

# Stato dell'arte e prospettive sull'applicazione dei modelli matematici nelle colture protette

Gianni Bellocchi<sup>1\*</sup>, Gianni Fila<sup>1</sup>, Luca Incrocci<sup>2</sup>, Alberto Pardossi<sup>2</sup>,  
Carlo Alberto Campiotti<sup>3</sup>, Roberto Balducchi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura – Istituto Sperimentale per le Colture Industriali*  
*Via di Corticella 133, 40128 Bologna*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie*  
*Viale delle Piagge 23, 56124 Pisa*

<sup>3</sup> *Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Centro Ricerche Casaccia*  
*Via Anguillarese 301, 00060 S. Maria di Galeria (Roma)*

<sup>4</sup> *Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Centro Ricerche Trisaia*  
*S.S. 106 Jonica, 75026 Rotondella (Matera)*

Data di presentazione: 20 novembre 2006

Data di accettazione: 16 gennaio 2007

---

## Riassunto

La modellazione delle interazioni suolo-pianta-*management* in coltivazioni protette ha avuto una certa evoluzione negli ultimi anni per lo più come adattamento di approcci sviluppati precedentemente per colture di pieno campo. La molteplicità degli approcci modellistici adottati ha reso tuttavia difficile la generalizzazione dei principi fisiologici basilari, comuni a più tipologie vegetali, mentre l'eterogeneità delle tecniche di sviluppo *software*, per lo più di tipo procedurale, ha ostacolato l'estensibilità dei modelli tramite l'inclusione di nuovi processi e la loro riutilizzabilità tra gruppi diversi. L'articolo descrive e discute le basi scientifiche, il *designing*, l'implementazione e le prospettive di sviluppo della modellistica in serra. Architetture modulari generiche sviluppate secondo le moderne tecnologie *software* (.NET, Java) sono identificate e proposte come soluzioni adeguate per progettare, implementare, verificare e comparare approcci alla modellazione a base meccanicistica. Gli autori indicano nella combinazione tra buona pratica *software* e accurata astrazione dei processi essenziali della crescita e dello sviluppo culturale la possibilità di un avanzamento nello sviluppo e nell'applicazione di approcci modellistici in ambiente protetto.

*Parole chiave:* colture protette, modelli, programmazione a oggetti, serra.

## Summary

### STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES ON APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS TO GREENHOUSE CROPS

An increasing trend was observed over the last years in the modelling of soil-plant-management interactions of protected crops, mainly as an adaptation of approaches originally developed for field crops. The variety of modelling approaches used world-wide reflects the difficulty of unifying physiological principles across various crops (plant types). The heterogeneity of software development techniques (typically based on procedural principles) has been another obstacle to the progress of research in this field, since it hampered model extension and re-usability. This paper describes and discusses the scientific basis, the design, implementation and perspectives in modelling greenhouse crops. Generic modular architectures developed according to up to date software technologies (.NET, Java) were identified and proposed as valuable for the design, implementation, verification and comparison of process-based modelling approaches. On this basis, the authors argue that the combination of good software engineering with sound crop science can enhance the rate of advance in crop modelling for protected crops.

*Keywords:* protected crops, models, object-oriented programming, greenhouse.

\* Autore corrispondente: tel.: + 39 0332 786798; fax: +39 0332 785483. Indirizzo e-mail: g.bellocchi@isci.it

## 1. Introduzione

I modelli matematici sono rappresentazioni, in forma di equazioni matematiche, delle conoscenze relative a processi e sistemi oggetto di indagine scientifica. Per quanto riguarda il settore agricolo, l'attività di modellazione delle colture ha avuto inizio nei primi anni '70, con l'elaborazione di una visione integrata e dinamica della fisiologia vegetale (de Wit, 1970), favorita dalla diffusione in tutti i campi della ricerca di calcolatori sempre più potenti e accessibili. In seguito, i modelli colturali si sono affermati molto rapidamente come potenti strumenti scientifici e di supporto alle decisioni sia a livello di campo che su scala territoriale. In orticoltura, un forte sviluppo dei modelli colturali si è avuto a partire dagli anni Ottanta (Gary et al., 1998). Nei sistemi in coltura protetta la simulazione dei processi della crescita vegetale è stata utilizzata nel monitoraggio dei parametri climatici e delle operazioni colturali nel corso del ciclo produttivo fino alla formazione del prodotto agrario utile.

I principali gruppi di ricerca che operano in questo settore sono situati in Paesi in cui l'industria delle colture protette riveste una notevole importanza economica e dove le tecniche di modellazione si presentano già particolarmente avanzate in altri sistemi di coltivazione: Paesi Bassi, Regno Unito, Francia, Israele, Stati Uniti, Germania, Svezia, Canada. Più recentemente l'attività di modellazione sta emergendo in regioni dove le colture protette sono in crescita, come l'Europa meridionale (Portogallo, Spagna, Grecia, Italia) e l'America meridionale (Brasile, Colombia).

## 2. Approcci alla modellazione

### *Tipologie di modelli*

L'attività di modellazione nell'ambito delle coltivazioni protette è stata prioritariamente focalizzata sulla crescita e lo sviluppo delle colture (Marcelis et al., 1998). Alcune pubblicazioni riportano modelli dell'assorbimento idrico (Jones e Tardieu, 1998) e minerale (Le Bot et al., 1998). Al momento attuale, come per altri sistemi di coltivazione, la modellazione delle interazioni tra colture e parassiti (Shipp e van Roermund, 1998) e l'uso di parametri genetici nei modelli

(Hammer et al., 2002; Weiss, 2003) sono a uno stadio iniziale di sviluppo. Alcuni modelli includono l'architettura tridimensionale della pianta tra gli input della intercettazione luminosa e della fotosintesi (Gijzen e Goudriaan, 1989).

Come per altri settori, anche per le colture protette gli approcci alla modellazione sono stati diversi. Modelli di tipo empirico (*function oriented*) sono stati prodotti per rappresentare le caratteristiche chiave del comportamento colturale senza spiegarne i meccanismi. Basati su riferimenti sperimentali, essi descrivono matematicamente i dati su base statistica. Modelli della crescita basati sull'efficienza d'uso della radiazione (conversione diretta della luce intercettata in biomassa, Monteith, 1977) e modelli dell'assorbimento azotato basati sulla progressiva diluizione del contenuto di azoto con l'accumulo della biomassa (Le Bot et al., 1997) appartengono a questo gruppo. Tra i modelli empirici si possono annoverare anche quelli derivati dalle tecniche dell'intelligenza artificiale (reti neurali, logica *fuzzy*, ecc.) che appaiono particolarmente adeguati per il controllo delle condizioni del sistema (Hashimoto e Yi, 1989; Zaidi et al., 1999).

I modelli di tipo meccanicistico (*process oriented*) sono invece quelli basati sulla descrizione dettagliata dello sviluppo della coltura e della produzione e distribuzione degli assimilati. Di riferimento sono i contributi di Bertin e Heuvelink (1993) e Heuvelink e Bertin (1994) su pomodoro (modelli TOMSIM e TOMGRO), e di Marcelis (1994) su cetriolo. Oltre alla crescita e allo sviluppo, modelli di questo tipo simulano anche gli scambi gassosi in risposta a modificazioni dell'ambiente di crescita. Essi consentono inoltre simulazioni di lungo periodo ma la loro valutazione completa è difficoltosa, data la tipica complessità dei sistemi descritti. Generalmente, i modelli meccanicistici contengono molti parametri, la cui determinazione richiede un adeguato apparato di dati sperimentali e accurate procedure di calibrazione.

Entrambi i tipi di modelli – empirici e meccanicistici – possono essere statici o dinamici, e sono pure possibili combinazioni dei due tipi, caratterizzate generalmente da modelli statici che fanno parte di modelli dinamici complessi. Una sintesi dei principali modelli oggi disponibili per lo studio delle colture orticole condotte in ambiente protetto è riportata in tabella 1.

Tabella 1. Principali modelli disponibili per le coltivazioni orticole in ambiente protetto.

Table 1. Principal models available for horticultural greenhouse crops.

Nome del modello	Tipo di modello	Output	Riferimento
HORTICERN	empirico	consumo energetico	Jolliet (1991)
HORTITRANS	empirico	traspirazione	Jolliet (1994), Hamer (2003)
HORTSIM	meccanicistico	crescita	Gijzen et al. (1998)
TOMGRO	meccanicistico	crescita	Jones et al. (1996), Dayan et al. (1993)
TOMSIM	meccanicistico	crescita	Heuvelink (1995, 1996)
TOMPOUSSE	empirico	produzione	Abreu et al. (2000)

### Tecnologia informatica

Come spesso è avvenuto nella ricerca scientifica, dove i progressi sono stati favoriti dalle innovazioni tecnologiche, anche nel campo della modellazione dei sistemi colturali il livello di dettaglio che è stato possibile raggiungere è stato principalmente condizionato dall'evoluzione delle tecniche di programmazione. Per lungo tempo, fino agli anni Novanta, ha dominato l'approccio procedurale e strutturato, caratterizzato dall'uso di linguaggi come il FORTRAN, il BASIC, il PASCAL o il C.

Nell'approccio procedurale, la costruzione del software consiste essenzialmente nello sviluppo di procedure che manipolano sequenzialmente dati di *input*. Procedure e dati sono due parti distinte, e l'architettura del programma non ha nessun rapporto concettuale con la struttura del sistema in esame.

I programmi così sviluppati si presentano normalmente come blocchi monolitici di codice, suddivisi in parti strettamente interconnesse, in cui il flusso di esecuzione è rigidamente controllato. Ne risulta che all'aumentare delle dimensioni del programma la sua complessità cresce in maniera più che proporzionale. La compattezza intrinseca all'approccio strutturato rende difficoltosa la riutilizzazione di modelli esistenti o di parti di essi in altre applicazioni a causa delle differenti architetture e delle incompatibilità tra linguaggi.

A partire dagli anni Novanta alcuni autori hanno sviluppato approcci di tipo modulare utilizzando tecniche di programmazione a oggetti (*OOP - Object-oriented programming*) (Gauthier e Zekki, 1996; Kenig e Jones, 1997; Reynolds e Acock, 1997; Gauthier et al., 1999; Pajorgii et al., 2001).

L'*OOP* ha rivoluzionato l'approccio di sviluppo, ponendo l'accento sui dati, ai quali vengono associate le procedure specifiche. L'analisi

si del problema raggruppa le variabili del problema in insiemi coerenti e autonomi (es. tutte le variabili relative alla pianta, al suolo, alla meteorologia, ecc.). Ad ogni gruppo di variabili vengono quindi associate le funzioni specifiche di quel insieme di variabili. Il programma finale si compone di unità discrete di codice, le *classi*, progettate per rappresentare una parte ben definita del sistema da simulare. Le classi sono poi assemblate nel programma secondo vari modelli di relazione. Un esempio potrebbe essere quello di una classe "foglia", che conterrà diverse funzioni per la simulazione dell'accumulo di sostanza secca, e una classe "pianta" definita dall'aggregazione di più istanze della classe "foglia", ognuna delle quali contribuisce individualmente al processo di crescita globale. I vantaggi di questo modo di operare sono molteplici. In primo luogo l'architettura del programma diventa una esplicitazione del modello di relazione tra le classi, il che rende più semplici la progettazione, la lettura e la manutenzione del programma. Se successivamente si rende necessario modificare qualche parte del programma, si può agire solo sulle classi interessate senza influire sul resto del codice. La strutturazione del programma in classi permette inoltre un'alta corrispondenza tra i modelli concettuali e la loro implementazione in un programma.

Questo approccio ha praticamente rivoluzionato l'intero processo di sviluppo di un programma, che può giovare oggi di supporti specifici per la fase di *design*. Tra questi va menzionato l'*UML (Unified Modelling Language)*, un linguaggio basato su stereotipi visuali che ha permesso di standardizzare le fasi della progettazione (oggetti, loro relazioni e comportamenti dinamici) e di automatizzare parte dello sviluppo del codice a partire dallo schema grafico.

Un altro aspetto di rilievo della *OOP* è la

maggior facilità di scambio/riutilizzo di parti di programma. Questa facilità viene notevolmente potenziata se nella progettazione delle classi si accetta di seguire degli standard, in modo da rendere riconoscibili le proprie classi da altri programmi che adottano le stesse specifiche. Si tratta dell'idea che sta alla base dei *development framework*. Un *framework* è un *set* di specifiche per classi generiche, e di servizi per la gestione di tali classi, con cui assemblare programmi di simulazione. Un *framework* descrive in termini generali il flusso di esecuzione, i protocolli di comunicazione e le strutture dati. Idealmente, sviluppare un modello usando un *framework*, comporta solo la scrittura delle classi specifiche del modello, poiché tutte le funzioni di carattere generale (gestione dinamica della simulazione, stime di parametri, integrazione numerica, flusso input/output, analisi statistica) sono già fornite dal *framework*. Questa separazione di compiti, oltre a favorire il riutilizzo del codice, ha il duplice vantaggio di facilitare un più alto grado di sofisticazione dei servizi generali (o "meta-modellistici"), e di affrancare lo sviluppatore dal doverne occupare, per potersi concentrare solo sulle parti specifiche del proprio modello.

Esistono già numerosi esempi di *development frameworks*, sviluppati per vari settori scientifici e tecnologici. Nell'ambito della modellazione agro-ambientale la loro introduzione è piuttosto recente. Si segnalano, tra gli altri, ModCom (Hillyer et al., 2003), OpenMI (Gijssbers et al., 2002), IMA (Villa, 2001) e Time (Rahman et al., 2003).

L'approccio dei *development framework* è analogo a quello che ha condotto al rilascio di particolari software di sviluppo come SIMILE (Muetzelfeldt e Massheder, 2003) e STELLA (Costanza et al., 1998, 2001; Costanza e Gottlieb, 1998), che permettono la costruzione dei modelli di simulazione tramite linguaggi visuali, accessibili anche a chi non ha conoscenze specifiche di programmazione.

Nell'ambito della *OOP* si è evoluta la programmazione orientata ai componenti (*Component - Oriented Programming - COP*), che si sta imponendo come metodologia guida per lo sviluppo di sistemi in una serie di ambiti scientifici, inclusa la modellazione di sistemi agro-ecologici (Argent, 2004). A differenza dell'*OOP*, dove il limite è rappresentato dall'interdipen-

denza fra gli oggetti, la cui implementazione interna deve essere conosciuta per un corretto assemblaggio, nella *COP* le applicazioni sono strutturate in componenti per il cui utilizzo è sufficiente conoscere le loro funzionalità, esposte esternamente dalle interfacce. L'attenzione è quindi focalizzata nell'accurata progettazione delle interfacce, che possono essere viste come dei "contratti" tra il componente e il sistema che deve utilizzarlo. Il componente può essere aggiornato o completamente sostituito, ma se non cambia la sua interfaccia, nulla cambia per il sistema.

Un altro livello di difficoltà nell'integrazione di parti di codice provenienti da diversi modelli, oltre che dalla tecnica di programmazione, dipende dalla varietà dei linguaggi di programmazione e piattaforme con cui sono stati e sono tuttora implementati. L'industria informatica ha a questo proposito già offerto alcune soluzioni per migliorare il grado di compatibilità tra linguaggi e piattaforme, attraverso convenzioni sui tipi di dati e sui protocolli di comunicazione. Sostanziali contributi in questo senso sono giunti da tecnologie quali COM (*Component Object Model*, <http://www.microsoft.com/com>), introdotta dalla Microsoft per specificare le regole per definire gli oggetti che possono essere usati tra applicazioni e linguaggi diversi. Attualmente la piattaforma .NET di Windows (<http://www.microsoft.com/net>) e il linguaggio Java della Sun (<http://java.sun.com>), operante sia su sistemi Windows che Linux, sono tra le tecnologie più diffuse per supportare l'inter-operabilità tra oggetti e la loro integrazione.

### 3. Applicazioni dei modelli in coltura protetta

Le principali applicazioni dei modelli colturali in ambiente protetto si ritrovano nel controllo delle condizioni di crescita (Bakker et al., 1995; van Pee e Berckmans, 1999). In particolare, le equazioni che governano le relazioni idriche sono componenti essenziali di qualunque modello colturale perché la crescita, la produttività e la qualità delle colture orticole sono strettamente legate allo stato idrico. Inoltre, il rifornimento idrico può essere stimato e governato tramite forme semplificate dei modelli dell'evapotraspirazione (Jolliet e Bailey, 1992). Analo-

gamente, modelli relativamente semplici dell'assorbimento minerale possono essere usati per prevedere la concentrazione di un elemento nella soluzione nutritiva (Carmassi et al., 2002).

Questi modelli stanno alla base di molti sistemi di irrigazione o sono incorporati all'interno di sistemi di supporto alle decisioni. L'ottimizzazione delle quantità di acqua, ma anche della concentrazione di CO<sub>2</sub> e dei livelli termici e igroscopici (e.g., Kenig et al., 1999), può essere infatti ottenuta combinando i modelli del bilancio di massa ed energia con i modelli del tasso di crescita e del tasso di traspirazione. I modelli sono usati anche per prevedere la fioritura o altre fasi fenologiche delle colture in base ai livelli di luce e temperatura così da massimizzare il risparmio energetico e ottimizzare la programmazione dei cicli produttivi (Heins et al., 1987; Karlsson et al., 1989; Kaczperski et al., 1991). I modelli delle relazioni idriche sono inoltre di aiuto nell'identificazione di alcune caratteristiche chiave delle colture, come la sensibilità stomatica (Tardieu, 1993), la qualità delle produzioni in seguito a stress idrici (Jones e Sutherland, 1991), ecc., così da suggerire possibili obiettivi di miglioramento genetico.

Un'altra applicazione di interesse è l'utilizzo dei modelli per la previsione delle produzioni. I modelli sono, infatti, strumenti essenziali per la stima delle produzioni potenziali e per l'identificazione dei principali fattori limitanti in un determinato ambiente di crescita (Challa e Bakker, 1999). Modelli previsionali dei livelli e della qualità delle produzioni sono di importanza strategica nelle relazioni tra produttori e consumatori. Tuttavia, gran parte dei modelli oggi disponibili sono verificati in ambiti limitati e molti simulano solo alcune parti del sistema produttivo della coltura (fotosintesi, ripartizione, sviluppo) senza essere integrati come sotto-modelli di modelli culturali completi. In questo contesto si collocano anche le recenti proposte applicative nell'ambito delle coltivazioni idroponiche (Incrocci et al., 2006).

L'uso dei modelli per orientare le scelte di fertilizzazione, diffuso per altre colture, ha avuto una ricaduta più limitata in ambito orticolo e in particolare nelle colture protette, dove si sono affermati i sensori ione-specifici, che consentono il monitoraggio in tempo reale dell'andamento dei consumi minerali (Le Bot et al., 1998).

I modelli sono usati anche come strumenti per la didattica e la formazione professionale, a sostegno di sistemi di produzione che, in ambiente protetto, sono molto complessi e per i quali le decisioni vanno assunte e/o riorientate in tempi brevi (spesso giornalmente). Gli strumenti di simulazione supportano processi di apprendimento *trial-and-error* attraverso l'esplorazione rapida e a costi pressoché nulli di un numero potenzialmente illimitato di modalità alternative di controllo del clima e delle piante. La simulazione, fornendo l'evoluzione del sistema biofisico, permette di supportare l'analisi dell'efficienza economica, tecnica ed energetica della strategia applicata rispetto a criteri scelti dall'utente. Al riguardo può essere di ausilio l'impiego di strumenti per l'analisi multicriteriale (e.g., Mazzetto e Bonera, 2003).

#### **4. Ricerche in corso**

Forte ormai di un'esperienza pluridecennale, la modellazione delle colture protette si trova oggi ad affrontare le nuove sfide del settore agricolo: l'internazionalizzazione dei mercati, le mutate esigenze dei consumatori, la rapida evoluzione delle tecnologie e la crescente preoccupazione per l'ambiente. I primi approcci sono stati sviluppati su una gamma ristretta di specie e processi fisiologici e introducendo numerose semplificazioni. Le specie coltivate in ambiente protetto sono tuttavia numerose (soprattutto tra le piante ornamentali) e molte presentano caratteristiche morfologiche e fisiologiche particolari. I modelli dovrebbero pertanto essere il più possibile generici e flessibili per permettere la modellazione di nuove specie e sistemi di coltivazione. In merito, la classificazione delle specie di interesse in pochi gruppi con morfogenesi simile può essere di aiuto. La tabella 2 (derivata da dati di Kelleher, 1994) riporta una sommaria classificazione delle importanti colture di pieno campo: le famiglie includono specie simili per ciclo fenologico e morfologia, i gruppi ecologici (formulati in base all'adattamento climatico) comprendono specie simili per la risposta ai fattori ambientali (essenzialmente temperatura e radiazione). L'"intensità" della risposta ai fattori ambientali è legata al tipo di metabolismo (C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, CAM). La figura 1, ricavata da Wang et al. (2002), rappresenta un interessante

Tabella 2. Principali colture di pieno campo, gruppi di adattamento climatico e famiglie tassonomiche di appartenenza. Le colture riportate in corsivo esprimono il metabolismo di tipo C<sub>4</sub>.

Table 2. Main field crops, climate groups and botanical families. *Italic characters indicate C<sub>4</sub>-type crops.*

Famiglia	Gruppi	Colture
<i>Graminaceae</i>	Temperati	frumento, orzo, avena, segale
	Tropicali	<i>mais</i> , riso, <i>canna da zucchero</i> , <i>sorgo</i> , <i>miglio</i>
<i>Leguminosae</i>	Temperati	lupino, pisello, cece, fava, erba medica
	Tropicali	soia, arachide, ecc.
<i>Compositae</i>	Temperati	cartamo
	Tropicali	girasole
<i>Cruciferae</i>	Temperati	canola, cavolo, rapa, ecc.
<i>Malvaceae</i>	Tropicali	cotone
<i>Solanaceae</i>	Temperati	patata
	Tropicali	tabacco, pomodoro
<i>Linaceae</i>	Temperati	lino

schema di riferimento, basato sulla rielaborazione di tre visioni generali. La “visione tassonomica” interpreta le specie come un insieme di tratti genetici e morfologici comuni; la “visione “fisio-ecologica” mette in evidenza il grado di similarità nelle risposte all’ambiente; la “visione modellistica” indica le principali variabili che il modello deve descrivere e prevedere per ciascun gruppo di colture.

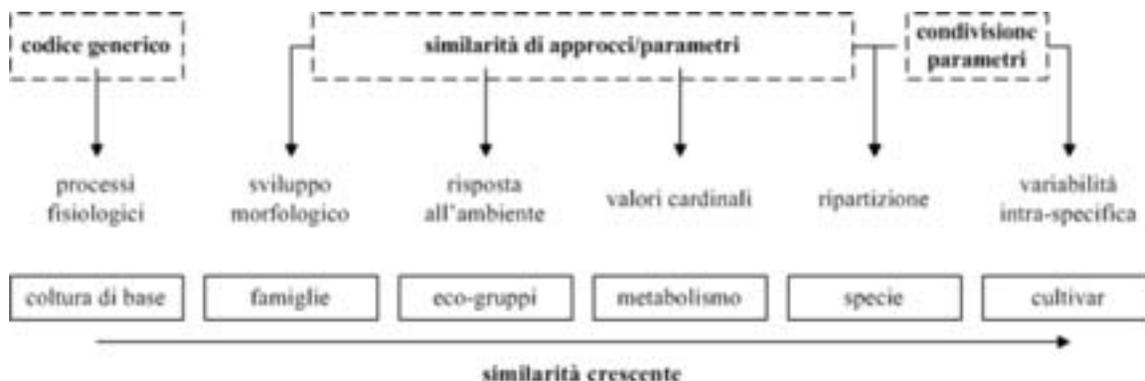
Le similarità tra le colture non sono ancora sufficientemente incluse nei modelli correnti, caratterizzati da eccessiva specificità o eccessiva genericità. Idealmente, si dovrebbe riuscire a progettare una specie, o classi di specie, con diversi livelli di astrazione, a partire da quello su-

periore rispetto al livello della famiglia tassonomica di appartenenza. Un primo livello di astrazione è la “coltura di base”, modellata includendo processi fisiologici essenziali e comuni a più tipologie vegetali. Un modello colturale sviluppato a partire dalla ipotetica “coltura di base” fornisce una struttura comune e algoritmi descrittivi processi generici per modellare le risposte della coltura ai fattori ambientali. Per ciascuna coltura, i parametri usati negli algoritmi possono essere derivati sperimentalmente o attraverso metodi di stima o calibrazione. Le colture appartenenti alla stessa famiglia e/o al medesimo eco-gruppo dovrebbero essere piuttosto simili nel tipo di risposta e nei valori dei parametri. A loro volta, le colture appartenenti alla stessa specie avrebbero verosimilmente molti parametri in comune a meno di variazioni cultivar-specifiche. Nell’ambito di una specie il numero delle cultivar è spesso ampio e soggetto a un veloce *turnover*. I parametri colturali dovrebbero pertanto essere chiaramente identificati e il loro valore stimato man mano che nuove cultivar vengono prodotte.

Anche se la ricerca ha prodotto modelli per tutti i processi della pianta, alcune caratteristiche del sistema colturale sono tuttora scarsamente considerate, come le dinamiche dell’acqua e dei nutrienti, la morfogenesi, le interazioni coltura-avversità, la ripartizione degli assimilati, la qualità delle produzioni. La crescente attenzione verso le conseguenze ambientali delle coltivazioni e la sanità delle produzioni giustifica ulteriori sforzi scientifici in questi campi. Infine, un significativo *gap* da colmare riguarda la fase che intercorre tra lo sviluppo-utilizzo dei mo-

Figura 1. Similarità tra gruppi di colture a diversi livelli di classificazione.

Figure 1. Similarities between groups of crops for different classification levels.



delli e l'assunzione delle decisioni operative. Se adeguatamente integrati all'interno di sistemi di supporto alle decisioni, i modelli possono essere strumenti efficaci per l'ottimizzazione della pianificazione e della gestione dei sistemi di coltivazione. Gli ambienti protetti consentono il controllo dei processi biologici delle colture attraverso l'ottimizzazione delle condizioni di crescita, tuttavia permangono lacune di conoscenza tra la variazione dinamica di tali condizioni e la risposta dinamica delle colture (Day, 1998). Per il controllo dell'ambiente di crescita è importante poter disporre di modelli del sistema sufficientemente robusti e accurati anche nello spazio oltre che nel tempo. Infatti, sebbene i comuni modelli simulino la crescita di una coltura "media", è noto che in ambiente protetto le colture sono spesso eterogenee perché l'ambiente stesso è di per sé più eterogeneo che in pieno campo. L'eterogeneità microclimatica dell'ambiente viene studiata con la tecnica denominata *computational fluid dynamics* (Murakami et al., 1991), i cui modelli possono essere combinati con i modelli della trasmissione luminosa e della traspirazione (e.g., Boulard e Wang, 2002). Altre tecniche in continuo sviluppo per la descrizione del microclima sono la modellazione multizona (Allard et al., 1990) e l'identificazione matematica (Berckmans et al., 1992).

## 6. Prospettive

Sebbene i tentativi più recenti di modellazione appaiano interessanti, come già detto i modelli prodotti sono stati oggetto di valutazioni per lo più limitate a pochi casi in cui si è riscontrata tuttavia una buona conformità tra valori stimati e valori misurati. L'integrazione dei modelli all'interno di sistemi complessi e la valutazione su larga scala restano invece problemi aperti. Significativi progressi sono attesi da programmi scientifici multi-disciplinari, che coinvolgano fisiologi vegetali, genetisti, patologi ed entomologi, ingegneri che operano nel settore delle serre e ricercatori di varia estrazione coinvolti nello studio dei sistemi aziendali. *Network* di questo tipo si stanno formando e consolidando in varie parti del mondo (vedi Bakker et al., 1995 per i Paesi Bassi; Baille, 1997 per la Francia, ecc.). Si segnalano inoltre le esperienze maturate dal consorzio HOPLICCS (Callewaert e

Lippert, 2000), nell'ambito del progetto europeo ESPRIT, per la realizzazione di strumenti di pianificazione dell'impresa serra integrando i modelli della crescita colturale con i modelli di ottimizzazione delle risorse. In Italia la modellazione dei sistemi in coltura protetta può trarre beneficio dalle nuove metodologie di modellazione sviluppate nell'ambito del progetto SIPEAA – Strumenti Informatici per la Pianificazione Eco-Compatibile delle Aziende Agrarie (Donatelli et al., 2002a, 2006, <http://www.si-peaa.it>). Il sostegno dato a questi sforzi può generare nuovi approcci alla modellazione e al *software design* (Donatelli et al., 2002b).

Sebbene il sistema "serra" sia complesso e la sua modellazione richieda una concettualizzazione molto accurata (e.g., Martin-Clouaire e Rellier, 1999) e vaste competenze, il numero dei ricercatori che vi opera è ancora troppo limitato se confrontato con altri sistemi di coltivazione. La diffusione che si è avuta nel tempo di seminari e simposi a livello internazionale ha favorito il rafforzamento di collaborazioni all'interno di programmi bilaterali (Gary, 1999). Inter-scambi di questo tipo vanno ulteriormente promossi al fine di favorire la formazione di reti di eccellenza effettivamente integrate e lo sviluppo di progetti di ampio respiro, non più limitati a piccoli gruppi e a situazioni locali. Un esempio è la rete di eccellenza europea, a cui partecipano anche strutture italiane affiliate al consorzio ICAM (*Italian Consortium for Agro-Ecological Modelling*, <http://www.icamodelling.it>) che, in un contesto fortemente multi-disciplinare e in accordo ai più recenti orientamenti scientifici (modularità, riutilizzabilità, inter-operabilità) e tecnologici (*component-oriented programming*), sta sviluppando modelli di sistema applicati al settore agricolo nell'ambito del progetto SEAMLESS (A System for Environmental and Agro-ecological Modelling; Linking European Science and Society, van Ittersum et al., 2002, <http://www.seamless-ip.org>).

## Ringraziamenti

Lavoro finanziato nell'ambito del Programma Nazionale per le Ricerche in Antartide (PRNA) – Progetto PULSA. Gli autori ringraziano dott. Marcello Donatelli (CRA-ISCI, Bologna) per il parere di competenza espresso.

## **Bibliografia**

- Abreu P., Meneses J.F., Gary C. 2000. Tompousse, a model of yield prediction for tomato crops: calibration study for unheated plastic greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)*, 519:141-150.
- Allard F., Dorer V.B., Feustel H.E. 1990. Fundamentals of the multizone air flow models – COMIS AIVC technical note, 29 maggio, 115 pp.
- Argent R.M. 2004. An overview of model integration for environmental applications – components, frameworks and semantics. *Env. Modell. Softw.*, 19:219-234.
- Baille A. 1997. Actes du séminaire de l'AIP intersectorielle "Serres". INRA, Avignon.
- Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., van de Braak N.J. 1995. Greenhouse climate control – an integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen, 279 p.
- Berckmans D., De Moor M., De Moor B. 1992. A new approach to modelling and control: the energy and mass transfer in a three dimensional imperfectly mixed ventilated space. *Proc. Roomvent '92: Air distribution in rooms. Third International Conference, 2-4 settembre, Aalborg, Denmark, Vol. 1, 399-416.*
- Bertin N., Heuvelink E. 1993. Dry matter production in a tomato crop: comparison of two simulation models. *J. Hortic. Sci.*, 68:995-1011.
- Boulard T., Wang S. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Comput. Electron. Agr.*, 34:173-190.
- Callewaert L., Lippert T. 2000. HOPLICCS: horticultural planning and integrated cost control systems. *Acta Hort. (ISHS)*, 519:221-229.
- Carmassi G., Incrocci L., Malorgio F., Tognoni F., Pardossi A. 2003. A simple model for salt accumulation in closed-loop hydroponics. *Acta Hort. (ISHS)*, 614:149-154.
- Challa H., Bakker J. 1999. Potential production within the greenhouse environment. In: Enoch Z., Stanhill G. (eds.): *Greenhouse ecosystems (Ecosystems of the world, volume 20)*. Elsevier, Amsterdam, 423 p.
- Costanza R., Duplisea D., Kautsky U. 1998. Modelling ecological and economic systems with Stella. *Ecol. Model.*, 110:1-103.
- Costanza R., Gottlieb S. 1998. Modelling ecological and economic systems with Stella: part II. *Ecol. Model.*, 112:81-247.
- Costanza R., Voinov A. 2001. Modelling ecological and economic systems with Stella: part III. *Ecol. Model.*, 143:1-143.
- Day W. 1998. The value of crop and greenhouse models in greenhouse environmental control. *Acta Hort. (ISHS)*, 456:295-303.
- Dayan E., van Keulen H., Jones J.W., Zipori I., Shmueli D., Challa H. 1993. Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model: I. Description of the model. *Agric. Syst.*, 43:145-163.
- De Wit C.T. 1970. Dynamic concepts in biology. In: Setlik I. (ed.): *Prediction and measurement of photosynthetic activity*, 17-23. Pudoc, Wageningen.
- Donatelli M., Acutis M., Balderacchi M., Barbieri S., Bechini L., Bellocchi G., Bonera R., Carlini L., Danuso F., Degli Esposti D., Ditto D., Fila G., Fontana F., Gentile A., Mazzetto F., Naselli P.A., Sacco P., Speroni M., Trevisan M., Vetrano V., Zuliani M. 2006. Modelli per sistemi produttivi in agricoltura. Progetto SIPEAA, CRA-ISCI Bologna, 332 p.
- Donatelli M., Acutis M., Danuso F., Mazzetto F., Nasuelli P., Nelson R., Omicini A., Speroni M., Trevisan M., Tugnoli V. 2002. Integrated procedures for evaluating technical, environmental and economical aspects in farms: the SIPEAA project. *Proc. 7<sup>th</sup> European Society for Agronomy Congress, 15-18 luglio, Cordoba, Spagna, 271-272.*
- Donatelli M., van Ittersum M.K., Bindi M., Porter J.R. 2002. Modelling cropping systems – highlights of the symposium and preface to the special issues. *Eur. J. Agron.*, 18:1-11.
- Gary C. 1999. Modeling greenhouse crops: state of the art and perspectives. *Acta Hort. (ISHS)*, 495:317-322.
- Gary C., Jones J.W., Tchamitchian M. 1998. Crop modelling in horticulture: state of the art. *Sci. Hort.*, 74:3-20.
- Gauthier L., Gary C., Zekki H. 1999. GPSF: a generic and object-oriented framework for crop simulation. *Ecol. Model.*, 116:253-268.
- Gauthier L., Zekki H. 1996. An object-oriented framework for crop growth and development simulation models. In: Zazueta F.S. (ed.), *Proc. of the 6th Int. Conf. on Computers in Agriculture, ASAE, 10-14 giugno, Cancún, Messico, 1022-1037.*
- Gijzen H., Goudriaan J. 1989. A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops. *Agric. For. Meteorol.*, 48:1-20.
- Gijzen H., Heuvelink E., Challa H., Marcelis L.F.M., Dayan E., Cohen S., Fuchs M. 1998. HORTISIM: a model for greenhouse crops and greenhouse climate. *Acta Hort. (ISHS)*, 456:441-450.
- Gijsbers P.J.A., Moore R.V., Tindall C.I. 2002. HarmonIT: Towards OMI, an Open Modelling Interface and Environment to harmonise European developments in water related simulation software, *Hydroinformatics 2002. Fifth International Conference on Hydroinformatics, Cardiff, UK, IAHR, 6.*
- Hamer P.J.C. 2003. Analysis of strategies for reducing calcium deficiencies in glasshouse grown tomatoes: model functions and simulations. *Agric. Syst.*, 76:181-205.
- Hammer G.L., Kropff M.J., Sinclair T.R., Porter J.R. 2002. Future contributions of crop modelling – from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *Eur. J. Agron.*, 18:15-31.
- Hashimoto Y., Yi Y. 1989. Dynamic model of CO<sub>2</sub> up-

- take based on system identification. *Acta Hort.*, 248:295-300.
- Heins R., Erwin J., Karlsson M., Berghage R., Carlson W., Biernbaum J. 1987. Easter lily responses to temperature during forcing. II. Tracking Easter lily height with graphs. *Grower Talks*, 51:64-68.
- Heuvelink E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation. *Ann. Bot.*, 75: 369-379.
- Heuvelink E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Ann. Bot.*, 77:71-80.
- Heuvelink E., Bertin N. 1994. Dry matter partitioning in a tomato crop: comparison of two simulation models. *J. Hortic. Sci.*, 69:885-903.
- Hillyer C., Bolte J., van Evert F., Lamaker A. 2003. The ModCom modular simulation system. *Eur. J. Agron.*, 18:333-343.
- Incrocci L., Fila G., Bellocchi G., Paradossi A., Campiotti C.A., Balducchi R. 2006. Soil-less indoor-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.): approaching the modelling task. *Env. Modell. Softw.*, 21:121-126.
- Jolliet O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agric. Engng. Res.*, 57:23-37.
- Jolliet O., Bailey B.J. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurements and models comparison. *Agric. For. Meteorol.*, 58:43-62.
- Jolliet O., Danloy L., Gay J.-B., Munday G.L., Reist A. 1991. HORTICERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse. *Agric. For. Meteorol.*, 55:265-294.
- Jones J.W., Dayan E., Allen L.H., van Keulen H., Challa H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Trans. of ASAE*, 34:663-672.
- Jones H.G., Sutherland R.A. 1991. Stomatal control of xylem embolism. *Plant Cell Environ.*, 14:607-612.
- Jones H.G., Tardieu F. 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.*, 74:21-46.
- Karlsson M.G., Heins R.D., Erwin E., Berghage R.D., Carlson W.H., Biernbaum J.A. 1989. Temperature and photosynthetic photon flux influence chrysanthemum shoot development and flower initiation under short-day conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 114:158-163.
- Kaczperski M.P., Carlson W.H., Karlsson M.G. 1991. Growth and development of *Petunia xhybrida* as a function of temperature and irradiance. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 116:232-237.
- Kelleher F.M. 1994. Climate and crop distribution. In: Pratley J. (ed.), *Principles of field crop production*, 26-117. Third ed., Oxford University Press, Oxford.
- Kenig A., Jones J.W. 1997. Model structure for dynamic crop-greenhouse simulations. In: Seginer I., Jones J.W., Gutman P., Vallejos C.E. (eds.), *Optimal environmental control for indeterminate greenhouse crops*. Final Report, BARD Research Project IS-1995-91RC, Agricultural Engineering Department, Technion, Haifa, Israel. Chap. II-4.
- Kenig A., Kramer S., Lipkind B. 1999. Decision model to determine heating temperature for muskmelons grown under elevated CO<sub>2</sub> levels. *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Modelling Cropping Systems*, 21-23 giugno, Lleida, Spagna, 207-208.
- Le Bot J., Adamowicz S., Robin P. 1998. Modelling of plant nutrition in horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.*, 74:47-82.
- Le Bot J., Andriolo J., Gary C., Adamowicz S., Robin P. 1997. Dynamics of N accumulation and growth of tomato plants in hydroponics: an analysis of vegetative and fruit compartments. In: Lemaire G., Burns I.G. (eds.), *Diagnostics procedures for crop N management*, INRA Editions, Paris, 37-51.
- Marcelis L.F.M. 1994. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Ann. Bot.*, 74:43-52.
- Marcelis L.F.M., Heuvelink E., Goudriaan J. 1998. Modelling of growth and yield in horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.*, 74:83-111.
- Martin-Clouaire R., Rellier J.-P. 1999. An ontology of greenhouse production management. *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Congr. for Computer Tech. in Agric.*, 15-18 novembre 1998, Firenze, Italia, 201-208.
- Mazzetto F., Bonera R. 2003. MEACROS: a tool for multi-criteria evaluation of alternative cropping systems. *Eur. J. Agron.*, 18:379-387.
- Monteith J.L. 1977. Climate and use efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London B*, 281:277-294.
- Muetzelfeldt R., Massheder J. 2003. The Simile visual environment. *Eur. J. Agron.*, 18:345-358.
- Murakami S., Kato S., Kondo Y. 1991. Examining k-e EVM by means of ASM for a 3-D horizontal buoyant jet in enclosed space. In: Rodi W., Ganic E.N. (eds.), *Engineering turbulence modelling and experiments*. Elsevier, Amsterdam, 205-214.
- Papajorgii P., Braga R., Porter C., Jones J.W., Beck H.W. 2001. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Modelling Cropping Systems*, 16-18 luglio, Firenze, Italy 227-228.
- Rahman J.M., Seaton S.P., Perraud J.-M., Hotham H., Verrilli D.I., Coleman J.R. 2003. It's TIME for a new environmental modeling framework. In: Post D.A. (ed.): *MODSIM 2003 International Congress on Modelling and Simulation*, Townsville, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., 1727-1732.
- Reynolds J.F., Acock B. 1997. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. *Ecol. Model.*, 94:7-16.
- Shipp J.L., van Roermund H.J.W. 1998. Pest and disease modelling and its role in integrated farm management. *Acta Hort. (ISHS)*, 456:419-430.
- Tardieu F. 1993. Will progress in understanding soil-root relations and root signalling substantially after water

- flux models? *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B*, 341:57-66.
- Van Ittersum M.K., Donatelli M., Jetten T.H. 2002. Towards an integrated system for agro-ecological and environmental modelling. *Proc. 7<sup>th</sup> European Society for Agronomy Congress*, 15-18 luglio, Cordoba, Spagna, 335-336.
- Van Pee M., Berkman D. 1999. Quality of modelling plant responses for environment control purposes. *Comput. Electron. Agr.*, 22:209-219.
- Villa F. 2001. Integrating modelling architecture: a declarative framework for multi-paradigm, multi-scale ecological modeling. *Ecol. Model.*, 137:23-42.
- Wang E., Robertson M.J., Hammer G.L., Carberry P.S., Holzworth D., Meinke H., Chapman S.C., Hargreaves J.N.G., Huth N.I., McLean G. 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *Eur. J. Agron.*, 18:121-140.
- Weiss A. 2003. Introduction to the symposium, "Crop modeling and genomics", Minneapolis, MN, 7 Nov. 2000, ASA-CSSA-SSSA Annual meeting. *Agron. J.*, 95:1-3.
- Zaidi M.A., Murase H., Honami N. 1999. Neural network model for the evaluation of lettuce plant growth. *J. Agr. Eng. Res.*, 74:237-242.