

MODELLI DI SIMULAZIONE DELLE COLTURE

Marco Bindi
Luca Fibbi

1 - MODELLI DI SIMULAZIONE DELLA CRESCITA DI UNA COLTURA

Nella sua accezione più generale un modello è una rappresentazione semplificata di un sistema. Intendendo come sistema una parte ben delimitata del mondo reale. In campo agricolo ad esempio una coltura con tutti i suoi organi (radici, culmi, foglie) e i suoi processi e meccanismi (crescita, sviluppo, fotosintesi, traspirazione, ecc.) costituisce un sistema. Negli ultimi anni i modelli di simulazione della crescita delle colture sono diventati uno strumento fondamentale per gli studi e le applicazioni agrometeorologiche. Essi in generale sono impiegati per studiare il comportamento di una coltura e per valutare la sua risposta all'ambiente che la circonda. Una delle caratteristiche peculiari dei modelli è quella di fornire risultati validi anche in realtà agronomiche, colturali e gestionali diverse da quelle dove sono stati sviluppati. Caratteristica quest'ultima che permette di considerare, oggi, la modellistica come lo strumento complementare ideale alla classica sperimentazione.

In generale la costruzione di un modello consiste nell'individuazione di una serie di equazioni matematiche mediante le quali è possibile riprodurre nel modo più fedele possibile il comportamento del sistema esaminato.

2 - TIPI DI MODELLI

In base alla validità e al significato delle equazioni matematiche individuate è possibile distinguere i modelli in:

- empirici o descrittivi
- meccanicistici o esplicativi

2.1 - Modelli empirici o descrittivi

I modelli empirici descrivono in modo semplificato il comportamento di un coltura. Lo sviluppo di un modello empirico si basa sull'individuazione, a partire da dati sperimentali, di una o più equazioni matematiche in grado di rappresentare il processo esaminato (Fig. 1). Sebbene questi modelli possano rappresentare, in teoria, uno strumento agile e di facile applicazione, in pratica essi risultano essere uno strumento incompleto ed ampiamente condizionato dalla disponibilità dei dati, dalle modalità di campionamento e dagli errori sperimentali. Le principali carenze di questo tipo di approccio sono da ricercare: nella limitata validità in ambienti diversi da quelli originali e nell'impiego di equazioni che spesso non hanno un significato biologico.

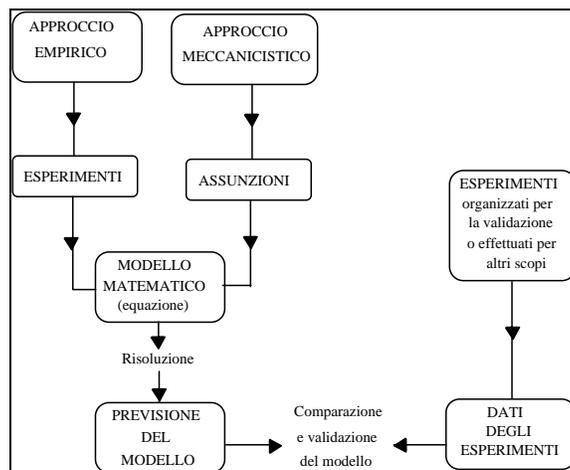


Fig. 1 - Schema dei metodi di modellizzazione

2.2 - Modelli meccanicistici o esplicativi

L'elemento principale che differenzia i modelli meccanicistici da quelli empirici è la natura e il modo con il quale vengono individuate le equazioni che descrivono il sistema (Fig. 1). In un modello meccanicistico infatti, i meccanismi e i processi che determinano il comportamento del sistema vengono quantificati separatamente attraverso equazioni ispirate a principi e leggi di validità generale e non ricavate da dati empirici. Il modello è costruito poi unendo e integrando i singoli processi per l'intera coltura. Per quanto concerne il numero di processi di primaria importanza esaminati per la simulazione della crescita di una coltura, esso dipende: dal livello di dettaglio che devono raggiungere i risultati e dai fattori limitanti la crescita considerati (carenze idriche e/o nutritive).

2.3 - Altri tipi di modelli

A loro volta i modelli empirici e meccanicistici possono essere classificati in: dinamici o statici e in stocastici o deterministici.

Modelli dinamici: descrivono sistemi che variano in funzione del tempo (es. modelli di ripartizione degli assimilati).

Modelli statici: descrivono sistemi che non variano nel tempo (es. modelli di distribuzione della luce all'interno della coltura).

Modelli deterministici: assegnano ad ogni variabile del sistema un solo valore (modelli di simulazione della crescita delle colture).

Modelli stocastici: assegnano ad ogni variabile del sistema una distribuzione di valori attorno alla loro media (es. modelli per la determinazione del grado di diffusione di infezioni fungine).

3 - SVILUPPO DI UN MODELLO DI SIMULAZIONE DELLA CRESCITA DELLE COLTURE

Quando si decide di sviluppare o più semplicemente di applicare un modello è necessario procedere secondo i seguenti punti:

- a) scelta del tipo di modello;
- b) individuazione e quantificazione dei processi da simulare;
- c) calibrazione;
- d) valutazione delle potenzialità (validazione e analisi di sensibilità);
- e) applicazione.

3.1 - Scelta del tipo di modello

La scelta del tipo di modello deve essere fatta in funzione: del tipo di impiego a cui è destinato e della disponibilità dei dati. Per quanto concerne il tipo di impiego, se lo scopo del modello è quello di riassumere dei dati sperimentati o di effettuare delle previsioni di tipo interpolativo (ovvero che riguardano l'ambiente in cui sono stati raccolti i dati sperimentali) il modello potrà essere completamente empirico. Qualora invece, il modello venga utilizzato per la ricerca e per previsioni estrapolative (al di fuori dell'ambiente in cui sono stati raccolti i dati sperimentali) il modello da utilizzare dovrà essere di tipo misto meccanicistico-empirico. Se poi occorre interpretare i risultati di prove sperimentali il modello dovrà essere completamente meccanicistico. Solo questo tipo di modelli, infatti, è in grado di spiegare in tutti i suoi dettagli il sistema analizzato (Fig. 2).

Riguardo invece alla disponibilità dei dati, essa può essere in molti casi l'elemento che più condiziona la scelta del modello. Infatti sia per l'iniziale sviluppo che, poi, per la validazione e l'applicazione del modello è necessario disporre di un ampio set di dati. In particolare nella fase di sviluppo sono necessarie diverse misure sperimentali dell'effetto delle variabili ambientali sullo sviluppo, crescita e senescenza degli organi della pianta (p. es. quantizzare l'assimilazione, la velocità di emissione ed espansione delle foglie, le richieste della pianta e le disponibilità nel suolo di elementi nutritivi e di acqua); in fase di validazione invece è necessario disporre di dati sperimentali indipendenti sulla durata delle varie fasi di sviluppo, sulla velocità di crescita e senescenza dei vari organi (fusto, frutti, foglie, radici, ecc.). Per l'applicazione infine occorreranno anche dati sulla gestione della coltura (epoca di semina, quantità ed epoca di irrigazioni e concimazioni) e sulle caratteristiche ambientali (meteorologiche e pedologiche).

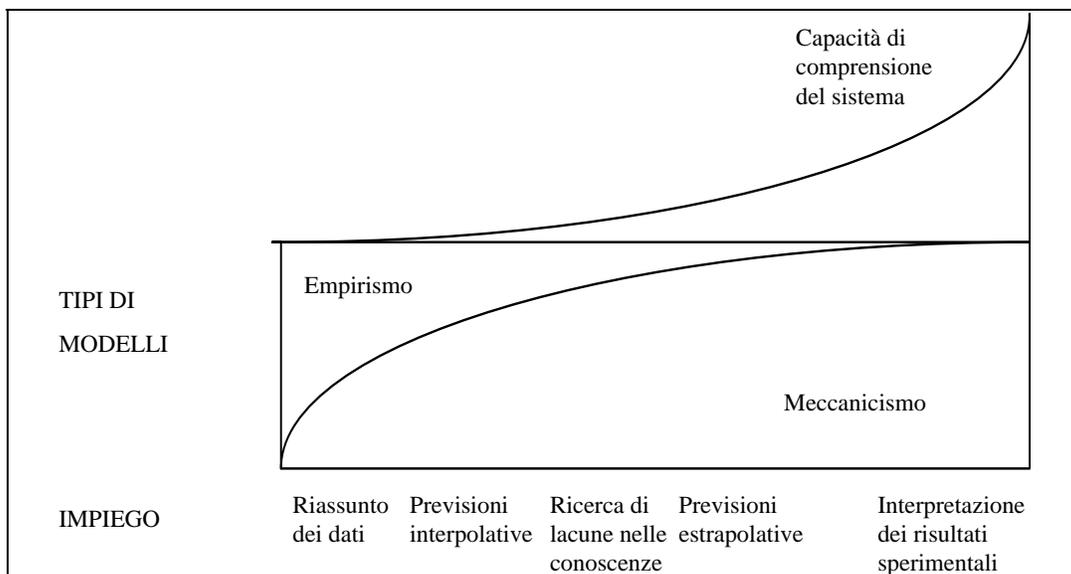


Fig. 2 - Possibilità di impiego dei modelli al variare dell'approccio con cui sono stati costruiti (empirico o meccanicistico).

3.2 Individuazione e quantificazione dei processi da simulare

Sulla base dei fattori limitanti la crescita si possono distinguere quattro livelli di produttività:

- livello 1: la coltura ha una disponibilità completa di acqua ed elementi nutritivi per tutta la durata del periodo di crescita; il suo tasso di crescita dipende quindi solamente dallo stato in cui si trova la coltura e dalle disponibilità termiche e radiative;
- livello 2: la crescita della coltura è limitata, per almeno una parte del periodo di crescita, dalla carenza di acqua;
- livello 3: la crescita della coltura è limitata dalla carenza di azoto per almeno una parte del periodo di crescita e dalla carenza di acqua per il rimanente periodo;
- livello 4: la crescita della coltura è limitata dalla carenza di fosforo e degli altri minerali nutritivi per almeno una parte del periodo di crescita.

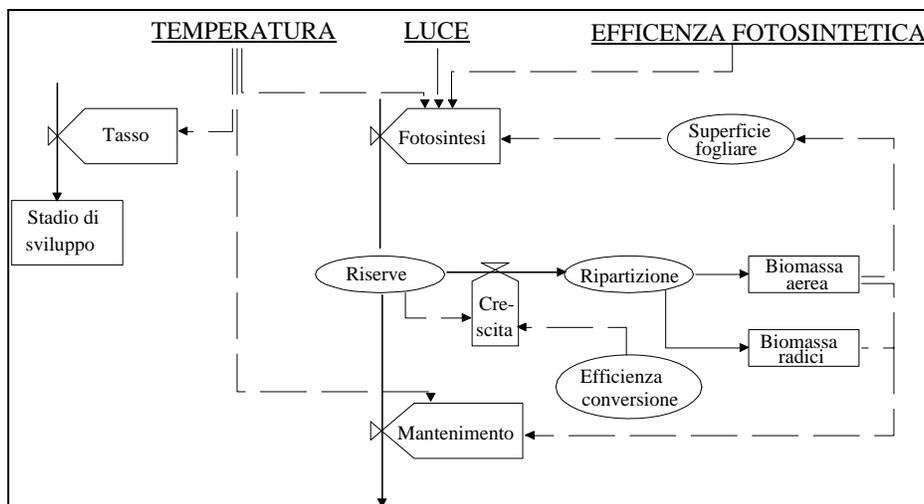


Fig. 3 - Schema dei processi da simulare per il livello produttivo 1.

E' facilmente intuibile che ben difficilmente la realtà produttiva può coincidere perfettamente con uno dei suddetti livelli produttivi, ai fini comunque della modellizzazione della crescita di una coltura risulta estremamente pratico ricondurre i singoli casi in una di queste quattro categorie. In questo modo infatti, il numero di fattori (ambientali, stato del suolo e della coltura) e di processi presi in considerazione nella costruzione di un modello di crescita può essere fatto variare a seconda del livello produttivo in cui si inserisce la coltura esaminata.

Per il livello produttivo 1 i fattori che guidano la crescita della pianta sono l'intensità della radiazione solare, l'intercettazione della luce e l'efficienza fotosintetica della pianta. In Fig. 3 è riportato lo schema base di un modello per la simulazione della crescita di una coltura a questo livello produttivo. La luce è la variabile guida da cui dipende la fotosintesi, mentre la temperatura controlla lo sviluppo e agisce su alcuni dei principali processi di crescita (fotosintesi, respirazione, ecc.). I carboidrati assimilati mediante il processo fotosintetico sono immagazzinati come riserve che successivamente vengono utilizzate per il mantenimento e la crescita del materiale strutturale. La ripartizione infine della biomassa tra radici, foglie, steli e organi di riserva è fortemente legata allo stadio di sviluppo in cui si trova la pianta.

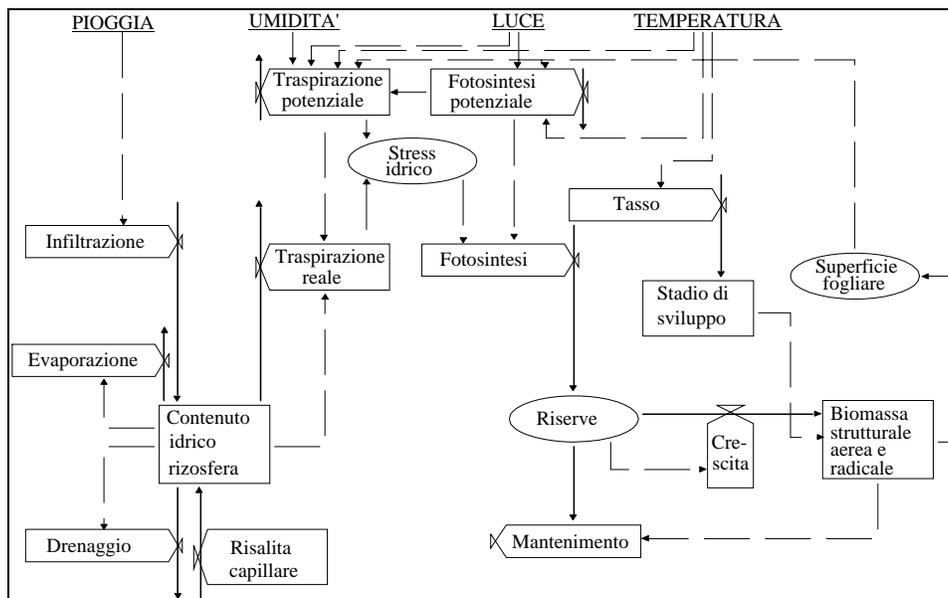


Fig. 4 - Schema dei processi da simulare per il livello produttivo 2.

Per il livello di produttività 2 i fattori chiave sono la quantità di acqua presente nel suolo e l'efficienza con la quale la pianta è capace di utilizzare quest'ultima (Fig. 4). La carenza di acqua infatti, porta ad una chiusura degli stomi ed alla conseguente immediata riduzione dei processi assimilativi e traspirativi. Il rapporto tra il tasso di traspirazione attuale e quello potenziale costituisce un parametro utile per la valutazione dello stato di stress idrico della coltura e viene, in generale, usato per unire il ciclo dell'acqua con quello del carbonio. In queste condizioni la relazione tra crescita e fattori guida risulta, a differenza di quanto precedentemente detto per il livello 1, di tipo indiretto, in quanto la quantità di acqua presente nel terreno non dipende solamente dall'apporto meteorico ma anche dalla quantità di acqua persa attraverso la traspirazione ed altri processi non produttivi.

Per il livello di produzione 3 la crescita è condizionata, oltre che dai fattori menzionati per i precedenti livelli, dalla disponibilità di azoto. In questo caso però la relazione che esiste tra assorbimento di azoto e crescita è leggermente diversa da quella tra assorbimento di acqua e crescita. L'azoto immagazzinato nella pianta infatti, è suddiviso in una frazione mobile e in una fissa (Fig. 5) che può essere a disposizione per la crescita di nuovi organi in quantità notevole. Questo rende, insieme alla capacità dei tessuti di continuare a funzionare anche con concentrazioni di azoto inferiori alla metà di quella massima, l'incremento di sostanza secca della pianta in gran parte indipendente dall'attuale assorbimento di azoto

dal terreno. Solo quando le riserve interne sono esaurite, infatti, la crescita della coltura è legata direttamente al tasso di assorbimento di azoto dal terreno.

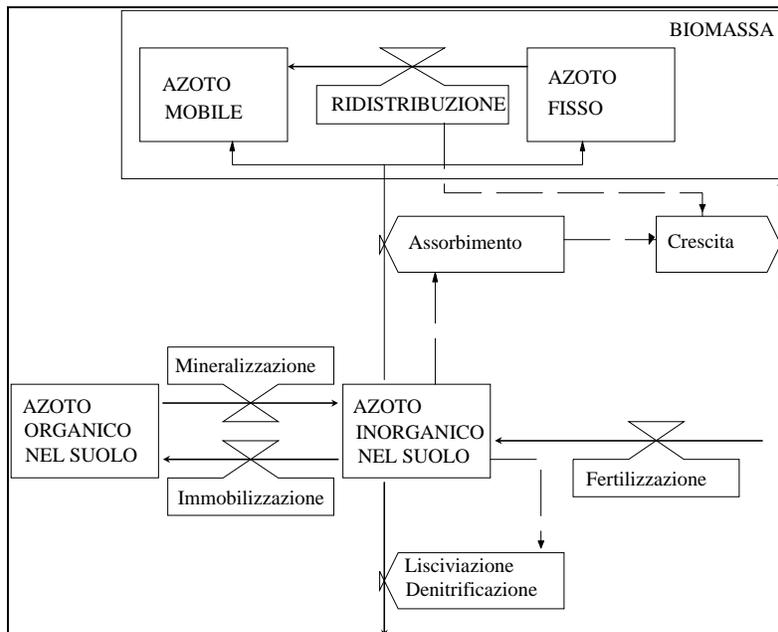


Fig. 5 - Schema dei processi da simulare per il livello produttivo 3.

I processi cruciali del livello di produttività 4 sono molto simili a quelli del livello precedente; infatti, anche in questo caso la pianta presenta una riserva interna di fosforo (Fig. 6). Notevoli differenze esistono invece per l'assorbimento del fosforo da parte della pianta. In questo caso la concentrazione del fosforo disciolto nel terreno è così scarsa che il tasso di assorbimento di fosforo da parte della pianta è quasi sempre determinato dal livello di rifornimento.

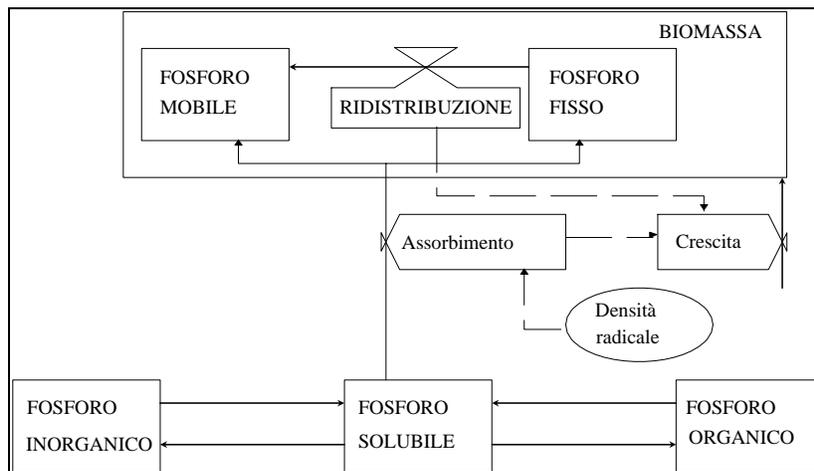


Fig. 6 - Schema dei processi da simulare per il livello produttivo 4.

3.3 - Calibrazione

La calibrazione è una procedura attraverso la quale una o più serie di dati sperimentali vengono usati per migliorare il livello di precisione del modello. Questo può avvenire attraverso l'aggiustamento di alcuni parametri (soprattutto quelli presenti nelle equazioni empiriche) oppure mediante la modifica di alcune parti del modello.

3.4 - Valutazione delle potenzialità

È un'operazione fondamentale per una corretta applicazione del modello. Essa prevede due fasi distinte: la validazione e l'analisi di sensibilità.

3.4.1 - Validazione

Per quanto riguarda la parte di validazione, si tratta di una procedura nella quale si confrontano i dati simulati dal modello con dati sperimentali diversi da quelli impiegati nello sviluppo e calibrazione del modello, in maniera da identificare la precisione di stima del modello. Può essere effettuata a due livelli: sulle assunzioni o sulle previsioni. Nel primo caso la validazione viene realizzata per verificare in anticipo se le equazioni utilizzate sono corrette. Nel secondo caso invece si valutano i risultati finali del modello.

Per quanto concerne le procedure con cui si esegue la validazione queste possono essere suddivise in quattro categorie di cui le prime due forniscono una valutazione qualitativa del modello e le restanti due danno una valutazione quantitativa. Esse sono:

- valutazione soggettiva: viene eseguita da parte di esperti che cercano di distinguere i dati simulati e quelli osservati (procedura complementare, guida);
- tecniche visive: si basano sul confronto, tramite grafici, tra i dati simulati ed osservati (procedura informativa: corrispondenza dati e tendenza modello);
- misure di spostamento: quantificano le differenze tra dati simulati e osservati. Applicabili per dati accoppiati in funzione tempo, località trattamento, osservazioni correlate, ecc.. I principali indici impiegati sono l'errore medio (MBE), l'errore medio percentuale (MBE%) e l'errore quadratico medio (RMSE):

$$MBE = \sum (y_o - y_s) / n$$

$$MBE \% = 100 \cdot \left[\sum ((y_o - y_s) / y_o) \right] / n$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\sum (y_o - y_s)^2 \right] / n}$$

dove y_o è il dato osservato, y_s è il dato stimato dal modello ed n è il numero di dati osservati o stimati.

- test statistici: sono applicabili ad osservazioni non correlate. In particolare, vengono normalmente impiegati test come l'analisi della regressione, il coefficiente di determinazione (r^2), l'efficienza del modello (EF), ecc..

3.4.2 - Analisi di sensibilità

È una procedura mediante la quale è possibile valutare la risposta del modello alla variazione dei parametri ambientali e colturali presenti in esso. Nel caso della crescita della coltura è possibile osservare come varia la produzione al variare della radiazione, della pioggia, della temperatura, dell'irrigazione, del contenuto di azoto nel suolo, della latitudine, della tessitura del suolo, ecc. Questa analisi serve a fornire importanti informazioni sul comportamento agronomico del modello indicando come l'ambiente, le caratteristiche della coltura e le pratiche colturali influenzano la crescita e la produzione della coltura.

3.5 - Applicazione

Non è certo limitativo definire infinite le possibilità di utilizzazione dei modelli di crescita delle colture nella ricerca, nell'applicazione a sistemi produttivi o come strumento di insegnamento. È quindi possibile fare solo una breve rassegna delle principali applicazioni finora realizzate:

- previsione della produzione delle varie colture a scala nazionale per la determinazione del prezzo di mercato e per l'orientamento della politica agricola;
- previsione delle produzioni delle colture utilizzate per l'alimentazione umana e per predisporre i necessari interventi umanitari (es. FAO);
- determinazione delle potenzialità produttive di aree non coltivate per introdurre nuove colture e studiare la pianificazione territoriale;
- valutazione dell'effetto delle principali pratiche colturali sulla produzione per ottimizzare i fattori produttivi, ridurre i costi, diminuire l'inquinamento ambientale e i residui chimici nei prodotti alimentari;
- individuazione delle migliori caratteristiche delle piante da selezionare;
- previsione della sostenibilità dei sistemi agricoli;
- valutazione dell'effetto dei cambiamenti climatici sull'agricoltura.

BIBLIOGRAFIA

- KEULEN, VAN H., E WOLF, J., (1986) Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. *Simulation monographs, PUDOC: Wageningen*.
- JORGENSEN, S.E., (1993). Model-Theoretical Aspects of Ecological modelling. *Ecological modelling*, 68:1-73.
- MARACCHI, G., FIBBI L., BINDI M., (1996). Applicazione della modellistica alla simulazione della crescita delle colture agrarie. *Quaderno CeSIA* (in pubblicazione).
- PENNING DE VRIES, F.W.T., & LAAR, VAN H.H., (1982) Simulation of plant growth and crop production. *Simulation monographs, PUDOC, Wageningen*.
- WHISLER F.D., ACOCK, B., BAKER, D.N., FYE, R.E., HODGES, H.F., LAMBERT, J.R., LEMMON, H.E., MCKINION, J.M., REDDY, V.R., (1986). Crop simulation models in Agronomic Systems. *Advances in Agronomy*, 40: 141-207.