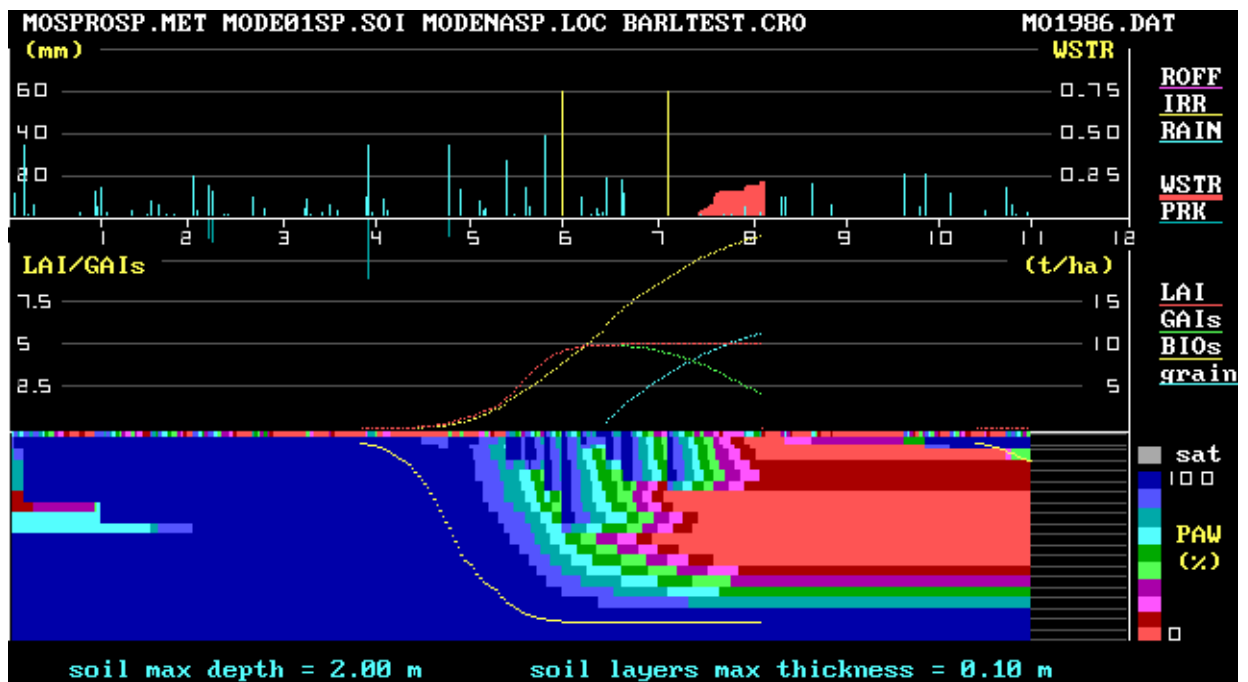


Sistemi nella Gestione Integrata delle Colture - Appunti dalle lezioni

Appunti dalle lezioni del corso tenuto durante l'autunno 1992 da C. Stockle - Dep. of Biological System Engineering, G. Campbell - Dep. of Crop and Soil Science e G. Long - Dep. of Entomology, presso la Washington State University, Pullman, Washington, USA

Marcello Donatelli



ISTITUTO SPERIMENTALE AGRONOMICO
Sezione di Modena

MINISTERO DELLE RISORSE
AGRICOLE, ALIMENTARI E FORESTALI

la corretta citazione di questo volume è:

Donatelli, M. 1995. Sistemi nella gestione integrata delle colture - Appunti dalle lezioni. Pubblicazione speciale dell'Istituto Sperimentale Agronomico, ISA-Sezione di Modena, Modena, 133 pag.

Progetto Finalizzato PANDA, Serie Generale, Pubblicazione no. 3

copie di questo volume saranno disponibili sino ad esaurimento per enti o istituzioni pubbliche che inoltrino richiesta scritta

la fotografia della copertina riproduce uno degli output grafici del sistema CSYMBA (Cropping SYstems Model Building Assistant):

Donatelli, M., E. Ceotto, R. Marchetti e P. Spallacci. 1994. CSYMBA: a PC based shell for cropping system simulation model development. Proceedings of the III ESA Congress, Abano Terme, Padova, Italy, 18-22 Settembre

stampato in proprio in Modena, maggio 1995

Indice

| | |
|------------------------|----------|
| Prefazione..... | 1 |
|------------------------|----------|

| | |
|-------------------------------|----------|
| Nota dell'autore | 2 |
|-------------------------------|----------|

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introduzione all'analisi dei sistemi e ai modelli di simulazione..... | 3 |
|----------|--|----------|

| | |
|---|---|
| Cosa sono i sistemi e l'analisi dei sistemi? | 3 |
| Che cos'è una simulazione ? | 4 |
| Uso della simulazione attuata con il computer nell'analisi dei sistemi biologici | 4 |
| I modelli in agricoltura: alcuni esempi | 6 |
| <i>Modelli di processo</i> | 6 |
| <i>Modelli di crescita per colture</i> | 7 |
| <i>Altri modelli di crescita</i> | 7 |
| <i>Modelli a larga scala</i> | 8 |

| | | |
|----------|--|----------|
| 2 | Classificazione dei modelli di simulazione..... | 9 |
|----------|--|----------|

| | |
|--|----|
| Modelli empirici e modelli meccanicistici..... | 9 |
| Modelli statici e dinamici | 10 |
| Modelli deterministici e modelli stocastici..... | 10 |
| Tipi di modelli usati frequentemente nella simulazione di sistemi agricoli | 11 |
| Elementi di modelli dinamici e deterministici | 12 |
| <i>Variabili</i> | 12 |
| <i>Parametri e costanti</i> | 12 |
| Modelli concettuali e diagrammi relazionali | 13 |
| Equazioni differenziali e finite | 14 |
| Integrazione di equazioni differenziali | 14 |
| L'intervallo di integrazione | 17 |
| Integrazione con effetti ricorsivi..... | 18 |
| Integrazione con discontinuità | 19 |
| Tecniche iterative..... | 19 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Modellazione dei sistemi biologici in relazione all'ambiente: sviluppo, temperatura e fotoperiodo | 21 |
|----------|--|-----------|

| | |
|---|----|
| Sviluppo in relazione alla temperatura | 21 |
| Tempo termico | 22 |
| Calcolo dei gradi giorno da dati meteorologici..... | 23 |
| Calcolo dei gradi giorno e temperature estreme | 25 |
| Normalizzazione del tempo termico | 26 |
| Tempo termico in relazione ad altre variabili ambientali | 27 |
| La temperatura e la crescita degli organismi..... | 28 |
| Stima del fotoperiodo e della temperatura ambientale | 28 |
| Durata del giorno e ora dell'alba | 28 |
| <i>esempio di calcolo</i> | 30 |
| Interpolazione per stime orarie di temperatura | 30 |
| Variazione spaziale della temperatura dell'aria..... | 31 |
| Stima della temperatura del suolo dalla temperatura dell'aria | 32 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Modellazione dei sistemi biologici in relazione all'ambiente: relazioni con l'acqua | 34 |
|----------|--|-----------|

| | |
|--|----|
| Il bilancio idrico nei sistemi viventi..... | 34 |
| Modellazione della perdita di acqua: legge di Fick | 34 |
| Il vapor acqueo nell'aria e nelle superfici evaporanti..... | 35 |
| Resistenza alla diffusione del vapore..... | 37 |
| <i>esempio di calcolo</i> | 38 |
| Flusso dell'acqua nel continuum suolo-pianta-atmosfera | 38 |
| Assorbimento di acqua delle radici..... | 40 |
| Modelli semplificati di assorbimento di acqua | 42 |
| Traspirazione delle piante | 43 |
| Combinazione di disponibilità e richiesta di acqua | 43 |
| Crescita in relazione all'acqua..... | 45 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Modellazione dell'acqua negli organismi viventi | 47 |
|----------|--|-----------|

| | |
|---|----|
| L'umidità atmosferica..... | 47 |
| Contenuto d'acqua nel suolo | 48 |
| <i>esempio di calcolo</i> | 50 |
| Precipitazioni | 51 |
| Modellazione dell'evapotraspirazione potenziale | 53 |
| Partizione dell'ETP tra evaporazione potenziale e traspirazione potenziale..... | 54 |
| Traspirazione ed evaporazione effettiva | 55 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | La radiazione solare..... | 56 |
| | La radiazione potenziale | 56 |
| | La radiazione solare giornaliera..... | 56 |
| | Suddivisione della radiazione tra diretta e diffusa..... | 58 |
| | Distribuzione spettrale della radiazione e radiazione fotosinteticamente attiva..... | 60 |
| | Assorbimento di energia solare da parte di superfici di suolo e piante..... | 60 |
| | Radiazione termica | 61 |
| | La radiazione netta per modelli di evapotraspirazione | 63 |
| 7 | Modellazione della risposta di organismi allo ambiente: fotosintesi e respirazione | 64 |
| | Modellazione della risposta della fotosintesi alla luce | 64 |
| | Modelli semplici d'intercettazione della luce..... | 67 |
| | Modellazione della risposta della fotosintesi alla disponibilità di CO ₂ | 68 |
| | Modellazione della respirazione | 69 |
| 8 | La luce nei manti vegetali..... | 71 |
| | L'indice di superficie fogliare e la trasmissione della luce nel manto vegetale | 71 |
| | Modelli dettagliati di intercettazione della luce da parte dei manti vegetali | 72 |
| | Trasmissione della radiazione diffusa..... | 74 |
| | La diffusione della luce nei manti vegetali | 75 |
| | Calcolo della densità di flusso di PAR sulle foglie di un manto vegetale | 75 |
| | Integrazione giornaliera | 76 |
| 9 | Concetti di base per lo sviluppo di modelli..... | 78 |
| | Le interazioni tra fattori nei modelli | 78 |
| | <i>esempio: tasso di decomposizione di residui colturali.....</i> | <i>79</i> |
| | <i>esempio: infestazione fungina su foglie di patata</i> | <i>80</i> |
| | Tipo di dati utilizzabili per sviluppare un modello..... | 81 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10 | Sviluppo e crescita delle colture | 82 |
| | Sviluppo delle colture | 82 |
| | Accrescimento delle colture..... | 85 |
| | Fissazione del carbonio..... | 86 |
| | Respirazione..... | 87 |
| | Produzione di biomassa | 87 |
| | Partizione del carbonio | 88 |
| | <i>Partizione del carbonio predeterminata</i> | 89 |
| | <i>Partizione del carbonio in funzione della domanda di crescita</i> | 89 |
| | <i>Equilibrio funzionale</i> | 90 |
| | <i>Modelli di resistenza al trasporto</i> | 92 |
| | Accrescimento del manto vegetale | 92 |
| | Accrescimento delle radici..... | 93 |
| | Produzioni utili | 94 |
| 11 | Modellazione del bilancio idrico..... | 96 |
| | Intercettazione..... | 96 |
| | Ruscigliamento..... | 96 |
| | Infiltrazione e redistribuzione | 98 |
| | Evapotraspirazione potenziale | 98 |
| | Partizione dell'evapotraspirazione potenziale..... | 101 |
| | Traspirazione effettiva (assorbimento di acqua della coltura)..... | 102 |
| | Evaporazione dal suolo | 104 |
| 12 | Modellazione del bilancio dell'azoto | 105 |
| | Trasformazioni dell'azoto | 105 |
| | Trasporto dell'azoto nel suolo | 108 |
| | Adsorbimento dell'ammonio..... | 109 |
| | Assorbimento dell'azoto da parte della coltura | 109 |
| | Allocazione dell'azoto e interazione con il carbonio | 112 |
| 13 | Valutazione dei modelli di simulazione..... | 113 |
| | Differenze tra dati simulati e misurati sperimentalmente | 113 |
| | Il grafico valori stimati vs. valori misurati..... | 115 |
| | Il grafico valori stimati e misurati vs. il tempo..... | 117 |
| | Indici numerici per la valutazione di modelli | 117 |
| | <i>Misure di correlazione</i> | 117 |
| | <i>Misure di differenze</i> | 118 |
| | Bibliografia | 120 |

Prefazione

Agronomic crop management, the compendium of practices applied to grow crops in a given location, can not be analyzed or evaluated independently of weather, soil characteristics, field hydrology, crop characteristics, and crop rotation, among other factors. Furthermore, the objective of agricultural management can not be assumed to be simply that of maximizing productivity per unit area of land. Other objectives may include the maximization of profit per unit land or for a given operation, and of increasing importance, the minimization of the potential impact of these practices on the environment.

The evaluation of the suitability of agronomic management implies different levels of spatial integration which may encompass from a point in a field, to a field, to a farm, or a region, properly incorporating the spatial variability of soils and weather within the domain of interest, as well as the long-term temporal integration of fluctuating weather conditions over the point or region of interest, as required for risk analysis and probabilistic assessment. All this is confounded by rapidly changing market demands, prices, and technology, requiring also rapid adjustment of cropping systems management to properly cope with new conditions.

Field experimentation, the traditional corner stone of agricultural sciences, is becoming increasingly inadequate to rapidly provide the answers required in the fast-paced environment that characterizes agriculture today. This explains the growing interest on computer simulation and associated computer-based technologies such as geographic information systems and weather generators, which are increasingly viewed and accepted as important tools to provide pre-assessment of the possible impact of selected cropping systems management scenarios. In this regard, computer simulation must not be perceived as replacement to field experimentation but rather as a useful approach to extrapolate in time and space the results obtained by laborious and necessary agricultural experimentation.

The objective of this course and these notes is to provide researchers, practitioners, and students with a first but comprehensive introduction to the concept, development and application of cropping system models. It is our hope that this material will motivate the curious student to initiate a lasting process of self education on the subject.

Claudio O. Stockle and Gaylon S. Campbell

Nota dell'autore

Questi appunti si riferiscono al corso sui sistemi nella gestione integrata delle colture, dall'inglese "Systems in Integrated Crop Management", offerto per la seconda volta nell'Università dello Stato di Washington durante il 1992 dai prof.ri Gaylon Campbell - Dip. Crop and Soil Science, Claudio Stockle - Dip. Biological Systems Engineering e Gary Long - Dip. Entomology.

Il corso ha riguardato la modellistica cercando di integrare le diverse competenze presenti nei Dipartimenti di Ingegneria dei Sistemi Biologici, di Scienza del Suolo e delle Colture, e di Entomologia.

L'attualità dell'argomento, il fatto che un testo sul corso, sia pure in inglese, non è tutt'ora disponibile ed infine la novità rappresentata dal corso stesso, assai raro se non unico nel panorama delle università americane nel momento in cui questa prefazione viene scritta, hanno fatto ritenere che queste note potessero avere un interesse per chi si accosta alla problematica della modellistica dei sistemi colturali. Nel testo sono comunque inserite una quantità di formule che sono il frutto della decennale attività di sintesi e di ricerca degli autori nei vari aspetti della modellazione di sistemi biologici, raccolta che quindi può risultare utile anche a coloro che attivamente lavorano in questo settore della ricerca.

Queste note sono state rese possibili dalla qualità del corso, intesa come chiarezza ed efficacia dei docenti, e come qualità del materiale distribuito. In queste note non è però inclusa la parte relativa alla modellazione di popolazioni entomatiche, parte che è risultata poco integrata o integrabile, così come è stata trattata, con la simulazione del sistema clima-suolo-pianta.

1 Introduzione all'analisi dei sistemi e ai modelli di simulazione

I computer hanno prodotto cambiamenti rilevanti in molti aspetti dell'attività umana. Relativamente alla produttività, due aspetti conseguenti l'uso dei computer sono stati e continuano ad essere di estrema importanza: l'incremento della produttività stessa e il miglioramento della qualità.

Applicazioni dell'uso dei computer alla scienza ed alla tecnologia hanno comportato modifiche in tutti i settori di attività: nella ricerca, nell'istruzione scolastica e nel training tecnico, nell'organizzazione del lavoro e nella gestione dell'impresa.

La simulazione e la modellistica sono tra le più importanti applicazioni dei computer; le simulazioni attuate con computer sono peraltro attuate praticamente da quando i computer sono diventati disponibili. Durante i primi anni, l'industria aeronautica e aerospaziale hanno costituito l'agente catalitico per un rapido sviluppo delle tecniche di simulazione.

Lo sviluppo delle tecniche di simulazione è progredito comunque con un tasso molto più elevato parallelamente al notevole incremento dell'aumento di accessibilità ai computer verificatosi con l'avvento dei personal computer. Questo tasso di sviluppo è stato tuttavia meno rilevante per quelle discipline legate allo studio di sistemi biologici come le scienze agrarie. La ragione di ciò è data dalle complesse interazioni tipiche di questi sistemi, dalla mancanza di una comprensione completa delle leggi che governano il loro comportamento, e dalla natura interdisciplinare delle problematiche relative, che spaziano dalla fisica alla chimica, dalla matematica alla biologia, dall'informatica alla statistica e ad altre. Rispetto a questo problema, un aspetto positivo è stato dato nell'ultimo ventennio dall'incremento delle ricerche mirate a definire quantitativamente leggi biologiche interagendo positivamente con il livello di conoscenza, e quindi della possibilità di manipolazione, dei sistemi biologici. In effetti, tutto ciò ha prodotto una svolta determinante nella conoscenza dei sistemi biologici, il cui forte impatto sarà evidente negli anni a venire.

Cosa sono i sistemi e l'analisi dei sistemi?

Secondo una definizione di Banks e Carson (1984), un sistema è un gruppo di elementi che sono uniti insieme in una qualche interazione o interdipendenza finalizzata ad ottenere un determinato scopo. Leffelaar e Ferrari (1989) hanno invece definito un sistema come una parte di realtà che contiene elementi interrelati. Esempi di sistemi biologici vanno dagli organuli delle cellule di una pianta al sistema respiratorio di un animale, o ad un sistema di simulazione di un bioprocesso come un sistema culturale o ecologico. Come discusso da Thornley e Johnson (1990), i sistemi biologici sono sistemi gerarchici caratterizzati da numerosi livelli di organizzazione.

L'analisi dei sistemi consiste nello studio del sistema ad un tempo determinato, oppure lo studio del comportamento del sistema stesso nel tempo in risposta a perturbazioni che tendano ad alterarne lo stato di equilibrio cui tende. L'analisi del sistema, piuttosto che consistere nella descrizione statica delle componenti del sistema stesso, studia il comportamento del sistema come un'entità funzionale. Peraltro, svolgere un'analisi di sistema utilizzando il sistema reale non è certo né pratico, né conveniente; è quindi necessario sviluppare un modello del sistema reale che ne inglobi i principali attributi. Questo modello può essere un modello fisico, vale a dire un modello che tende a riprodurre la realtà, oppure può essere un modello matematico.

Un modello matematico è un insieme di relazioni che tentano di descrivere formalmente il comportamento di un sistema. Il sistema fisico viene rappresentato da un modello con lo scopo di permettere analisi e sintesi del sistema stesso; l'accuratezza e la validità dell'analisi dipenderanno dalla capacità del modello matematico di rappresentare correttamente le relazioni funzionali tra le differenti componenti del sistema reale.

Che cos'è una simulazione ?

Banks e Carson (1984) hanno definito la simulazione come l'imitazione di un processo o sistema reale nel tempo. Sia che la simulazione sia fatta con calcoli a mano o utilizzando un computer, la simulazione determina la creazione di una "storia artificiale" del sistema e permette la valutazione di questa storia per operare inferenze concernenti le caratteristiche operative del sistema reale. Secondo Span, (1982) la simulazione, nella sua forma più semplice, consiste nel codificare un modello matematico in un programma, da utilizzare in un computer per produrre dati simulati. I dati prodotti dal modello matematico possono venire comparati con dati sperimentali rilevati nel sistema reale per verificare la bontà della previsione del modello. Effettuata questa verifica, il modello può essere utilizzato per l'analisi dei sistemi.

E' tuttavia importante rimarcare la distinzione tra modello e processo di simulazione. Quest'ultimo rappresenta l'uso del modello e la successiva manipolazione dei risultati per determinarne la bontà della stima. Nella misura in cui il modello rappresenta il sistema reale, così può fare una previsione del sistema reale stesso nell'ambiente reale in cui il sistema è inserito.

L'utilizzatore del modello può quindi ipotizzare una serie di perturbazioni al sistema, verificando quale sarà la risposta del sistema reale.

Uso della simulazione attuata con il computer nell'analisi dei sistemi biologici

Ci sono numerose ragioni per utilizzare tecniche di simulazione per l'analisi dei sistemi biologici in generale e per l'applicazione in sistemi agricoli in particolare. Alcune di queste sono elencate di seguito (Colella *et al.*, 1974; Span, 1982; Stockle, 1989; Thornley e Johnson, 1990); questo elenco dovrebbe esso stesso fornire un valido supporto per sostenere il concetto che l'applicazione di simulazioni al computer dovrebbe giocare un ruolo importante nella ricerca e nello studio, così come nella gestione dei sistemi biologici. La simulazione attuata attraverso computer può essere utilizzata per:

- valutare l'effetto di scelte operative su molti sistemi biologici per i quali tali scelte appaiono rischiose;
- identificare quelle parti del sistema i cui meccanismi non sono del tutto chiari, mettendo quindi in evidenza le aree che richiedono ulteriore ricerca;
- separare il problema fisico (degradazione del sistema, fluttuazioni nella risposta dovuta a sorgenti esterne di disturbo) dalla scelta tecnica che si vuol valutare. La simulazione permette un test chiaro e indisturbato delle tesi che si vogliono valutare.
- permettere a ricercatori o manager di eseguire "esperimenti" con il modello di sistema in condizioni estreme o esterne agli intervalli normalmente utilizzati per le variabili in gioco. In

questo modo possono essere attuate previsioni sul successo o fallimento di una determinata scelta in rapporto ad un determinato obiettivo.

- analizzare sistemi che hanno interazioni multiple e non lineari, come i sistemi ecologici e fisiologici. Questi sistemi in genere contengono numerose variabili correlate tra loro con meccanismi iterativi negativi o positivi. E' stato dimostrato (Forrester, 1969) che le decisioni effettuate da individui, come sintesi delle proprie conoscenze, sono usualmente di segno opposto a quello che dovrebbero avere. Questo in quanto, all'attuarsi di una perturbazione, il sistema sembra suggerisce contromisure, recepite quasi sempre dall'individuo nell'operare una scelta, che producono effetti contrari a quelli sperati.
- ottenere informazioni o elementi su sistemi per i quali sono scarsi i dati sperimentali, e per i quali la sperimentazione sarebbe lenta, difficile o costosa. Un tipico esempio è quello di utilizzare una serie di dati raccolti in una località per tentare di estrapolare ad un lungo periodo, oppure di simulare gli stessi anni ma con tesi diverse.
- migliorare il sistema sotto osservazione attraverso la conoscenza ottenuta nel definire il modello di simulazione. I modelli sono utili nello stimolare l'attività di analisi generando idee che possono riguardare il comportamento del sistema.
- sviluppare strumenti computerizzati che possono essere utilizzati nell'insegnamento e nell'addestramento. I modelli contengono lo stato dell'arte della conoscenza del sistema e, opportunamente interfacciati, possono rendere questa conoscenza disponibile all'utente non esperto.
- stimolare uno studio multi disciplinare del problema. Il processo di sintesi del modello di simulazione di un sistema biologico richiede conoscenze provenienti da diversi settori, ed è quindi una naturale via per sviluppare lavoro di gruppo multi disciplinare.

Il rapido incremento della disponibilità di modelli ed il parallelo aumento della richiesta di simulazioni di sistemi, non accompagnati da adeguata conoscenza delle problematiche connesse, ha fatto sì che l'uso dei modelli o l'aspettativa sulle loro possibilità sia stata in qualche caso erronea. Alcuni punti meritano quindi di essere chiariti:

- I modelli rappresentano, nella migliore delle ipotesi, lo stato dell'arte della conoscenza di un dato sistema. Tuttavia, il modello spesso include semplificazioni nella definizioni dei processi non solo in rapporto allo scopo per il quale il modello è costruito, ma anche come conseguenza del punto di vista del gruppo o dell'individuo che l'ha realizzato.
- Modelli che non sono il risultato di un'attività di sintesi interdisciplinare sono spesso validi nel settore di studio dell'autore, ma sono molto meno validi in altri settori. Ciò è vero non solo nella sintesi del modello, ma anche nel suo uso. In un caso per esempio, un modello per la simulazione di sistemi colturali è stato utilizzato non facendo precedere l'utilizzazione dalla calibrazione e validazione del modello. I dati di produzione furono quindi utilizzati per uno studio di pianificazione economica; solo alla presentazione dei risultati delle simulazioni del modello apparve chiaro che i valori non avevano alcun senso, rendendo la pur valida analisi economica del tutto inutile.

- La bontà delle previsioni ottenibili da un modello sono limitate dalla qualità dell'input utilizzato. Spesso il primo approccio ad un modello può essere negativo in quanto, non disponendo di dati sufficienti alla sua calibrazione e validazione, si simulano realtà nella sostanza diverse da quelle che l'utente crede di star simulando.
- I modelli devono essere utilizzati valutando attentamente le limitazioni con cui sono stati creati. Modelli di crescita per colture che per esempio non prevedano la limitazione di nutrienti possono fornire risultati pessimi quando uno stress da nutrienti è presente. La variabilità spaziale presente in un determinato territorio spesso incrementa notevolmente la difficoltà di definire la simulazione di una situazione "media".
- I modelli sono rappresentazioni più o meno semplificate della realtà. Non esiste un modello biologico che includa tutte le caratteristiche del sistema reale; anche i modelli più complessi hanno un certo livello di empirismo, il che comporta che non esiste un modello universale. L'uso del modello richiede quindi una calibrazione.
- Spesso i modelli hanno una documentazione assai limitata, il che rende difficile operare adattamenti, modifiche, o anche solo l'uso.
- Gli autori dei modelli possono tendere a proporre il loro modello come capace di prestazioni che sono nei fatti al di là delle effettive possibilità del modello stesso. Le capacità operative del modello devono essere quindi definite, e le limitazioni dell'uso propriamente discusse.

I modelli in agricoltura: alcuni esempi

L'eccezionale incremento dello sviluppo di modelli di simulazione negli ultimi anni rende non proponibile una descrizione dettagliata di essi. Vedremo invece brevemente la simulazione in agricoltura raggruppando i modelli a questo punto disponibili in quattro categorie: modelli di processo, modelli di crescita per colture, altri modelli di crescita in agricoltura, e infine modelli a larga scala

Modelli di processo

La necessità di capire i meccanismi alla base del funzionamento delle piante, di comprendere le dinamiche ambientali e le numerose interazioni pianta-ambiente, hanno portato allo sviluppo di numerosi modelli relativi a processi biologici, fisici, biofisici, biochimici e fisiologici in agricoltura. Questi modelli vanno dal livello di organizzazione della cellula a quello del tessuto, da quello dell'organo a quello dell'intera pianta. Alcuni comprendono una dettagliata descrizione dell'ambiente in termini di variabili meteorologiche e relative al suolo. Esempi di questi modelli si possono a questi punti trovare facilmente su riviste scientifiche e sono utilizzati con frequenza crescente dai ricercatori che li propongono per presentare le loro idee e valutare i loro risultati sperimentali. Alcuni di questi modelli sono brevemente descritti di seguito.

Ci sono stati molti contributi per lo sviluppo di una base matematica per descrivere il trasporto dell'acqua nelle cellule delle piante (Molz e Ferrier, 1982). Sono state sviluppate le equazioni di base per descrivere il movimento dell'acqua nella cellula, e sono stati sviluppati metodi per misurare i vari parametri (permeabilità delle membrane, modulo elastico delle pareti delle cellule, ecc.). Sono inoltre disponibili modelli che descrivono le relazioni acqua-tessuto nella pianta, e sono disponibili modelli che prevedono il controllo della crescita dei tessuti nella pianta (Boyer, 1985; Cosgrove, 1986). Questi modelli sono stati usati, per esempio, per calcolare la distribuzione del potenziale idrico in un ipocotile di soia come determinato dalla crescita (Molz e

Boyer, 1978) e per dimostrare come la crescita longitudinale delle radici dipenda dalle caratteristiche idrauliche del tessuto (Silk e Wagner, 1980).

Un'analisi a "compartimenti" è stata utilizzata per rappresentare la dinamica delle traslazioni di sostanze all'interno della pianta (Dale *et al.*, 1981). Questo approccio è stato utilizzato come supporto quantitativo in esperimenti con traccianti radioattivi, impostati per analizzare il metabolismo della pianta al livello di organizzazione sia fisiologico che biochimico (Pearlman e Lawlor, 1981).

La fotosintesi, il processo chiave dipendente dalla luce attraverso il quale la pianta fissa CO₂ per produrre sostanza secca, è stato modellato estensivamente. De Wit, nel 1965, stabilì le basi per modellare la fotosintesi di una singola foglia o di un manto vegetale. La risposta foto sintetica alla luce di singole foglie è stato modellato empiricamente utilizzando una curva esponenziale asintotica o una iperbole rettangolare (Goudriaan, 1977). Lommen *et al.* (1971) hanno presentato un modello per la simulazione della fotosintesi come funzione di diverse variabili ambientali (effetto della luce e della temperatura sulla fissazione di CO₂, controllo della luce sulla resistenza stomatica). Questo modello presenta, nella struttura, analogie con un circuito elettrico, e descrive la diffusione del gas dall'atmosfera ai cloroplasti; una equazione di Michaelis-Menten descrive il processo di fissazione. Modelli più dettagliati, strutturati in modo da integrare l'attuale conoscenza delle componenti biochimiche dell'assimilazione foto sintetica del carbonio, sono stati sviluppati nell'ultimo ventennio (Hall e Bjorkman, 1975; Berry e Farquhar, 1978; Farquhar *et al.*, 1980). Il tasso di fotosintesi del manto vegetale può essere calcolato dalla fotosintesi delle singole foglie, dalla radiazione solare incidente e dal LAI (rapporto tra superficie fogliare e superficie del suolo). Devono inoltre essere conosciuti la distribuzione degli angoli di inserzione delle foglie e alcune proprietà ottiche del manto vegetale, in quanto essi influenzano la distribuzione della radiazione disponibile all'interno del manto vegetale stessa. Sono stati sviluppati modelli a diverso livello di complessità per stimare la fotosintesi del manto vegetale (de Wit, 1965; Goudriaan e van Laar, 1978; Norman, 1979).

Esistono molti altri modelli di processo, che includono modelli sulla respirazione, sull'assimilazione di nutrienti, sulla partizione del carbonio nella pianta, sulla crescita delle foglie e delle radici, sulla traspirazione di foglie e dell'intero manto vegetale, sul comportamento degli stomi, sullo sviluppo fenologico della pianta, sulla fase di riempimento delle cariossidi, sul movimento di acqua e soluti nei suoli, sul trasporto dell'energia nel suolo, sul decadimento della sostanza organica, sull'attività microbica nei suoli, sul ciclo dei nutrienti, sull'erosione del suolo e molti altri. Il lettore faccia riferimento ai lavori di seguito elencati per una descrizione di modelli (Rose e Charles-Edwards, 1981; Monteith, 1975; Campbell, 1977; Campbell *et al.*, 1985; Wisiol and Hesketh, 1987; Nobel, 1983; Charles-Edwards *et al.*, 1986).

Modelli di crescita per colture

I modelli disponibili capaci di simulare l'accrescimento delle piante differiscono tra loro per i diversi livelli di complessità e per il livello di empirismo delle funzioni che contengono. Questo aspetto sarà trattato in dettaglio più oltre nel capitolo relativo alla classificazione dei modelli in base alle loro caratteristiche strutturali.

Un lavoro di qualche anno fa (Joyce e Kickert, 1987) elenca 42 modelli per singole specie; è certo che il numero, a questo punto, è sicuramente molto più grande. I più semplici di questi modelli includono simulazioni dinamiche dei processi descritti nel paragrafo precedente, semplificati e rappresentati da poche variabili. Il numero di parametri in input è mantenuto basso e l'intervallo di simulazione è in genere un giorno o più. Questi modelli trovano in genere applicazione nella ricerca e nella gestione. Altri modelli sono invece più complessi, includendo un maggior numero di variabili e riuscendo a dare una migliore interpretazione del sistema reale. Questi ultimi sono quasi esclusivamente per ricerca (per esempio, nella definizione dei caratteri da selezionare in programmi di miglioramento genetico).

I modelli per coltura sono disponibili per un ampio spettro di colture. In genere sono strutturati su un numero variabile dei livelli di seguito elencati, dove ogni nuovo livello determina un fattore addizionale limitante la crescita della pianta: (1) luce e temperatura; (2) disponibilità di acqua; (3) azoto e (4) fosforo e altri nutrienti. Un ulteriore livello è presente nei modelli che valutano gli effetti iterativi sulla crescita della pianta dati dalla presenza di malattie fungine ed entomologiche, e sulla competizione di infestanti.

Alcuni di questi modelli si prestano alla simulazione dell'accrescimento di diverse colture sostituendo un certo numero di parametri caratteristici delle diverse specie.

Altri modelli di crescita

L'attività di modellazione di sistemi ha riguardato anche la simulazione di pascoli o le foreste. Joyce e Kickert (1987) hanno classificato questi modelli in: empirici (principalmente regressioni multiple), modelli di crescita di colture modificati (utilizzando appunto i modelli per colture come base), modelli che enfatizzano l'idrologia o il ciclo dei nutrienti, modelli che enfatizzano la dinamica dell'accrescimento della biomassa, e modelli pianta-animale (descrivono l'interazione tra la crescita della pianta e il pascolamento). I modelli che sono riferiti al pascolamento individuati dagli autori sono diciotto, mentre altri tredici riguardano le foreste, simulate come insieme di singole piante o come un corpo unico.

Modelli a larga scala

Ci sono modelli di simulazione sviluppati con lo scopo di analizzare sistemi agricoli a livello di campo, di azienda agricola o di bacino. Questi modelli hanno come scopo principale quello di analizzare problemi a larga scala come il trasporto di sedimenti (erosione idrica ed eolica), il ruscellamento, il trasporto di sostanze e l'effetto di questi processi sulla produttività delle colture. Grable (1987) ha esaminato il potenziale di questi modelli nella gestione dei sistemi produttivi e nei processi decisionali che definiscono la politica economica. Questi modelli sono modulari e possono essere così aggiornati o modificati a seconda dell'obiettivo fissato. Alcuni di questi modelli sono descritti molto sinteticamente di seguito.

L'EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) è un modello a scala di campo sviluppato per determinare le relazioni tra erosione del suolo e produzione delle colture negli USA (Williams, 1984; Williams *et al.*, 1989). Il modello utilizza un intervallo di simulazione giornaliero e input facilmente ottenibili. Potendo essere l'erosione un processo relativamente lento, il modello è capace di simulare anche centinaia di anni se necessario. Le componenti principali dell'EPIC includono idrologia, la simulazione delle variabili meteorologiche, l'erosione, il ciclo dei nutrienti, l'effetto delle lavorazioni, i bilanci economici e la crescita delle piante. La produzione potenziale è limitata da cinque fattori di stress che la riducono: stress idrico, termico, dovuto all'azoto, al fosforo e infine all'aereazione del suolo. L'accrescimento delle radici è limitato da tre fattori di stress: consistenza del suolo, temperatura e tossicità dovuta all'alluminio. Una recente versione prende in esame il problema della qualità delle acque di falda valutando anche il movimento dei pesticidi nel profilo.

Lo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) è un modello a scala di bacino che simula l'idrologia, il clima, il suolo e la produzione di biomassa. I processi esaminati includono l'erosione superficiale, i deflussi idrici, la percolazione, l'evapotraspirazione, le riserve idriche nel bacino, la sedimentazione e la crescita delle colture (Arnold *et al.*, 1989). Il modello è stato recentemente modificato per simulare in maggior dettaglio l'accrescimento delle colture, permettendo anche doppie colture, irrigazioni da laghetti artificiali, il "furrow diking", ed i ritorni economici (Arnold *et al.*, 1991).

Il CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) è stato sviluppato per fare previsioni sull'effetto di pratiche agricole sul destino dei prodotti chimici di sintesi impiegati come input. Il modello include simulazioni dell'idrologia, dell'erosione e della

sedimentazione, ed è stato definito avendo come scala di applicabilità il campo (Knisel, 1980). L'introduzione di problematiche relative ai pesticidi nell'acqua di falda hanno comportato modifiche nel modello. Il GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) è una modifica di CREAMS per valutare il movimento di acqua e sostanze chimiche nello strato del suolo esplorato dalle radici (Leonard *et al.*, 1987).

L'NTRM (Nitrogen-Tillage-Residue-Management) è un simulatore del continuum pianta-suolo-acqua sviluppato per fornire uno strumento che assistesse nel prevedere l'impatto sul lungo periodo di condizioni fisiche, chimiche e biologiche sulle produzioni, sulle condizioni del suolo e sulla qualità di acque di percolazione e ruscellamento superficiale (Shaffer e Larson, 1987).