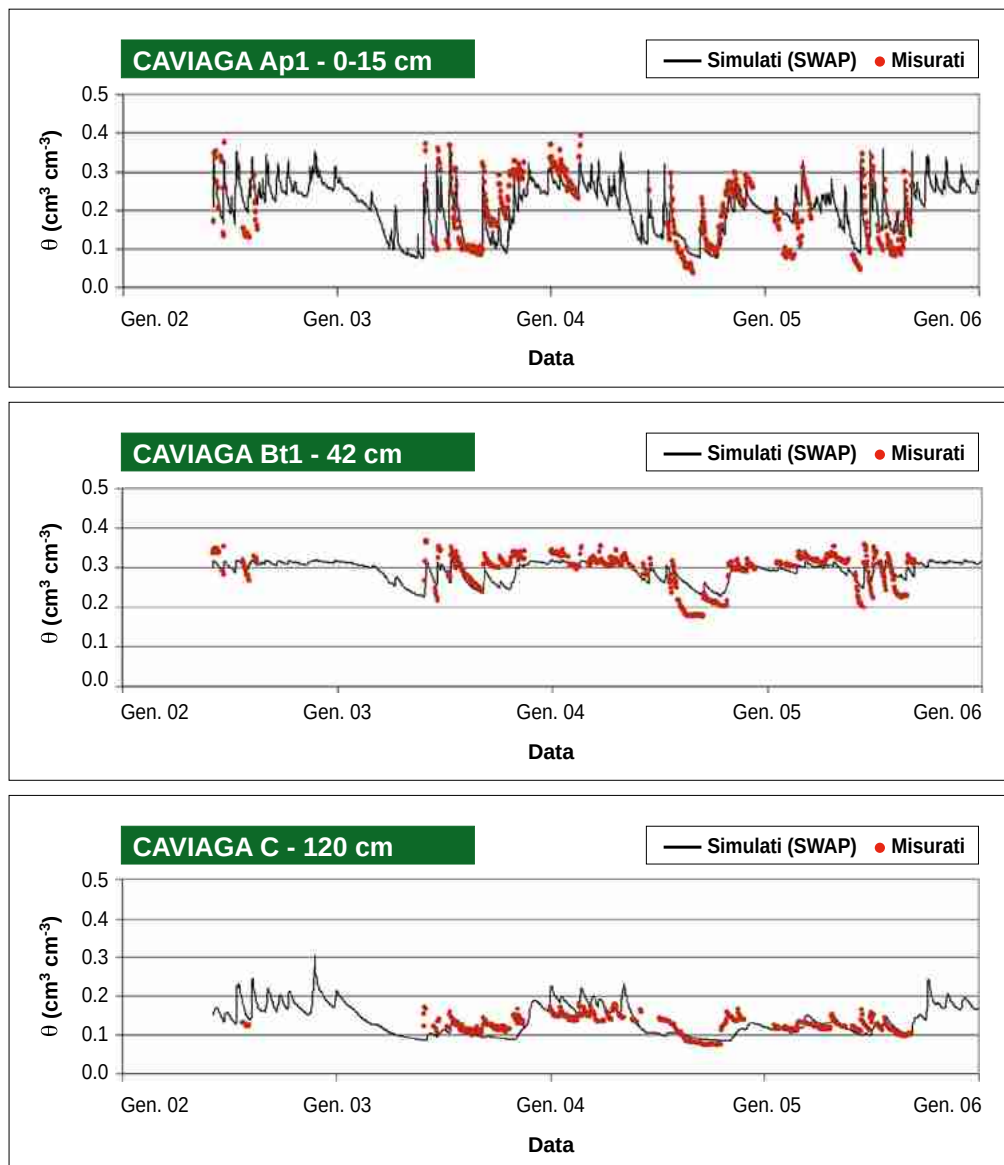


Figura 4.2 Grafici di confronto dei contenuti d'acqua simulati e misurati in alcuni siti ARMOSA

I picchi di contenuto d'acqua in superficie sono sempre in corrispondenza di eventi piovosi o di irrigazioni. Di grande qualità risultano gli adattamenti dei dati simulati a quelli misurati in particolar modo negli anni di validazione del modello.

Come rilevabile in Tabella 4.1, per il sito di **Caviaga**, il modello permette di ottenere un'ottima performance (il valore dell'errore medio relativo al contenuto idrico è di circa $0,04 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$) per tutte le profondità e per anni molto diversi da un punto di vista climatico.

Tabella 4.1 Valori degli indici statistici medi ottenuti per 2 siti ARMOSA

	RMSE				R Pearson			
	2002	2003	2004	2005	2002	2003	2004	2005
Caviaga	0.04	0.04	0.04	0.05	0.66	0.54	0.88	0.46
Pietole 1	0.03	0.03	0.03	-	0.78	0.71	0.68	-

E' importante rimarcare che performance (RMSE) di questo tipo sono citate in letteratura sempre in riferimento a periodi molto più brevi di simulazione e per pochi orizzonti. Per quanto riguarda il coefficiente R di Pearson (altro indice di valutazione delle performance dei modelli matematici) buone sono le correlazioni con risultati (eccellenti nell'anno di validazione 2004). Maggiormente scadenti sono invece risultate le performance nel 2005, anche se da una analisi dei dati misurati si può ipotizzare che il basso valore sia dovuto ad una anomalia di funzionamento del multiplexer che gestiva le sonde TDR profonde.

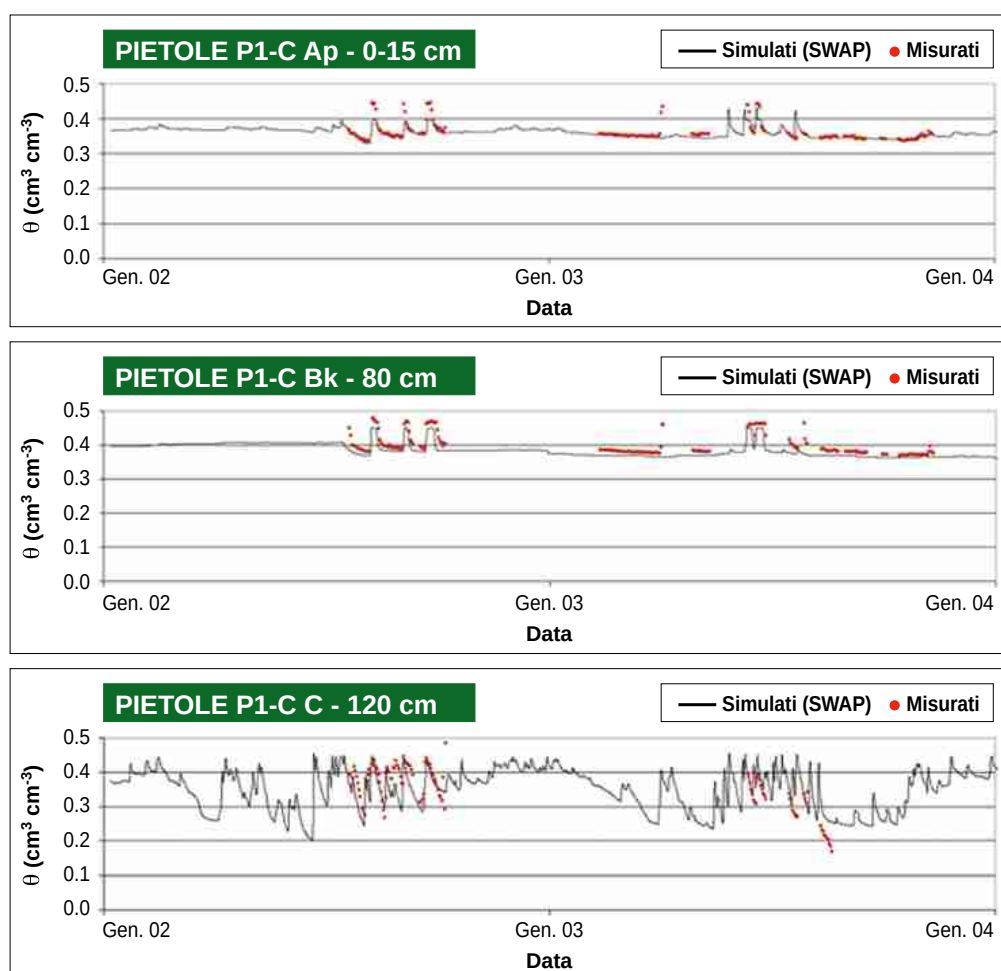


Figura 4.3 Confronto dei contenuti d'acqua simulati e misurati in alcuni siti ARMOSA

In figura 4.3 sono riportati gli andamenti nel tempo dei contenuti d'acqua misurati e simulati con il modello SWAP per tre diversi orizzonti (Ap, Bk e C) nel sito sperimentale di Pietole 1. Il modello è stato calibrato sui dati del 2002 e validato sui dati degli anni successivi.

Ovviamente, come per il sito di Caviaga la dinamica dell'acqua è più spinta in superficie, in corrispondenza di eventi piovosi o di irrigazioni, e si riduce man mano che ci si approfondisce nel suolo. Il modello segue benissimo i dati sperimentali in profondità e nell'orizzonte Bk mentre qualche imprecisione viene commessa per le misure di superficie nell'anno di validazione.

E' da rimarcare che nella gestione del sito ogni anno le sonde superficiali venivano rimosse per permettere le operazioni colturali, per cui i valori di contenuto d'acqua non forniscono esattamente una serie temporale ma inglobano anche errori legati alla variabilità spaziale.

La performance del modello risulta elevata sia nell'anno di calibrazione che in quello di validazione. Infatti, il valore dell'errore medio in contenuto d'acqua si attesta intorno a $0,02/0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ per il P1_C e $0,03/0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ negli altri profili e per tutti gli anni di misura.

Da rimarcare ancora una volta la qualità degli indici RMSE negli anni di validazione, a riprova della robustezza del modello anche in anni con caratteristiche climatiche completamente differenti. Anche i valori medi dell'R di Pearson, riportati in Tabella 4.1 e riferiti a tutte le profondità di misura e per tutti e tre i profili studiati di Pietole 1, sono elevati nell'anno 2002 ($0,76 \div 0,80$) con una leggera diminuzione negli anni successivi ($0,63 \div 0,73$).

Il confronto fra i 3 modelli utilizzati è stato condotto nei due siti di Caviaga e di Pietole 1. La calibrazione dei modelli nel sito di Caviaga è stata condotta su un set di dati indipendenti riferiti all'anno 2003 mentre nel sito di Pietole 1 sui dati del 2002.

Lo sviluppo della coltura in MACRO e SWAP è stato parametrizzato sulla base dei risultati dello sviluppo colturale ottenuto dal modello dettagliato implementato in CropSyst calibrato e validato su misure di LAI e produzione di biomassa negli anni 2002-2003.

Tutti e tre i modelli hanno utilizzato le stesse condizioni al contorno superiore ed inferiore del campo di moto. Per quanto riguarda il sito di Caviaga tutti e tre i modelli hanno fornito ottime performance medie come mostrato dagli indici RMSE riportati in Tabella 4.2.

Tabella 4-2: Valori degli indici statistici - Sito di Caviaga

Anno	Indice	SWAP	CROPSYST	MACRO
2002	RMSE	0.037	0.037	0.039
	R	0.50	0.38	0.42
2003	RMSE	0.028	0.035	0.076
	R	0.72	0.79	0.66

Tabella 4.3: Valori degli indici statistici - Sito di Pietole 1

Anno	Indice	SWAP	CROPSYST	MACRO
2002	RMSE	0.032	0.030	0.040
	R	0.74	0.79	0.60
2003	RMSE	0.016	0.020	0.022
	R	0.66	0.72	0.65
2004	RMSE	0.029	0.030	0.036
	R	0.80	0.76	0.72

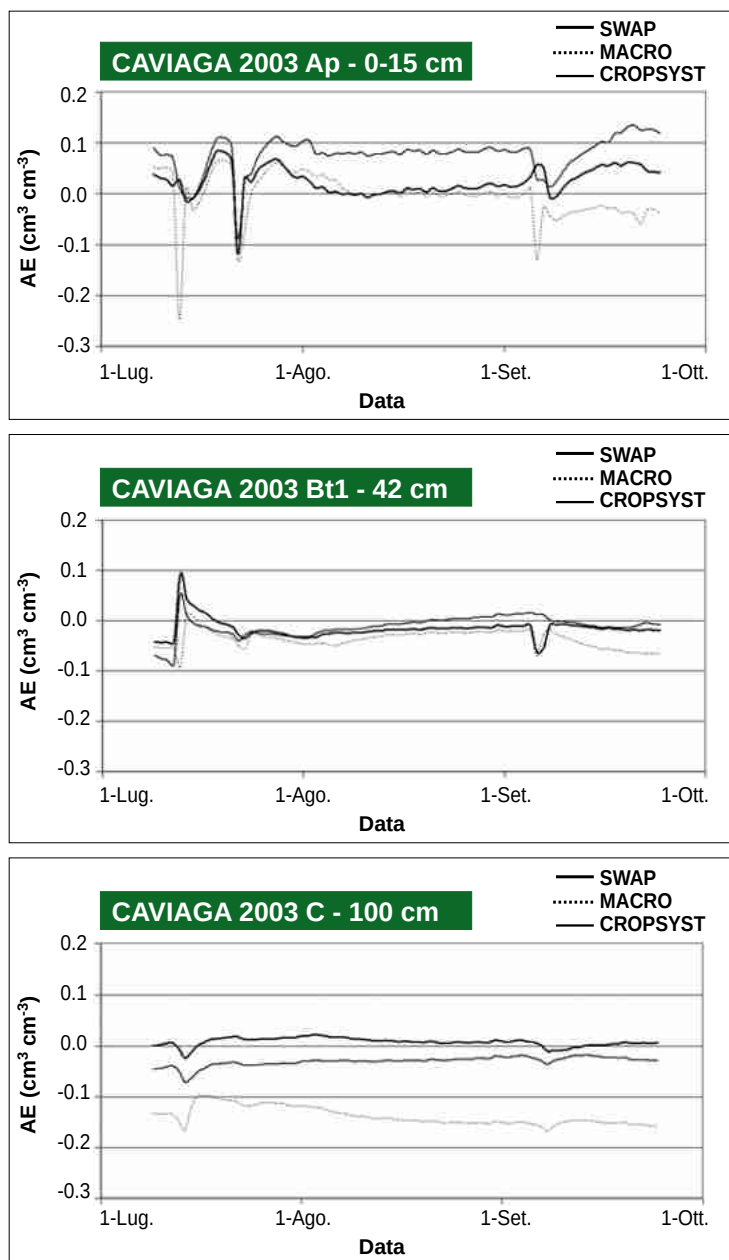


Figura 4.4 Confronto dei contenuti d'acqua simulati e misurati in alcuni siti ARMOSA

In particolare il modello SWAP, sia nell'anno di calibrazione che di validazione, mostra gli errori minori al contrario del modello MACRO che nell'anno 2003 ha mostrato errori medi pari al doppio di quelli mostrati dagli altri due modelli mentre nell'anno di validazione si è attestato sugli stessi valori. Per quanto attiene l'indice R di Pearson si nota un peggioramento nell'anno di validazione in particolare per il modello CropSyst.

Come esempio di maggior dettaglio sono riportati in Figura 4.4 gli errori assoluti AE, per tre orizzonti diversi (Ap, Bt1 e C), risultanti dal confronto fra dati di contenuto d'acqua misurati e simulati durante la stagione di crescita del mais nel 2003 nel sito sperimentale di Caviaga.

I dati di contenuto d'acqua misurati sono, per ogni profondità, le medie di tre profili di misura (A, B e C).

In superficie il modello SWAP simula i processi con minori errori, negli orizzonti intermedi i tre modelli si equivalgono mentre in profondità il modello MACRO risente della cattiva gestione delle condizioni al contorno inferiore in presenza di falda. Un andamento simile a quello del 2003 si è riscontrato nel 2002.

Per quanto riguarda il sito di Pietole 1 in Tabella 4.3 sono riportati gli indici statistici per gli anni 2002, 2003 e 2004. Interessante notare come il comportamento dei modelli in fase di validazione risulti essere coerente con i risultati ottenuti in fase di calibrazione. Tale coerenza, indicativa della bontà della calibrazione è avvalorata dalle forti differenze climatiche riscontrate fra i diversi anni.

SWAP e CropSyst producono risultati analoghi mentre MACRO partendo da performance peggiori migliora in fase di validazione, riducendo l'RMSE da 0.040 a 0.022 e 0.036 e aumentando il valore di R da 0.60 a 0.65 e 0.72. Analogamente a quanto riscontrato nel sito di **Caviaga** non ci sono grandi differenze nella performance dei modelli nel simulare gli orizzonti superficiali con qualche leggera preferenza per SWAP rispetto a CropSyst, limitato in alcune condizioni dalla maggiore rigidità nella descrizione delle proprietà idrauliche tramite la parametrizzazione di Campbell rispetto alla van Genuchten-Mualem. Anche nel sito di **Pietole 1** il modello MACRO mostra la peggiore performance fra i tre negli strati inferiori in seguito ad una cattiva gestione delle condizioni al contorno inferiore del campo di moto in presenza di falda.

Come esempio di dettaglio delle simulazioni e confronti relativi al sito di **Pietole 1** in Figura 4.5 sono mostrati i profili di contenuto d'acqua misurati e simulati con i tre modelli. I dati si riferiscono a 3 giorni (222°, 226° e 232° giorno dell'anno) di un processo di drenaggio.

Dall'analisi dei profili emergono considerazioni interessanti sui processi e sulla qualità delle misure e delle informazioni ottenibili:

- nell'orizzonte Ap, a 30 cm di profondità si notano valori più bassi di contenuto d'acqua rispetto alle sonde poste immediatamente sopra e sotto ma sempre all'interno dello stesso orizzonte.

Tale discontinuità è da attribuire all'effetto dell'interramento dei residui colturali del mais a quella profondità come si evince anche dalle foto del profilo (Allegato B).

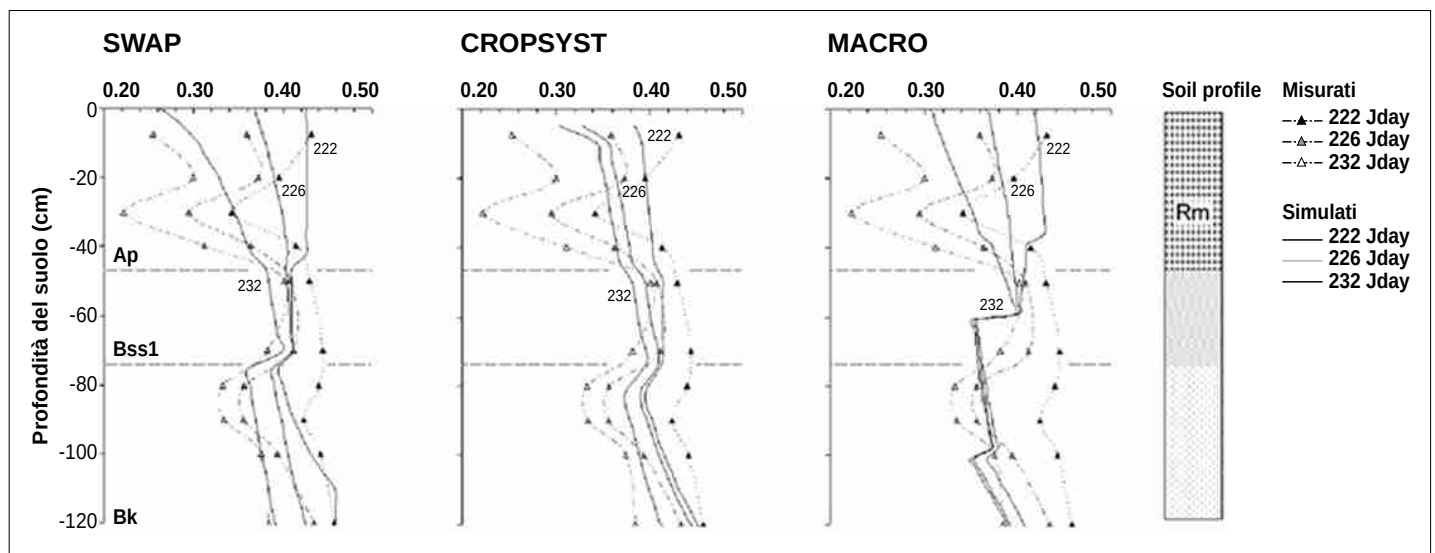


Figura 4.5 Profili di contenuto d'acqua misurati e simulati con 3 modelli

Le sonde sono state inserite in un mezzo che ha proprietà diverse, e variabili nel tempo, rispetto a quello campionato e tutti gli indici calcolati a quella profondità ne hanno risentito;

- l'orizzonte Bss1 mostra le sue caratteristiche di orizzonte compatto che rallenta il drenaggio dell'acqua nel profilo, che procede in misura più marcata nell'orizzonte Bk in cui risulta evidente l'effetto strutturante dei carbonati così come riportato nella descrizione pedo-idrologica dei profili (capitolo 3.2);
- il modello SWAP segue al meglio il fenomeno di esaurimento sia in superficie che nello strato profondo mentre è evidente la più imprecisa gestione delle condizioni al contorno inferiore del modello MACRO. Il modello CropSyst, applicato in questo esempio nella sua versione di risoluzione del bilancio dell'acqua tramite l'equazione di Richards, funziona in maniera soddisfacente pur presentando maggiori errori in superficie.

Come detto i risultati relativi agli altri siti possono essere approfonditi nell'ambito della relazione tecnico scientifica di progetto, anche se, in generale, si può dire che anche nelle altre condizioni pedoclimatiche indagate, gli indici globali delle simulazioni evidenziano sempre un'ottima performance del modello ($RMSE < 0,04$ e $R > 0,51$).

Si può quindi concludere che per la parte idrologica:

- Tutti e tre i modelli (SWAP, MACRO e CropSyst) hanno fornito buoni risultati ($RMSE < 0,05$) in tutte le condizioni pedo-climatiche testate.
- Il modello SWAP ha fornito in media i migliori risultati. Il modello CropSyst nella versione alle differenze finite non si discosta eccessivamente dal primo mentre peggiori risultati sono stati ottenuti con la versione del modello "a cascata". Il modello MACRO ha presentato alcuni problemi nella gestione delle condizioni al contorno inferiore in presenza di falda superficiale.
- Il modello SWAP è risultato il migliore anche da un punto di vista della stabilità delle soluzioni numeriche.
- Le proprietà idrauliche misurate in laboratorio sono risultate, nella maggior parte dei casi, rispondenti al comportamento idrologico di campo. Alcuni adattamenti sono stati fatti ai valori di θ_0 , maggiormente per gli orizzonti superficiali, in accordo con la incompleta saturazione in campo del mezzo poroso per la presenza di bolle d'aria (Basile et al., 2003, 2006). Il modello di van Genuchten-Mualem così come quello di Campbell ha generalmente fornito buoni risultati ma, in alcuni casi, un disaccoppiamento fra la parametrizzazione della curva di ritenzione e di conducibilità sarebbe auspicabile.

- La buona stima delle condizioni al contorno superiore e inferiore sono cruciali per una buona riuscita della modellizzazione. Maggiori sforzi dovrebbero essere posti nella stima degli apporti irrigui e nell'acquisizione di nuove stazioni meteo per il monitoraggio della pioggia e dei parametri per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento e potenziale. Inoltre, è auspicabile l'infittimento della rete di piezometri per il monitoraggio delle condizioni al contorno inferiore, ricordando che il bilancio dell'acqua nel suolo è fortemente determinato dalla presenza di falde sospese temporanee più che dalla profondità dell'acquifero principale.
- Le misure di contenuto d'acqua tramite sonde TDR, acquisite sia in automatico che in manuale, sono risultate decisamente affidabili e a costi decrescenti nel tempo. Alcune considerazioni sono però necessarie:
 - * per permettere una gestione reale dell'appezzamento il monitoraggio era "trasparente" nel senso che le sonde superficiali venivano rimosse per permettere le lavorazioni del terreno e la semina e successivamente reinserite.

Questo ha determinato, a volte, differenze nei contenuti d'acqua superficiali in cui la quota dovuta alla variabilità climatica non era facilmente distinguibile da quella dovuta alla variabilità spaziale;

 - * il posizionamento delle sonde è di cruciale importanza in tutti quei suoli in cui i limiti fra diversi orizzonti sono chiari e/o diffusi. Infatti, la modellistica schematizza il profilo e, ovviamente, non è in grado di riprodurre le complesse e graduali variazioni del suolo; inoltre le proprietà del suolo sono misurate per ogni orizzonte catturandone il concetto centrale e quindi assumendolo omogeneo.
- Per quanto riportato sopra e per l'esperienza acquisita, la capacità di lettura del profilo e dei processi pedologici che in esso avvengono risulta determinante per una buona conduzione del monitoraggio, della sperimentazione e per una corretta interpretazione dei risultati anche se in questo tipo di modellistica le informazioni pedologiche in senso stretto sono solo parzialmente inglobate nei modelli. Inoltre, ovviamente, un buon bilancio dell'acqua non può prescindere da corrette analisi della gestione agronomica del sito.
- Infine, le considerazioni pedo-idrologiche riportate nelle schede del capitolo 3 hanno trovato generalmente conferma nella dinamica dell'acqua osservata in campo.

4.3 Dinamiche e modellistica dell'azoto

4.3.1 Principi generali

L'azoto è il più importante dei macroelementi: nelle piante entra a far parte degli acidi nucleici, delle proteine e di molti altri composti di grande importanza biologica (Sequi e Antisari, 1989).

Il comparto in cui l'azoto è maggiormente presente è l'atmosfera, essendo questa costituita dal 79% circa di azoto in forma molecolare (N_2). L'azoto molecolare (N_2) può essere utilizzato come fonte nutritiva solo da poche specie di organismi viventi; si tratta di microrganismi, presenti nel comparto suolo, liberi (Azotobacter, Clostridi, batteri fotosintetici, Cianobatteri) o simbiotici con piante (Rizobi con leguminose). Tali microrganismi sono in grado di convertire la forma molecolare in azoto ammoniacale (NH_4^+) attraverso l'azotofissazione assicurata dalla presenza al loro interno di un particolare sistema enzimatico caratterizzato dalla nitrogenasi. I batteri coinvolti possono essere sia aerobi che anaerobi, a metabolismo eterotrofo o fotoautotrofo. La fissazione biologica è influenzata dal pH, dalla quantità di fosforo e potassio, dalla presenza di metalli pesanti e dal regime idrico.

La forma ammoniacale (NH_4^+) a sua volta può essere utilizzata da altri microrganismi nella respirazione di composti inorganici attraverso la nitrificazione.

In particolare, questo processo è caratterizzato da due sottopassaggi:

- 1 trasformazione dell' NH_4^+ in NO_2^- (nitrito) da parte dei batteri ammonio-ossidanti;
- 2 trasformazione dell' NO_2^- in NO_3^- (nitrato) da parte dei batteri nitritos-sidanti.

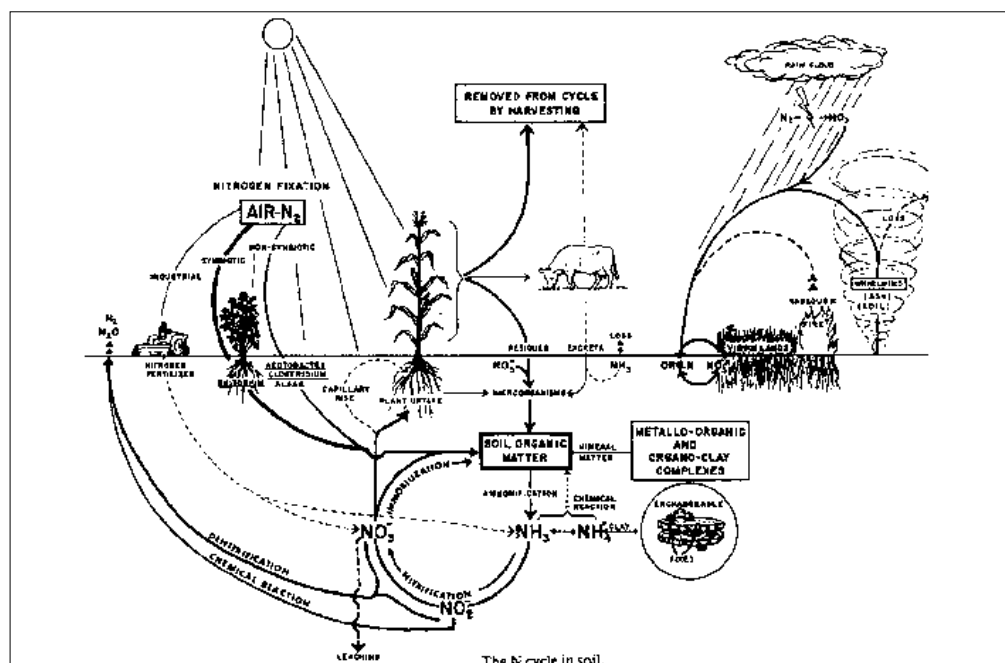


Figura 4.6 Ciclo dell'azoto tratto da Stevenson (1982).

La forma nitrica (NO_3^-), per la sua maggior presenza quantitativa, è quella principalmente assimilata dalle piante come fonte di azoto per la costruzione delle macromolecole (le piante possono infatti assimilare anche la forma ammoniacale). I fattori che influenzano questo processo sono essenzialmente la temperatura, la presenza di ossigeno e il rapporto C/N della sostanza organica. La sostanza organica può contenere fino al 98% dell'azoto totale di un suolo sotto forma amminica (proteine) e in minor misura sotto forma eterociclica (basi azotate degli acidi nucleici). La proteolisi induce il rilascio dell'azoto amminico della sostanza organica mentre l'ammonificazione (mineralizzazione dell' N) porta alla riduzione dei gruppi $-\text{NH}_2$ a NH_3 . Quasi tutti i microrganismi sono in grado di compiere tale riduzione. I fattori limitanti questo processo sono essenzialmente le basse temperature e la carenza di acqua.

In condizioni di anaerobiosi il nitrato (NO_3^-) può subire il processo di denitrificazione da parte dei batteri denitrificanti (*Achromobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*) che utilizzano l'azoto nitrico come accettore di elettroni nella respirazione anaerobica. In questo caso il nitrato viene trasformato dapprima in NO , successivamente in N_2O per poi ridursi in N_2 , cioè azoto molecolare che quindi ritorna in atmosfera chiudendo il ciclo.

Gli ioni NO_3^- presenti nella soluzione circolante del terreno possono essere allontanati dal profilo pedologico interessato dall'approfondimento radicale, in seguito a lisciviazione; attraverso questo fenomeno chimico-fisico gli ioni percolano fino a raggiungere la falda acquifera. I fattori che, interagendo tra loro, determinano principalmente l'entità delle perdite di N-NO_3^- dal suolo agrario per lisciviazione sono le caratteristiche pedologiche e idrologiche, come tessitura e porosità (conducibilità idrica, ecc.), gli apporti di concimi azotati, la presenza o assenza della coltura e la sua dinamica di crescita e assorbimento dell'azoto, gli apporti irrigui e il tipo di irrigazione eseguita, le precipitazioni e la loro distribuzione annua.

La lisciviazione rappresenta, insieme alla denitrificazione, il processo che determina le più elevate perdite di N. Secondo la stima da bibliografia (Acutis et al., 2000), in condizioni di suolo sabbioso, irrigato a scorrimento e concimato con $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, l'entità dei nitrati lisciviati può superare i $200 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$.

L'utilizzo di modelli di simulazione della dinamica dell'azoto nel suolo rappresenta un valido strumento nello studio dell'inquinamento ambientale correlato ai rilasci in falda di nitrati lisciviati dai suoli agricoli.

Esistono numerosi modelli che simulano i processi propri dell'azoto, ognuno dei quali è simulato con maggior o minor livello di dettaglio. I problemi che sorgono nel descrivere la dinamica dell'azoto nel suolo derivano dall'enorme complessità che si riscontra nella realtà. I molteplici processi sono infatti influenzati da numerosi fattori di natura fisica, chimica e biologica e dalle strette relazioni che intervengono tra questi.

Tutti gli approcci utilizzati in ambito agronomico per la modellizzazione della dinamica del carbonio e dell'azoto nel suolo si basano sulla loro suddivisione in "pool" distinti di sostanza organica e di azoto minerale (Molina e Smith, 1998).

Un pool è definibile (Smith et al., 2002) come "un compartimento che contiene materiali chimicamente indistinguibili e ugualmente accessibili alle piante o alla popolazione microbica del suolo". Si individuano, quindi, diversi pool a cui si assegnano sia la sostanza organica del terreno sia quella apportata con i residui colturali o fertilizzanti contenenti sostanza organica. Ciascuno dei pool possiede valori specifici di proprietà, quali rapporto C/N, velocità di decomposizione e coefficienti di ripartizione dei flussi, consentendo la simulazione dinamica della decomposizione della relativa sostanza organica.

I pool possono essere concettualmente suddivisi in tre categorie di sostanza organica (Duxbury et al., 1989):

- la biomassa microbica, che comprende i microrganismi viventi, responsabili dell'attacco biologico delle altre forme di sostanza organica non vivente;
- la sostanza organica fresca, derivante da residui vegetali indecomposti, la quale è soggetta all'attacco microbico;
- la sostanza organica stabile (humus), molto meno soggetta all'attacco microbico, essendo temporaneamente o permanentemente inaccessibile alla biomassa microbica (Gabrielle et al., 2002).

La suddivisione attuabile più semplice (es. ICBM/N: Kätterer e Andrén, 2001; CropSyst: Stöckle et al., 2003) prevede un pool a lenta decomposizione, che rappresenta la sostanza organica stabile del suolo (humus), e un pool a rapida decomposizione, che rappresenta i materiali organici apportati (residui colturali, effluenti d'allevamento, radici, ecc.).

Tale configurazione è espandibile, poiché sia l'humus sia i materiali aggiunti sono rappresentabili con più di un pool (Kätterer e Andrén, 2001; Molina e Smith, 1998; Wu e McGeachan, 1998).

Esempi di tali modelli sono:

CANTIS (Garnier et al., 2001 e 2003), che utilizza 4 pool per rappresentare i residui (materiali rapidamente decomponibili, cellulosa, emicellulosa, lignina) e 2 pool (uno solubile e uno umificato) per rappresentare la sostanza organica del terreno;

CERES (Godwin e Jones, 1991), che divide i materiali aggiunti in 3 pool (carboidrati, cellulosa, lignina);

NCSOIL (Molina et al., 1983), che, in aggiunta rispetto a CERES, suddivide anche la sostanza organica del terreno in biomassa microbica, umati e humus passivo;

SUNDIAL (Bradbury et al., 1993), che prevede 2 pool per i materiali aggiunti e 2 per il terreno;

CENTURY (Parton et al., 1986), che utilizza 2 pool per i residui colturali (strutturale e metabolico) e 3 pool per la sostanza organica del suolo; infine, il

modello sviluppato da Verberne et al. (1990), successivamente utilizzato come base per MOTOR (Whitmore et al., 1997), che utilizza 3 pool per rappresentare i materiali aggiunti (carboidrati e proteine, cellulosa ed emicellulosa, materiali strutturali lignificati) e 3 pool per rappresentare la sostanza organica del terreno (sostanza organica attiva protetta, sostanza organica attiva non protetta, sostanza organica inattiva).

Un approccio che preveda più pool consente una rappresentazione più dettagliata della realtà, proprio perché materiali non sufficientemente omogenei sono suddivisi in componenti distinte; inoltre, i diversi pool possono essere ricollegati a frazioni misurabili, come negli esempi precedentemente esposti (carboidrati solubili, cellulosa, emicellulosa, lignina) semplificando così l'inizializzazione del modello.

In molti modelli è presente, oltre al pool della sostanza organica, il pool, di fondamentale importanza, della massa microbica, la quale rappresenta una possibile fonte o utilizzatrice di C e N. I modelli sopra elencati, tra quelli a più di 2 pool, la comprendono. Un'esplicita rappresentazione della biomassa microbica consente di simulare più appropriatamente i processi a scala temporale medio-breve, in particolare quelli relativi all'azoto (Gabrielle et al., 2003).

Ogni pool è rappresentato nel modello da una variabile di stato. I corrispondenti tassi di variazione sono calcolati in modo specifico a seconda di come sono definiti i pool e le relazioni funzionali tra questi. In base alla scala spaziale di applicazione e del contesto agronomico di applicazione, poi, un singolo pool può essere rappresentato in diverse dimensioni. Perciò, in un modello di rappresentazione di un suolo, verticale e unidimensionale, un pool sarà replicato a diverse profondità, per valutare gli effetti delle lavorazioni o dell'incorporazione di materiali organici nel terreno; in tal caso, i pool di sostanza organica possono essere rappresentati fino alla profondità massima di aratura, mentre quelli di azoto minerale sono normalmente considerati fino alla base del profilo pedologico. I tassi di variazione sono molto spesso calcolati con cinetiche di primo ordine che assumono che la biomassa microbica presente non sia mai limitante per la decomposizione (Verberne et al., 1990); altri modelli (es. Garnier et al., 2001 e 2003) adottano invece cinetiche di primo ordine rispetto al carbonio e di tipo Michaelis-Menten rispetto alla biomassa microbica.

I coefficienti di decomposizione sono normalmente calcolati sulla base di un coefficiente riferito a condizioni ottimali, successivamente moltiplicato per uno o più fattori di riduzione che dipendono dalla temperatura del terreno, dal suo contenuto idrico, e, in alcuni casi, dal contenuto in argilla e/o in calcare totale e/o dal pH (es. Brisson et al., 1998; Wu e McGechan, 1998).

4.3.2 Modelli di bilancio azotato valutati

La dinamica dell'azoto è sicuramente l'aspetto più importante nell'ambito della ricerca realizzata e vista la complessità del ciclo di questo elemento nel sistema suolo/pianta e dell'elevato numero di processi che coinvolge si è preferito descrivere in modo dettagliato per ciascun modello analizzato quali processi considera e con che livello di dettaglio e approccio li simula.

Inoltre, poiché gli algoritmi implementati nel modello **ARMOSA** relativi ai processi di trasporto e trasformazione dell'azoto sono infine stati quelli di SOILN, per questo modello la descrizione è condotta in modo più approfondito.

CropSyst

Simulazione della fenologia colturale

La simulazione degli stadi fenologici si basa sulle somme termiche. Ogni stadio di sviluppo viene raggiunto quando sono stati accumulati i gradi giorno necessari alla coltura in esame per il passaggio da uno stadio all'altro. Il modello considera anche l'eventuale fabbisogno di freddo per la vernalizzazione di cereali autunno-vernini e, nell'ambito delle temperature utili per lo sviluppo, l'effetto limitante sullo sviluppo di temperature sub-ottimali.

Simulazione dell'accumulo di biomassa e delle produzioni

L'accumulo di biomassa e la produzione utile della coltura vengono simulati in relazione alle limitazioni imposte dalla disponibilità di luce, di acqua e di azoto, partendo da un valore potenziale di assimilazione di CO_2 (anidride carbonica), ottenuto attraverso un parametro specifico per coltura (ed eventualmente varietà) che moltiplica l'ammontare giornaliero della radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla coltura.

L'effetto dell'azoto nell'accumulo di biomassa nella pianta è modellizzato moltiplicando la biomassa totale accumulata per un fattore in cui compaiono la massima concentrazione di azoto utile alla crescita, la concentrazione di azoto attesa nella pianta e la minima concentrazione di azoto utile alla crescita.

Per concentrazioni di azoto comprese tra quella massima e quella critica, l'accumulo di biomassa non risente della limitazione da parte dell'azoto. Tali concentrazioni hanno valori di riferimento tipici per ogni coltura, che si evolve nel corso del ciclo di sviluppo in accordo alle fenofasi e alla biomassa già accumulata.

Simulazione dello sviluppo dell'area fogliare

L'incremento del LAI (*Leaf Area Index*) durante il periodo vegetativo è calcolato come una funzione dell'accumulo di biomassa e della sua ripartizione degli assimilati tra foglie e fusti, e da un valore di *specific area index* (g m^{-2}) specifico di ogni coltura e varietà.

Simulazione del bilancio dell'azoto

Il modello CropSyst simula le trasformazioni dell'azoto (mineralizzazione, nitrificazione e denitrificazione) utilizzando cinetiche di primo ordine e assumendo

che tutte le trasformazioni avvengano nei primi 30 cm di suolo. Queste trasformazioni sono dipendenti dalla temperatura del suolo e dal contenuto idrico; di conseguenza è incluso nel modello un simulatore della temperatura del suolo.

SOILN

Tale modulo include tutti i principali processi che determinano il trasporto e le trasformazioni dell'azoto nei terreni agrari, simulando il bilancio azotato. Come ogni modello, richiede delle variabili guida e di inizializzazione e parametri che descrivono i processi che avvengono nel sistema fisico da simulare.

SOILN richiede la conoscenza preliminare della dinamica dell'acqua in termini di flussi tra i diversi strati di suolo (opzionalmente suddividendo il flusso totale in quello che avviene nei macropori e nei micropori).

La Figura 4.7 rappresenta uno schema delle voci in entrata ed uscita del bilancio azotato e di come l'azoto si suddivide in varie frazioni all'interno del suolo, secondo Johnsson et al., 1987.

In esso le entrate di azoto possono essere sotto forma di fertilizzanti (*fertilizer*), liquami e letame (*manure*), deposizione atmosferica (*deposition*), mentre il raccolto della coltura (*harvest*), la lisciviazione (*leaching*) e la denitrificazione (*denitrification*) costituiscono le uscite.

L'azoto viene suddiviso in minerale e organico. L'azoto minerale viene a sua volta distinto in frazione ammoniacale (NH_4^+) e nitrica (NO_3^-), mentre l'azoto organico viene distinto in lettiera, feci, humus e pianta (*N-litter*, *N-faeces*, *N-humus*) e N utilizzato dalla coltura (*N-plant*).

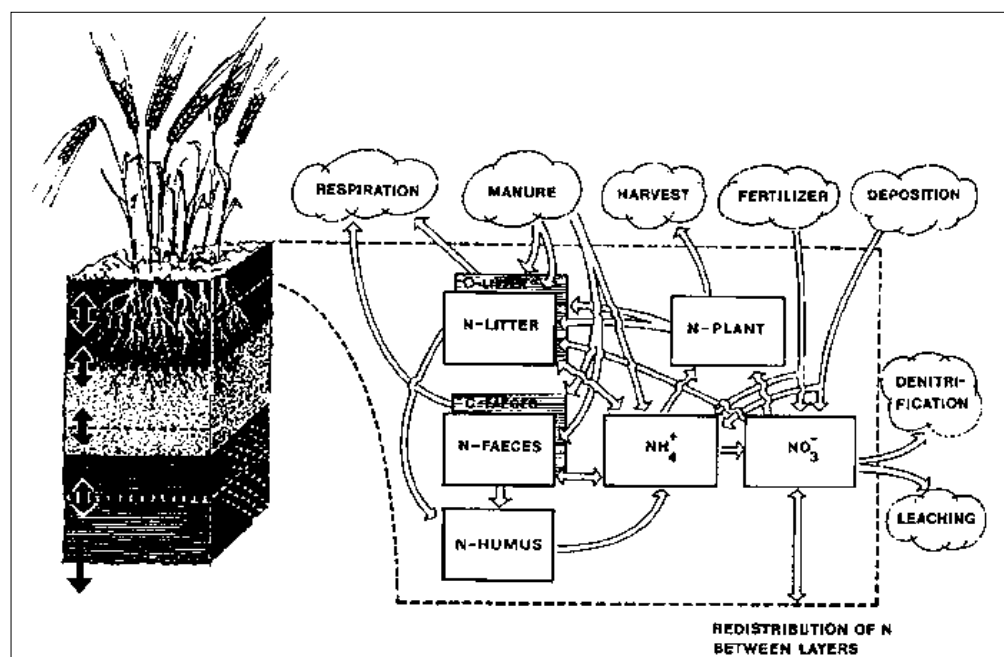


Figura 4.7 Struttura di SOILN che mostra le variabili di stato (riquadri) e di flusso (freccie) incluse nel modello (da Johnsson et al., 1987)

Il modello SOILN non simula dinamicamente l'accrescimento della coltura né il suo contenuto di azoto, ma si basa sulla ripartizione, secondo una curva logistica, dei valori di azoto nelle diverse parti della pianta potenzialmente ottenibili alla raccolta. Tale approccio pone grossi limiti di applicabilità in distinti areali pedoclimatici e con colture diverse; pertanto nel caso del modello **ARMOSA**, sono state usate le stime giornaliere prodotte dagli algoritmi derivati da CropSyst per quanto riguarda la coltura (accrescimento radicale, assimilazione e crescita, ecc.), consentendo quindi l'applicazione ad agro-ecosistemi complessi. Maggior dettaglio sulla simulazione del ciclo dell'azoto implementata in SOILN è fornita nei paragrafi seguenti.

Input di azoto minerale

Gli apporti di azoto minerale considerati dal modello comprendono la deposizione atmosferica (umida e secca) e le fertilizzazioni chimiche.

I fertilizzanti chimici azotati, aggiunti alla superficie del terreno, entrano a far parte della frazione minerale del suolo attraverso l'applicazione di un tasso costante di dissoluzione, tipico di ogni fertilizzante.

Fertilizzazioni con sostanza organica da effluenti d'allevamento

La componente organica apportata al terreno viene incorporata attraverso tre frazioni: come lettiera (parte pagliosa), come feci e come ammonio.

I principali parametri richiesti dal modello per caratterizzare la sostanza organica e descriverne il processo di distribuzione sono il rapporto carbonio/azoto (C/N) della lettiera, il C/N dei liquami, la profondità alla quale la fertilizzazione organica è interrata e i contenuti in azoto minerale e organico dei diversi materiali fertilizzanti.

Mineralizzazione e immobilizzazione

L'azoto minerale è rappresentato da due frazioni: la prima, ammoniacale è considerata immobile, la seconda, nitrica, è invece considerata mobile.

La frazione ammoniacale è arricchita da azoto fornito attraverso applicazioni di fertilizzanti organici e chimici, mineralizzazione della sostanza organica e deposizione atmosferica, mentre è impoverita da immobilizzazione in materiale organico, dall'ossidazione a nitrati e dall'assorbimento radicale da parte delle piante. La frazione nitrica si arricchisce a seguito di nitrificazione di composti ammoniacali, apporti di fertilizzanti, risalita capillare di acqua dal sottosuolo e deposizione atmosferica; viene invece impoverita a seguito di lisciviazione, denitrificazione e assorbimento radicale.

La trasformazione dell'ammonio (NH_4^+) a nitrati (NO_3^-), espressa per ogni strato, è controllata da uno specifico tasso di nitrificazione ed è funzione della temperatura, del contenuto idrico e del pH del suolo.

Il modello considera 3 pool di sostanza organica nel suolo: lettiera (materiale organico indecomposto e biomassa microbica viva), feci e humus.

Il comportamento dinamico dell'azoto contenuto nella sostanza organica è determinato dai flussi di carbonio, dai processi di mineralizzazione o immobilizzazione dipendenti dal rapporto C/N del materiale in decomposizione e dalla disponibilità di azoto minerale, e da temperatura e umidità del suolo.

Per le differenti trasformazioni vengono quasi sempre utilizzate cinetiche di primo ordine e tutti i processi sono simulati nell'ambito di ogni singolo strato di suolo. I differenti processi sono condizionati da tassi di riferimento per la decomposizione delle diverse frazioni di sostanza organica e da tassi di mineralizzazione, entrambi tipici per le differenti tipologie e condizioni del suolo.

Denitrificazione

La denitrificazione, che riduce i nitrati in composti azotati gassosi (N_2 e N_2O) è un processo anaerobico che dipende quindi fortemente dall'aerazione del suolo. Il modello usa il contenuto idrico come una espressione indiretta dello stato dell'ossigeno all'interno del suolo.

Il processo di denitrificazione, espresso per ogni strato, è simulato in funzione di un tasso potenziale dipendente dal sistema di coltivazione, dal tipo suolo, dalla concentrazione di nitrati nella soluzione circolante, dalla temperatura e dal contenuto idrico.

Assorbimento della coltura, gestione dei residui colturali e trasporto dei soluti
L'assorbimento di azoto da parte della coltura è calcolato con una funzione empirica dipendente dal tempo e specifica per ciascuna coltivazione simulata. Dopo la raccolta e a seguito delle lavorazioni, le radici e i residui colturali possono essere incorporati nel suolo come lettiera. Durante l'aratura e altre lavorazioni del terreno, l'azoto della pianta rimasto in superficie dopo il raccolto viene quindi incorporato nello strato arato.

Il flusso di acqua che trasporta i nitrati da uno strato all'altro del suolo è il processo responsabile della lisciviazione dell'azoto dal suolo. Tal flusso viene richiesto come input in ingresso e prodotto da un modello idrologico.

In caso di basse dotazioni, le perdite giornaliere dalla frazione di azoto minerale possono essere superiori alle disponibilità (input inclusi), specialmente per quanto riguarda i nitrati. Per limitare questo problema, il modello presuppone la seguente priorità di accesso alla frazione di azoto minerale: immobilizzazione microbica, nitrificazione e infine assorbimento radicale.

4.3.3 Dinamiche dell'azoto e applicazioni modellistiche

Dinamiche misurate

Il contenuto di azoto nitrico ed ammoniacale del suolo è stato monitorato costantemente durante tutta la sperimentazione e dati misurati sono disponibili anche nei periodi in cui le coppe porose non potevano essere utilizzate, per consentire l'esecuzione delle lavorazioni, perché parallelamente sono stati prelevati ed analizzati campioni di terreno a differenti profondità. Al fine di poter integrare le due diverse misure, sono state effettuate anche misure in parallelo (coppe - terreni) al fine di analizzarne i rapporti.

In Figura 4.8 viene illustrato un confronto 1:1 tra i dati di azoto nitrico misurati con le coppe porose e con i campioni di terreno raccolti nei siti di **Caviaga** e **Pietole 1** nel triennio 2002-2004: i valori ottenuti dai campioni di terreno sono risultati tendenzialmente superiori a quelli rilevati con le coppe porose.

Tale tendenza non è comunque statisticamente significativa, risultando il coefficiente angolare della retta di regressione non diverso da 1. Inoltre il grafico così elaborato tende a esemplificare la reale variabilità della misura, in quanto si presuppone che il nitrato del suolo sia totalmente presente nella soluzione circolante e totalmente solubile in acqua. Si fa ancora notare comunque che anche la variabilità nell'ambito di repliche a pochi metri di distanza tra azoto contenuto nella soluzione circolante o tra campioni di suolo è dello stesso ordine di grandezza.

In tutti i siti sperimentali sono stati inoltre misurati, oltre all'azoto nitrico, i contenuti di azoto ammoniacale. I valori rilevati con le coppe porose sono risultati notevolmente inferiori rispetto a quelli ottenuti dai campioni di terreno:

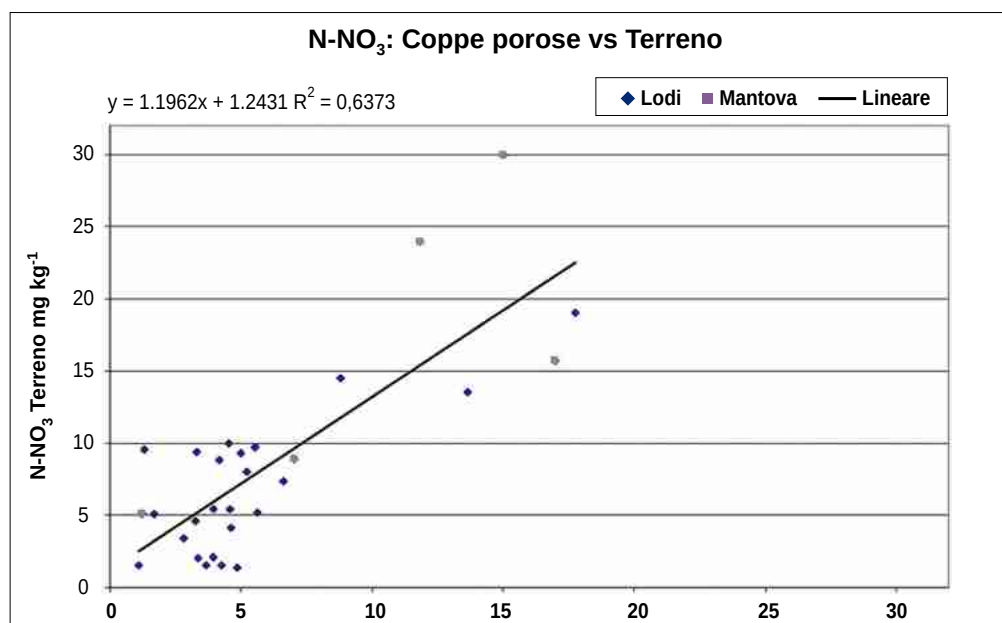


Figura 4.8 Confronto 1:1 tra i dati di azoto nitrico misurati con le coppe porose e con i campioni di terreno raccolti a Lodi (Sito di Caviaga) e Mantova (Sito di Pietole 1) nel triennio 2002-2004

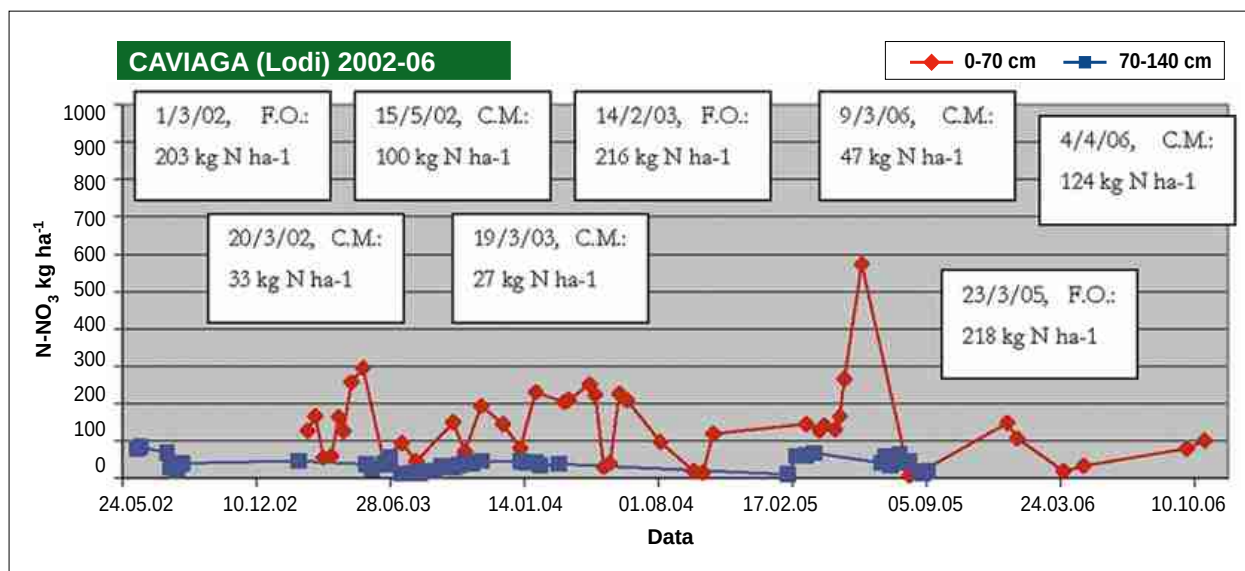


Figura 4.9 Contenuti di azoto nitrico nella soluzione circolante, prelevata con coppe porose, e nel terreno nel sito di Caviaga (rispettivamente in blu e in rosso).

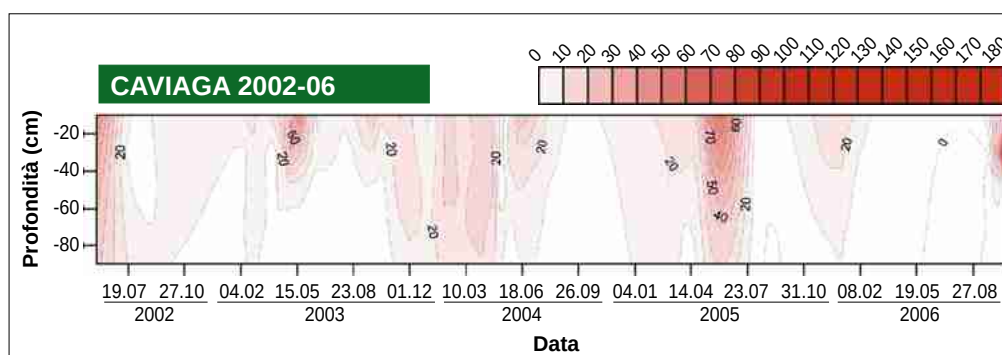


Figura 4.10 Grafico a isolinee relativo al contenuto di azoto nitrico (kg ha^{-1}) del profilo del suolo di Caviaga

quanto rilevato è giustificato dal fatto che lo ione ammonio non è completamente solubile nella soluzione circolante e viene assorbito dal complesso di scambio del terreno, per cui è ragionevole ottenere concentrazioni più elevate nei campioni di suolo. Nel complesso i valori misurati di azoto ammoniacale sono risultati decisamente bassi: per questo motivo non sono stati riportati e descritti accuratamente in questa sede.

Osservando la Figura 4.9 si può notare come il contenuto di nitrati a Caviaga sia risultato rilevante solo in due periodi: nell'estate del 2002 e nei mesi invernali tra il 2003 e il 2004; nei restanti periodi la disponibilità di azoto nitrico per la coltura è stata ridotta.

Nella Figura 4.10 si può notare come gli orizzonti superficiali contengano una maggiore quantità di azoto nitrico rispetto a quelli più profondi; inoltre, mentre in profondità il contenuto di azoto nitrico rimane pressoché costante, in superficie le variazioni sono molto rapide ed intense.

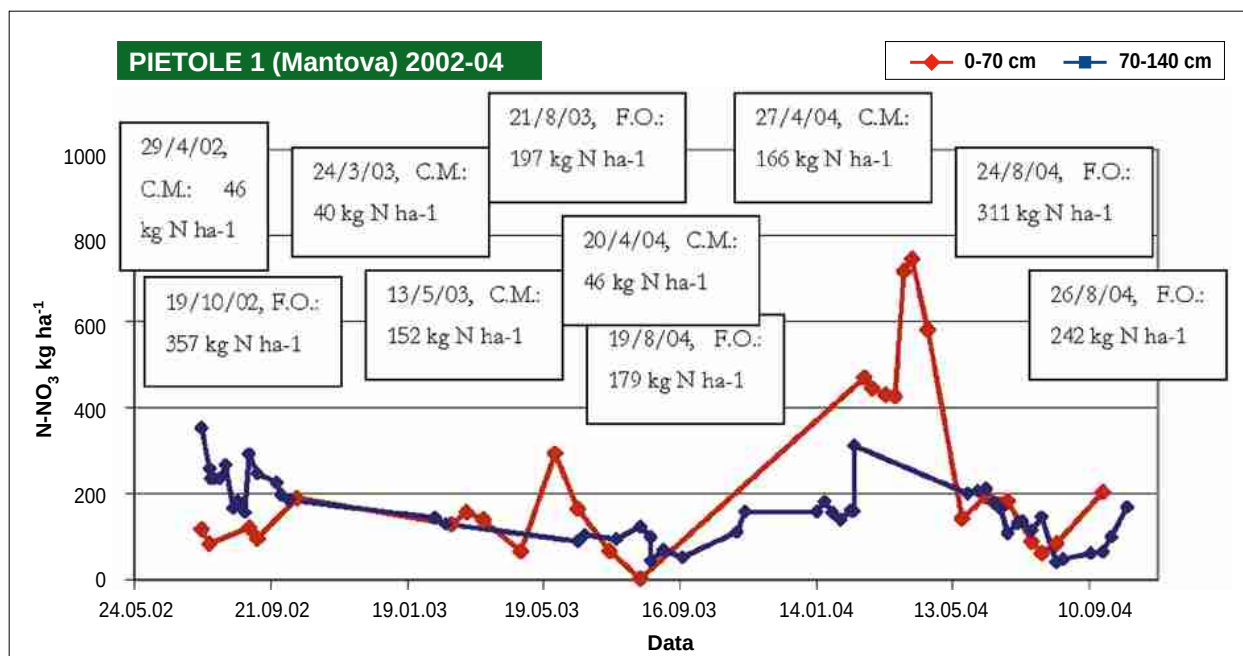


Figura 4.11 Contenuti di azoto nitrico nella soluzione circolante, prelevata con coppe porose, e nel terreno nel sito di Pietole 1 (rispettivamente in blu e in rosso)

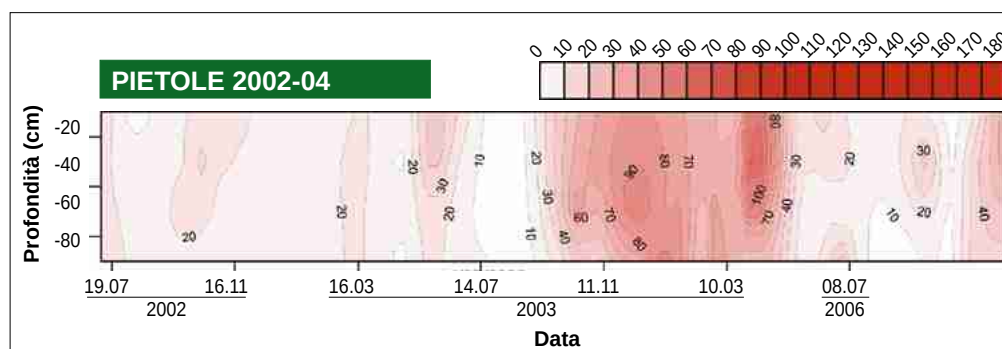


Figura 4.12 Grafico a isolinee relativo al contenuto di azoto nitrico (kg ha⁻¹) del profilo del suolo del sito principale di Pietole 1

A **Pietole 1** (Figura 4.11) il contenuto di nitrati è risultato basso nelle fasi in cui la coltura è presente in campo, soprattutto a causa dell'elevato assorbimento di azoto da parte del mais; durante i mesi invernali il contenuto di azoto nitrico aumenta notevolmente, sia a causa della mancanza della coltura che per le liquamazioni eseguite ogni anno a fine estate. Osservando la Figura 4.11 si può notare un picco di nitrati nello strato 0-70 cm durante i primi mesi del 2004: questo forte incremento è stato determinato dalla liquamazione molto abbondante eseguita durante la sperimentazione a fine estate 2003.

A differenza del sito di **Caviaga**, si può notare come non ci siano grosse differenze di contenuto di azoto tra gli orizzonti più profondi e quelli più superficiali: la coltura può sfruttare l'azoto presente in profondità solo nelle fasi in cui l'apparato

radicale è maggiormente sviluppato (fioritura), mentre nelle fasi iniziali del ciclo questa quota non è disponibile.

In Figura 4.13 sono riportate le concentrazioni di azoto nitrico misurate analiticamente nella soluzione circolante prelevata nelle coppe porose più profonde (130-150 cm) dei siti Caviaga (Lodi) e Pietole 1 (Mantova) nel triennio 2002-2004. Per il sito di Pietole 1 i valori misurati sono stati sempre più elevati rispetto a Caviaga: i picchi più alti (fino a 92 mg l⁻¹) sono stati registrati nei mesi di giugno e luglio del 2003 e 2004.

A Caviaga i valori sono risultati particolarmente elevati durante i mesi estivi del 2002 probabilmente in seguito ad una concimazione minerale eseguita il 15 maggio, non effettuata negli anni successivi.

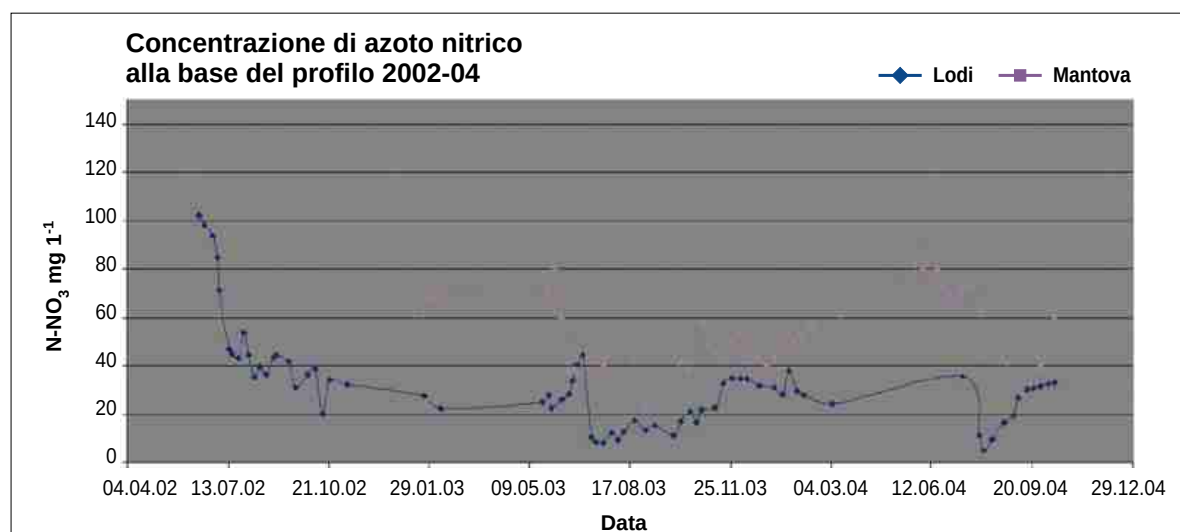


Figura 4.13 Concentrazione di N-NO_3^- alla base del profilo nei siti principali Caviaga e Pietole 1 di Lodi e Mantova, dal 2002 al 2004

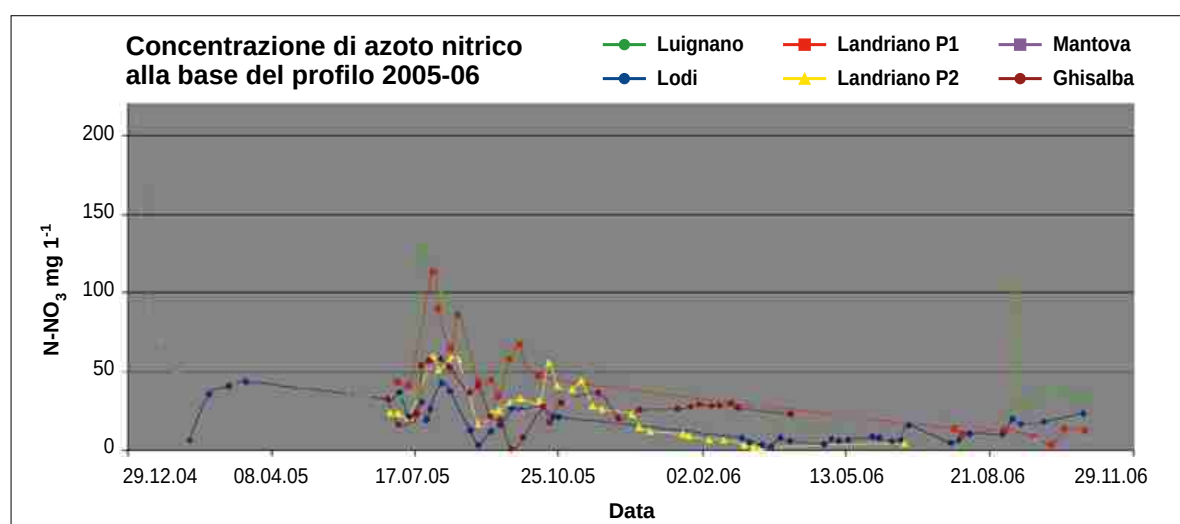


Figura 4.14 Concentrazione di N-NO_3^- alla base del profilo nei siti di Luignano, Landriano 1 e 2 Pietole 1 (Mantova), Caviaga (Lodi) e Ghisalba, dal 2005 al 2006

Un rapido incremento è stato registrato anche nel luglio 2003 probabilmente causato dal trasporto verticale di azoto nitrico dovuto alle abbondanti irrigazioni eseguite dall'agricoltore durante i mesi estivi particolarmente caldi in quell'annata. In Figura 4.14 sono state riportate le concentrazioni registrate in tutti i siti nel biennio 2005-2006. I valori più elevati sono stati rilevati a **Pietole 1** nei mesi invernali del 2005: sono state riscontrate concentrazioni fino a 210 ppm, imputabili alle distribuzioni di elevata quantità di effluenti d'allevamento eseguite nell'autunno del 2004.

I risultati presentati, relativi a 2 dei siti di **ARMOSA**, ma comunque confermati anche da quelli degli altri siti evidenziano che:

- Le irrigazioni effettuate nei mesi estivi, spesso abbondanti, causano eventi di drenaggio e lisciviazione dell'azoto, come evidenziato dai decrementi dei contenuti misurati dopo questi periodi, prima negli strati superficiali e poi in quelli profondi;
- In concomitanza con le fasi di maggiore accrescimento culturale (ad esempio con la fase di riempimento delle cariossidi del mais) le elevate asportazioni di azoto (per assimilazione) determinano notevoli cali dei contenuti di nitrati nel suolo e nelle acque;
- Valori particolarmente elevati dei contenuti di azoto si rilevano spesso nel periodo autunnale e/o primaverile in concomitanza delle distribuzioni di liquami e letame al suolo;
- In tutti i siti si può osservare un incremento generale dell'azoto nitrico rilasciato alla base del suolo nei mesi di luglio-agosto del 2005; crescita quasi certamente correlata alle abbondanti piogge verificatesi in quei mesi estivi;
- In presenza di falda con oscillazioni stagionali (periodici innalzamenti) si evidenziano ridotti quantitativi di azoto alla base dello strato di suolo studiato

Risultati delle simulazioni

Simulazione della crescita colturale

La simulazione della crescita e dello sviluppo della coltura è indispensabile per poter stimare accuratamente anche le dinamiche relative all'azoto. Il modello di simulazione CropSyst è stato calibrato e validato utilizzando i dati misurati di biomassa totale alla fioritura ed alla raccolta, di produzione di granella, LAI massimo (alla fioritura) e infine di azoto assorbito dalla coltura.

I dati raccolti nei siti di **Caviaga** e **Pietole 1** nel triennio 2002-2004 sono stati utilizzati per la calibrazione. I due siti presentano notevoli differenze: a **Pietole 1** sono state registrate produzioni molto elevate, soprattutto nel 2002, (16 t SS ha⁻¹ di granella) mentre a **Caviaga** i valori registrati sono risultati nella media (circa 22 t SS ha⁻¹ di trinciato). Al fine di ottenere riproduzioni adeguate da parte del modello CropSyst sono stati scelti parametri differenti per i due siti e sono stati realizzati due file con i parametri colturali: uno adatto per i siti ad alto potenziale produttivo (utilizzato per le altre località del mantovano e del cremonese, zone altamente vocate per la maiscoltura) ed uno adatto per ambiente a potenziale produttivo normale, utilizzato per **Caviaga**, **Landriano** e per i restanti ambienti.

CropSyst è stato invece validato utilizzando i dati raccolti nel biennio 2005-2006 in tutti i siti monitorati.

I risultati ottenuti sono stati alquanto incoraggianti: nella tabella 4.5 sono riportati alcuni indici di valutazione delle qualità delle simulazioni (derivati dal confronto tra i dati misurati e quelli simulati), sia in fase di calibrazione che di validazione: è importante sottolineare il basso valore dell'RRMSE (Relative Root Mean Square Error), perfettamente in linea con quanto ottenuto da Bellocchi (2002) su mais italiano.

Essendo l'efficienza di modellazione risultata positiva ed il coefficiente di massa residua praticamente nullo, si può affermare che le stime sono, in questo caso, un migliore predittore della media dei dati reali (misurati).

In figura 4.15 è stato riportato il confronto fra i dati di biomassa totale alla raccolta misurati e quelli simulati a **Caviaga** dal 2002 al 2006.

Il modello è riuscito a riprodurre accuratamente la crescita della coltura in tutti gli anni, tranne il 2003, anno comunque anomalo caratterizzato da un'estate particolarmente torrida con scarsità di precipitazioni: CropSyst ha sovrastimato il dato misurato confermando le difficoltà di molti modelli di simulazione nella stima della crescita delle colture in annate anomale.

Anche nel 2006, anno in cui è stato coltivato frumento tenero, il modello ha stimato molto bene la crescita della coltura ed è riuscito a riprodurre perfettamente la biomassa totale misurata alla raccolta.

In Figura 4.16 è possibile osservare il confronto dei dati misurati e simulati di biomassa totale a **Pietole 1** nel triennio 2002-2004. CropSyst ha simulato in modo ottimale la crescita della coltura, nonostante le elevate differenze produttive registrate nei tre anni.

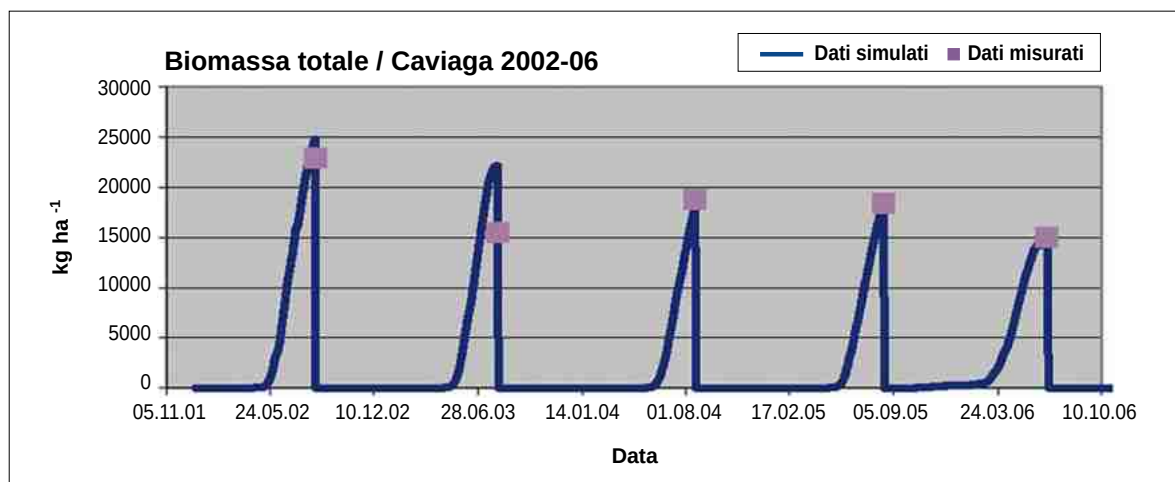


Figura 4.15 Confronto tra i dati simulati e misurati relativi alla biomassa totale alla raccolta nel sito di Caviaga dal 2002 al 2006

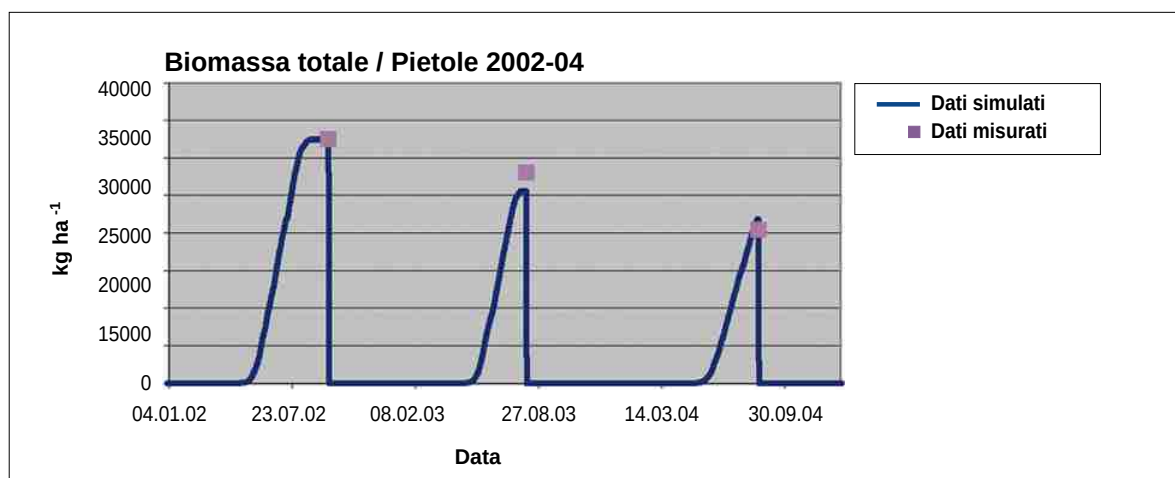


Figura 4.16 Confronto tra i dati simulati e misurati relativi alla biomassa totale alla raccolta nel sito di Pietole dal 2002 al 2004

Tabella 4.4 Dati misurati e simulati relativi alla biomassa totale (kg ha^{-1}) alla raccolta di diverse colture

Sito	Anno	Coltura	Biomassa totale alla raccolta	
			Misurati	Simulati
Caviaga	2002	Mais trinciato	22964	24782
	2003	Mais trinciato	15508	22133
	2004	Mais trinciato	18747	18089
	2005	Mais trinciato	18415	18368
	2006	Frumento tenero	15000	14273
Pietole 1	2002	Mais granella	32495	32457
	2003	Mais trinciato	28037	25611
	2004	Mais trinciato	20482	21853

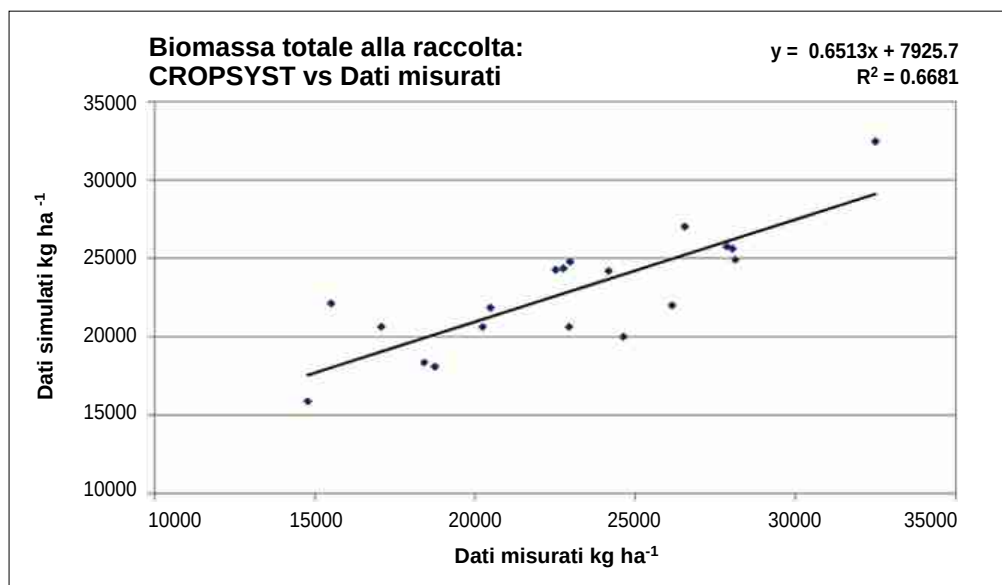


Figura 4.17 Confronto 1:1 tra i dati misurati e simulati relativi alla biomassa totale alla raccolta in tutti i siti

Tabella 4.5 Indici di fitting tra i dati simulati e misurati relativi alla biomassa totale alla raccolta per tutti i siti

Parametro	RRMSE	EF	CRM	R ²
Min	0.00	-inf.	-inf.	-inf.
Max	+inf.	1.00	+inf.	+inf.
Best	0.00	1.00	0.00	1.00
Biomassa totale kg ha ⁻¹	11.62	0.67	0.00	0.67

Il modello è riuscito a riprodurre l'elevato accumulo di biomassa registrato alla raccolta nel 2002 (oltre 32 t ha⁻¹ di biomassa totale) così come le produzioni notevolmente inferiori rilevate nel 2003: quanto emerso conferma la bontà dei parametri colturali utilizzati e quindi la robustezza della calibrazione.

Simulazione del LAI

I risultati della simulazione dell'andamento del LAI possono essere considerati buoni, anche alla luce del fatto che lo stesso dato misurato in campo (ottenuto registrando la lunghezza e la larghezza delle foglie di tre piante rappresentative ed elaborando i dati con il metodo proposto da Pellerin (2000) evidenzia una moderata variabilità.

Il LAI è stato sempre misurato alla fioritura del mais, durante la quale viene raggiunta la massima copertura fogliare; nel 2003 è stata effettuata una misura anche durante la fase di levata in modo tale da poter prevedere l'andamento dell'area fogliare durante la fase ascendente della curva.

Le simulazioni per il sito di **Caviaga** sono risultate parimenti adeguate nel biennio 2004-2005, mentre nel 2003 CropSyst ha sovrastimato i valori di LAI misurati in campo così come la biomassa totale.

Nel sito di **Pietole 1** CropSyst ha ottenuto un'eccellente performance sia nel 2003 che nel 2004, come è possibile osservare nella Figura 4.19.

Nella Tabella 4.6 sono riportati i dati misurati e simulati per tutti i siti, relativi sia alla fase di calibrazione che di validazione. Gli indici di fitting tra i dati osservati e quelli stimati sono riportati nella Tabella 4.7: l'RRMSE è risultato pari a 14.32% mentre il coefficiente di massa residua a -0.02: entrambi i valori sono decisamente accettabili considerando l'incertezza della misura sperimentale.

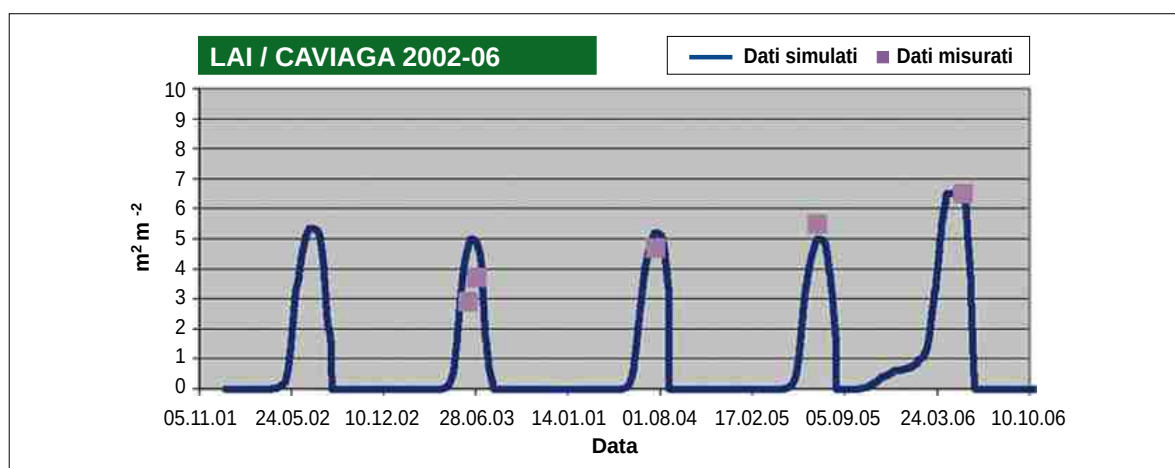


Figura 4.18 Confronto tra i dati di LAI misurati e simulati nel sito di Lodi dal 2002 al 2006

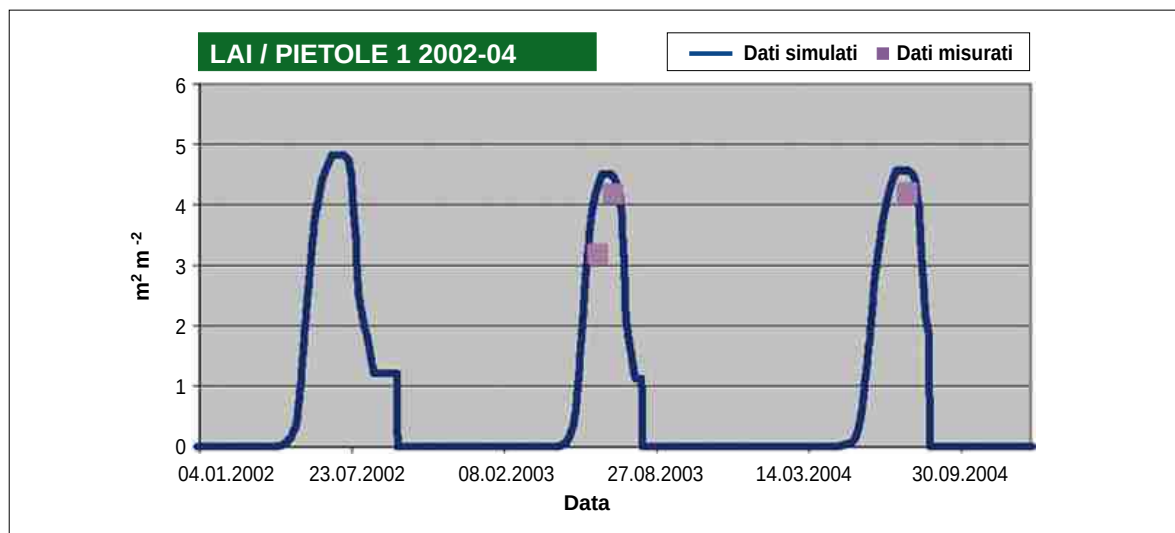


Figura 4.19 Confronto tra i dati di LAI misurati e simulati nel sito di Mantova dal 2002 al 2004

Tabella 4.6 Dati di LAI massimo simulati e misurati alla fioritura

Sito	Anno	Coltura	LAI massimo, alla fioritura	
			Misurati	Simulati
Caviaga	2003	Mais trinciato	3.70	4.82
	2004	Mais trinciato	4.69	5.18
	2005	Mais trinciato	5.48	4.99
	2006	Frumento tenero	6.50	6.50
Pietole 1	2003	Mais trinciato	4.19	4.47
	2004	Mais trinciato	4.19	4.57

Tabella 4.7 Indici di fitting tra i dati di LAI simulati e misurati (per tutti i siti)

Parametro	RRMSE	EF	CRM	R ²
Min	0.00	-inf.	-inf.	-inf.
Max	+inf.	1.00	+inf.	+inf.
Best	0.00	1.00	0.00	1.00
LAI m ² m ⁻²	14.35	0.09	-0.02	0.12

Simulazione dell'assorbimento di azoto da parte della coltura

La simulazione dell'assorbimento di azoto da parte della coltura è fondamentale per poter valutare la quota di azoto prelevata dal suolo e quindi non soggetta a perdite dovute alla lisciviazione.

Nel grafico di Figura 4.20 è possibile osservare il confronto tra i dati simulati e misurati per il sito **Caviaga** (Lodi); il modello ha sovrastimato i dati reali nel 2002 e soprattutto nel 2003, mentre ha riprodotto in modo ottimale l'uptake di azoto nel 2004 e nel 2005.

A **Pietole 1** (Figura 4.21) una buona riproduzione dei dati misurati è stata ottenuta nel biennio 2002-2003 (nel 2002 la coltura ha assorbito 425 kg N ha⁻¹), mentre si evidenzia una elevata sovrastima del modello nel 2004.

Appare tuttavia discutibile il dato sperimentale dell'uptake di azoto: è poco probabile che la coltura abbia assorbito quasi 100 kg N ha⁻¹ in meno rispetto all'anno precedente e ben 227 kg N ha⁻¹ in meno rispetto al 2002, pur mantenendo livelli produttivi paragonabili.

In Figura 4.22 è possibile osservare il confronto 1:1 tra i dati misurati e i dati simulati di azoto assorbito: il coefficiente di regressione è risultato pari a 0.6 ed è in linea con quanto ottenuto da Bellocchi (2002) con CropSyst applicato in scenari maidicoli con differenti tecniche di gestione.

Come è possibile osservare in Tabella 4.9, l'RRMSE è risultato pari al 16.8%, l'efficienza di modellazione uguale a 0.57% ed il coefficiente di massa residua quasi prossimo a zero (-0.04%), indice che comprovano l'idoneità dell'approccio di CropSyst nel determinare l'uptake di azoto da parte delle colture.

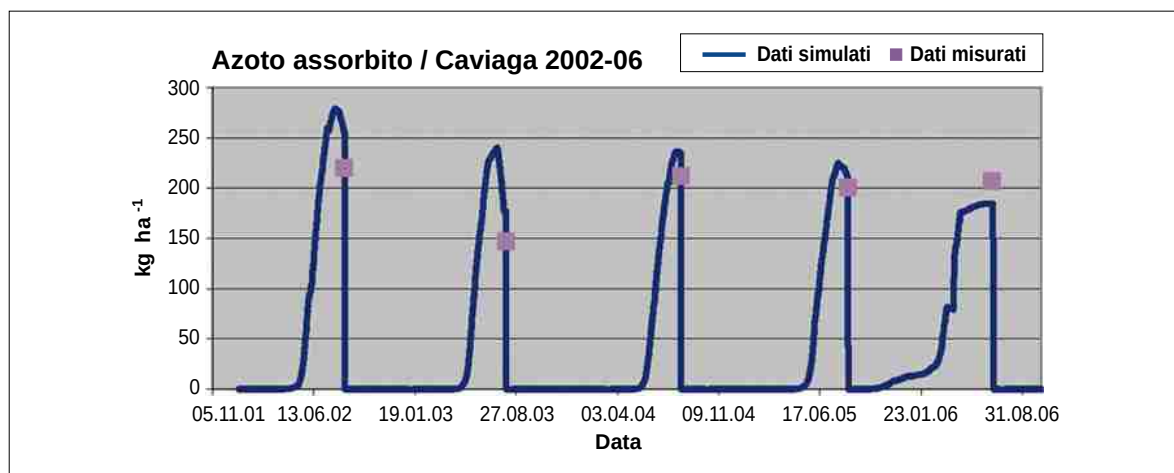


Figura 4.20 Confronto tra i dati di azoto assorbito dalla coltura, simulati e misurati, a Caviaga (Lodi) dal 2002 al 2006

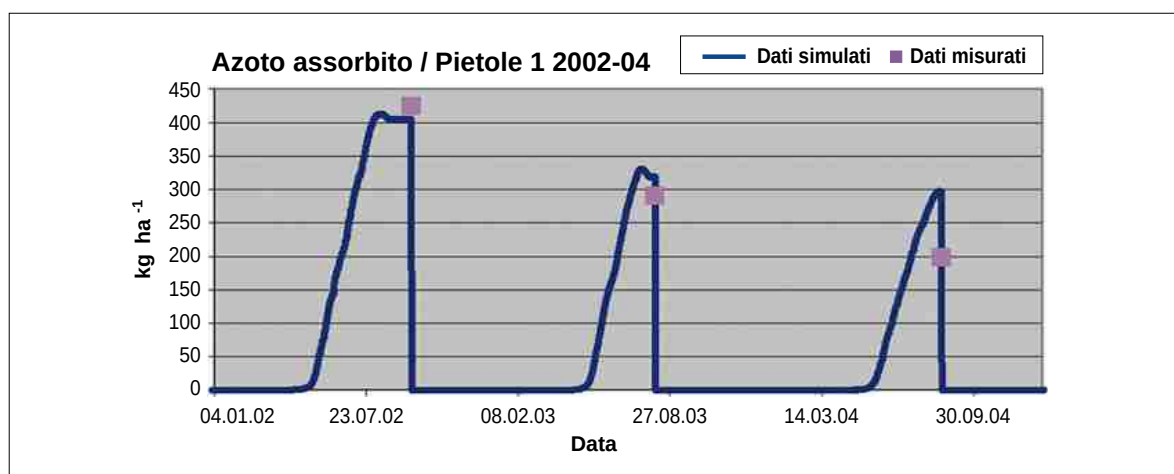


Figura 4.21 Confronto tra i dati di azoto assorbito dalla coltura, simulati e misurati, a Pietole 1 (Mantova) dal 2002 al 2004

Tabella 4.8 Dati simulati e misurati di azoto assorbito alla raccolta nei diversi siti

Sito	Anno	Coltura	Azoto assorbito alla raccolta	
			Misurati	Simulati
Caviaga	2002	Mais trinciato	220	255
	2003	Mais trinciato	147	177
	2004	Mais trinciato	212	235
	2005	Mais trinciato	201	211
	2006	Frumento tenero	207	184
Pietole 1	2002	Mais granella	425	405
	2003	Mais trinciato	290	319
	2004	Mais trinciato	198	297

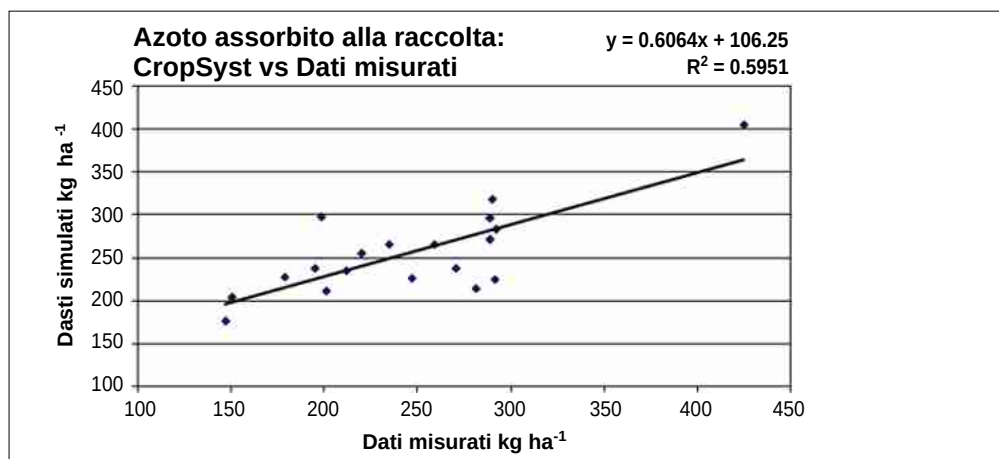


Figura 4.22 Confronto 1:1 tra i dati di azoto assorbito dalla coltura, misurati e simulati, per i diversi siti

Tabella 4.9 Indici di fitting tra i dati misurati e simulati relativi all'azoto assorbito dalle colture nei diversi siti

Parametro	RRMSE	EF	CRM	R ²
Min	0.00	-inf.	-inf.	-inf.
Max	+inf.	1.00	+inf.	+inf.
Best	0.00	1.00	0.00	1.00
Azoto assorbito kg ha ⁻¹	16.83	0.57	-0.04	0.60

Simulazione dell'andamento dell'azoto nitrico nel suolo: CropSyst vs ARMOSA
La performance dei modelli CropSyst e **ARMOSA** nella simulazione del bilancio dell'azoto nel suolo è stata valutata confrontando le concentrazioni di azoto nitrico ed ammoniacale simulate e quelle misurate nei campioni di terreno e nella soluzione circolante prelevati nei siti sperimentali.

Il modello CropSyst, già validato per la capacità di simulazione dei processi di crescita colturale e per le dinamiche dell'acqua nel suolo, è stato ulteriormente calibrato per la migliore simulazione del bilancio dell'azoto nel suolo.

Per la calibrazione (fase di ottimizzazione del modello in funzione delle variabili locali), in entrambi i modelli, il tasso di mineralizzazione della sostanza organica stabile è stato ottimizzato tenendo conto della tessitura e del rapporto C/N del suolo in accordo con quanto suggerito in bibliografia (disciplinare di produzione integrata Emilia Romagna 2005).

I parametri che nei due modelli regolano la denitrificazione sono stati messi a punto sulla base dei valori di azoto denitrificato (da 1 a 4 kg N-N₂O ha⁻¹ anno⁻¹ persi per denitrificazione) rilevati da Arcara et al. (1999) in una sperimentazione eseguita su mais concimato con effluenti di allevamento e concimi chimici distribuiti in quantità simile a quella dei siti **ARMOSA**. Il tasso di riferimento per la nitrificazione è stato calibrato in modo tale che il modello riproducesse nel miglior modo possibile l'andamento dell'azoto nitrico del suolo.

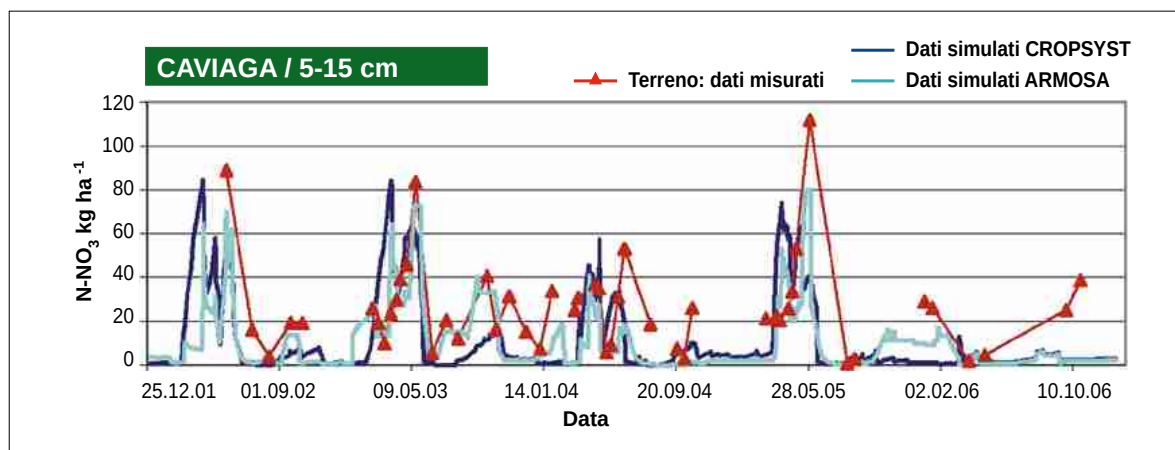


Figura 4.23 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Caviaga, prelevato ad una profondità compresa tra 5 e 15 cm

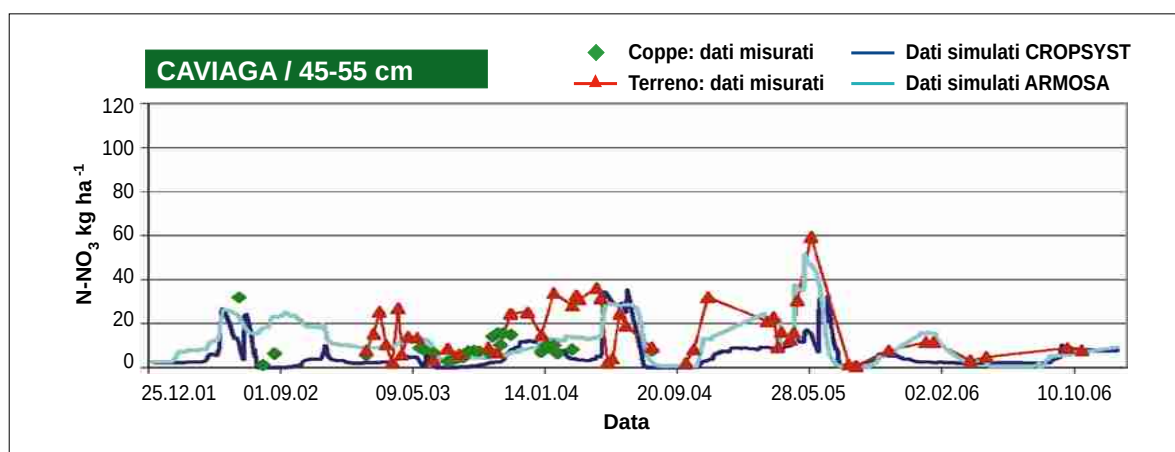


Figura 4.24 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Caviaga, prelevato ad una profondità compresa tra 45 e 55 cm

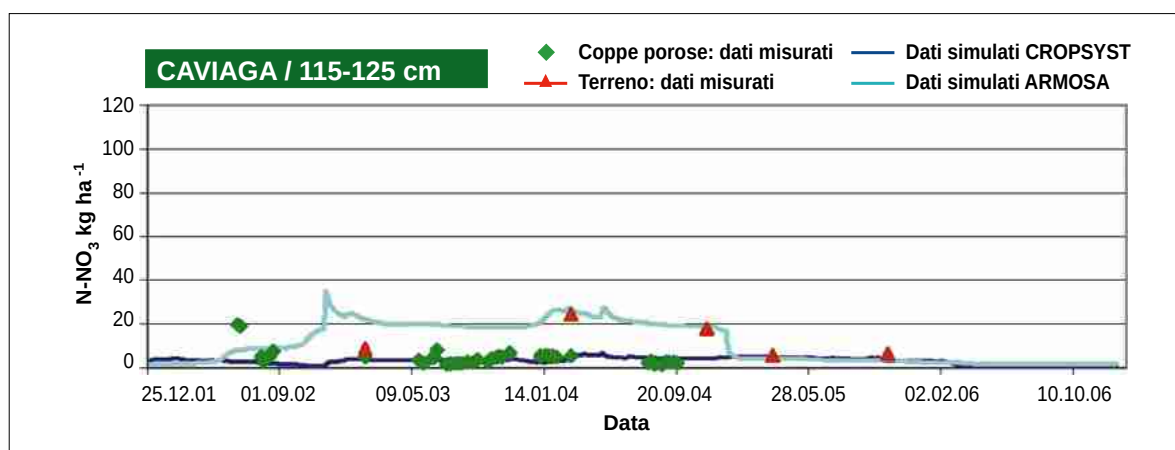


Figura 4.25 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Caviaga, prelevato ad una profondità compresa tra 115 e 125 cm

Le perdite di ammoniaca per volatilizzazione sono state calcolate dal modello sulla base della modalità di applicazione del concime (interrato o distribuito in superficie, ecc.), del pH e della capacità di scambio cationico dello strato superficiale del suolo. Infine il tasso di decomposizione della sostanza organica labile (sommministrata con le fertilizzazioni con sostanza organica) è stato calcolato dal modello sulla base della tipologia di effluente d'allevamento distribuito, tranne nel caso dei fanghi di depurazione distribuiti a Lodi per i quali si è fatto riferimento a quanto riportato in letteratura (Beraud et al., 2005).

Osservando i grafici sotto riportati è possibile notare come CropSyst abbia simulato discretamente l'andamento dell'azoto nitrico misurato a Caviaga.

Il modello ha riprodotto quasi tutti i picchi misurati in campo dal 2002 al 2006, anche se è emersa la tendenza ad anticipare gli innalzamenti del contenuto di azoto nitrico che seguono le concimazioni o dovuti alla mineralizzazione e alla successiva nitrificazione della sostanza organica.

Negli strati superficiali CropSyst ha lievemente sottostimato i dati misurati mentre in profondità ha riprodotto molto bene il contenuto di azoto nitrico misurato con le coppe porose.

Il modello **ARMOSA** è stato in grado, invece, negli strati superficiali di simulare i picchi di contenuto di nitrati in ottima sincronia con quanto misurato, come visibile in Figura 4.23; inoltre, a profondità intermedie ha riprodotto picchi di azoto nel suolo misurati, ma non simulati da CropSyst.

Per le profondità più elevate si è riscontrata un'ampia variabilità tra i dati di concentrazione di nitrati ottenuti da campioni di terreno e da campioni di soluzione circolante. Il modello **ARMOSA** ha riprodotto correttamente i primi, sovrastimando invece i contenuti rispetto alle coppe porose. Tuttavia, data la concentrazione di nitrati sempre molto bassa negli orizzonti profondi di questo sito, tali differenze sono poco rilevanti e nell'ambito dell'errore sperimentale.

Sito di Pietole 1

Nel triennio 2002-04 CropSyst ha simulato accuratamente l'andamento dell'azoto nitrato misurato in campo, lungo tutto il profilo del suolo. Solo alle profondità più elevate la qualità della simulazione è leggermente diminuita.

La ragione di ciò è da attribuirsi alla componente idrologica di CropSyst, che presenta qualche criticità nella gestione delle condizioni di contorno alla base del profilo.

Il modello **ARMOSA** ha avuto nel complesso prestazioni superiori al modello CropSyst, soprattutto per le profondità più elevate che risultano quelle dove è richiesta la miglior capacità predittiva dei contenuti di azoto per una corretta stima della lisciviazione, come evidente dalla Fig. 4.28 e ancor più dalla Fig. 4.29.

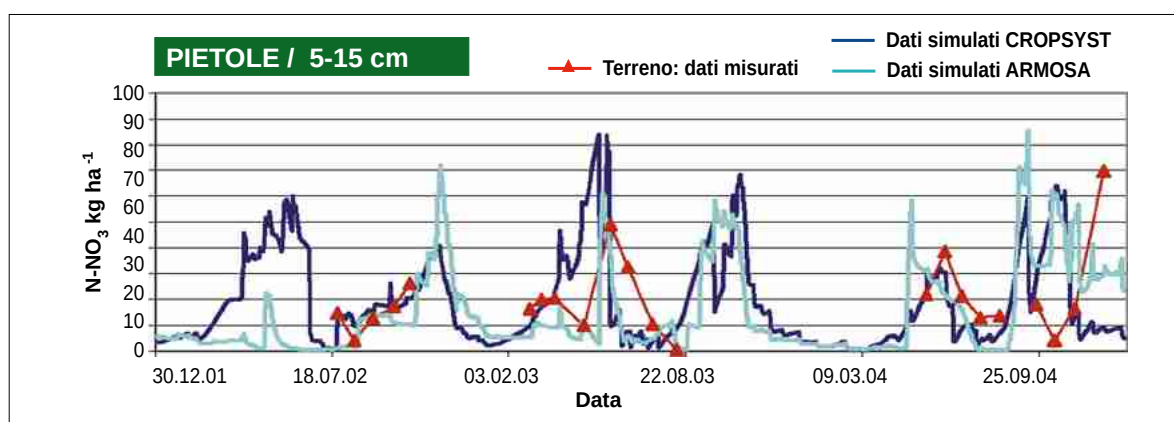


Figura 4.26 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Pietole 1, prelevato ad una profondità compresa tra 5 e 15 cm

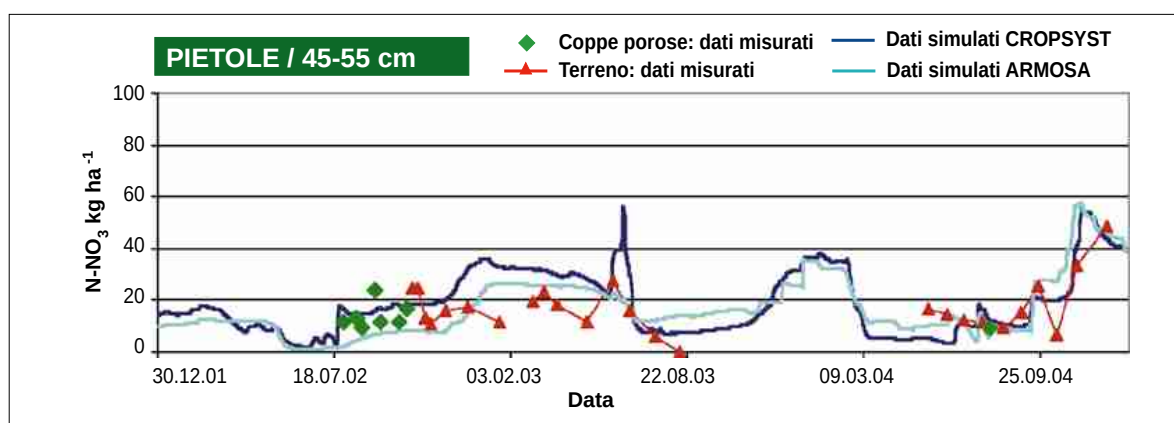


Figura 4.27 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Pietole 1, prelevato ad una profondità compresa tra 45 e 55 cm

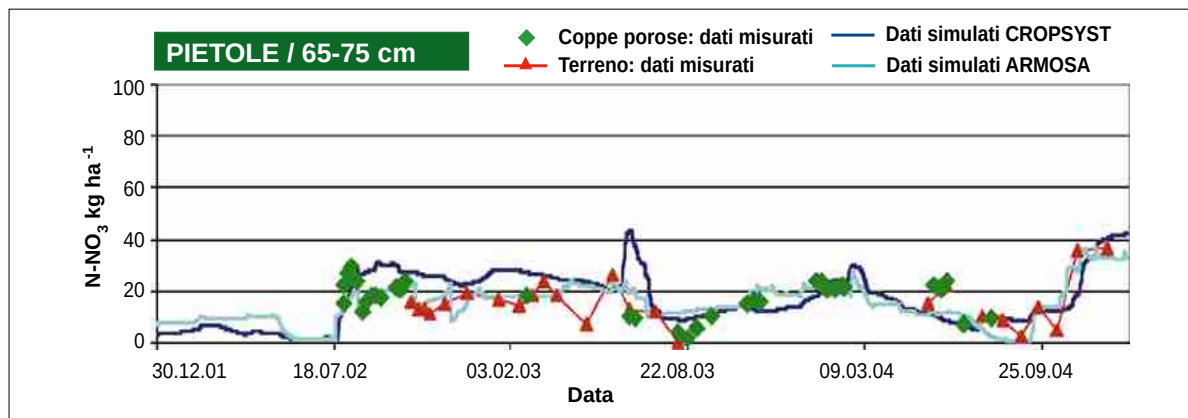


Figura 4.28 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Pietole 1, prelevato ad una profondità compresa tra 65 e 75 cm

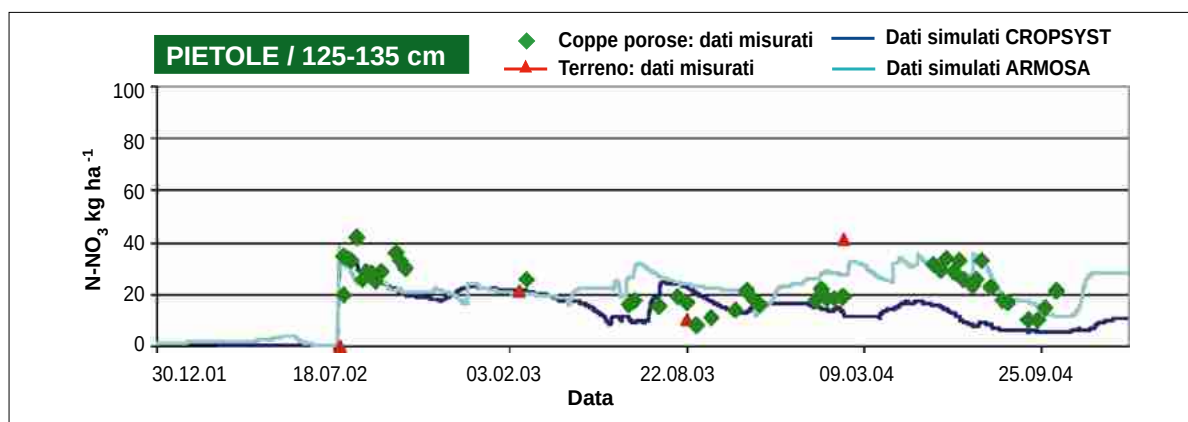


Figura 4.29 Confronto tra dati simulati, dai modelli CropSyst e Armosa, e misurati di N-NO_3^- nel terreno del sito di Pietole 1, prelevato ad una profondità compresa tra 125 e 135 cm

Indici e grafici di confronto fra misure e simulazioni

Nelle seguenti figure sono riportati i confronti 1:1 tra i dati simulati dal modello **ARMOSA** e quelli misurati complessivamente per i due siti di **Caviaga** e **Pietole 1**. In Tabella 4.10 sono riportati gli indici di valutazione di qualità delle simulazioni, anche per il modello CropSyst.

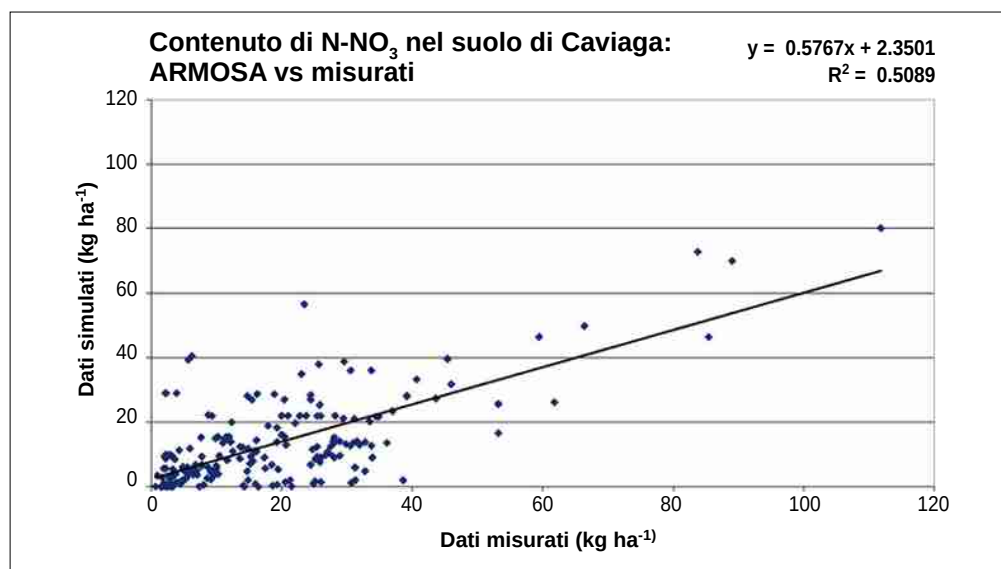


Figura 4.30 Grafico 1:1 tra i valori misurati di azoto nitrico con le coppe porose e quelli simulati dal modello Armosa, per tutte le profondità, a Caviaga

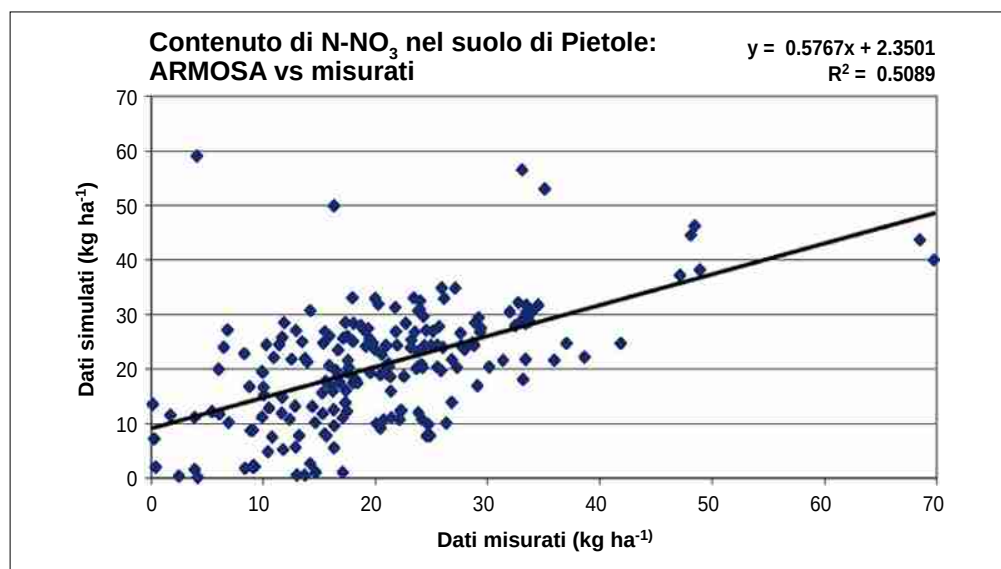


Figura 4.31 Grafico 1:1 tra i valori misurati di azoto nitrico con le coppe porose e quelli simulati dal modello Armosa, per tutte le profondità, a Pietole 1

Tabella 4.10 Indici di valutazione quantitativa dei modelli

Parametro	RRMSE	EF	CRM	R ²
Min	0.00	-inf.	-inf.	-inf.
Max	+inf.	1.00	+inf.	+inf.
Valore ottimale	0.00	1.00	0.00	1.00
Confronto contenuto N-NO₃ kg ha⁻¹				
Caviaga: CropSyst vs dati misurati	97.17	-0.05	0.41	0.27
Caviaga: ARMOSA vs dati misurati	70.72	0.39	0.30	0.51
Pietole 1: CropSyst vs dati misurati	58.71	-0.32	-0.01	0.15
Pietole 1: ARMOSA vs dati misurati	48.28	0.11	0.09	0.31

La grande variabilità sperimentale del dato di nitrato nel suolo, insieme al problema di sincronizzare i picchi di nitrato misurati e simulati, rendono in generale basse le valutazioni qualitative dei modelli che tentano di predire questo dato a scala giornaliera. La qualità delle simulazioni appaiono, ad esempio, migliori di quelle ottenute con solo 31 dati da Blombäck et al. (1995).

La qualità delle predizioni appare nettamente migliore per il modello **ARMOSA**, rispetto a CropSyst: infatti il primo ha sempre efficienza di modellazione positiva, mentre per CropSyst l'EF risulta sempre negativo.

Anche in termini di coefficiente di determinazione (R²), e di errore quadratico medio espresso in % rispetto alla media dei dati misurati (RRMSE) il modello **ARMOSA** offre simulazioni migliori.

Solo in termini di CRM (indica quanto è ampia la differenza tra la media dei dati simulati e misurati) e solo a **Pietole 1**, CropSyst risulta migliore di **ARMOSA**; è da rilevare che però per entrambi i modelli i valori assunti dall'indice sono decisamente favorevoli e indice di buona simulazione.

Non del tutto soddisfacente è comunque il valore dell'inclinazione della retta di regressione tra dati simulati e osservati, che in entrambi i siti assume valori appena inferiori a 0,6, indicando che i modelli non sono in grado di seguire al meglio i picchi di azoto misurati.

4.4 Stima della lisciviazione

4.4.1 Metodo Lord e Shepherd

Di seguito sono presentati grafici riguardanti la lisciviazione dei nitrati stimata seguendo l'approccio proposto da Lord e Shepherd (1993). Tale approccio risulta applicabile solo in siti ove la falda è sempre a profondità maggiori di quelle raggiunte dalle radici, pertanto i siti del mantovano sono stati esclusi.

Non sono stati presi in considerazione nemmeno quelli per cui non erano disponibili sufficienti prelievi di suolo a profondità elevate (> di 1 m).

Il valore della perdita di nitrato è calcolato come integrale della curva che mette in relazione la concentrazione di N-NO_3 (misurata nella soluzione circolante prelevata alla massima profondità raggiunta dalle coppe porose) e il drenaggio cumulado, derivato dalla simulazione del bilancio idrico utilizzando il modello di riferimento per l'idrologia del suolo SWAP.

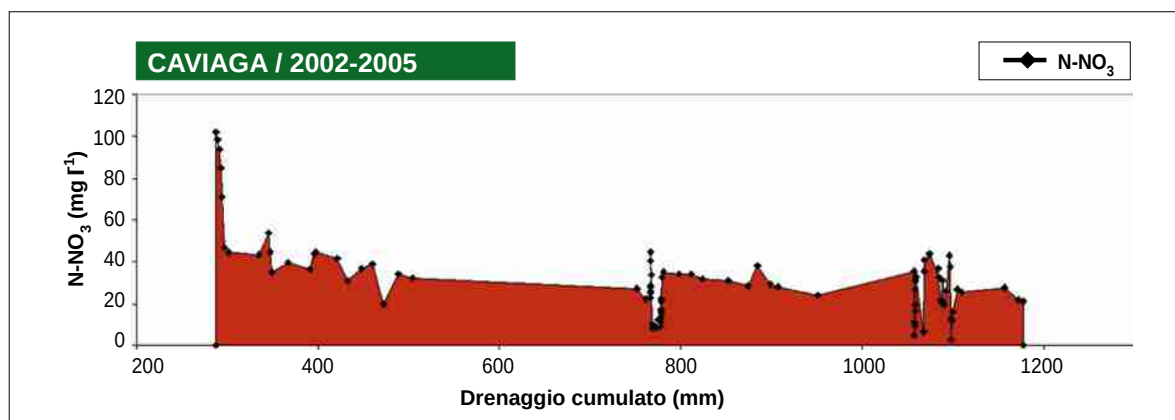


Figura 4.32 Calcolo del N-NO_3 lisciviato con il metodo dell'integrale (ESA), dal 2002 al 2005 nel sito di Caviaga

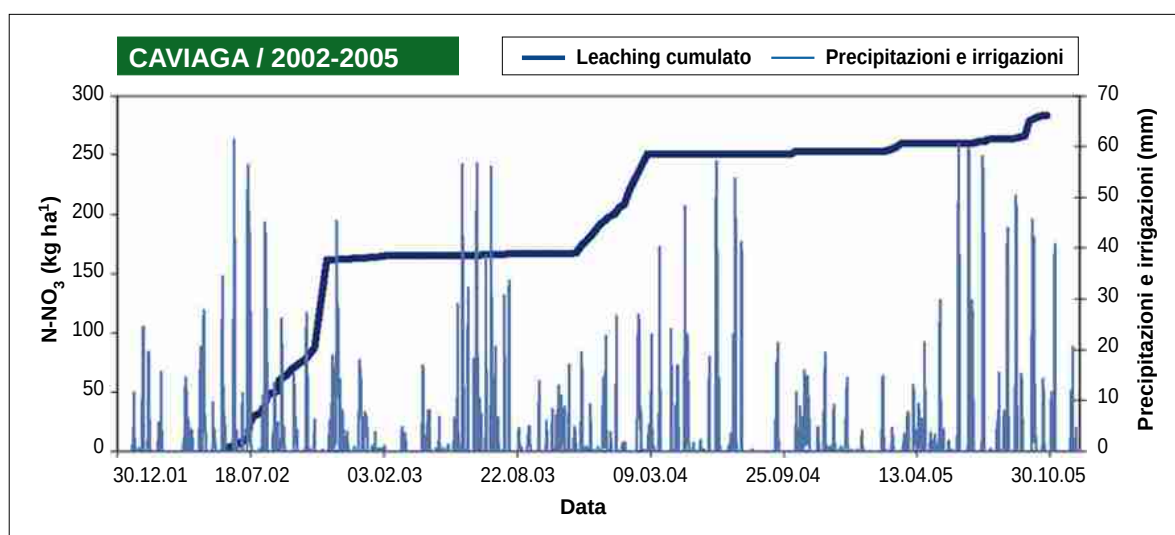


Figura 4.33 Andamento del leaching cumulado dal 2002 al 2005 nel sito di Caviaga. Nel grafico sono evidenziati inoltre i volumi idrici in ingresso nel suolo nello stesso periodo

Come è possibile notare in Figura 4.33, l'evento di lisciviazione più rilevante si è verificato nei mesi autunnali del 2002, in cui è stata stimata una perdita di circa 80 kg N ha^{-1} , in seguito ad un periodo caratterizzato da eventi piovosi intensi e mancanza di copertura del suolo (mais raccolto in agosto).

Durante il ciclo vegetativo della coltura non sono stati stimati eventi di leaching nonostante siano state effettuate irrigazioni nei periodi prossimi alla fioritura ed al riempimento delle cariossidi. Una spiegazione può riguardare l'elevata richiesta nitrica da parte della pianta e il conseguente assorbimento del nitrato presente nel suolo. La quantità di nitrato lisciviato da giugno 2002 a ottobre 2005 (1249 giorni) è risultata pari a 284 kg N ha^{-1} .

Questo valore è risultato superiore al valore proposto da Acutis et al. (2000) per un suolo franco sabbioso, irriguo e coltivato a mais da trinciato al quale sono apportati 200 kg N ha^{-1} .

4.4.2 Stima della lisciviazione con i modelli

La lisciviazione, oltre che con il metodo basato sui dati misurati delle coppe porose, è stata stimata anche con i modelli CropSyst e **ARMOSA** (che per i processi di trasporto dell'azoto utilizza algoritmi derivati da SOILN).

In Figura 4.34 è possibile osservare come nel sito di **Caviaga**, negli anni dal 2002 al 2006, i principali eventi di lisciviazione dell'azoto avvengano nei mesi in cui la coltura è assente o nei primi stadi di sviluppo.

In termini di frequenza degli eventi di lisciviazione i due modelli hanno mostrato comportamenti sostanzialmente simili, simulando eventi di lisciviazione di importanza rilevante nei mesi estivi del 2003 e del 2004; in particolare, si sono verificati alcuni episodi di lisciviazione favoriti probabilmente dalla concimazione organica eseguita nell'autunno del 2002 (203 kg N ha^{-1}).

A **Caviaga** le perdite di azoto per lisciviazione non sono risultate molto elevate (in media 50 kg N ha^{-1} all'anno); verosimilmente le tecniche di lavorazione conservative (minima lavorazione) riducono il drenaggio e di conseguenza la lisciviazione dell'azoto. Inoltre le quantità di azoto somministrate con i fertilizzanti sono solo poco superiori rispetto alle asportazioni colturali.

Una strategia per ridurre ulteriormente la lisciviazione, che il modello simula nella stagione in cui il suolo rimane nudo, potrebbe consistere nell'adozione di "cover crops" autunno-vernine in grado di "catturare" l'azoto che si rende disponibile dopo la raccolta del mais da trinciato soprattutto in settembre-ottobre, mesi in cui le temperature ancora abbastanza elevate e la mancanza della coltura favoriscono la mineralizzazione della sostanza organica e la conseguente nitrificazione.

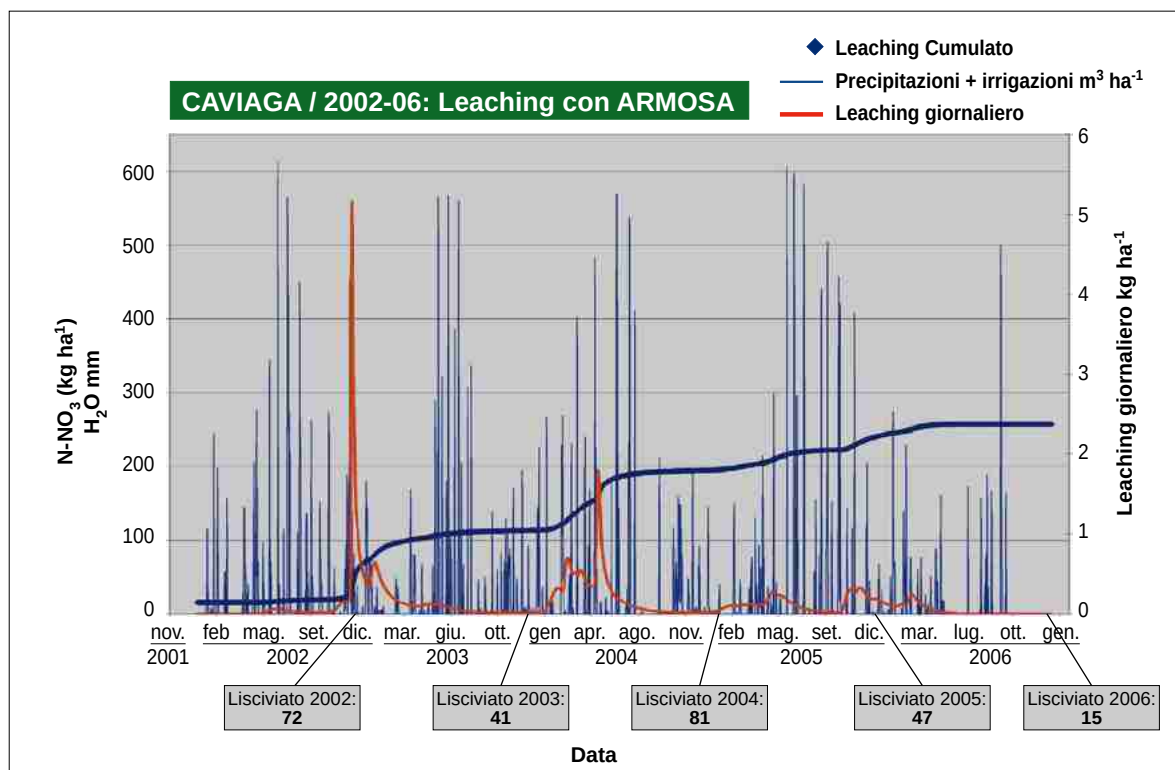


Figura 4.34 Simulazione del leaching cumulato e giornaliero con ARMOSA

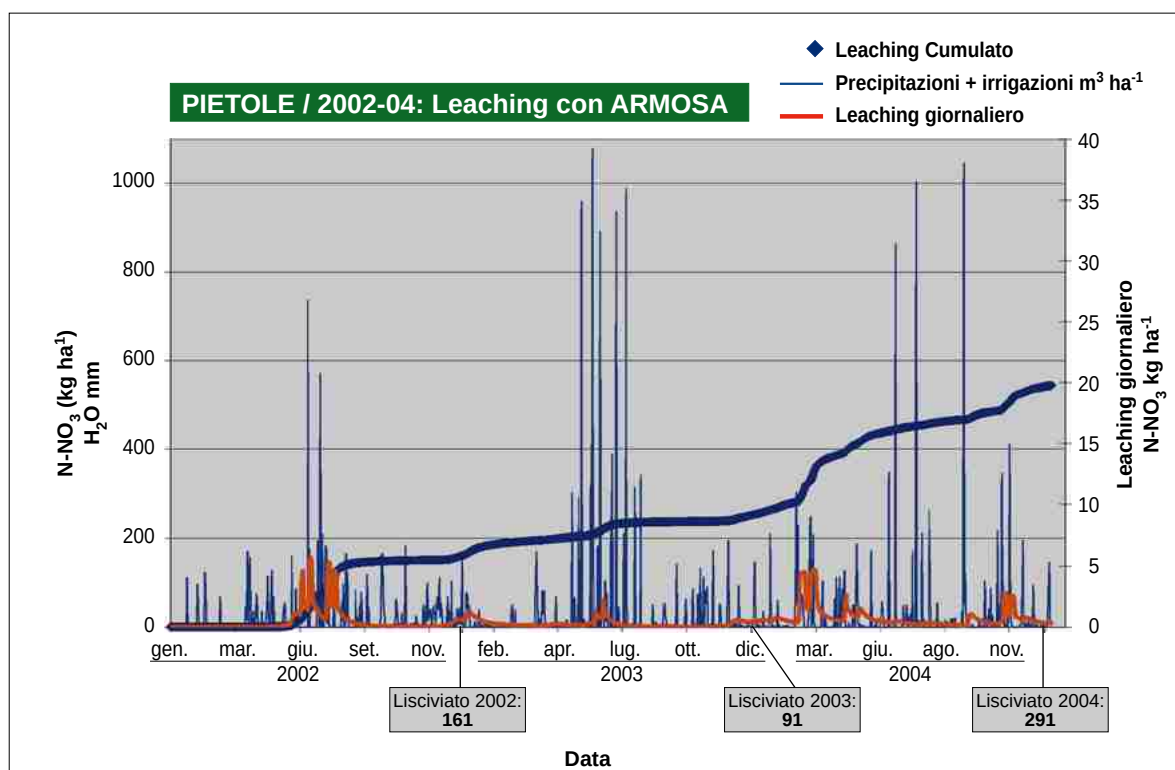


Figura 4.35 Simulazione del leaching cumulato e giornaliero con ARMOSA per il sito di Pietole 1

Nel sito di **Pietole 1**, nel triennio 2002-2004, si sono verificati numerosi eventi di lisciviazione soprattutto durante i mesi estivi ed autunnali. Le perdite maggiori avvengono dopo piogge o irrigazioni abbondanti ed anche in concomitanza della presenza della coltura, periodo nel quale sono distribuite elevate quantità di concime e in cui l'aumento delle temperature permette la mineralizzazione degli effluenti d'allevamento somministrati in elevate quantità durante l'autunno precedente.

La lisciviazione prevista dal modello è in media di 181 kg N ha^{-1} all'anno: tale valore è molto elevato ed è probabilmente dovuto alle ingenti quantità di effluenti d'allevamento somministrati nel sito sperimentale ogni anno dopo la raccolta del mais.

Entrambi i metodi hanno consentito di evidenziare la presenza di eventi di lisciviazione, chiaramente legati in modo molto stretto con irrigazioni e precipitazioni. In generale si evidenzia la criticità laddove si hanno suoli permeabili, che favoriscono il drenaggio dell'acqua (suoli sabbiosi e/o ad elevato contenuto in scheletro), gestiti con tecniche tradizionali che prevedono l'uso abbinato di concimazioni minerali e di effluenti d'allevamento e di irrigazione a scorrimento; solo nel caso del sito di **Caviaga** le perdite di azoto restano contenute (pur avendo elevati volumi di drenaggio di acqua), ma ovviamente questo è dovuto alle specifiche pratiche conservative adottate nel sito sperimentale e che, come dimostrato, comportano comunque minori produzioni, la cui sostenibilità deve essere attentamente valutata.

Parimenti in siti sperimentali caratterizzati da suoli a maggior capacità protettiva verso le acque sotterranee, si sono evidenziate minori perdite di azoto per lisciviazione, anche se elevati carichi di effluenti d'allevamento associati inoltre ad apporti minerali, andando a superare di molto le reali esigenze colturali, causano, anche in queste condizioni pedoambientali, importanti perdite di azoto per lisciviazione.

Infine i dati sperimentali e le simulazioni modellistiche confermano l'importanza di adottare rotazioni del tipo *loiessa-mais*, evidenziando, per queste condizioni, perdite particolarmente contenute di azoto lisciviato.



5

Scenari applicativi

5.1 Confronto tra itinerari tecnici differenti

Il modello **ARMOSA** integra buone capacità predittive sia per le produzioni che per le dinamiche dell'acqua e dell'azoto nel suolo, offrendo quindi la possibilità di valutare possibili alternative gestionali per la messa a punto di sistemi colturali sostenibili e adatti alle diverse condizioni pedoclimatiche.

Viene qui proposta, a titolo esemplificativo, un'analisi finalizzata all'ottimizzazione della fertilizzazione. L'esempio è condotto con riferimento ai siti di **Caviaga** e **Pietole 1**, per i quali sono stati raccolti nel corso del progetto il maggior numero di dati.

Caviaga

Nell'avvicendamento colturale preso in considerazione in questo esempio a quattro anni di mais da trinciato segue un anno di frumento. Il mais è gestito con tecniche di minima lavorazione e il frumento è seminato su sodo; nella concimazione delle colture si fa ricorso a fanghi di depurazione urbana.

Le rese produttive registrate con l'itinerario A, peraltro corrispondente a quanto effettivamente attuato in azienda, sono inferiori rispetto a quelle medie dell'areale pedoclimatico in cui si localizza il sito; ciò è dovuto alle specifiche tecniche di lavorazione e gestione adottate, che privilegiano il risparmio energetico ed economico rispetto alla produttività.

La lisciviazione di azoto, con questo itinerario, appare decisamente contenuta se paragonata con i valori standard tipici per il mais in Lombardia. Si è pertanto voluto valutare, attraverso il modello **ARMOSA**, quelle che sarebbero le possibili ripercussioni di un cambio gestionale (itinerario B), finalizzato a incrementare le rese attraverso l'integrazione della distribuzione di effluenti d'allevamento con la concimazione chimica, nei confronti di produzione e sostenibilità ambientale.



Il piano di fertilizzazione nell'itinerario A (Tab. 5.1) prevede l'apporto di quantitativi limitati di azoto da concime attraverso interventi localizzati alla semina, con l'eccezione del 2002 che da questo punto di vista è anomalo (apporti di 330 kg ha⁻¹ anno⁻¹ al mais contro una media di 260 kg ha⁻¹ nei tre anni successivi). I nuovi livelli di concimazione minerale ipotizzati nell'itinerario B sono stati derivati sulla base di un piano teorico di concimazione specificatamente riferito all'areale in esame (Grignani et al., 2003): la concimazione totale con azoto aumenta (ad eccezione del 2002 in cui diminuisce e del 2004 in cui resta sostanzialmente invariata), al fine di allinearsi alle esigenze stimate previste per il mais, passando da un valore medio di circa 278 a 290 kg ha⁻¹ anno⁻¹ per il mais, mentre per il frumento l'apporto è stato lievemente innalzato (fino a 185 kg ha⁻¹) al fine di migliorare le apparentemente limitate produzioni. Considerando, infine, la rotazione aziendale nel suo complesso, la concimazione minerale annuale è stata incrementata in media del 14%, passando da 75 a 85 kg ha⁻¹ (nei 5 anni).

Tabella 5.1 Utilizzo di effluenti d'allevamento e concimazioni minerali degli itinerari tecnici A e B relativi al sito di Caviaga

CAVIAGA							
Anno	Coltura	Itinerario A			Itinerario B		
		Utilizzo effluenti d'allevamento kg N ha ⁻¹	Concimazione minerale kg N ha ⁻¹	Totale A kg N ha ⁻¹	Utilizzo effluenti d'allevamento kg N ha ⁻¹	Concimazione minerale kg N ha ⁻¹	Totale A kg N ha ⁻¹
2002	Mais trinciato	203	133	336	203	80	283
2003	Mais trinciato	216	27	243	216	60	276
2004	Mais trinciato	274	33	307	274	40	314
2005	Mais trinciato	218	11	229	218	60	278
2006	Frumento	0	170	170	0	185	185

Tabella 5.2 Biomassa aerea prodotta e azoto nitrico lisciviato simulati con il modello ARMOSA per gli itinerari tecnici A e B nel sito di Caviaga

CAVIAGA							
Anno	Coltura	Biomassa aerea alla raccolta t ha ⁻¹		Variazione %	N-NO ₃ lisciviato kg ha ⁻¹		Variazione %
		IT. A	IT. B		IT. A	IT. B	
2002	Mais trinciato	24.8	21.8	-12	72.3	45.0	-38
2003	Mais trinciato	22.1	25.4	+15	41.2	32.5	-21
2004	Mais trinciato	18.1	20.1	+11	81.2	82.9	+2
2005	Mais trinciato	18.4	21.3	+16	47.2	54.4	+15
2006	Frumento	14.3	14.4	+1	15.3	19.3	+26

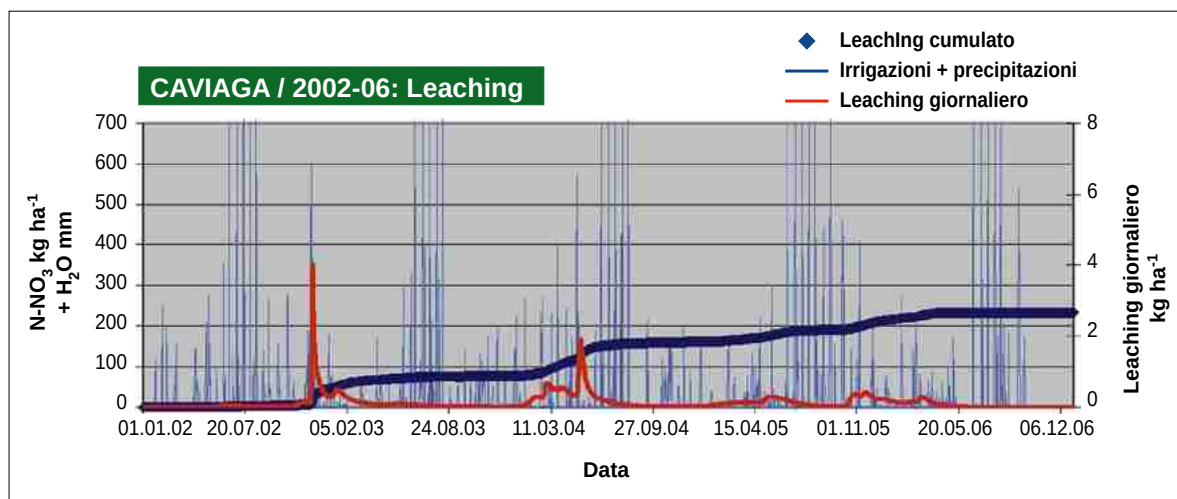


Figura 5.1 Simulazione del leaching cumulato e giornaliero con ARMOSA per il sito di Caviaga seguendo l'itinerario tecnico B. Nel grafico sono inseriti inoltre i volumi idrici in ingresso nel suolo nello stesso periodo

I risultati della applicazione del modello **ARMOSA** evidenziano (Tab 5.2) che con l'itinerario B:

- Si osserva un incremento medio del 14% della produzione per il mais (anni 2003-2005), con l'eccezione del 2002 in cui la riduzione della concimazione si accompagna ad una minore resa produttiva, che comunque si attesta sugli standard aziendali medi.
- Le perdite di azoto per lisciviazione si riducono significativamente nel 2002, come risultato della razionalizzazione della concimazione azotata, mentre negli anni successivi di coltivazione del mais si mantengono entro valori complessivamente limitati (56 kg N-NO₃ ha⁻¹ in media sul triennio).
- Nelle condizioni pedoclimatiche e gestionali del sito di **Caviaga**, le rese del mais potrebbero essere incrementate, mantenendo le perdite di nitrati entro valori limitati, mentre nel caso del frumento la lisciviazione sembrerebbe crescere in modo rilevante (+26%, pur rimanendo molto inferiore a quella del mais in valore assoluto), senza apprezzabili vantaggi produttivi.

I risultati presentati illustrano, naturalmente, solo una parte delle analisi rese possibili dal modello **ARMOSA**, con il quale, in questa situazione, potrebbero essere presi in considerazione altri potenziali itinerari tecnici, che razionalizzino ulteriormente la fertilizzazione o che prevedano, ad esempio, l'uso di cover crops, la maggiore presenza nell'avvicendamento di cereali autunno-vernini o, ancora, l'introduzione di colture prative.

Pietole 1

L'avvicendamento simulato nel sito di **Pietole** prevede un anno di mais da granella e due anni da trinciato. L'itinerario A è caratterizzato da elevati apporti azotati, sia da effluenti d'allevamento che da concimi minerali¹, che inducono una lisciviazione decisamente elevata, ma assicurano rese produttive alte e coerenti con le medie tipiche dell'areale.

Nella definizione di un itinerario tecnico alternativo (itinerario B) è stata considerata, in questo caso, l'ipotesi di eliminare del tutto gli apporti azotati minerali (pari in media a 220 kg ha⁻¹ nell'itinerario A) mantenendo inalterati quelli da effluenti d'allevamento (Tab. 5.3).

Tabella 5.3 Utilizzo di effluenti d'allevamento e concimazioni minerali degli itinerari tecnici A e B relativi al sito di Pietole 1

PIETOLE 1							
Anno	Coltura	Itinerario A			Itinerario B		
		Utilizzo effluenti d'allevamento kg N ha ⁻¹	Concimazione minerale kg N ha ⁻¹	Totale A kg N ha ⁻¹	Concimazione organica kg N ha ⁻¹	Concimazione minerale kg N ha ⁻¹	Totale A kg N ha ⁻¹
2002	Mais granella	357	46	403	357	0	357
2003	Mais trinciato	192	191	383	192	0	192
2004	Mais trinciato	732	212	944	732	0	732

I risultati dell'applicazione del modello **ARMOSA** confermano (Tab. 5.4) che con l'itinerario B:

- Le rese produttive resterebbero elevate (26,6 t ha⁻¹ di biomassa aerea) e non varierebbero significativamente, a conferma che, quando con gli effluenti d'allevamento vengono soddisfatte le esigenze delle colture, la concimazione minerale può essere superflua.
- L'azoto nitrico lisciviato diminuisce, come prevedibile, soprattutto quando gli apporti sono largamente sovrabbondanti (-40% nel 2004); le perdite stimate per l'avvicendamento rimangono comunque ancora elevate (da 80 a 160 kg ha⁻¹ anno⁻¹), a prova che la sola distribuzione di effluenti d'allevamento, anche con l'itinerario B, rimane maggiore rispetto alle reali esigenze del mais.
- Nelle condizioni pedoclimatiche del sito di **Pietole 1**, le alte produzioni si combinano con elevate asportazioni di azoto da parte del mais e sembrano essere compatibili anche con consistenti usi di effluenti d'allevamento, purché adeguatamente razionalizzati.

¹ Nell'esempio applicativo riferito al sito di Pietole, a titolo di verifica sperimentale delle risposte del modello quando vengono simulati carichi di azoto molto consistenti, è stato previsto, sia nell'itinerario A che nell'itinerario B, un apporto di concime molto elevato e, nel 2004, addirittura abbondantemente superiore a quella che è l'ordinarietà della pratica agricola anche nelle condizioni di agricoltura più intensiva.

Tabella 5.4 Variazione percentuale della produzione granellare e dell'azoto nitrico lisciviato simulata dal modello ARMOSA seguendo un itinerario tecnico (B)

PIETOLE 1							
Anno	Coltura	Biomassa aerea alla raccolta t ha ⁻¹		Variazione %	N-NO ₃ lisciviato kg ha ⁻¹		Variazione %
		IT. A	IT. B		IT. A	IT. B	
2002	Mais granella	32.5	32.4	0	161.4	158.7	-1.7
2003	Mais trinciato	25.6	25.6	0	91.1	84.0	-7.7
2004	Mais trinciato	21.9	21.8	0	290.6	173.3	-40.4

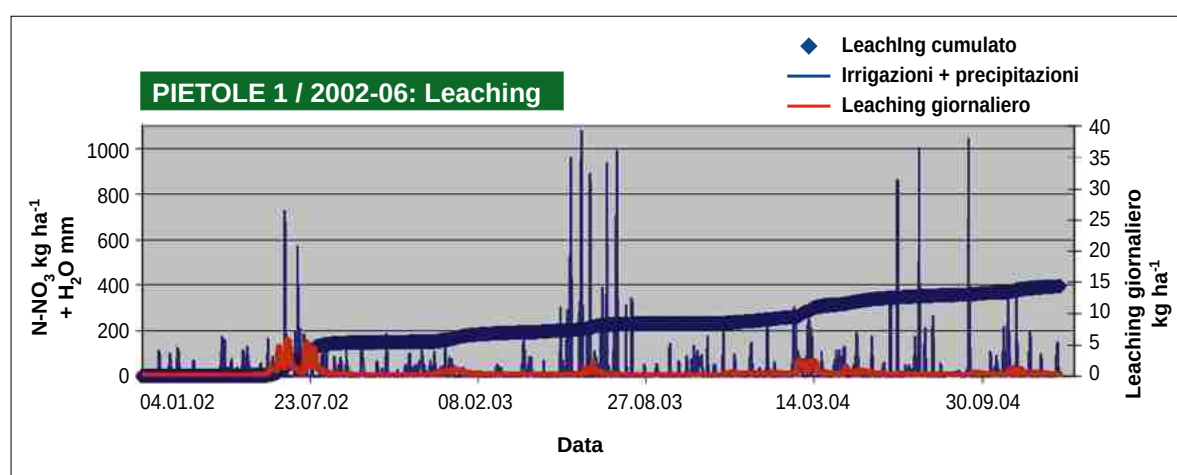


Figura 5.2 Simulazione del leaching cumulato e giornaliero con ARMOSA per il sito di Pietole 1 seguendo l'itinerario tecnico B. Nel grafico sono inseriti inoltre i volumi idrici in ingresso nel suolo nello stesso periodo

Date le finalità esemplificative degli esempi effettuati, tese ad evidenziare le potenzialità applicative del modello **ARMOSA**, i risultati della simulazione devono essere considerati, naturalmente, puramente indicativi e preliminari.

La valutazione degli itinerari proposti, tanto in termini di produttività che di impatto ambientale, richiederebbe pertanto, prima di poterne prendere in considerazione il trasferimento nella pratica, di essere completata da una più articolata e dettagliata analisi che, fra le altre, presupponga in particolare elaborazioni a scala temporale più estesa (al fine, ad esempio, di limitare effetti dovuti alle condizioni meteo-climatiche); inoltre, va ricordato che la concreta trasferibilità di itinerari tecnici alternativi nella pratica aziendale non può prescindere da considerazioni di carattere economico, di reale applicabilità e di possibili altre ripercussioni sul sistema suolo agrario, qui non considerate.

5.2 Esempi a scala comunale

Oltre che per confrontare itinerari tecnici differenti adottati in una determinata situazione pedoclimatica, il modello **ARMOSA** può essere utilizzato anche per effettuare stime a livello territoriale del carico di nitrati lisciviato dall'agricoltura. Nell'applicazione qui riportata, condotta per soli 5 comuni del lodigiano (Cornegliano Laudense, San Martino in strada, Massalengo, Ossago Lodigiano e Brembio), sono state, dato lo scopo esemplificativo della simulazione, adottate alcune semplificazioni:

- In tutti i comuni è stata ipotizzata, sulla base delle dichiarazioni SIARL, la presenza di prati polifita da vicenda di durata quadriennale sul 20% della SAU a seminativo;
- La restante superficie a seminativo è stata ipotizzata destinata alla coltivazione di mais da trinciato in presenza di suoli a granulometria più fine (franco - franco limosi) e relativamente meno permeabili o ad una rotazione di frumento e mais su suoli permeabili a granulometria più grossolana (franco-sabbiosi);
- È stata utilizzata una serie storica di dati meteorologici relativamente corta (2002-2006), relativa alla stazione situata presso il sito sperimentale di Caviaga;
- Il quantitativo di azoto al campo proveniente da effluenti di allevamento è stato stimato dai carichi relativi al singolo comune e derivati da dichiarazioni SIARL; si è assunto che gli effluenti prodotti nei 5 comuni venissero utilizzati interamente sulla SAU a seminativo dei comuni stessi e che gli eventuali fabbisogni rimanenti di azoto venissero coperti con concimi minerali;
- Relativamente alla fertilizzazione si è stabilito in modo univoco per l'intero territorio considerato:
 - a) Un apporto medio annuo di 300 kg di azoto per il Mais (sia trinciato che granella) coperto in parte con effluenti d'allevamento e in parte con concime minerale;
 - b) Un apporto azotato di 200 kg per il frumento, tutto sotto forma di concime minerale;
 - c) Un apporto variabile di azoto (da 134 a 227 kg/ha) per il prato polifita, esclusivamente da effluenti d'allevamento in dipendenza delle quantità di reflui disponibili;
- Si è infine considerato che tutte le pratiche colturali (lavorazioni, irrigazioni, ecc.) fossero condotte in modo uniforme e standardizzato sull'intera area.

In Tabella 5.5 sono riassunti i valori medi stimati con la simulazione di azoto nitrico lisciviato dai suoli, la cui superficie è destinata alla coltivazione degli arativi, presenti nei diversi comuni presi in esame.

Le perdite di azoto lisciviato maggiori sono state simulate nei comuni di Cornegliano e San Martino, caratterizzati da suoli considerevolmente più permeabili rispetto a Brembio, Ossago e Massalengo. Quest'ultimo risulta inoltre quello con minore lisciviazione a causa dei ridotti apporti di azoto organico.

E' importante sottolineare che la scelta di simulare itinerari gestionali con la presenza di cereali autunno-vernini e soprattutto prati polifita da vicenda (ipotesi dedotta dai dati SIARL, ma comunque non completamente rappresentativa di tutte le realtà aziendali presenti nell'area) ha determinato stime di perdite di azoto per lisciviazione non particolarmente elevate.

Le rotazioni di prato polifita determinano infatti, se considerate singolarmente, perdite di azoto molto contenute pari a 19 kg N ha⁻¹ per i comuni con prevalenza di suoli franco-argillosi e a 27 kg N ha⁻¹ per Cornegliano e San Martino, caratterizzati da suoli mediamente molto permeabili.

Ulteriori differenziazioni, non realizzate in questa analisi dimostrativa, ma facilmente integrabili, permetterebbero quindi di discriminare ancora più in dettaglio il risultato, individuando a livello aziendale le situazioni più critiche (o laddove gli interventi e le proposte di cambiamento gestionale possono apportare i maggiori benefici ambientali), in funzione di dati (SIARL annuale, uso del suolo, piani di concimazione, dati di monitoraggio, ecc.) sempre più aggiornati, facilmente gestibili ed integrabili con strumenti di pianificazione di provata affidabilità (modello **ARMOSA**).

Tabella 5.5 Stima modellistica dei valori medi di azoto nitrico lisciviato per l'intera SAU dei cinque comuni oggetto delle simulazioni con il modello ARMOSA

Stima di N-NO ₃ medio lisciviato per la superficie comunale destinata agli arativi (kg ha ⁻¹ anno ⁻¹)					
Anno	Brembio	Cornegliano Laudense	Massalengo	Ossago Lodigiano	San Martino in Strada
2003	60	65	45	53	68
2004	94	114	73	89	109
2005	62	118	44	68	93
2006 *	57	73	39	48	67
Media quadriennale	68	93	50	65	84

* Le simulazioni relative al 2006 terminano il 30 settembre

Materiali e Metodi

1.1 Proprietà idrologiche: campionamento e metodi di misura

La determinazione delle proprietà idrauliche dei profili di suolo rappresentativi è stata effettuata, nella quasi totalità dei casi, mediante analisi sperimentali in laboratorio su campioni indisturbati prelevati in ognuno degli orizzonti pedologici riconosciuti; solo nel sito di Ghisalba, a causa della forte presenza di scheletro, si è scelto di adoperare tecniche di misura di campo.



Fig. 1 Campionamento

I campioni indisturbati sono stati raccolti in campionatori cilindrici di acciaio (fig. 1) del diametro di 8,6 cm e di altezza pari a 15 cm ed anche in campionatori di dimensioni più contenute (7 cm di diametro, 7 cm di altezza) avendo cura di evitare un eventuale compattamento, nonché evitando al massimo ogni sorta di eventuale disturbo, durante la fase di trasporto in laboratorio, che ne potesse compromettere la naturale strutturazione.

In laboratorio i campioni sono stati preparati per le prove, applicando una garza-filtro alla base (con maglia di dimensioni tali da non rappresentare un ostacolo ai flussi ma sufficiente

ad evitare la perdita di materiale) e misurando l'altezza del suolo campionato con un micrometro, mediando su vari punti di misura, ricavandone così il volume totale apparente del suolo campionato.

I campioni così preparati sono stati portati a condizioni di saturazione lentamente dal basso, per favorire la fuoriuscita dell'aria da tutti i pori, ponendoli su dischi perforati in una vasca contenente circa 3 cm d'acqua; il livello dell'acqua è stato progressivamente aumentato fino a raggiungere la sommità del campionatore.

La saturazione completa ha richiesto non meno di tre giorni in relazione alla diversa permeabilità dei campioni.

Raggiunta la saturazione è stato determinato il contenuto d'acqua θ_s con metodo gravimetrico ed il valore della

conducibilità idraulica alla saturazione, k_s , per mezzo di un permeametro (fig. 2) a carico variabile, riportato come ufficiale nel manuale dei Metodi di Analisi Fisica del Suolo (Rossi Pisa, 1997).



Fig. 2 Permeametro

Il campione viene immerso in acqua ed esternamente è mantenuto un carico costante, per mezzo di una elettrovalvola, ad una altezza superiore alla superficie del suolo.

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 di suolo sono state effettuate 3 repliche.



Fig. 3 Cassetta tensiometrica Stakman

I campioni di dimensioni minori sono stati utilizzati per la determinazione della relazione di ritenzione idrica secondo due metodi (Dane e Hopmans, 2002): il metodo della cassetta tensiometrica (fig. 3), o vasca Stakman, ed il metodo dell'apparato di pressione o camera di Richards (fig. 4).

Il principio su cui si basano sia le cassette tensiometriche che l'apparato a pressione è dato dal fatto che in un sistema trifase si determina un equilibrio tra le forze agenti sull'unità di massa d'acqua. Nelle operazioni di laboratorio, la pressione esterna imposta può essere positiva o negativa.

In ambo i casi il processo analitico prevede l'imposizione di una pressione esterna su un campione di suolo, previamente portato alla saturazione, fino a che non si sia verificata una condizione di equilibrio.

Per il metodo della cassetta tensiometrica i campioni di terreno saturi sono appoggiati in una cassetta riempita con uno strato di limo e caolino alla cui base viene imposta una depressione variabile da 0 a 1 metro tramite un regolatore di livello tipo bottiglia Mariotte e valori di tensione tra 1 metro e 4 metri tramite una pompa da vuoto.

Una volta impostata la tensione desiderata si attende, evitando l'evaporazione dalla vasca e dal campione, che il suolo si ponga in equilibrio con essa e successivamente si provvede alla determinazione del peso. Tale operazione viene ripetuta tante volte quanti punti della relazione $\theta(h)$ si vogliono ottenere per questo tratto di curva (in genere da 7 a 10 punti).

Il raggiungimento dell'equilibrio si determina con pesate cadenzate di campioni di riferimento scelti tra quelli in prova. La durata di ogni fase è variabile da suolo a suolo; per i campioni esaminati nel presente lavoro ogni fase ha richiesto da 1 a 2 settimane. I valori di contenuto d'acqua corrispondenti alle tensioni imposte sono calcolati dalle pesate e riferiti al peso secco al termine della prova.



Fig. 4 Apparato di pressione Richards

Il metodo dell'apparato di pressione (o camera di Richards), utilizzato per i punti della curva di ritenzione a potenziali minori, prevede che i campioni di suolo vengano posti su di un piatto di ceramica porosa permeabile all'acqua ed impermeabile all'aria, ed ermeticamente chiusi in camere di acciaio a tenuta. Viene inviata aria a diverse pressioni (1÷15 bar) e si attende il tempo necessario affinché il campione si metta in equilibrio con la pressione imposta.

Ciò si può determinare quando dallo sfiato presente sulla camera e collegato alla piastra porosa cessa la fuoriuscita d'acqua. Per pesata, riferendo il dato al peso secco e tenendo conto della densità apparente del mezzo, si ottengono i valori di contenuto d'acqua in funzione della pressione imposta.

Sui campioni di dimensioni maggiori sono state eseguite prove di evaporazione mediante il metodo di Wind (Tamari et al., 1993) per la determinazione della funzione di conducibilità idraulica. I campioni saturi sono stati attrezzati con tre capsule porose ($\phi = 6$ mm, $l = 60$ mm, punto di bolla 1 bar) inserite lateralmente ad una distanza dalla base di circa 20, 60 e 100 mm. Le capsule sono state 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 spurgo del circuito da eventuale presenza di bolle d'aria. Successivamente è stato sigillato il fondo del campione 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 è stato 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°C (± 0.5).

ALLEGATO A

(segue Materiali e Metodi)



Fig. 5 Sistema automatico del metodo di Wind

Il trasduttore di tensione, la cella di carico e la valvola sono collegati ad un sistema automatico (fig. 5) di acquisizione 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 misure elettriche. 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'ISAFOM 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 è stato ripetuto ogni 30 minuti e i rilievi sono stati interrotti quando nel tensiometro posizionato più in alto nel campione si è notata entrata d'aria. Il campione è stato posto poi in stufa a 105°C per 24 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. Inoltre, sono determinati alcuni punti della curva di ritenzione (da 1 a 15 bar) mediante apparato di pressione.

Per il calcolo della conducibilità si fa riferimento alle procedure di calcolo messe a punto nel metodo del profilo istantaneo (Watson, 1966). I valori del potenziale alle diverse altezze sono stati 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 si ottengono 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.

Nei siti di Ghisalba è stato utilizzato un infiltrometro "a tensione" o "a disco" per descrivere il comportamento idraulico di quei suoli. L'infiltrometro a disco è ormai divenuto strumento di uso comune (Ankeny et al., 1991).

Classicamente, per descrivere il flusso stazionario tridimensionale sotto il disco poroso viene utilizzata la soluzione analitica di Wooding (1968) la quale combinata con la relazione esponenziale della conducibilità di Gardner (1958) $k(h)=k_s e^{(\alpha h)}$, permette di determinare alcuni punti della curva di conducibilità in prossimità della saturazione.

Alternativamente, nei siti di Ghisalba le prove sperimentali con l'infiltrometro sono state utilizzate per la determinazione sia della funzione di ritenzione idrica che di conducibilità idraulica attraverso un metodo inverso di ottimizzazione dei parametri. Il metodo richiede la conoscenza della curva di infiltrazione cumulata e della misura del contenuto d'acqua all'inizio e alla fine della prova di infiltrazione per la stima dei parametri delle funzioni idrauliche (Simunek e van Genuchten, 1997).



Fig. 6 Infiltrmetro

Schematicamente, l'infiltrmetro (fig. 6) è costituito da un serbatoio cilindrico graduato che alimenta un disco poroso e da una colonna di carico (detta torre a bolle) attraverso cui si regola il potenziale (negativo) dell'alimentazione idrica in modo da generare una infiltrazione di acqua in condizioni insature. Il metodo richiede solo un minimo disturbo del suolo, è relativamente rapido e funziona efficacemente nel campo del suolo in condizioni prossime alla saturazione ($-15 \leq h \leq 0$ cm) in cui i macropori sono considerati idraulicamente attivi e importanti per la trasmissione di acqua e soluti (Clothier et al., 1992).

1.2 Analisi mineralogica e micromorfologica

L'analisi mineralogica, condotta per diffrazione a raggi-X (XRD), è stata effettuata sulle frazioni sabbia e argilla separate da orizzonti rappresentativi dei diversi suoli studiati. La metodologia di preparazione e analisi dei campioni utilizzata fa riferimento ai Metodi di Analisi Mineralogica del Suolo (MIPAF, 2005).

La frazione terra fine ($\phi < 2$ mm) è stata trattata con Na esametafosfato, al fine di favorirne la dispersione durante la separazione granulometrica. Successivamente, la frazione sabbiosa è stata separata mediante setacciatura a $50 \mu\text{m}$ e la frazione argillosa per centrifuga. Alcuni campioni di argilla sono stati saturati con Ca^{2+} , altri con K^+ .

L'analisi è stata effettuata con diffrattometro Rigaku Geigerflex D/Max IIIC, con radiazione $\text{CuK}\alpha$, Ni filtrata a 40 kW e 25 mA. Sono stati analizzati:

- i) campioni orientati della frazione argillosa ($\phi < 2 \mu\text{m}$): (argille saturate con Ca^{2+} ; argille solvate con glicole etilenico (EG), per l'individuazione di minerali espandibili; argille saturate con K^+ e riscaldate a 550°C ai fini della distinzione tra cloriti e vermiculiti);
- ii) campioni non orientati di polveri sia della frazione sabbiosa ($\phi > 50 \mu\text{m}$) (per l'identificazione dei minerali primari) che della frazione argillosa (per la determinazione della distanza sul piano 060).

L'analisi micromorfologica è stata condotta al microscopio ottico in luce piana e circolare, parallela ed incrociata su sezioni sottili di suolo (con spessore di $30 \mu\text{m}$).

Per la preparazione delle sezioni sottili, gli aggregati indisturbati di suolo sono stati sottoposti a trattamenti di rimozione dell'acqua, saturazione con acetone ed impregnazione con resina poliestere.

I blocchi ottenuti sono stati sezionati, spianati, lappati, lucidati ed incollati su vetrino da microscopia.

Il blocco aderente al vetrino è stato ulteriormente lavorato fino ad ottenere sezioni dello spessore di $30 \mu\text{m}$.

La tecnica di preparazione e la descrizione delle sezioni sottili sono state condotte secondo i metodi descritti da FitzPatrick (1984, 1993).

Sito di Carpaneta 1

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P009 - ARM (Carpaneta P1)
CTR 1:10.000	E7d4
Comune / Località	Bigarello (MN), località Azienda Carpaneta
Rilevatore / Data	ERSAF / 29-11-2004
Quota / Pendenza	26 m s.l.m. / 0,2%
Paesaggio	superficie intermedia fra le principali linee di flusso e le aree rilevate più stabili
Parent material	depositi limoso-sabbiosi molto calcarei
Class. USDA 2003	coarse silty over sandy or sandy skeletal, carbonatic, mesic, Aquic Calciustept
Class. WRB 1998	Hypercalcic Calcisol



Descrizione degli orizzonti

Ap1	0-35 cm; umido; bruno (10YR4/3); franco sabbioso; frammenti poliedrici subangolari medi moderatamente sviluppati; pochi macropori fini; comuni radici molto fini; poche concrezioni di CaCO ₃ , piccole e medie; molto calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Ap2	35-50 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/4); franco sabbioso; aggregazione poliedrica subangolare media debolmente sviluppata; pochi macropori molto fini; comuni radici molto fini; poche concrezioni di CaCO ₃ piccole e medie; molto calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
Ck	50-70 cm; umido; giallo pallido (2.5Y7/4), secondariamente bruno giallastro chiaro (2.5Y6/3); franca limoso; massivo; comuni concrezioni di CaCO ₃ medie; pochi macropori fini molto; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore chiaro lineare.
CB	70-95 cm; molto umido; bruno molto pallido (10YR7/4), comuni piccole screziature grigio chiaro (10YR7/2), a contrasto distinto e limite netto; sabbioso; incoerente; pochi macropori medi; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Cg	95-105+ cm; molto umido; giallo pallido (2.5Y7/4), abbondanti piccole screziature grigio chiaro (10YR7/2), a contrasto marcato e limite netto; franco limoso; massivo; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol ₍₊₎ /kg)						TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%	
Ap1	6,4	9,5	60,3	76,3	3,1	4,8	7,9	15,8	8,4	7,3	19	1,7	1,0	24,1	20,7	2,1	0,3	1,0	100	
Ap2	6,4	9,6	63,5	79,5	2,5	4,3	6,8	13,7	7,9	6,8	23	2,1	1,2	23,1	19,0	2,5	0,4	1,2	100	
Ck	4,2	4,5	21,2	29,9	28,6	35,8	64,3	5,8	8,5	7,2	64	0,3	0,2	7,6	4,7	1,7	0,1	1,1	100	
CB	22,8	68,1	1,9	92,8	3,4	2,7	6,2	1,0	8,7	7,9	56	0,1	0	5,4	3,7	0,6	0	1,1	100	
Cg	0,9	0,7	34,1	35,7	42,6	20,8	63,4	0,9	8,6	7,8	52	0,1	0,1	8,2	5,7	1,1	0,1	1,3	100	

Caratterizzazione fisico-idrologica

Carpaneta 1 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap2	Ck	CB
Densità apparente, ρ^a (g cm ⁻³)	1.350	1.600	1.530
Porosità, P (%)	0.491	0.396	0.423
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.471	0.394	0.428
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	4.79	14.9	912

Ap2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.450	0.035	1.103
Err. Stima	0.003	0.006	0.006
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.445	0.0227	1.090
Limite superiore di confidenza al 95%	0.455	0.0470	1.116
$R^2 = 0.938$			

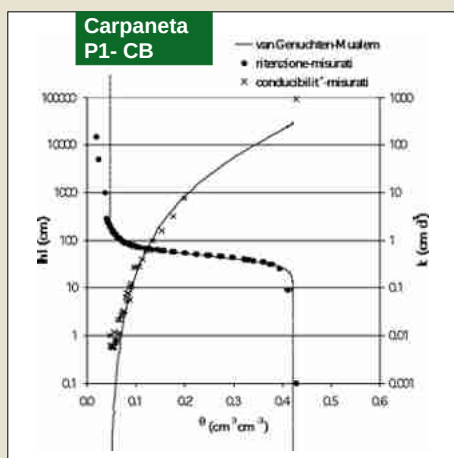
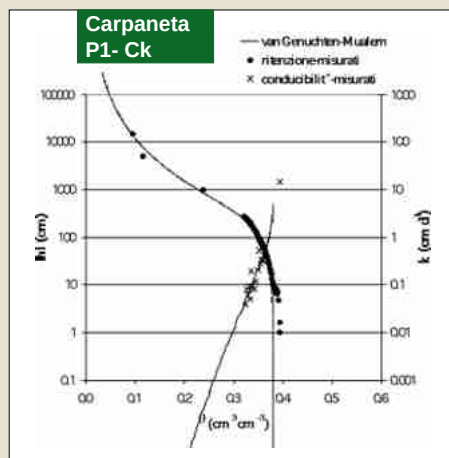
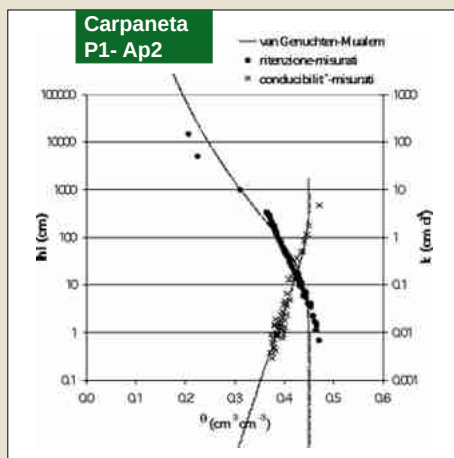
Ck - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.379	0.004	1.348
Err. Stima	0.001	0.000	0.015
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.376	0.003	1.319
Limite superiore di confidenza al 95%	0.382	0.004	1.377
$R^2 = 0.984$			

CB - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.420	0.022	4.807
Err. Stima	0.003	0.000	0.059
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.414	0.021	4.690
Limite superiore di confidenza al 95%	0.426	0.022	4.923
$R^2 = 0.997$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo



Sito di Carpaneta 2

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P010 - ARM (Carpaneta P2)
CTR 1:10.000	E7d4
Comune / Località	Bigarello (MN), località Azienda Carpaneta
Rilevatore / Data	ERSAF / 29-11-2004
Quota / Pendenza	26 m s.l.m. / 0,2%
Paesaggio	superficie intermedia fra le principali linee di flusso e le aree rilevate più stabili
Parent material	depositi limoso-sabbiosi molto calcarei
Class. USDA 2003	coarse silty, carbonatic, mesic, Aquic Calciustept
Class. WRB 1998	Hypercalcic Calcisol



Descrizione degli orizzonti

Ap1	0-35 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/4); franco; frammenti poliedrici subangolari grandi debolmente sviluppati; comuni macropori fini; comuni radici molto fini; poche concrezioni di CaCO ₃ piccole e medie; calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
Ap2	35-50 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/4); franco limoso; aggregazione poliedrica subangolare grande debolmente sviluppata; macropori fini comuni; radici molto fini comuni; calcareo; presenza di poche piccole e medie concrezioni di CaCO ₃ ; limite inferiore abrupto, irregolare.
Bw	35-50 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/6); franco sabbioso; aggregazione poliedrica subangolare media moderatamente sviluppata; scarsamente calcareo; presenza di poche piccole e medie concrezioni di CaCO ₃ ; macropori fini comuni; radici molto fini comuni; limite inferiore abrupto, discontinuo.
C	50-60 cm; umido; bruno giallastro chiaro (2.5Y6/4), secondario giallo pallido (2.5Y7/4); sabbioso; incoerente; calcareo; macropori fini comuni; radici assenti; limite inferiore abrupto, discontinuo.
Bk	50-70 cm; umido; giallo pallido (2.5Y7/4), comuni piccole screziature giallo (10YR7/8) a contrasto marcato e limite netto; franco limos; aggregazione poliedrica angolare media debolmente sviluppata; molto calcareo; presenza di moltissime medie e grandi concrezioni di CaCO ₃ ; macropori fini comuni; radici molto fini poche; limite inferiore abrupto, lineare.
CB	70-125 cm; umido; bruno molto pallido (10YR7/4), abbondanti screziature medie giallo (10YR7/8) a contrasto distinto e limite netto; limoso; massivo; calcareo; presenza di estremamente piccole concrezioni di Fe/Mn; macropori molto fini molto pochi; radici fini poche; limite inferiore abrupto, lineare.
Cg	125-+ cm; molto umido; grigio chiaro (10YR7/2); franco limoso; massivo; calcareo; radici assenti; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol _(c) /kg)						TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%	
Ap1	4,9	16,5	22,1	43,4	19,7	26,3	46,0	10,6	7,7	7,2	36	1,9	1,1	15,1	12,1	1,1	0,2	1,7	100	
Ap2	4,8	13,9	26,6	45,3	19,5	34,9	54,4	11,9	7,7	7,1	30	2,2	1,3	20,4	17,6	1,2	0,3	1,4	100	
Bw	5,2	14,7	44,5	64,4	11,9	15,1	27,0	8,6	8,0	7,3	37	1,5	0,9	8,5	5,5	1,8	0,2	1,0	100	
C	28,5	33,0	28,4	89,9	7,8	2,2	10,0	4,9	8,5	7,9	55	0,1	0,1	5,9	5,2	0,2	0,1	0,5	100	
Bk	11,4	5,2	22,6	39,2	15,4	37,1	52,5	8,3	8,4	7,4	70	0,3	0,2	8,4	6,5	0,9	0,2	0,8	100	
CB	1,6	1,1	7,6	10,3	48,7	33,9	82,6	7,1	8,3	7,3	60	0,2	0,1	8,0	5,2	1,2	0,3	1,3	100	

Caratterizzazione fisico-idrologica

Carpaneta 2 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap1	Ap2	C	Bk	CB
Densità apparente, ρ_d (g cm ⁻³)	1.400	1.300	1.520	1.350	1.480
Porosità, P (%)	0.472	0.509	0.426	0.491	0.442
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.491	0.527	0.392	0.516	0.453
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	94.4	683	990	13.2	1.92

Ap1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.459	0.026	1.160
Err. Stima	0.004	0.004	0.010
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.452	0.0177	1.140
Limite superiore di confidenza al 95%	0.466	0.0342	1.180
$R^2 = 0.947$			

Bk - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.477	0.020	1.238
Err. Stima	0.013	0.008	0.036
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.448	0.001	1.158
Limite superiore di confidenza al 95%	0.506	0.038	1.319
$R^2 = 0.959$			

Ap2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.474	0.018	1.226
Err. Stima	0.008	0.005	0.023
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.455	0.006	1.175
Limite superiore di confidenza al 95%	0.492	0.029	1.276
$R^2 = 0.967$			

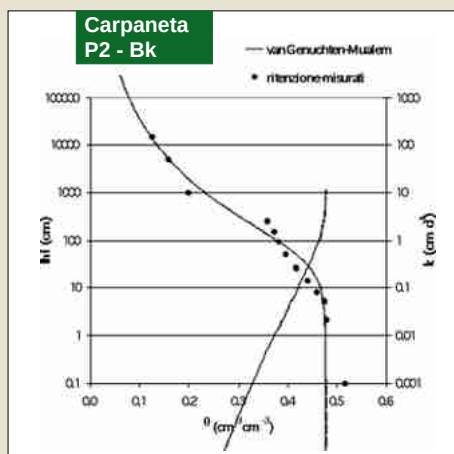
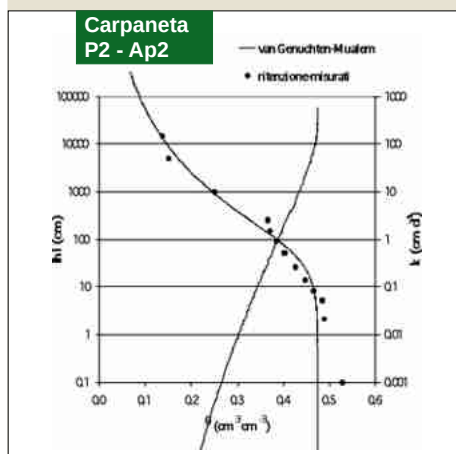
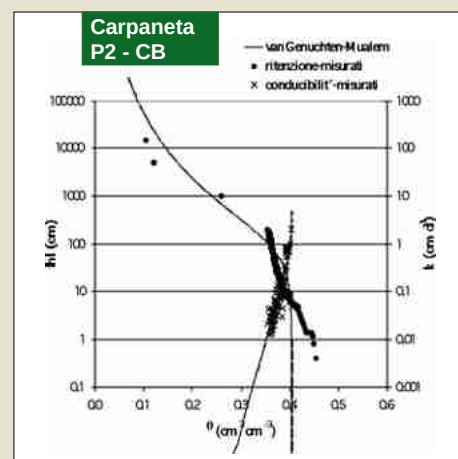
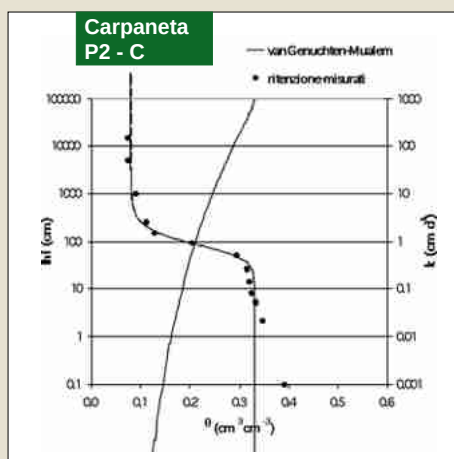
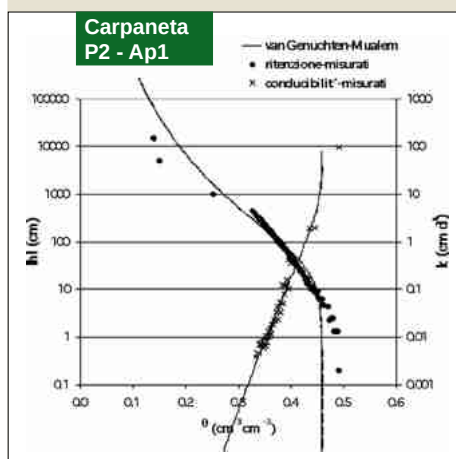
CB - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.403	0.010	1.221
Err. Stima	0.002	0.001	0.020
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.400	0.007	1.182
Limite superiore di confidenza al 95%	0.406	0.013	1.261
$R^2 = 0.827$			

C - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.331	0.013	3.022
Err. Stima	0.004	0.001	0.261
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.322	0.011	2.441
Limite superiore di confidenza al 95%	0.340	0.015	3.604
$R^2 = 0.972$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo



Sito di Caviaga

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P001 - ARM (Lodi P3)
CTR 1:10.000	C7a2
Comune / Località	Cavenago d'Adda (LO) / Caviaga
Rilevatore / Data	ERSAF / 26-02-2002
Quota / Pendenza	72 m s.l.m. / 0%
Paesaggio	Superfici pianeggianti della Bassa pianura sabbiosa
Parent material	depositi fluviali e fluvioglaciali medi, non calcarei
Class. USDA 2003	coarse loamy, mixed, superactive, mesic, Ultic Haplustalf
Class. WRB 1998	Haplic Luvisol



Descrizione degli orizzonti

Ap1	0 - 20 cm; umido; bruno grigiastro scuro (10YR4/2); franco; friabile; frammenti principali poliedrici subangolari grandi moderatamente sviluppati, struttura secondaria granulare media debolmente sviluppata; non calcareo; biopori grandi, molto scarsi; limite inferiore abrupto ondulato.
Ap2	20 - 35 cm; umido; bruno grigiastro scuro (10YR4/2); franco; friabile; aggregazione poliedrica subangolare grande debolmente sviluppata; grandi biopori, molto scarsi; non calcareo; grandi biopori, molto scarsi; limite inferiore chiaro ondulato.
Bt1	35 - 45 cm; umido; bruno (10YR4/3); franco; resistente; aggregazione poliedrica angolare grande debolmente sviluppata; adesivo; grandi biopori, molto scarsi; poche pellicole di argilla; non calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
Bt2	45 - 80 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/6); franco sabbioso; friabile; aggregazione poliedrica angolare molto grande debolmente sviluppata; adesivo; poche pellicole di argilla; grandi biopori, molto scarsi; non calcareo; limite inferiore graduale lineare.
BC	80 - 110 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco sabbioso; principalmente incoerente con porzioni ad aggregazione poliedrica angolare molto grande debolmente sviluppata; non calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
C	110 - 140+ cm; umido; bruno (10YR4/3); sabbioso franco; incoerente; non calcareo; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol ₍₊₎ /kg)						TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%	
Ap1	11,2	18,9	19,4	49,5	16,4	16,2	32,6	17,9	5,9	5,1	0	1,4	0,8	15,4	2,7	0,6	0,3	0,0	23	
Ap2	11,5	17,7	19,9	49,1	15,6	17,6	33,2	17,7	6,0	5,0	0	1,4	0,8	12,5	6,0	1,0	0,2	0,0	57	
Bt1	5,6	17,2	24,0	46,8	16,1	15,3	31,4	21,8	6,2	4,7	0	0,8	0,4	12,5	6,0	1,0	0,2	0,0	58	
Bt2	36,6	26,7	11,2	74,5	5,3	6,8	12,1	13,4	6,7	5,2	0	0,3	0,2	9,9	6,7	1,7	0,112	0,0	87	
BC	50,4	26,6	6,7	83,7	2,1	4,2	6,3	10,0	6,8	5,3	0	0,2	0,1	8,9	4,4	2,7	0,1	0,0	81	
C	41,9	33,9	10,8	86,6	3,4	4,0	7,4	6,0	7,0	5,7	0	0,1	0,1	7,7	4,0	2,6	0,1	0,0	87	

Caratterizzazione fisico-idrologica

Caviaga - Principali caratteristiche fisiche

	Ap1	Ap2	Bt1	Bt2	BC	C
Densità apparente, ρ^d (g cm ⁻³)	1.490	1.520	1.610	1.690	1.470	1.500
Porosità, P (%)	0.438	0.426	0.392	0.362	0.445	0.434
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.430	0.370	0.398	0.340	0.410	0.387
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	1.35	3.62	13.1	12.3	358	437

Ap1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.425	0.233	1.109
Err. Stima	0.009	0.075	0.005
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.408	0.0818	1.099
Limite superiore di confidenza al 95%	0.442	0.3839	1.120
$R^2 = 0.963$			

Bt2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.343	0.017	1.490
Err. Stima	0.002	0.001	0.016
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.339	0.015	1.458
Limite superiore di confidenza al 95%	0.348	0.020	1.522
$R^2 = 0.996$			

Ap2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.360	0.006	1.240
Err. Stima	0.002	0.001	0.009
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.355	0.005	1.222
Limite superiore di confidenza al 95%	0.365	0.008	1.259
$R^2 = 0.994$			

BC - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.403	0.046	1.835
Err. Stima	0.008	0.005	0.072
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.387	0.034	1.686
Limite superiore di confidenza al 95%	0.420	0.057	1.985
$R^2 = 0.985$			

Bt1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

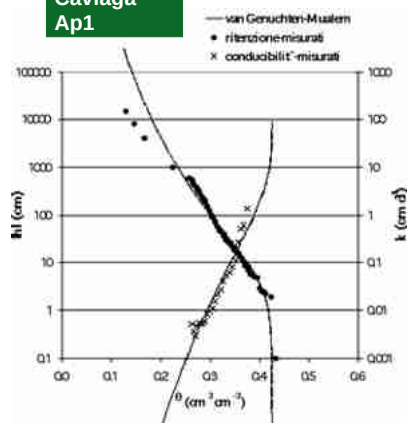
	q_0	a	n
Valore	0.394	0.015	1.141
Err. Stima	0.002	0.003	0.006
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.388	0.010	1.128
Limite superiore di confidenza al 95%	0.399	0.021	1.154
$R^2 = 0.996$			

C - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

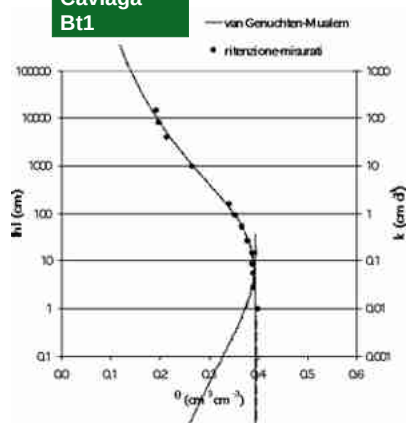
	q_0	a	n
Valore	0.371	0.057	1.819
Err. Stima	0.006	0.006	0.050
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.359	0.045	1.715
Limite superiore di confidenza al 95%	0.384	0.068	1.922
$R^2 = 0.991$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo

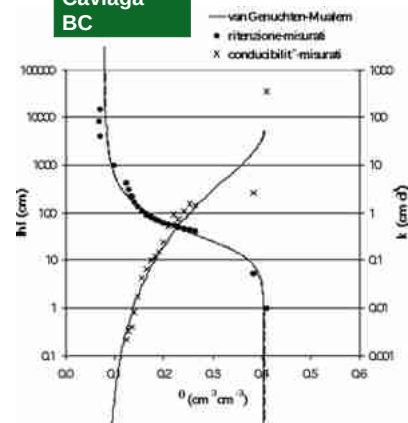
Caviaga Ap1



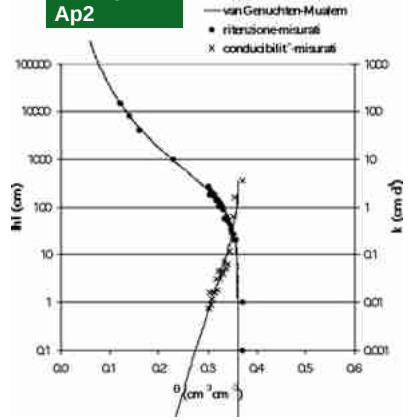
Caviaga Bt1



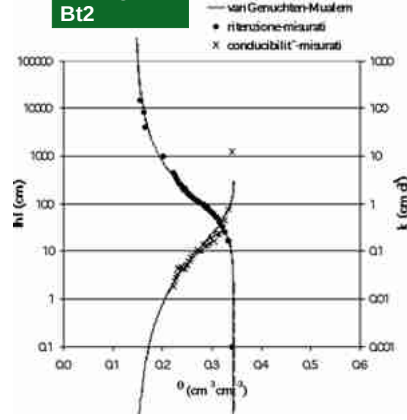
Caviaga BC



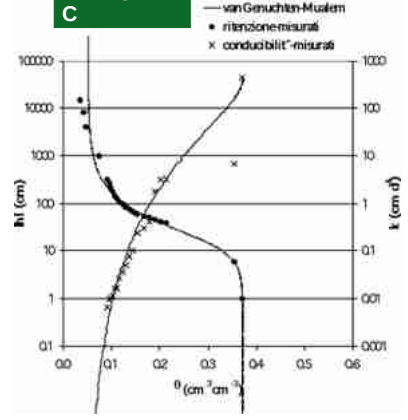
Caviaga Ap2



Caviaga Bt2



Caviaga C



Sito di Ghisalba 1

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P006 - ARM (Ghisalba P1)
CTR 1:10.000	C5c4
Comune / Località	Ghisalba (BG), località Portico Fletto
Rilevatore / Data	ERSAF / 05-11-2004
Quota / Pendenza	178 m s.l.m. / 0,5%
Paesaggio	conoide fluvioglaciale del fiume Serio (alta pianura ghiaiosa: LG1)
Parent material	depositi fluvioglaciali grossolani prevalentemente calcarei
Class. USDA 2003	fine loamy, mixed, superactive, mesic, Typic Hapludalf
Class. WRB 1998	Haplic Luvisol



Descrizione degli orizzonti

Ap1	0-35 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco limoso scarsamente ghiaioso; frammenti poliedrici subangolari grandi moderatamente sviluppati; molti macropori fini e medi; comuni radici molto fini; scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Bt1	35-50 cm; umido; bruno forte (7.5YR4/6); franco ghiaioso; aggregazione poliedrica angolare fine fortemente sviluppata; comuni argillans; macropori fini comuni; radici assenti; scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
Bt2	50-75 cm; umido; bruno forte (7.5YR4/6); franco; aggregazione poliedrica subangolare grande fortemente sviluppata; comuni argillans; comuni macropori fini; radici assenti; non calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
BC	75-100 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/6); secondariamente bruno forte (7.5YR4/6); franco; aggregazione poliedrica subangolare grande debolmente sviluppata; macropori fini comuni; radici assenti; non calcareo; limite inferiore chiaro ondulato.
2C1	100-120 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/6); sabbioso franco; incoerente; macropori fini e molto fini molti; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
2C2	120-150 cm; umido; colore matrice influenzato da litocromia; sabbioso, estremamente ghiaioso; incoerente; comuni pendanti di CaCO ₃ molto piccoli; molti macropori fini e molto fini; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol _(c) /kg)					TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%
Ap1	7,5	2,8	17,0	27,3	11,5	45,2	56,7	16,0	7,5	6,4	2	3,2	1,9	15,0	10,7	2,9	0,4	1,1	100
Bt1	11,2	14,6	13,4	39,2	10,7	35,1	45,8	15,0	7,7	6,3	2	1,4	0,8	15,2	12,7	1,3	0,1	1,0	100
Bt2	5,1	15,3	13,1	33,4	12,1	32,2	44,3	22,3	8,0	6,3	0	0,8	0,5	15,9	14,6	1,1	0,1	0,1	100
BC	4,6	15,0	11,6	31,2	13,3	30,3	43,6	25,3	8,2	6,8	0	0,9	0,5	18,8	16,2	1,1	0,1	1,4	100
2C1	42,3	21,6	22,0	86,0	4,8	6,3	11,1	3,0	8,5	7,8	28	0,3	0,2	7,1	5,3	0,4	0,1	1,3	100

Caratterizzazione fisico-idrologica

Ghisalba 1 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap	Bt1	Bt2	BC	2C1
Densità apparente, ρ_d (g cm ⁻³)	1.310	1.470	1.570	1.420	1.430
Porosità, P (%)	0.506	0.445	0.408	0.464	0.460
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.512	0.446	0.407	0.472	0.486
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	28.3	2.02	10.0	9.4	23.0

Ap - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.508	0.021	1.178
Err. Stima	0.001	0.001	0.004
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.505	0.0186	1.170
Limite superiore di confidenza al 95%	0.511	0.0226	1.185
$R^2 = 0.995$			

BC - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.466	0.110	1.084
Err. Stima	0.005	0.031	0.004
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.455	0.042	1.074
Limite superiore di confidenza al 95%	0.477	0.179	1.093
$R^2 = 0.991$			

Bt1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.450	0.057	1.138
Err. Stima	0.004	0.010	0.007
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.441	0.038	1.124
Limite superiore di confidenza al 95%	0.458	0.076	1.152
$R^2 = 0.954$			

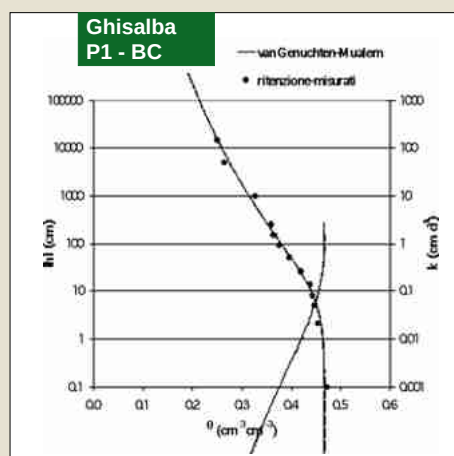
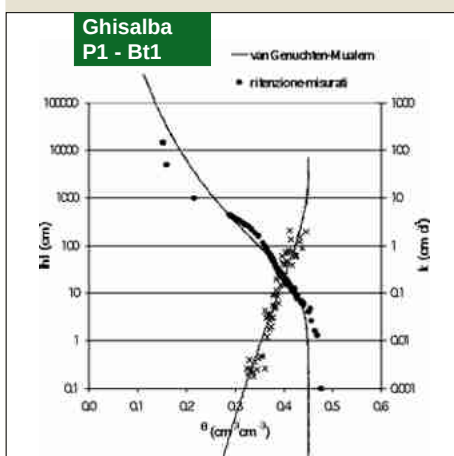
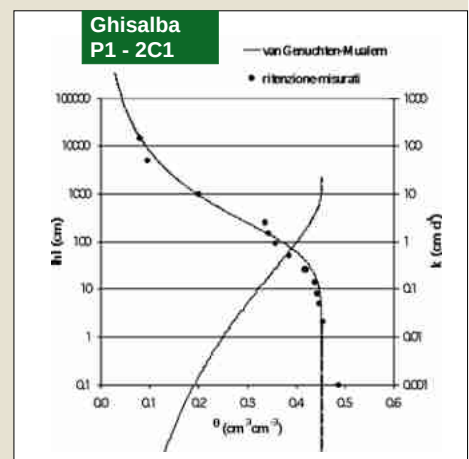
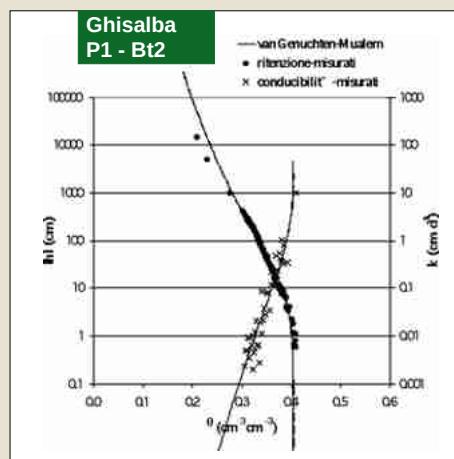
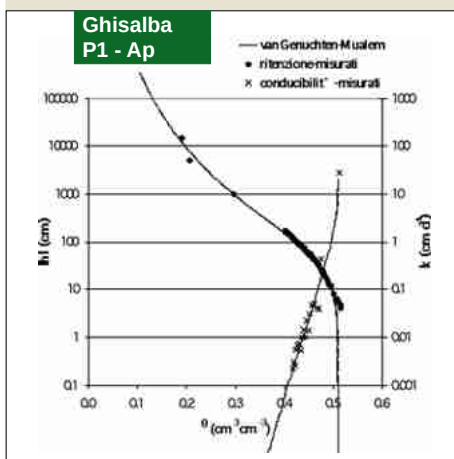
2C1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.452	0.012	1.335
Err. Stima	0.009	0.003	0.042
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.432	0.004	1.241
Limite superiore di confidenza al 95%	0.473	0.019	1.429
$R^2 = 0.978$			

Bt2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.403	0.124	1.075
Err. Stima	0.002	0.016	0.002
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.399	0.092	1.071
Limite superiore di confidenza al 95%	0.407	0.155	1.080
$R^2 = 0.982$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo



Sito di Ghisalba 2

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P007-ARM (Ghisalba P2)
CTR 1:10.000	C5c4
Comune / Località	Ghisalba (BG), località Portico Fletto
Rilevatore / Data	ERSAF / 05-11-2004
Quota / Pendenza	178 m s.l.m. / 0,5%
Paesaggio	conoide fluvioglaciale del fiume Serio
Parent material	fluvioglaciale ghiaioso e ciottoloso calcareo
Class. USDA 2003	loamy skeletal, mixed, superactive, mesic, Inceptic Hapludalf
Class. WRB 1998	Haplic Luvisol



Descrizione degli orizzonti

Ap	0-35 cm; poco umido; bruno (10YR4/3); franco scarsamente ghiaioso; frammenti poliedrici subangolari medi debolmente sviluppati; molti macropori fini; comuni radici molto fini; non calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
Bt	35-55 cm; poco umido; matrice bruno forte (7.5YR4/6); pellicole brune (7.5YR4/4); franco ghiaioso; aggregazione poliedrica angolare fine fortemente sviluppata; comuni argillans; comuni macropori fini; radici assenti; non calcareo; limite inferiore abrupto, ondulato.
BC	55-105 cm; poco umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco sabbioso, estremamente ghiaioso; massivo; pochi pendant estremamente sottili di CaCO ₃ ; molti macropori fini; radici assenti; scarsamente calcareo; limite inferiore chiaro, ondulato
Ck	105-110 cm; umido; bruno giallastro chiaro (2,5Y6/4); evidente litocromia; sabbioso, estremamente ghiaioso; massivo; moltissimi pendant di CaCO ₃ , piccoli; macropori fini molti; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
C	110-130 cm; umido; bruno oliva chiaro (2,5Y5/3), secondariamente bruno oliva (2,5Y4/3); sabbioso, estremamente ghiaioso; incoerente; comuni pendant di CaCO ₃ molto piccoli; comuni pendant di Fe-Mn estremamente sottili; comuni macropori; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol _(c) /kg)					TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%
Ap	16,7	10,4	8,1	35,3	10,6	36,7	47,3	17,4	6,9	6,0	0	2,1	1,2	20,8	5,4	1,3	0,3	1,0	-
Bt	20,8	3,3	14,7	38,8	7,8	30,6	38,3	22,9	7,7	6,3	0	1,2	0,7	19,0	15,8	2,3	0,2	0,8	100
BC	44,2	20,1	11,5	75,9	8,0	7,3	15,3	8,8	8,3	7,4	36	0,7	0,4	6,2	4,2	1,1	0,1	0,8	100
C	87,2	6,1	1,2	94,6	1,5	3,5	4,9	0,8	8,8	8,3	28	0,3	0,2	2,4	1,1	0,3	0,1	1,0	100

Caratterizzazione fisico-idrologica

Ghisalba 2 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap	Bt
Densità apparente, ρ^a (g cm ⁻³)	1.650	1.600
Porosità, P (%)	0.377	0.396
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.370	0.395
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	1.73	3.48

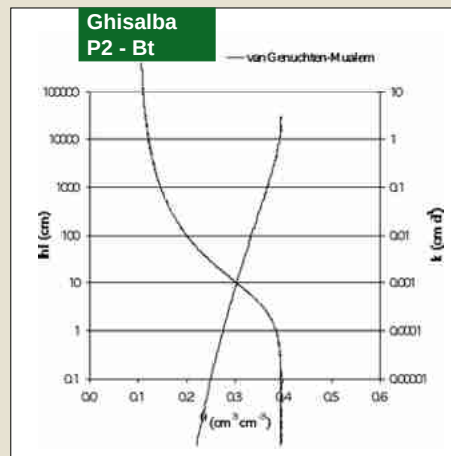
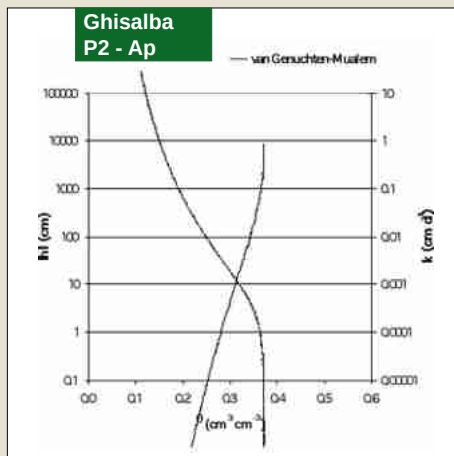
Ap - Parametri curva di ritenzione e conducibilità (van Genuchten-Mualem)

	q_0	q_r	a	n	l	k_0
Valore	0.370	0.050	0.242	1.150	2.049	1.727
Err. Stima	-	-	0.017	0.030	0.658	0.260
Limite inferiore di confidenza al 95%	-	-	0.208	1.089	0.721	1.202
Limite superiore di confidenza al 95%	-	-	0.276	1.211	3.377	2.252
$R^2 = 0.998$						

Bt2 - Parametri curva di ritenzione e conducibilità (van Genuchten-Mualem)

	q_0	q_r	a	n	l	k_0
Valore	0.395	0.100	0.245	1.337	6.919	3.478
Err. Stima	-	-	0.009	0.012	0.528	0.296
Limite inferiore di confidenza al 95%	-	-	0.228	1.314	5.861	2.886
Limite superiore di confidenza al 95%	-	-	0.263	1.360	7.978	4.071
$R^2 = 0.999$						

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo



Sito di Landriano 1

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P012 - ARM (Landriano P1)
CTR 1:10.000	B7c1
Comune / Località	Landriano (PV), località Cascina Robecco
Rilevatore / Data	ERSAF / 13-12-2004
Quota / Pendenza	87 m s.l.m. / 0,1%
Paesaggio	superficie intermedia fra le principali linee di flusso e le aree rilevate più stabili
Parent material	depositi fluviali e fluvioglaciali grossolani, spesso in lenti, non calcarei
Class. USDA 2003	loamy skeletal, mixed, superactive, mesic, Oxyaquic Haplustept
Class. WRB 1998	Endoskeleti-Fluvic Luvisol (eutric)



Descrizione degli orizzonti

Ap1	0-25 cm; umido; bruno (10YR4/3), secondariamente bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco sabbioso, scarsamente ghiaioso; frammenti poliedrici subangolari grandi debolmente sviluppati; comuni macropori fini; poche radici molto fini e fini; non calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Ap2	25-40 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4), secondariamente bruno giallastro (10YR5/6); franco sabbioso, scarsamente ghiaioso; massivo; pochi macropori fini; poche radici molto fini; molto scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Bw	40-70 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco sabbioso, ghiaioso; aggregazione poliedrica subangolare media debolmente sviluppata; pochi macropori fini; poche radici molto fini; non calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
BC	70-90 cm; molto umido; bruno giallastro (10YR5/4), secondariamente bruno giallastro (10YR5/6); franco sabbioso, molto ghiaioso; incoerente; comuni macropori medi; radici assenti; non calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Cg	90-120+ cm; bagnato; bruno grigiastro (10YR5/2); sabbioso*; molto ghiaioso; incoerente; pochi macropori fini; radici assenti; non calcareo; limite inferiore sconosciuto.

* stima di campagna



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol ₍₊₎ /kg)						TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%	
Ap1	20,1	26,2	19,9	66,2	13,2	16,9	30,1	3,7	7,7	7,0	1	1,9	1,1	8,7	7,4	1,0	0,3	0,0	100	
Ap2	54,6	3,6	5,0	63,2	14,7	18,2	32,8	4,0	8,0	7,1	2	1,6	1,0	8,3	6,8	1,2	0,2	0,1	100	
Bw	22,1	14,2	14,9	51,1	17,2	25,6	42,8	6,1	7,3	6,4	0	2,6	1,5	7,7	6,1	1,2	0,3	0,1	100	
BC	22,8	3,1	44,8	70,7	5,1	12,8	17,8	11,5	7,6	6,5	0	0,7	0,4	9,3	7,5	1,4	0,5	0,0	100	

Caratterizzazione fisico-idrologica

Landriano 1 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap1	Ap2	Bw	BC
Densità apparente, ρ^a (g cm ⁻³)	1.680	1.480	1.640	1.620
Porosità, P (%)	0.366	0.442	0.381	0.389
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.348	0.476	0.374	0.353
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	5.71	16.1	31.7	27.8

Ap1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.329	0.008	1.344
Err. Stima	0.001	0.000	0.007
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.327	0.0078	1.330
Limite superiore di confidenza al 95%	0.331	0.0089	1.357
$R^2 = 0.996$			

Ap2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.437	0.012	1.356
Err. Stima	0.011	0.004	0.052
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.413	0.004	1.239
Limite superiore di confidenza al 95%	0.460	0.020	1.473
$R^2 = 0.971$			

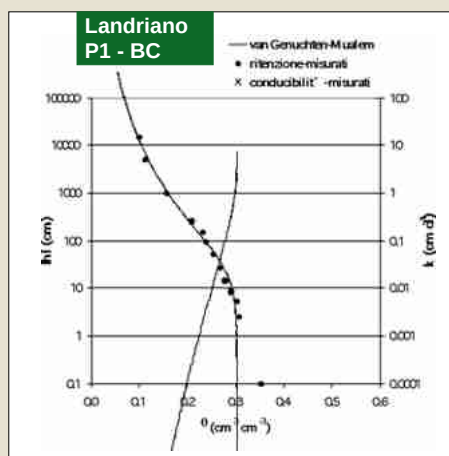
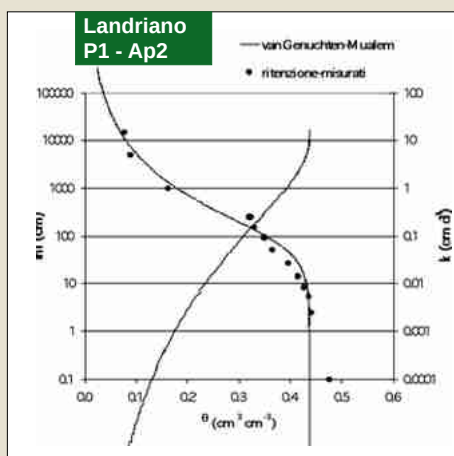
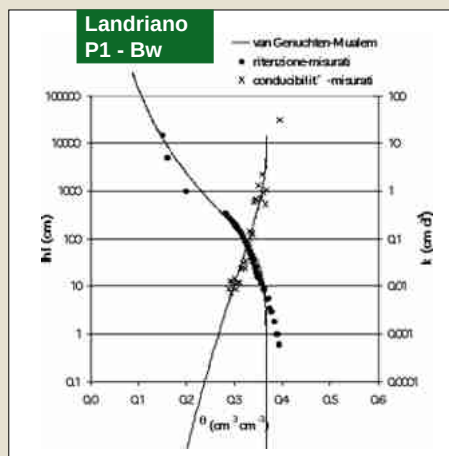
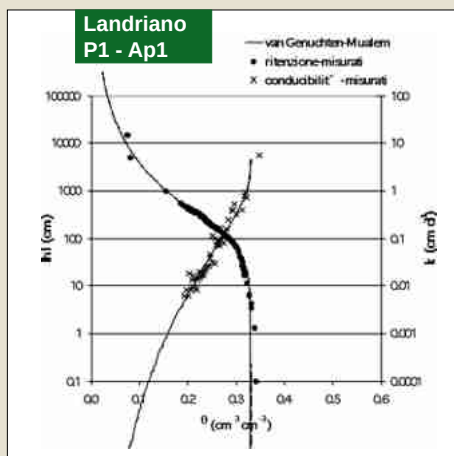
Bw - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.366	0.014	1.172
Err. Stima	0.002	0.002	0.011
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.361	0.010	1.150
Limite superiore di confidenza al 95%	0.371	0.018	1.195
$R^2 = 0.957$			

BC - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.302	0.031	1.185
Err. Stima	0.004	0.007	0.012
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.293	0.016	1.158
Limite superiore di confidenza al 95%	0.311	0.047	1.212
$R^2 = 0.955$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo



Sito di Landriano 2

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P013/ARM (Landriano P2)
CTR 1:10.000	B7c1
Comune / Località	Landriano (PV), località Cascina Bruciata
Rilevatore / Data	ERSAF / 17-05-2005
Quota / Pendenza	84 m s.l.m. / 0,1%
Paesaggio	superficie intermedia fra le principali linee di flusso e le aree rilevate più stabili (LQ3)
Parent material	depositi alluvionali fini
Class. USDA 2003	coarse silty, mixed, superactive, mesic, Oxyaquic Haplustept
Class. WRB 1998	Gley-Fluvic Luvisol (eutric)



Descrizione degli orizzonti

Ap1	0-25 cm; poco umido; bruno (10YR4/3); franco; frammenti poliedrici angolari medi moderatamente sviluppati; comuni macropori fini; molte radici molto fini; non calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Ap2	25-40 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco sabbioso; aggregazione poliedrica subangolare grande moderatamente sviluppata; macropori molto fini pochi; radici molto fini poche; molto scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto, ondulato.
Bw	40-70 cm; umido; bruno forte (7,5YR5/6), secondariamente bruno giallastro (10YR5/6); franco argilloso; aggregazione poliedrica subangolare grandi debolmente sviluppati; agricutans di colore bruno pallido (10YR6/3) lungo i pori e le facce verticali degli aggregati; comuni piccole concrezioni ferromanganesifere; pochi macropori molto fini e medi; poche radici molto fini; molto scarsamente calcareo; limite inferiore graduale, lineare.
C	70-105 cm; molto umido; bruno (10YR5/3), comuni screziature medie bruno giallastre (10YR5/8), a contrasto distinto; sabbioso molto fine franco; massivo (incoerente?); poche piccole concrezioni ferromanganesifere; scarsamente calcareo; poche radici molto fini; limite inferiore abrupto lineare.
2Ck	105-150 cm; molto umido; bruno giallastro chiaro (2,5Y6/3), comuni screziature medie bruno giallastre (10YR5/8), a contrasto marcato; limoso; massivo; concrezioni molto abbondanti di CaCO ₃ , grandi; radici assenti; matrice scarsamente calcarea; limite inferiore abrupto lineare.
3Cg	150+ cm; bagnato; bruno grigiastro chiaro (10YR6/2); sabbioso; incoerente; calcareo; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol ₍₊₎ /kg)					TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%
Ap1	13,5	16,6	21,1	51,2	23,1	18,2	41,4	7,4	7,3	6,6	0	2,0	1,2	8,6	6,6	1,9	0,2	0,0	100
Ap2	13,5	15,9	23,5	52,9	22,2	17,5	39,7	7,4	7,2	6,6	0	1,6	0,9	9,8	6,4	2,3	0,2	0,9	100
Bw	0,7	22,8	1,3	24,8	27,8	18,9	46,7	28,5	7,8	6,0	0	0,7	0,4	17,3	13,3	3,2	0,1	0,7	100
C	0,1	1,2	76,6	78,0	10,8	5,0	15,8	6,2	8,3	7,3	0	0,5	0,3	6,7	4,8	1,2	0,1	0,7	100
2Ck	3,2	2,1	2,4	7,7	57,2	25,6	82,7	9,6	8,5	7,2	4,1	0,3	0,2	8,1	4,8	1,9	0,1	1,3	100

Caratterizzazione fisico-idrologica

Landriano 2 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap1	Ap2	Bw(1)	Bw(2)
Densità apparente, ρ^a (g cm ⁻³)	1.710	1.590	1.500	1.570
Porosità, P (%)	0.355	0.400	0.434	0.408
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.337	0.399	0.447	0.407
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	33.9	1.27	45.1	16.6

Ap1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.332	0.017	1.244
Err. Stima	0.001	0.001	0.005
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.330	0.0161	1.235
Limite superiore di confidenza al 95%	0.334	0.0189	1.254
$R^2 = 0.995$			

Ap2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.373	0.007	1.275
Err. Stima	0.002	0.001	0.014
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.370	0.006	1.247
Limite superiore di confidenza al 95%	0.377	0.008	1.303
$R^2 = 0.974$			

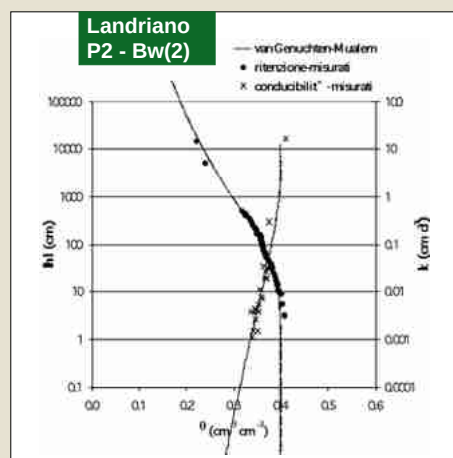
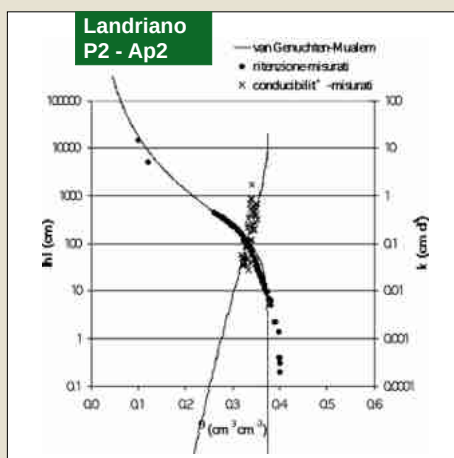
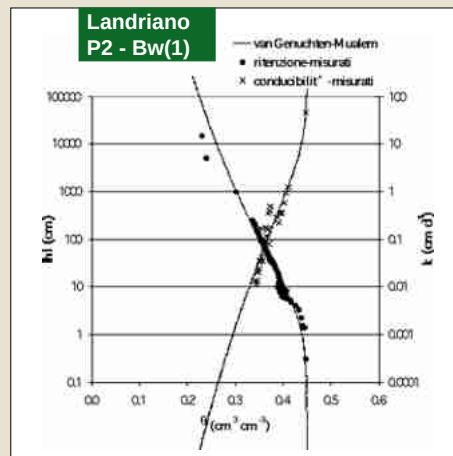
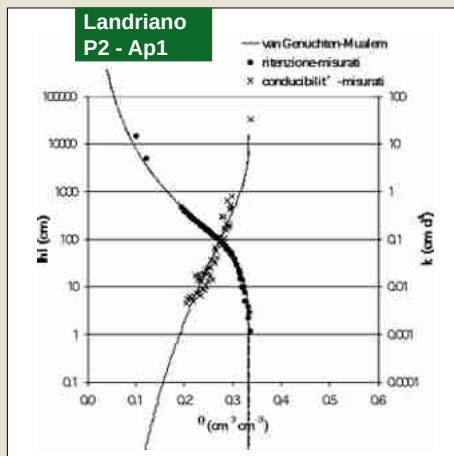
Bw(1) - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.448	0.465	1.065
Err. Stima	0.005	0.126	0.002
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.438	0.214	1.060
Limite superiore di confidenza al 95%	0.459	0.716	1.069
$R^2 = 0.958$			

Bw(2) - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.398	0.018	1.102
Err. Stima	0.001	0.002	0.004
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.395	0.014	1.095
Limite superiore di confidenza al 95%	0.401	0.022	1.109
$R^2 = 0.984$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo

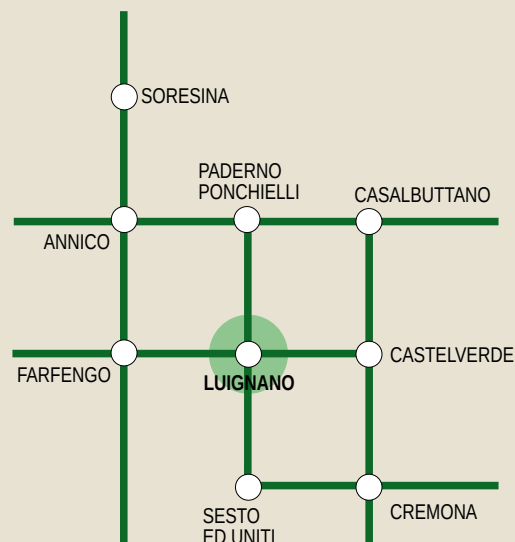


Sito di Luignano

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P011 - ARM (Luignano P1)
CTR 1:10.000	C7d3
Comune / Località	Sesto ed Uniti (CR) / Luignano
Rilevatore / Data	ERSAF / 10-12-2004
Uso del suolo	Seminativo
Quota / Pendenza	57 m s.l.m. / 0%
Paesaggio	Depressioni di forma subcircolare a drenaggio difficoltoso e con problemi di smaltimento esterno delle acque, talora con evidenze di fossi scolanti e baulature dei campi (LF3)
Parent material	depositi fluviali e fluvio-glaciali da medi a moderatamente fini, calcarei
Class. USDA 2003	fine silty, mixed, superactive, mesic, Inceptic Haplustalf
Class. WRB 1998	Haplic Luvisols



Descrizione degli orizzonti

Ap	0-40 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4); franco; frammenti poliedrici subangolari grandi debolmente sviluppati; comuni radici molto fini e fini; molto scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
Bt	40-70 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/6), secondariamente bruno giallastro (10YR5/6); franco argilloso; aggregazione poliedrica angolare media moderatamente sviluppata; comuni concentrazioni soffici di Fe-Mn, molto piccole; comuni macropori fini e molto fini; poche radici molto fini; non calcareo; limite inferiore abrupto ondulato.
BC	70-100 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/6); franco sabbioso; massivo; molte concentrazioni soffici di Fe-Mn, grandi; molti macropori molto fini; radici assenti; non calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
C	100-145 cm; molto umido; bruno pallido (10YR6/3), abbondanti screziature medie bruno giallastre (10YR5/8), a contrasto distinto e limite netto; franco limoso; massivo; poche concentrazioni soffici di Fe-Mn, estremamente piccole; pochi macropori molto fini; radici assenti; non calcareo; limite inferiore abrupto lineare.
Cg	145+ cm; bagnato; verde grigiastro (5G4/2); sabbioso franco; massivo; pochi macropori molto fini; radici assenti; scarsamente calcareo; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol ₍₊₎ /kg)					TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%
Ap	4,5	14,3	16,7	35,5	19,6	30,2	49,8	14,7	6,6	5,2	0	2,5	1,5	24,7	5,9	1,5	0,3	0,1	32
Bt	0,2	13,2	28,1	41,4	10,0	19,4	29,5	29,1	7,2	5,6	1	0,9	0,5	17,9	15,0	2,6	0,2	0,1	100
BC	0,1	37,2	31,7	69,0	6,8	7,1	13,9	17,1	7,2	5,8	0	1,0	0,6	12,8	10,3	2,2	0,2	0,2	100
C	0,1	2,2	29,4	31,7	33,4	16,6	50,0	18,3	7,4	5,7	0	0,7	0,4	12,8	8,9	3,2	0,2	0,5	100
Cg	7,3	7,6	70,0	84,9	5,2	4,1	9,3	5,8	8,5	7,3	1	0,6	0,4	7,1	5,9	1,1	0,1	0,0	100

Caratterizzazione fisico-idrologica

Luignano - Principali caratteristiche fisiche

	Ap	Bt	BC	C
Densità apparente, ρ^a (g cm ⁻³)	1.540	1.520	1.460	1.370
Porosità, P (%)	0.419	0.426	0.449	0.483
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.409	0.438	0.441	0.477
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	0.490	2.15	1.15	0.383

Ap - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.409	0.004	1.212
Err. Stima	0.001	0.000	0.011
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.407	0.0034	1.191
Limite superiore di confidenza al 95%	0.412	0.0047	1.234
$R^2 = 0.961$			

Bt - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.430	0.010	1.143
Err. Stima	0.001	0.001	0.005
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.428	0.008	1.134
Limite superiore di confidenza al 95%	0.432	0.011	1.152
$R^2 = 0.999$			

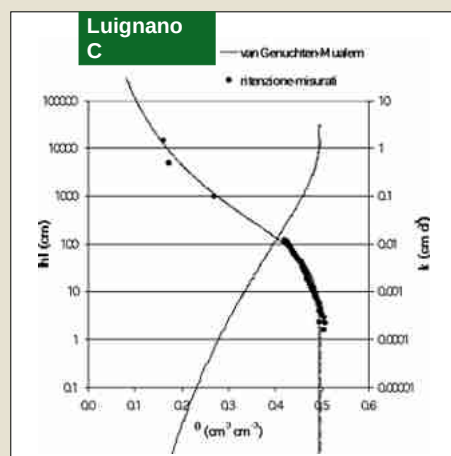
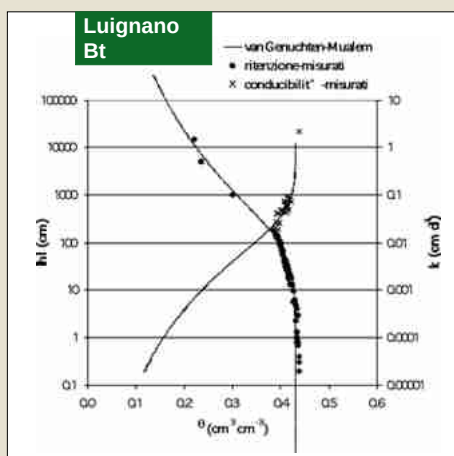
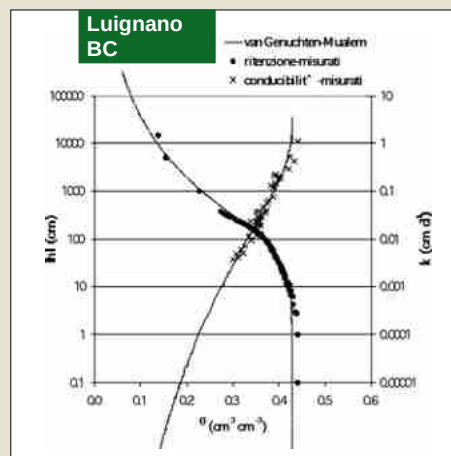
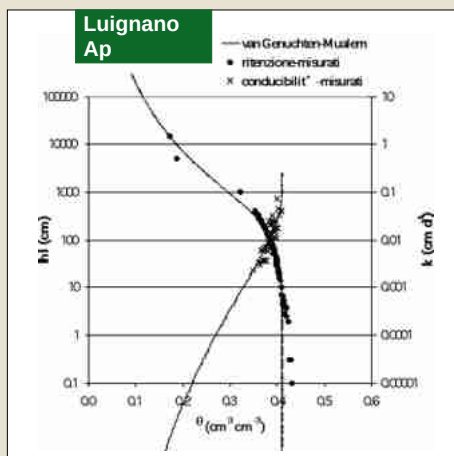
BC - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.427	0.012	1.238
Err. Stima	0.001	0.001	0.008
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.425	0.011	1.223
Limite superiore di confidenza al 95%	0.430	0.014	1.253
$R^2 = 0.987$			

C - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.494	0.014	1.217
Err. Stima	0.002	0.001	0.010
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.490	0.012	1.196
Limite superiore di confidenza al 95%	0.498	0.017	1.238
$R^2 = 0.991$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo

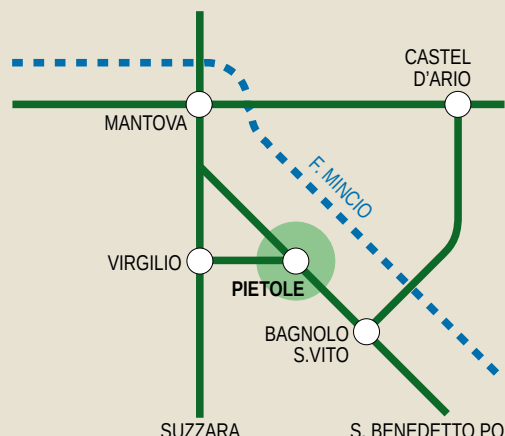


Sito di Pietole 1

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P002 - ARM (Pietole P3)
CTR 1:10.000	E7c5
Comune / Località	Virgilio (MN), località Pietole
Rilevatore / Data	ERSAF / 26-02-2002
Quota / Pendenza	20 m s.l.m. / 0,3%
Paesaggio	Superfici pianeggianti della Bassa pianura sabbiosa
Parent material	depositi alluvionali molto calcarei a tessitura media
Class. USDA 2003	fine, mixed, active, mesic, Typic Calcistep
Class. WRB 1998:	Haplic Calcisol



Descrizione degli orizzonti

Ap	0-25 cm; umido; bruno oliva (2.5Y4/4); franco argilloso; compresenza di frammenti poliedrici subangolari molto grandi debolmente sviluppati e secondariamente frammenti poliedrici angolari medi debolmente sviluppati; biopori molto grandi, scarsi; comuni radici molto fini; moderatamente calcareo; alcalino; limite inferiore abrupto ondulato.
Bss1	25-50 cm; umido; bruno oliva chiaro (2.5Y5/3); argilloso limoso; aggregazione principale poliedrica angolare molto grande debolmente sviluppata, aggregazione secondaria poliedrica subangolare grande debolmente sviluppata; biopori grandi, molto scarsi; poche radici molto fini; comuni pellicole orientate per pressione e scarse pellicole orientate per pressione e scivolamento; moderatamente calcareo; alcalino; limite inferiore diffuso lineare.
Bss2	50-70 cm; umido; bruno giallastro (10YR5/4); argilloso; aggregazione principale poliedrica angolare molto grande debolmente sviluppata, aggregazione secondaria poliedrica subangolare grande moderatamente sviluppata; biopori grandi, molto scarsi; poche radici molto fini; comuni pellicole orientate per pressione e scarse pellicole orientate per pressione e scivolamento; scarsamente calcareo; alcalino; limite inferiore chiaro lineare.
Bk	70-90 cm; umido; giallo pallido (2.5Y7/4); scarse screziature piccole, giallo oliva (2.5Y6/8); franco limoso; aggregazione poliedrica subangolare grande debolmente sviluppata; concentrazioni soffici di carbonato di calcio piccole e molto abbondanti; biopori grandi, molto scarsi; poche radici molto fini; fortemente calcareo; molto alcalino; limite inferiore diffuso ondulato, giallo.
C	90-110 cm; bagnato; bruno giallastro chiaro (2.5Y6/4); sabbioso; aggregazione poliedrica angolare grande debolmente sviluppata; fortemente calcareo; molto alcalino; limite inferiore sconosciuto.



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol _(c) /kg)					TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl				CSC	Ca	Mg	K	Na	
Ap	1,1	3,8	16,5	21,4	14,2	29,8	44,0	34,6	8,1	7,0	7	1,9	1,1	22,9	19,1	2,8	0,7	0,2	100
Bss1	1,0	4,4	10,9	16,3	16,0	26,0	42,0	41,7	8,2	7,1	6	1,2	0,7	20,5	16,2	2,9	1,0	0,4	100
Bss2	0,1	2,1	11,4	13,6	13,3	26,1	39,4	47,0	8,3	7,1	1	0,9	0,5	26,1	22,6	2,8	0,3	0,3	100
Bk	0,4	6,9	15,6	22,9	17,7	32,6	50,3	26,8	8,5	7,6	45	0,6	0,4	15,1	13,0	1,7	0,1	0,3	100
C	1,3	48,5	38,4	88,2	7,0	0,0	7,0	4,8	8,7	8,1	40	0,3	0,2	-	4,3	0,6	0,1	0,1	-

Caratterizzazione fisico-idrologica

Pietole 1 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap	Bss1	Bss2	Bk	C
Densità apparente, ρ^d (g cm ⁻³)	1.315	1.370	1.470	1.370	1.490
Porosità, P (%)	0.504	0.483	0.445	0.483	0.438
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.498	0.430	0.415	0.450	0.430
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	1063	2.10	2.65	22.8	64.8

Ap - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.500	0.073	1.094
Err. Stima	0.005	0.016	0.004
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.490	0.0401	1.086
Limite superiore di confidenza al 95%	0.510	0.1052	1.103
$R^2 = 0.968$			

Bk - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.450	0.023	1.161
Err. Stima	0.007	0.006	0.013
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.435	0.010	1.133
Limite superiore di confidenza al 95%	0.465	0.035	1.189
$R^2 = 0.966$			

Bss1 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.423	0.003	1.173
Err. Stima	0.002	0.001	0.009
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.418	0.002	1.154
Limite superiore di confidenza al 95%	0.428	0.004	1.192
$R^2 = 0.987$			

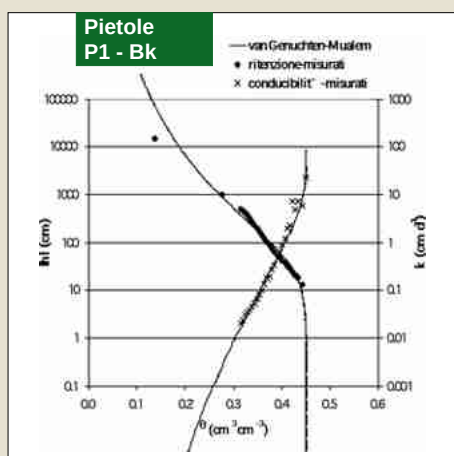
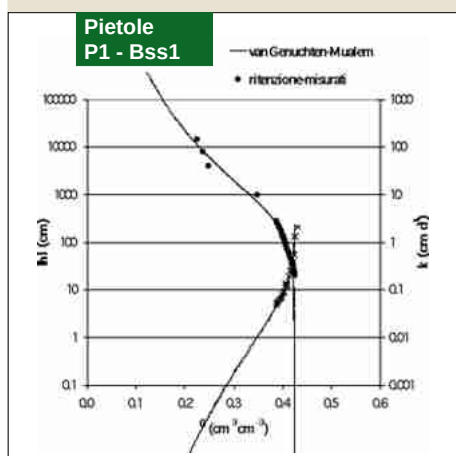
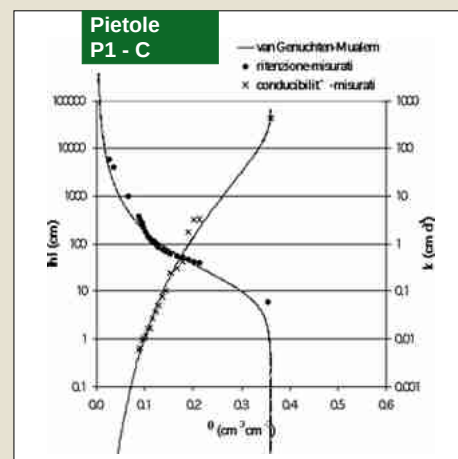
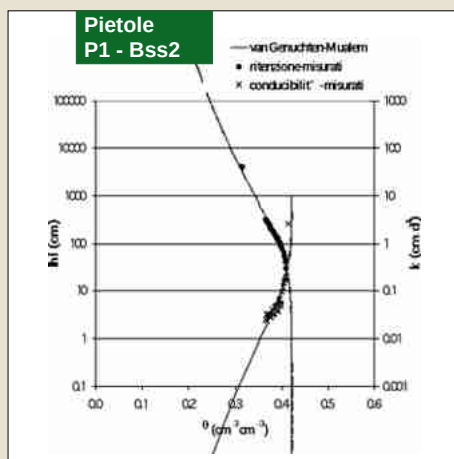
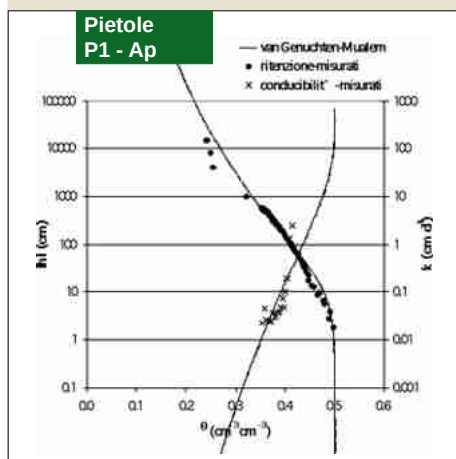
C - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.360	0.085	1.460
Err. Stima	0.011	0.017	0.037
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.337	0.050	1.383
Limite superiore di confidenza al 95%	0.383	0.120	1.536
$R^2 = 0.978$			

Bss2 - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.421	0.017	1.073
Err. Stima	0.002	0.003	0.003
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.417	0.011	1.066
Limite superiore di confidenza al 95%	0.426	0.022	1.080
$R^2 = 0.982$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo

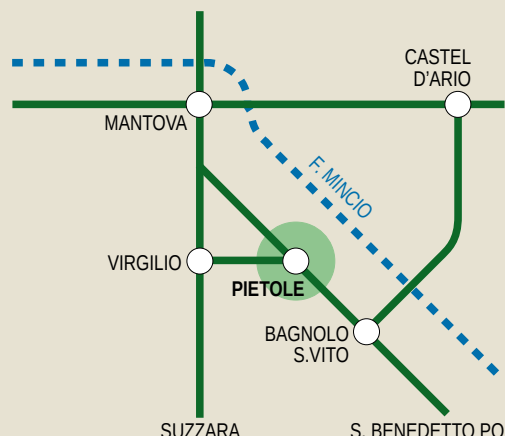


Sito di Pietole 2

Caratterizzazione pedologica

Descrizione della stazione

Profilo	P008 - ARM (Pietole new P1)
CTR 1:10.000	E7c5
Comune / Località	Virgilio (MN), località Pietole
Rilevatore / Data	ERSAF / 24-11-2004
Quota / Pendenza	20 m s.l.m. / 0,3%
Paesaggio	Superfici pianeggianti della Bassa pianura sabbiosa
Parent material	depositi alluvionali molto calcarei a tessitura media
Class. USDA 2003	fine silty, mixed, carbonatic, mesic Typic Calciustept
Class. WRB 1998	Haplic Calcisol



Descrizione degli orizzonti

Ap	0-40 cm; umido; bruno (10YR4/3); franco argilloso limoso; frammenti poliedrici subangolari grandi moderatamente sviluppati; molti macropori fini; radici comuni molto fini; scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
Bw	40-60 cm; umido; bruno giallastro scuro (10YR4/4), secondariamente bruno giallastro (10YR5/4); franco argilloso limoso; aggregazione poliedrica angolare media fortemente sviluppata; comuni skeletans; poche concrezioni di CaCO ₃ piccole; comuni macropori fini; radici assenti; scarsamente calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
BC	60-80 cm; umido; bruno giallastro chiaro (10YR6/4); franco argilloso limoso; aggregazione poliedrica angolare media debolmente sviluppata; comuni concrezioni di Fe/Mn molto piccole; poche concrezioni di CaCO ₃ molto piccole; comuni macropori fini; radici assenti; calcareo; limite inferiore abrupto, ondulato
Ck	80-100 cm; umido; giallo pallido (2.5Y7/4), scarse piccole screziature giallo brunastro (10YR6/8) a contrasto debole e limite chiaro; franco argilloso limoso; massivo; molte concrezioni di CaCO ₃ medie; pochi macropori fini; radici assenti; molto calcareo; limite inferiore abrupto, lineare.
C	100-130 cm; molto umido; bruno molto pallido (10YR7/4), comuni piccole screziature giallo brunastro (10YR6/8) a contrasto debole e limite chiaro; franco limoso; massivo; molto pochi macropori fini; radici assenti; calcareo limite inferiore abrupto, lineare.
Cg	130-175 cm; molto umido; grigio chiaro (10YR7/2), secondariamente giallo pallido (2.5Y7/4); franco limoso; massivo; molto pochi macropori molto fini; radici assenti; calcareo; limite inferiore sconosciuto (riscontrata laminazione suborizzontale di spessore variabile da alcuni mm a pochi cm, riconducibile ai processi di deposizione del substrato).



Determinazioni chimico-fisiche

Orizzonti	Tessitura (%)								pH		CaCO ₃ totale	SO	CO	Complesso di scambio (cmol _c /kg)					TSB
	Sg	Sf	Smf	Stot	Lg	Lf	Ltot	A	H ₂ O	KCl	%	%	%	CSC	Ca	Mg	K	Na	%
Ap	2,5	5,3	22,8	30,6	11,7	30,3	42,0	27,3	8,2	7,0	11	2,9	1,7	27,2	21,1	3,7	1,0	1,4	100
Bw	1,5	1,7	4,2	7,5	14,3	42,2	56,5	36,1	8,4	7,0	14	1,6	0,9	26,0	21,1	3,4	0,4	1,0	100
BC	0,6	1,4	0,5	2,5	12,2	54,2	66,4	31,0	8,6	7,2	50	0,8	0,5	19,1	15,7	2,1	0,3	1,0	100
Ck	3,6	5,9	0,2	9,7	12,8	57,9	70,7	19,6	8,7	7,3	73	0,6	0,4	16,5	13,5	1,8	0,1	1,1	100
C	0,4	0,8	20,7	21,9	29,3	39,1	68,4	9,7	8,7	7,6	58	0,2	0,1	10,8	8,5	1,1	0,1	1,1	100
Cg	0,5	0,2	50,2	50,9	1,1	20,4	21,5	27,6	8,8	7,4	61	0,2	0,1	17,4	13,2	2,7	0,2	1,3	100

Caratterizzazione fisico-idrologica

Pietole 2 - Principali caratteristiche fisiche

	Ap	Bw	BC	Ck	C	Cg
Densità apparente, ρ_d (g cm ⁻³)	1.410	1.390	1.360	1.430	1.350	1.320
Porosità, P (%)	0.468	0.475	0.487	0.460	0.491	0.502
Contenuto d'acqua massimo, $q_{\max}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.468	0.490	0.503	0.445	0.479	0.512
Conducibilità idraulica satura, k_{sat} (cm d ⁻¹)	4.09	55.3	44.0	40.9	12.9	10.2

Ap - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.450	0.005	1.138
Err. Stima	0.001	0.001	0.009
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.448	0.0039	1.120
Limite superiore di confidenza al 95%	0.453	0.0067	1.155
$R^2 = 0.961$			

Bw - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.482	0.017	1.095
Err. Stima	0.001	0.001	0.002
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.481	0.015	1.091
Limite superiore di confidenza al 95%	0.484	0.018	1.098
$R^2 = 0.993$			

BC - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.506	0.269	1.080
Err. Stima	0.003	0.032	0.001
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.499	0.204	1.077
Limite superiore di confidenza al 95%	0.512	0.333	1.083
$R^2 = 0.993$			

Ck - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.450	0.076	1.096
Err. Stima	0.004	0.015	0.004
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.441	0.047	1.088
Limite superiore di confidenza al 95%	0.459	0.106	1.103
$R^2 = 0.984$			

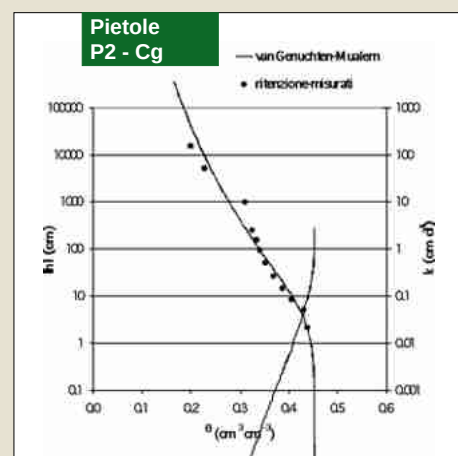
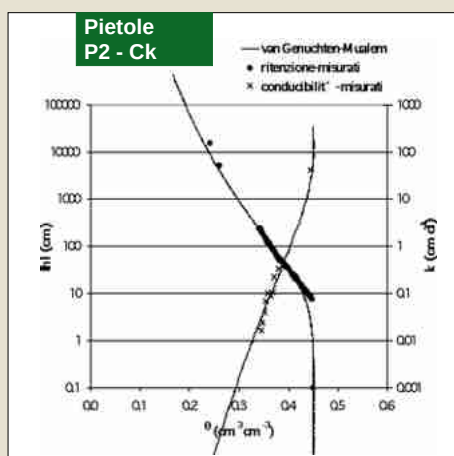
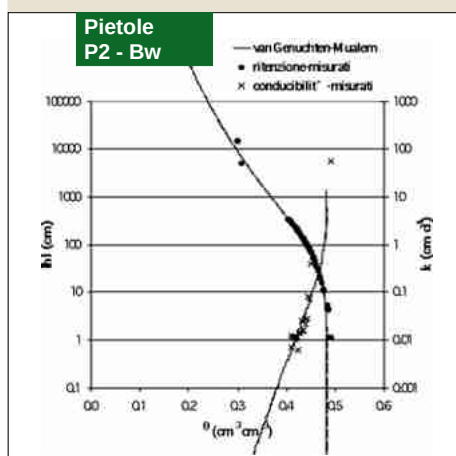
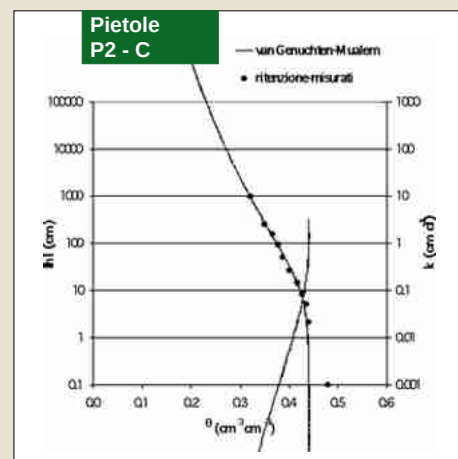
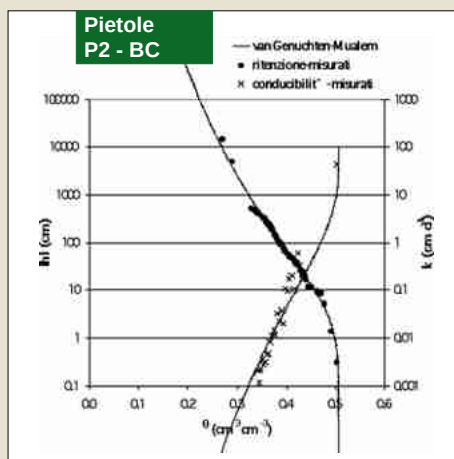
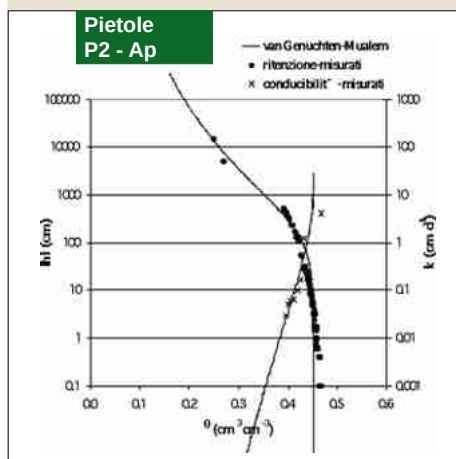
C - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.440	0.089	1.071
Err. Stima	0.010	0.085	0.019
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.416	0.107	1.029
Limite superiore di confidenza al 95%	0.464	0.284	1.114
$R^2 = 0.931$			

Cg - Parametri curva di ritenzione di van Genuchten

	q_0	a	n
Valore	0.451	0.247	1.089
Err. Stima	0.025	0.250	0.010
Limite inferiore di confidenza al 95%	0.396	0.319	1.065
Limite superiore di confidenza al 95%	0.507	0.813	1.112
$R^2 = 0.993$			

Curve di ritenzione per gli orizzonti di suolo



Bibliografia

- Acutis M., Donatelli M., 2003. SOILPAR 2.00: Software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4): 373-377.
- Acutis M., Grignani C., Reyneri A., 1992. Perdita di suolo e qualità delle acque ruscellate da terreni sistemati a spianata e coltivati a mais. *Rivista di Agronomia*, 26-4 suppl.: 648-654.
- Acutis M., Ducco G., Grignani C., 2000. Stochastic use of the LEACHN model to forecast nitrate leaching in different maize cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 13: 191-206.
- Addiscott, T. M., Whitmore, A. P., Powlson, D. S., 1991. Farming, fertilizers and the nitrate problem. CAB International, Wallingford.
- Arcara, P.G., Gamba, C., Bidini, D., Marchetti, R., 1999. The effect of urea and pig slurry fertilization on denitrification, direct nitrous oxide emission, volatile fatty acids, water-soluble carbon and anthrone-reactive carbon in maize-cropped soil from the Po plain. *Biol. Fertil. Soils*, 29: 270-276.
- Basile, A., G. Ciollaro, A. Coppola, 2003. Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measured hydraulic properties, *Water Resources Research*, 39(12), 1355, doi: 10.1029/2003WR002432.
- Basile, A., A. Coppola, R. De Mascellis, L. Randazzo, 2006. A hysteresis based scaling approach to deduce field hydraulic behavior from core scale measurements. *Vadose Zone Journal*, 2006 - 171.66.123.123.
- Bellocchi, G., Silvestri, N., Mazzoncini, M., Menini, S., 2002 Using the CropSyst model in continuous rainfed maize (*Zea mays* L.) under alternative management options. *Italian Journal of Agronomy* 6 (1): 43-56.
- Beraud, J., Fine, P., Yermiyahu, U., Keinan, M., Rosenberg, R., Hadas, A., Bar-Tal, A., 2005. Modeling Carbon and Nitrogen Transformations for Adjustment of Compost Application with Nitrogen Uptake by Wheat. *J. Environ. Qual.*, 34: 664-675.
- Beretta G. P., Cambareri M.N., Chinaglia N., Masetti M., Pilati M., Riparbelli C. (2005). "Utilizzo di un approccio integrato idrogeologico-pedologico per l'individuazione della vulnerabilità dell'acquifero all'inquinamento in Lombardia" *Geologia Insubrica* vol 8/2 pp. 33-44.
- Beven, K., Germann, P., 1981. Water flow in soil macropores. II. A combined flow model. *J. Soil Sci.*, 32: 15-29.
- Beven, K., Germann P., 1982. Macropore and water flow in soils. *Water Resources Research.*, 18: 1311-1325.
- Blombäck K., Stähli M., Eckersten H., 1995. Simulation of water and nitrogen flows and plant growth for a winter wheat in central Germany. *Ecological modelling* 81, 157-167
- Booltink, H.W.G., Hatano, R., Bouma, J., 1993. Measurement and simulation of bypass flow in a structured clay soil: a physico-morphological approach. *J. Hydrol.*, 148:149-168.
- Bradbury, N.J., A.P. Whitmore, P.B.S. Hart, D.S. Jenkinson. 1993. Modelling the fate of N in crop and soil in the year following application of ¹⁵N labelled fertilizer to winter wheat. *Journal of Agricultural Science Cambridge*, 121: 363-379.
- Brenna S., Malucelli F., Andreoli L., Albani G., Sanpietri W., DeMascellis R., Basile A., Terribile F. e Acutis M., (2003). "Il Progetto ARMOSA: monitoraggio dei flussi di azoto nell'agroecosistema e verso la falda". *Atti del XXXV Convegno della Società Italiana di Agronomia*, Portici(NA).

- Brenna S., Pastori M.: "Nitrati di origine agricola. Aree vulnerabili e loro monitoraggio". INQUINAMENTO tecnologie ambiente e uomo, Maggio 2005 - Anno XLVII Numero 71.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, C. Hénault, F. Maraux, B. Seguin, H. Sinoquet. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346.
- Brooks, R.H., Corey A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3, Colorado State University, Fort Collins CO.
- Calzolari, C., Ungaro, F., Guermandi, M. e Laruccia, N., 2001. Suoli capisaldo della pianura padano-veneta: bilanci idrici e capacità protettiva. Progetto SINA Carta Pedologica, Sottoprogetto 2. Rapporto 10.1, CNR-IGES Istituto per la Genesi e l'Ecologia del Suolo, Firenze.
- Campbell, S.G., 1985. Soil Physics with Basic Transport Models for Soil-Plant Systems. Elsevier.
- Clothier, B.E., Kirkham M.B., McLean J.E., 1992 In situ measurements of the effective transport volume for solute moving through soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:733-736.
- Collana di metodi analitici per l'agricoltura diretta da Paolo Sequi, FrancoAngeli
- CRPV (Centro Ricerche Produzioni Vegetali) 2005, Norme generali del Disciplinaire di Produzione Integrata della Regione Emilia-Romagna, consultabile su <http://www.ermesagricoltura.it>
- Dane, J.H. e Hopmans, J.W., 2002 Water retention and storage. p. 671-720. In *Methods of soil analysis: Part 4-Physical methods* (Dane, J.K. & Topp, G.C. eds.), SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Donatelli M., Stockle, C., Ceotto, E., Rinaldi, M., 1997. Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy. *European Journal of Agronomy*, 6: 35-45.
- Duxbury, J.M., Smith, M.S., Doran, J.W., Jordan, C., Szott, L., Vance, E., 1989. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: Coleman, D., Oades, J., Uehara, G. (eds), *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. University of Hawaii Press, Honolulu: 33-67.
- Eckersten, H., Jansson, P.E., Johnsson, H., 1996. SOILN model, user's manual, 3th Ed. Comm. 96:1, Swedish Univ. Agric. Sci., Dpt. of Soil Sciences, Uppsala.
- EEA - Agenzia Europea per l'Ambiente, Le risorse idriche in Europa, una valutazione basata su indicatori, technical report n.3, 2003;
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. Zaradny, H., 1978. Simulation of water use and crop yield. *Simulation Monogr*, PUDOC, Wageningen, 188 pp.
- Fila G., Bellocchi G., Acutis M., Donatelli M., 2003. IRENE: a software to evaluate model performance. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4): 369-372.
- FitzPatrick, E.A., 1984. *Micromorphology of Soils*. Chapman & Hall, London, p. 433.
- FitzPatrick, E.A., 1993. *Soil microscopy and Micromorphology*. Wiley, Chichester, UK, p. 304.
- Gabrielle, B., B. Mary, R. Roche, P. Smith, G. Gosse. 2003. Simulation of carbon and nitrogen dynamics in arable soils: a comparison of approaches. *European Journal of Agronomy*, 18: 107-120.
- Garnier, P., C. Néel, B. Mary, F. Lafolie. 2001. Evaluation of a nitrogen transport and transformation model Bradbury, N.J., A.P. Whitmore, P.B.S. Hart, D.S. Jenkinson. 1993. Modelling the fate of N in crop and soil in the year following application of ¹⁵N labelled fertilizer to winter wheat. *Journal of Agricultural Science Cambridge*, 121: 363-379.
- Garnier, P., C. Néel, C. Aita, S. Recous, F. Lafolie, B. Mary. 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *European Journal of Soil Science*, 54: 555-568.

Bibliografia

- Gusberti D., Acutis M., 2006. The simulation of soil water balance: comparison of CropSyst and MACRO model per-formances. Proceedings of the IX European Society for Agronomy Congress, M. Fotyma & B. Kami_ska (Eds.). Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 11: 283-284.
- Gusberti D., Acutis M., Albani G., Brenna S., 2006. Nitrate leaching of a continuous maize cropping system for silage production under minimum tillage management. Proceedings of the IX European Society for Agronomy Congress, M. Fotyma & B. Kami_ska (Eds.). Bibliotheca Fragmenta Agronomica, 11: 651-652.
- Hamilton, P. A., Helsel, D. A., 1995. Effects of agriculture on ground-water quality in five regions of the United States. *Ground Water*, 33: 217-226.
- Jarvis, N.J., Hollis, J.M., Nicholls, P.H., Mayr, T., Evans, S.P., 1997. MACRO-DB. A decision-support tool for assessing pesticide fate and mobility in soils. *Environ. Modell. Software*, 12: 251-265.
- Jarvis, N.J., Messing, I., 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture and measured by tension infiltrometers. *Soil Sci. Amer. J.*, 59: 27-34.
- Jarvis, N.J., Nicholas J., 1994. The MACRO model (Version 3.1). Technical description and sample simulations. Reports and Dissertations. 19, Dept. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala.
- Jarvis, N.J., Nicholas J., 2003. The MACRO Model (Version 4.3) Technical Description. SLU, Department of Soil Sciences, Box 7014, 750 07 Uppsala.
- Johnsson, H., Bergstrom, L., Jansson, P.E., Paustian, K., 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 18: 333-356.
- Johnsson, H., Larsson, M., Martensson, K., Hoffmann, M., 2002. SOILNDB: a decision support tool for assessing nitrogen leaching losses from arable land. *Environ-mental Modelling & Software*, 17: 505-517.
- Kätterer, T. e O. Andrén. 2001. The ICBM family of analytically solved models of soil carbon, nitrogen and microbial biomass dynamics - description and application examples. *Ecological Modelling*, 136: 191-207
- Kolpin, D. W., 1997. Agricultural chemical in ground-water of the Midwestern United States: relations to nitrate exposure. *J. Environ. Qual.*, 26: 1025-1037.
- Larsbo, M., e Jarvis, N. 2003. MACRO5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. Studies in the Biogeophysical Environment. Report. Emergo 2003:6
- Larsson, M.H., Jarvis, N. J., 1999. Evaluation of a dual-porosity model to predict field-scale solute transport in a macroporous soil. *Journal of Hydrology*, 215: 153-171.
- Libardi, P.L., K. Reichardt, D.R. Nielsen, e J.W. Biggar. 1980. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:3-7.
- Lord, E. I., Shepherd, M. A., 1993. Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. *Journal of Soil Science*, 44 (3): 435-449.
- Marchetti, R., Ponzoni, G., Spallacci, P., 2004. Simulating Nitrogen Dynamics in Agricultural soils fertilized with pig slurry and urea. *J. Environ. Qual.*, 33: 1217-1229.
- Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (MIPAF) 2005. Metodi di Analisi Mineralogica del Suolo.

- Molina, J.A.E. e P. Smith. 1998. Modeling carbon and nitrogen processes in soil. *Advances in Agronomy*, 62: 253-298.
- Molina, J.A.E., C.E. Clapp, M.J. Shaffer, F.W. Chichester, W.E. Larson. 1983. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformation in soil: description, calibration and behavior. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 85-91.
- Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522.
- Parton, W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole, D.S. Ojima. 1986. Analysis of Factors Controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 1173-1179.
- Pellerin, S., Mollier, A., Plenet, D., 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots. *Agronomy Journal*, 92: 690-697.
- Robinson, D.A., S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or, S.P. Friedman. 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soil using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2:444-475.
- Rossi Pisa P., 1997. Conducibilità idraulica nel suolo saturo, in "Metodi di analisi fisica del suolo", Ministero delle Politiche Agricole, Osservatorio Nazionale Pedologico per la qualità del Suolo. Collana di metodi analitici per l'agricoltura e diretta da Paolo Sequi. Franco Angeli editore.
- Sequi, P., Antisari, L. V., 1989. Environmental and agronomic aspects of nitrogen dynamics. *Dinamismo chimico dell'azoto: aspetti agronomici e ambientali*. *Rivista di Agronomia*, 23 (1): 30-42.
- Simunek, J., e M. Th. van Genuchten, 1997. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension disc infiltrometer data, *Soil Science*, 162(6), 383-398.
- Smith, J.U., P. Smith, R. Monaghan, A.J. MacDonald. 2002. When is a measured soil organic matter fraction equivalent to a model pool? *European Journal of Soil Science*, 53:405-416.
- Stevenson, F. J., 1982. Nitrogen - organic forms. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, 625-641.
- Stöckle, C.O., M. Donatelli, R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18: 289-307.
- Tamari, S., L. Bruckler, J. Halbertsma, and J. Chadoeuf. 1993. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:642-651.
- Topp, G.C., J.L. Davis, A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, Vol 16, No 3: 574-582.
- Van Dam, J.C., Huygen, J.C., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., van Diepen, C.A., 1997. Theory of SWAP-Version 2.0. Simulation of Water Flow, Solute Transport and Plant Growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant Environment. Report 71, Department Water Resources Wageningen University, Technical document 45, Alterra, Wageningen, the Netherlands, 167 pp.
- Verberne, E.L.J., J. Hassink, P. de Willigen, J.J.R. Groot, J.A. van Veen. 1990. Modelling organic matter dynamics in different soils. *Netherlands Journal of Agricultural Sciences*, 38: 221-238.
- Wegehenkel, M., Wilfried, M., 2006. Crop growth, soil water and nitrogen balance simulation on three experimental field plots using the OPUS model- A case study. *Ecol. Model.* 190 (1/2): 116-132.
- Whitmore, A.P., H. Klein-Gunnewiek, G.J. Crocker, J. Klír, M. Körschens, P.R. Poulton. 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the Verberne/MOTOR model. *Geoderma*, 81: 137-151.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*. 4: 1259-1273.
- Wu, L., M.B. McGeachan. 1998. A Review of Carbon and Nitrogen Processes in Four Soil Nitrogen Dynamics Models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69: 279-305.

Contributi specifici

- Marco Pastori (ERSAF) - coordinamento attività di monitoraggio, realizzazione e gestione della banca dati ARMOSA, e coautore dei cap.2 e cap.5.
- Antonello Bonfante (Università degli Studi di Napoli Federico II e CNR-ISAFOM) - modellistica idrologica e coautore del cap. 4.2.
- Roberto de Mascellis (CNR - ISAFOM) - progettazione, realizzazione e gestione dei siti di monitoraggio, realizzazione del software di analisi dati TDR e relativa elaborazione dati e coautore del cap. 3 e dell'Allegato A.
- Davide Gusberti (Università degli Studi di Milano- DiProVe) - contributo dato relativamente alla tematica della modellistica dell'azoto e coautore del cap. 4.3-4.4.
- Simona Vingiani (Università degli Studi di Napoli Federico II - DISSPAPA) - caratterizzazione mineralogica, descrizione dei caratteri pedologici e coautrice del cap. 2 e degli Allegati A e B.
- Piero Manna (Università degli Studi di Napoli Federico II - DISSPAPA) - modellistica idrologica.
- Alessia Perego (Università degli Studi di Milano- DiProVe) - testing del modello ARMO-SA e per il contributo alla redazione del cap.4.3-4.4 e cap.5.
- Maria Cristina Velardo (Università degli Studi di Milano- DiProVe) - analisi modellistica dell'azoto e contributo alla redazione del cap. 4.3-4.4.
- Giorgio Albani, Francesco Malucelli e Marco Sciaccaluga (ERSAF) - gestione dei siti di monitoraggio, attività di rilevamento e campionamento.
- Pasquale Eduardo e Massimo Nicolazzo - supporto alla realizzazione del software di analisi dati TDR e alla progettazione dei sistemi di acquisizione dati di campo.
- Nadia Orefice (CNR-ISAFOM) - analisi idrologiche dei suoli.
- Patrizia Trevisiol (Università degli Studi di Milano- DiProVe) - supporto informatico alla realizzazione del modello ARMOSA.
- Antonella Gentile e Mattia Fumagalli (Università degli Studi di Milano- DiProVe) - supporto agronomico, tecnico e informatico alla gestione dei dati.
- Barbara Bettoni, Barbara Bertazzoni, Paolo Preus e Lucio Loatelli (ERSAF) - analisi chimiche campioni di suolo e acque.

Si ringraziano inoltre:

- Rodolfo Baculo, Rosario Dell'Aquila, Bruno Di Matteo, Ferdinando Di Matteo e Fulvio Fragnito (CNR ISAFOM).
- Stefano Salvati dell'Università degli Studi di Milano.
- Marisa Meda e Gianpaolo Bertoncini (Regione Lombardia - D.G. Agricoltura) e Nadia Chinaglia (Regione Lombardia - D.G. Reti e Servizi di pubblica utilità e sviluppo sostenibile).
- Marco Castelnuovo (Fondazione Centro Lombardo per l'incremento della Floro-ortofrutticoltura "Scuola di Minoprio").
- Paolo Tartaglia, Maria Luisa Gargano e le aziende agricole che hanno ospitato i siti sperimentali.

Realizzazione fotografie
Carlo Silva: fotografia di pagina 92
Tutte le altre foto sono di proprietà ERSAF

Progetto grafico e stampa
L'O - L'Officina della Pubblicità - 20122 Milano - Corso Italia 38



RegioneLombardia

Agricoltura

Il sito della ricerca in agricoltura
www.agricoltura.regione.lombardia.it