



*Ministero dell'Istruzione
dell'Università e della Ricerca*



Università degli Studi di Palermo

DOTTORATO DI RICERCA IN “AGRONOMIA AMBIENTALE”

XXII CICLO

Anni Accademici 2007/2008, 08/09, 09/10

Sede Amministrativa

Università degli Studi di Palermo

Sede Consorzata

Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

Settore scientifico disciplinare AGR/02

Dissertazione finale dal titolo

**Applicazione del modello *CropSyst* sui cereali
e simulazione di scenari climatici futuri in Sicilia**

Coordinatore del Dottorato

Chiar.mo Prof. Claudio Leto

Il Tutor

Chiar.ma Prof.ssa Teresa Tuttolomondo

Il Dottorando

Dott. Antonio Aronadio

Introduzione

In Sicilia, il settore della cerealicoltura, pur nello stato di crisi generale in cui si trova attualmente l'agricoltura, è di notevole importanza. Soprattutto attraverso la coltivazione del grano duro, la cerealicoltura riveste un ruolo predominante nei sistemi colturali delle aree collinari interne, rappresenta un elemento fondamentale del comparto agro-alimentare, caratterizza il paesaggio ed esprime un insieme di valori ancora legati alla storia, alle tradizioni rurali e alla società dell'Isola.

In ambito nazionale e internazionale, ormai da alcuni anni, tra le metodologie e gli strumenti utilizzati nella ricerca agronomica figura la modellistica, ossia l'uso di software per la simulazione del sistema colturale e lo studio delle interazioni tra gli elementi che compongono lo stesso sistema: clima, suolo, coltura, gestione agronomica e altri fattori.

L'obiettivo della ricerca condotta è di verificare la possibilità di applicazione del modello di simulazione colturale CropSyst (STÖCKLE C.O., DONATELLI M., NELSON R., 2003) alla coltivazione dei cereali nell'ambiente siciliano.

Nel presente lavoro si descrive brevemente il comparto cerealicolo, presentando alcuni dati relativi alle superfici coltivate e alle produzioni delle diverse specie. Si espone poi la tematica della modellizzazione dei sistemi colturali, descrivendo le fasi che compongono la realizzazione di un modello e la seguente calibrazione e validazione. Successivamente si evidenziano le numerose applicazioni dei modelli di simulazione nei diversi ambiti dell'agrometeorologia, dell'agronomia e della pianificazione territoriale, facendo anche riferimento ai limiti insiti nei modelli stessi. Inoltre si presenta un excursus sulla modellistica, considerando la situazione attuale e i possibili ulteriori sviluppi.

La ricerca prende poi in esame il modello CropSyst, attraverso una descrizione generale e presentandone, oltre all'articolazione degli input e degli output, i concetti fondamentali e le principali equazioni alla base del funzionamento.

Il modello viene applicato ai dati sperimentali relativi alle prove di confronto varietale, realizzate presso l'Azienda "Sparacia" (Cammarata – AG), nell'ambito della sperimentazione nazionale sui cereali. Per le colture di grano duro (varietà

Simeto), grano tenero (Bologna) e orzo (Dasio) si effettua la calibrazione e la validazione del modello.

Con riferimento alle problematiche legate ai possibili cambiamenti climatici, viene trattata l'applicazione dei modelli di simulazione per lo studio degli effetti del clima sui sistemi colturali.

Ritenuta soddisfacente la validazione del modello, per le colture di grano duro e orzo, si procede alla simulazione in una situazione di cambiamento climatico, secondo due scenari climatici futuri (A2 e B2) elaborati sulla base del modello climatico HADCM3 (GORDON C. *et al.*, 2000; POPE V.D. *et al.*, 2000), facendo riferimento a scenari futuri di emissione di CO₂ ipotizzati dall'IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Per entrambe le colture, la simulazione considera la fenologia e la resa di granella, evidenziando quindi il comportamento delle colture stesse negli scenari climatici ipotizzati.

Capitolo I

Principali aspetti della cerealicoltura

I cereali comprendono un gruppo di specie caratterizzate da un elevato contenuto amidaceo delle cariossidi e per questo ampiamente utilizzate in tutto il Mondo in diversi settori: alimentazione umana, nutrizione del bestiame, applicazioni industriali (produzione di birra, whisky, biocarburanti, materiali biodegradabili ecc.). (BALDONI R., GIARDINI L., 2000).

La coltivazione dei cereali riveste un ruolo chiave nell'agricoltura italiana. Le colture cerealicole sono sempre presenti negli ordinamenti colturali e rappresentano le colture fondamentali dei piani di avvicendamento, interessando, in funzione dei diversi areali, sia il ciclo primaverile-estivo (riso e mais) sia il ciclo autunno-vernino (grano, orzo, avena) (BONCIARELLI F., 1995).

Con particolare riferimento alla Sicilia, le colture cerealicole, a ciclo autunno-vernino, interessano gran parte delle aree collinari interne. In tali zone, le rotazioni ordinarie prevedono la coltivazione dei cereali (grano duro, orzo, avena), delle leguminose da granella (fava, cece, lenticchia) e degli erbai (spesso polifiti) per la produzione di fieno. In alcune località della Sicilia è molto diffusa, come specie prativa, la sulla. (LETO C., 2010).

La cerealicoltura in Sicilia, come in molte altre regioni d'Italia, per la notevole superficie investita, è anche un elemento caratterizzante il paesaggio. Inoltre alla coltivazione del grano si legano notevoli aspetti storici e culturali, nonché riferimenti religiosi e mitologici (VIGGIANI P., 2007).

Tra le diverse specie cerealicole coltivate in Sicilia, maggiore interesse riveste la coltura del grano duro, alla base di una delle principali filiere, a livello socio-economico, del comparto agro-alimentare siciliano. L'importanza, nelle abitudini alimentari, del pane di semola e della pasta determina in Sicilia la presenza di un settore agro-industriale legato alla produzione e alla trasformazione del grano duro. Si tratta di una filiera che, attraverso i sementifici, le aziende agricole, i centri di stoccaggio, i molini, i pastifici e i panifici, nonostante la diffusa crisi economica, è ancora capace di generare reddito e occupazione per l'Isola. Negli ultimi anni anche

la filiera cerealicola siciliana ha risentito degli effetti della globalizzazione, in termini di prezzi fortemente oscillanti delle materie prime e di concorrenza nella commercializzazione dei prodotti.

Con particolare riferimento al comparto agricolo della filiera, appare necessario migliorare la produttività delle colture e la qualità della granella ai fini dell'utilizzazione industriale. Infatti l'industria molitoria, per la successiva pastificazione, richiede partite di grano dotate di elevato contenuto proteico, indicativamente superiore al 13%, mentre per la produzione siciliana in genere si rileva un valore sensibilmente più basso che si attesta nell'intervallo 11-12%. Pertanto vengono importati in Sicilia consistenti quantitativi di grano e di semola per soddisfare le esigenze dell'industria di trasformazione (CONSORZIO DI RICERCA "GIAN PIETRO BALLATORE", 2008).

Nelle seguenti tabelle, per il grano duro, il grano tenero e l'orzo, si riportano i dati relativi alle superfici coltivate e alle rese nel corso del decennio 2001-2010 nei diversi areali italiani. I successivi grafici evidenziano gli andamenti delle superfici delle tre colture nell'arco del decennio considerato nelle macroaree Nord, Centro e Mezzogiorno.

Si evidenzia una riduzione della coltivazione del grano duro al Centro e al Mezzogiorno, mentre al Nord la coltivazione del grano duro è in aumento. Ovviamente la cerealicoltura risente degli interventi della Politica Agricola Comunitaria, in particolare del "disaccoppiamento" ossia dell'erogazione dei pagamenti diretti non più legati alla specifica coltura ma al valore medio di quanto precedentemente percepito dalla stessa azienda nel triennio di riferimento (2000 – 2001 – 2002) (Reg. CE 1782/2003). Venendo a mancare uno specifico contributo economico per la coltivazione del grano duro, la redditività della stessa coltura, soprattutto nelle aree marginali caratterizzate da basse rese, è diminuita, determinando quindi la riduzione delle superfici investite. Nel 2008 si è avuto un incremento delle superfici coltivate a grano duro dovuto al forte rialzo dei prezzi verificatosi nel periodo aprile-dicembre 2007 (POGNA N., 2008).

Tab. 1 – Superficie e resa del grano duro nei diversi areali italiani.

Anno	Nord Ovest		Nord Est	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	2.238	49,55	19.253	49,90
2002	3.221	52,15	25.506	51,96
2003	3.014	50,12	23.008	51,46
2004	4.511	56,40	25.186	62,22
2005	5.267	57,54	23.660	65,83
2006	7.860	58,28	33.922	60,33
2007	17.018	48,13	50.462	48,35
2008	25.807	54,87	88.632	55,81
2009	21.780	55,33	75.018	52,88
2010	20.685	54,25	84.209	52,31
Anno	Centro		Sud	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	361.390	28,46	846.191	19,38
2002	399.524	32,86	868.937	26,38
2003	375.883	26,10	846.829	19,15
2004	430.119	39,11	866.006	29,02
2005	311.702	37,76	765.324	28,57
2006	259.743	36,46	676.064	28,35
2007	282.712	35,84	713.046	22,61
2008	343.563	36,16	714.007	30,22
2009	299.739	35,08	603.371	22,86
2010	291.785	36,85	548.212	27,11
Anno	Sicilia		Sardegna	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	351.085	20,65	84.038	14,72
2002	338.965	12,00	97.108	10,97
2003	346.450	25,04	93.650	12,13
2004	349.600	27,10	96.710	22,82
2005	319.430	23,09	94.678	15,24
2006	290.660	26,04	74.648	15,76
2007	300.150	28,03	75.843	17,11
2008	338.790	27,00	78.240	21,50
2009	228.539	26,79	25.635	17,66
2010	302.421	26,90	38.516	17,87

Fonte ISTAT.

Nord Ovest: Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Liguria.

Nord Est: Trentino Alto-Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia, Emilia Romagna.

Centro: Toscana, Marche, Umbria, Lazio.

Sud: Abruzzo, Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria.

Tab. 2 – Superficie e resa del grano tenero nei diversi areali italiani.

Anno	Nord Ovest		Nord Est	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	122.915	50,39	244.681	51,00
2002	164.461	50,64	276.433	56,44
2003	135.897	46,28	222.986	51,92
2004	139.583	53,01	227.819	62,67
2005	146.965	54,81	240.403	64,86
2006	144.661	56,92	232.158	64,70
2007	168.459	51,79	281.386	52,79
2008	183.912	51,82	303.449	60,36
2009	158.054	49,43	275.159	54,67
2010	144.609	54,98	247.455	56,86
Anno	Centro		Sud	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	167.811	38,76	88.870	30,41
2002	156.938	40,08	83.613	30,74
2003	147.216	34,64	70.126	30,45
2004	144.809	48,26	68.529	32,72
2005	152.317	46,64	62.000	33,56
2006	137.135	46,28	67.700	33,97
2007	139.586	48,65	70.675	29,73
2008	143.563	49,83	69.241	34,90
2009	103.822	52,70	30.087	30,90
2010	79.113	50,90	53.527	32,89
Anno	Sicilia		Sardegna	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	900	15,78	..	..
2002	610	13,61	..	..
2003	1.100	16,36	..	..
2004	1.100	20,00	..	..
2005	1.150	24,35	..	..
2006	1.100	25,27	..	..
2007	1.100	4,36	..	..
2008	1.100	25,27	579	17,18
2009	1.151	28,81	..	..
2010	1.100	28,80	..	..

Fonte ISTAT.

Nord Ovest: Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Liguria.

Nord Est: Trentino Alto-Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia, Emilia Romagna.

Centro: Toscana, Marche, Umbria, Lazio.

Sud: Abruzzo, Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria.

Tab. 3 – Superficie e resa dell'orzo nei diversi areali italiani.

Anno	Nord Ovest		Nord Est	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	44.027	51,02	51.303	47,80
2002	51.683	52,32	54.413	48,33
2003	49.486	48,74	52.370	43,69
2004	46.908	55,45	49.870	51,84
2005	51.385	56,67	51.216	50,73
2006	53.006	57,24	55.130	54,17
2007	59.904	47,57	54.574	48,14
2008	55.594	48,49	53.887	50,70
2009	53.355	42,64	47.048	48,31
2010	44.100	51,09	38.957	49,81
Anno	Centro		Sud	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	75.821	34,70	113.287	26,68
2002	76.156	39,67	110.926	26,36
2003	77.120	31,43	92.197	26,21
2004	76.861	38,34	93.979	29,64
2005	80.946	37,91	96.303	30,20
2006	84.858	37,75	97.171	30,99
2007	85.539	37,44	103.008	27,47
2008	86.511	37,37	104.671	28,99
2009	73.322	34,10	103.206	26,99
2010	62.783	38,30	102.068	27,71
Anno	Sicilia		Sardegna	
	Sup (ha)	Resa (q/ha)	Sup (ha)	Resa (q/ha)
2001	17.220	20,13	31.432	17,78
2002	17.225	12,47	32.422	12,65
2003	16.935	23,69	21.618	12,30
2004	15.050	24,09	22.208	12,83
2005	13.220	21,30	26.874	13,83
2006	14.115	24,54	28.260	13,88
2007	16.160	24,78	25.493	13,45
2008	14.450	24,31	15.411	20,83
2009	14.430	22,98	15.421	21,16
2010	13.130	24,30	12.482	12,93

Fonte ISTAT.

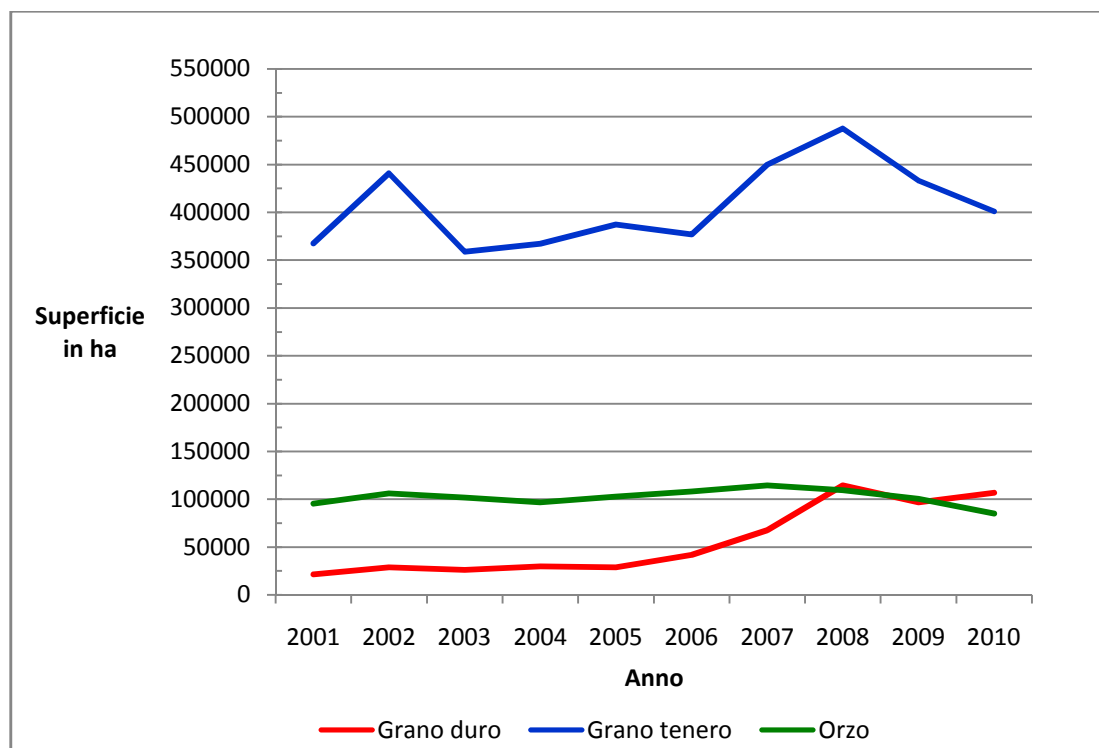
Nord Ovest: Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Liguria.

Nord Est: Trentino Alto-Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia, Emilia Romagna.

Centro: Toscana, Marche, Umbria, Lazio.

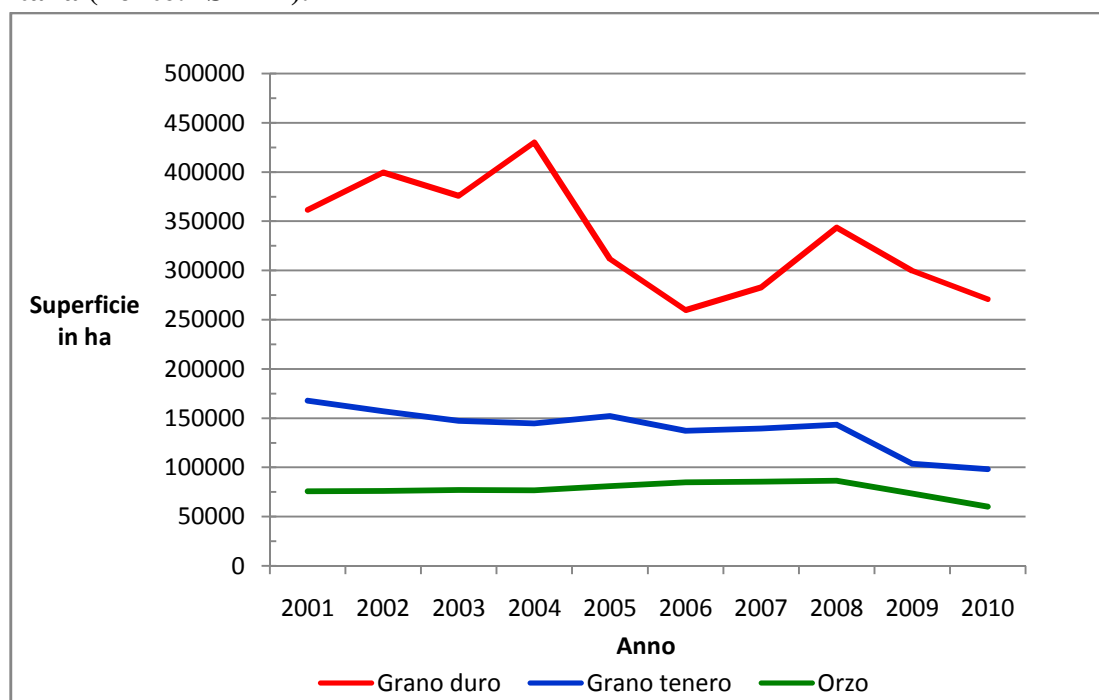
Sud: Abruzzo, Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria.

Fig. 1 – Superficie (ha) coltivata a grano duro, grano tenero e orzo nel Nord Italia (Fonte: ISTAT).



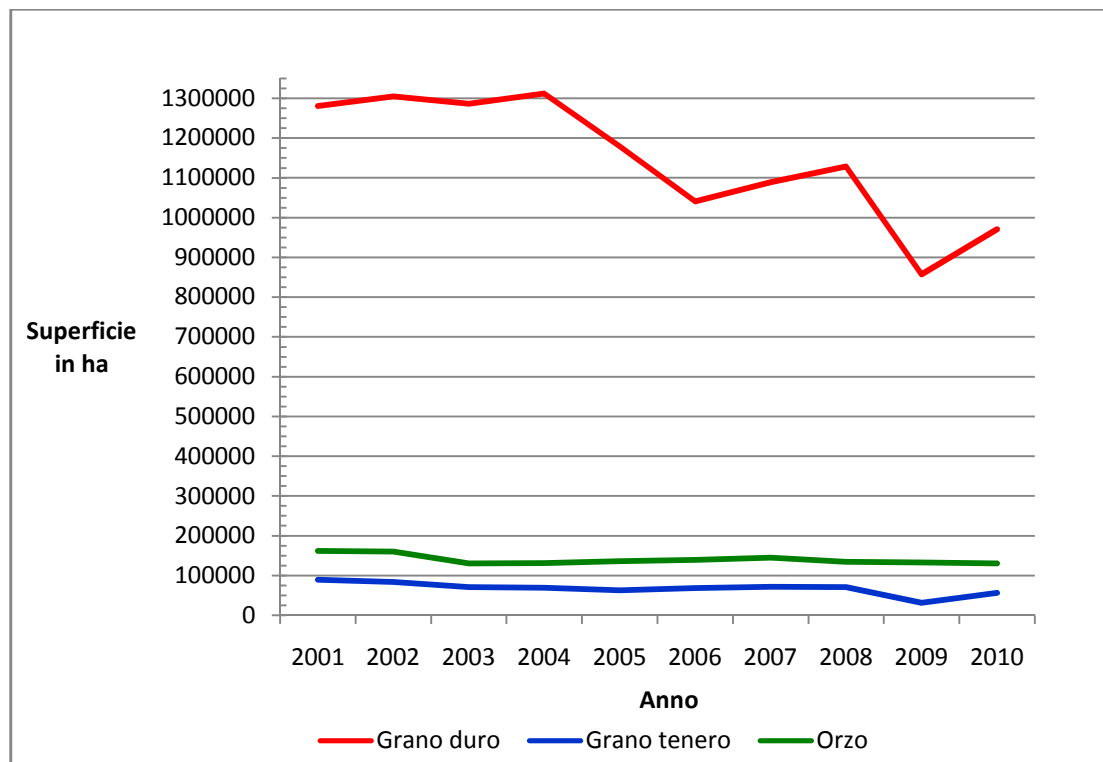
Nord: Piemonte, Valle d’Aosta, Lombardia, Liguria, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia, Emilia Romagna.

Fig. 2 – Superficie (ha) coltivata a grano duro, grano tenero e orzo nel Centro Italia (Fonte: ISTAT).



Centro: Toscana, Umbria, Marche, Lazio.

Fig. 3 – Superficie (ha) coltivata a grano duro, grano tenero e orzo nel Mezzogiorno d'Italia (Fonte: ISTAT).



Mezzogiorno: Abruzzo, Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria, Sicilia, Sardegna.

Capitolo II

I modelli di simulazione del sistema colturale

II.1 Il sistema colturale e la rappresentazione tramite i modelli

Nel significato più generale del termine, si definisce “sistema” un gruppo di elementi che sono uniti insieme in una qualche interazione o interdipendenza finalizzata ad ottenere un determinato scopo (BANKS J., CARSON J.S, 1984). “Sistema” può anche essere definita una parte di realtà che contiene elementi tra loro interconnessi (LEFFELAAR P.A., FERRARI T.J., 1989).

I sistemi biologici, costituiti da elementi biotici e abiotici, sono sistemi gerarchici caratterizzati da numerosi livelli di organizzazione, come descritto dalla biologia e dalla ecologia: singola cellula, tessuto, organo, apparato, individuo, popolazione, ecosistema ecc. (THORNLEY J.H.M., JOHNSON I.R., 1990).

“Per *sistema colturale* si intende il complesso delle componenti coltura-suolo-altri bionti e loro interazioni, sottoposto ad un regime climatico ed agli interventi antropici” (DANUSO F., DONATELLI M., 2002). Il clima e l’agrotecnica influenzano sia le singole componenti del sistema sia le loro interazioni. A differenza degli ecosistemi naturali, il sistema colturale è realizzato e mantenuto dall’uomo, al fine di ottenere determinati beni e/o servizi (alimenti, materie prime, ambiente ricreativo, ecc.).

L’analisi di un sistema tende a definirne i confini, a descriverne i processi e le risultanze, ad evidenziarne i fattori di condizionamento. L’analisi del sistema, oltre ad una descrizione statica delle componenti del sistema stesso, considera il sistema come un’unità funzionale, trattandone il comportamento nel corso del tempo e in funzione delle variazioni delle sue componenti (DONATELLI M., 1995). L’agronomia, attraverso l’analisi di un sistema colturale, ha come obiettivo il miglioramento del sistema stesso: aumento quantitativo e qualitativo della produzione, riduzione degli input energetici, salvaguardia dell’ambiente, incremento del profitto economico e del benessere sociale.

Condurre una analisi del sistema utilizzando l'intero sistema reale stesso, in molti casi, non è pratico e conveniente, e, in alcuni casi, può risultare del tutto impossibile. L'analisi del sistema può essere allora condotta su un modello fisico del sistema reale oppure su una piccola porzione del sistema reale stesso. La validità dell'analisi, nel primo caso, dipende dagli elementi considerati per la realizzazione del modello fisico, nel secondo caso dipende dalla rappresentatività della porzione considerata nei confronti dell'intero sistema. Su tali concetti si è da sempre basata la ricerca agronomica. Esempi di modelli fisici sono i lisimetri e le camere di crescita mentre le aree di saggio in un campo e le parcelle sperimentali sono piccole porzioni dell'intero sistema. Tale metodologia tradizionale di sperimentazione agricola può risultare inadeguata in alcune situazioni che sempre più spesso si presentano all'attenzione dei ricercatori (COLELLA A.M. *et al.*, 1974; SPAN J.D., 1982; STÖCKLE C.O., 1989; THORNLEY J.H.M., JOHNSON I.R., 1990):

- valutazione di scelte operative rischiose;
- sperimentazione di condizioni estreme;
- studi a scala territoriale;
- processi che si sviluppano in un lungo periodo di tempo;
- previsioni sulla sostenibilità ambientale di determinate tecniche di coltivazione;
- valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sull'agricoltura.

Pertanto si è evidenziata la necessità di realizzare modelli matematici in grado di rappresentare adeguatamente i sistemi colturali reali, al fine di usare tali modelli per l'analisi dei sistemi colturali stessi, nelle varie situazioni in cui la sperimentazione tradizionale è troppo lunga, costosa o impossibile. Realizzare un modello matematico in grado di rappresentare adeguatamente i sistemi colturali significa percorrere la strada indicata dal moderno metodo scientifico.

Il principio di tale percorso si trova nell'opera di Galileo Galilei, "Il Saggiatore" (1620 ca.): *"La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intendere la lingua, e conoscer i caratteri, ne quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un'aggirarsi vanamente per un labirinto*

oscuro". Isaac Asimov, nel manuale di fisica "*Asimov's Guide to science*" (1984), nel moderno metodo scientifico individua tre fasi: raccogliere osservazioni, ordinarle, trovare una legge matematica in grado di spiegarle (CONFALONIERI R., 2007).

Un modello matematico è un sistema, più o meno complesso, di equazioni matematiche che tenta di descrivere il funzionamento di un sistema reale. Il sistema reale viene rappresentato (simulato) dal modello con lo scopo di permettere l'analisi del sistema stesso. L'accuratezza e la validità dell'analisi dipendono dalla capacità del modello matematico di simulare correttamente le relazioni funzionali tra le numerose componenti del sistema reale.

Nel caso dei sistemi colturali le principali componenti sono: la coltura, il suolo, l'ambiente biologico (malerbe, patogeni, insetti ecc.) e gli interventi colturali. Il clima, pur condizionando fortemente tutte le componenti, nella maggior parte dei casi viene considerato esterno al sistema in quanto non è influenzato dalle componenti del sistema stesso¹ (DANUSO F., DONATELLI M., 2002). Realizzare un modello di un sistema colturale significa quindi formalizzare, sulla base delle teorie scientifiche e dei dati sperimentali, delle equazioni in grado di descrivere i diversi aspetti del sistema risultanti dall'interazione delle varie componenti: crescita e sviluppo della coltura, produttività delle colture in rotazione, limitazioni idriche e nutrizionali, andamento della sostanza organica nel suolo, lisciviazione dei nitrati, erosione ecc..

La realizzazione di un modello comprende diverse fasi che spesso, più che succedersi progressivamente, si evolvono integrandosi tra loro.

- Fase concettuale: consiste nella fissazione degli obiettivi del modello, e nell'individuazione dei processi da simulare. Ad esempio, un modello che ha l'obiettivo di descrivere la produzione potenziale della coltura deve simulare il processo fotosintetico sulla base della radiazione solare e del regime termico. Se il modello ha l'obiettivo di simulare la produzione ottenibile in funzione della disponibilità di acqua e di elementi nutritivi

¹ Vi possono essere situazioni in cui il clima diventa una componente del sistema e quindi è necessario trovare le leggi matematiche che lo legano alle altre componenti. Ciò si verifica, per esempio, nel caso in cui si voglia studiare l'influenza dell'irrigazione a pioggia su un aspetto del microclima quale l'evapotraspirazione potenziale.

allora, oltre al processo fotosintetico, devono essere simulati il bilancio idrico e azotato del suolo.

- Fase costruttiva: quantificazione dei processi da simulare (sulla base della sperimentazione di campo e di laboratorio), redazione delle equazioni che descrivono i processi, organizzazione di tali equazioni in algoritmi, verifiche logiche, implementazione di quanto sviluppato in un software.
- Fase applicativa: calibrazione del modello, validazione sperimentale, valutazione delle performance del modello ed infine applicazioni pratiche per la simulazione dei sistemi oggetto di ricerca.

La realizzazione di un modello necessita di diverse competenze e professionalità. Nella fase concettuale della realizzazione del modello è necessaria la conoscenza del sistema colturale che si intende rappresentare tramite il modello stesso. È necessario conoscere le problematiche e le potenzialità del sistema colturale, i fattori limitanti, i fabbisogni di ricerca, le esternalità che interessano gli stakeholder. I processi da tradurre in equazioni riguardano, a livello specialistico, diverse discipline (la pedologia, la fisiologia vegetale, l'agrometeorologia, l'idrologia ecc.). L'implementazione del software richiede specifiche conoscenze di programmazione informatica mentre l'applicazione necessita di conoscenze statistiche per il trattamento dei dati e le varie elaborazioni.

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

- empirici (detti anche descrittivi);
- meccanicistici (detti anche esplicativi).

I modelli empirici sono descrizioni dirette dei dati osservati. Tali modelli descrivono il comportamento di un sistema e le relazioni tra le variabili senza tentare di spiegare la natura di queste relazioni. 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, sulla base, in genere, di regressioni multiple. Pertanto la descrizione del sistema risulta molto semplificata e superficiale. Ad esempio, un modello empirico può stimare l'accumulo di sostanza secca di una coltura soltanto in funzione del tempo oppure in funzione dei cumuli di piogge e/o dell'accumulo dei gradi giorno, senza considerare tutti gli altri elementi correlati quali, ad esempio, le caratteristiche pedologiche e la radiazione solare che

influenzano la disponibilità di acqua per la pianta e il processo fotosintetico. Questi modelli sono in genere di facile realizzazione e applicazione ma sono limitati dalla disponibilità dei dati, dalle modalità di campionamento e dagli errori sperimentali. I modelli empirici non permettono alcuna estrapolazione, quindi non possono essere usati per previsioni al di fuori dell'intervallo dei dati utilizzati per la loro realizzazione. Le equazioni utilizzate nei modelli empirici spesso non hanno un significato biologico ma si basano su analisi statistiche per cui non sono utili alla conoscenza dei processi biofisici del sistema.

I modelli meccanicistici tentano di spiegare la natura delle relazioni tra gli elementi del sistema. In un modello meccanicistico, in funzione del livello di dettaglio con cui si desidera rappresentare il sistema, si individuano i processi da simulare. Ciascun processo viene formalizzato attraverso equazioni matematiche ispirate a principi e leggi di validità generale e non ricavate direttamente da dati empirici. Il modello viene poi sviluppato integrando i singoli processi ossia ponendo delle relazioni tra le diverse equazioni precedentemente individuate.

La rappresentazione completa, a tutti i livelli, in maniera meccanicistica, di un sistema complesso come quello colturale è pressoché impossibile. Anche i modelli meccanicistici racchiudono quindi, in misura più o meno ampia, degli approcci empirici. I modelli possono essere definiti empirici o meccanicistici in funzione del livello a cui è posto l'empirismo (ACOCK B., ACOCK M.C., 1991). Un modello empirico di tipo statistico, come una regressione multipla, che stimi, ad esempio, la produzione come funzione di un parametro moltiplicato per la piovosità di un determinato periodo, presenta l'empirismo (il parametro) allo stesso livello (nella stessa equazione) della previsione (la produzione). Un modello che invece stimi la produzione come funzione della traspirazione e dell'intercettazione della radiazione solare, che a loro volta sono stimate con funzioni che richiedono parametri empirici (il coefficiente di evapotraspirazione e il coefficiente di estinzione della luce), può essere definito meccanicistico in quanto i parametri empirici sono ad un livello inferiore rispetto al livello di stima della produzione.

I modelli statistici (empirici), all'interno del contesto in cui sono stati sviluppati, possono risultare più affidabili dei modelli meccanicistici. Comunque i modelli meccanicistici sono esportabili a situazioni diverse e quanto più rappresentano nel dettaglio i singoli processi tanto più assumono validità generale.

Inoltre l'uso dei modelli meccanicistici evidenzia le lacune delle conoscenze riguardo il funzionamento biofisico di determinati aspetti del sistema, indicando validamente nuove tematiche di ricerca. Al contrario, i modelli empirici, non spiegando il funzionamento dei processi, non possono aiutare a migliorare la comprensione del sistema.

Oltre alla classificazione in empirici e meccanicistici, i modelli possono essere definiti:

- statici;
- dinamici;
- deterministici;
- stocastici.

In un modello statico, la variabile "tempo" non è presente, pertanto non viene simulato l'andamento dei processi nel corso del tempo. Tali modelli in genere non hanno un interesse agrometeorologico ma possono essere utilizzati come sub-modelli all'interno di altri modelli di vario tipo. I modelli dinamici descrivono sistemi che variano in funzione del tempo, contenendo il tempo come variabile esplicita. I modelli deterministici forniscono output privi di distribuzione probabilistica mentre i modelli stocastici, contenendo una componente casuale nel caratterizzare lo stato di alcune o di tutte le variabili, tengono conto delle distribuzioni di probabilità dei valori forniti in output. Un modello deterministico potrebbe essere usato come stocastico attraverso ripetute simulazioni condotte utilizzando come dati di input numeri casuali generati attraverso distribuzioni di probabilità delle variabili considerate (DONATELLI M., 1995).

II.2 Sviluppo del modello, calibrazione e validazione

Il sistema colturale è costituito dall'interazione di diversi processi: crescita e fenologia della coltura, dinamica dell'acqua e dei nutrienti, evoluzione dei residui colturali e della sostanza organica ecc. (DANUSO F., DONATELLI M., 2002). Nello sviluppo del modello devono essere considerati tutti i processi ritenuti significativi per il suo successivo corretto utilizzo nelle diverse condizioni pedo-climatiche e colturali². Un modello di simulazione colturale è composto da diversi moduli, ciascuno dei quali simula un determinato processo che concorre alla definizione e al funzionamento del sistema colturale.

Il modulo colturale simula l'accrescimento della biomassa aerea e radicale, la dinamica dell'apparato fogliare fotosintetizzante e la produzione utile, in funzione delle variabili meteorologiche (regime termico, radiazione solare, evapotraspirazione potenziale), del bilancio idrico e azotato e delle pratiche colturali (irrigazione, fertilizzazione, gestione dei residui colturali ecc.). All'interno di un modello, il modulo colturale può essere specifico per una determinata coltura oppure può essere di tipo generico. Un modulo generico simula le diverse colture tramite la variazione, operata da chi applica il modello, dei parametri colturali.

Il modulo che simula i fenomeni relativi all'acqua considera i processi di evapotraspirazione, ruscellamento, infiltrazione, percolazione nello strato profondo, drenaggio in falda, risalita di acqua capillare da falda acquifera sottosuperficiale. I fattori considerati alla base di tali fenomeni sono il potenziale idrico e il contenuto idrico del suolo, determinati in funzione della tessitura.

Per la dinamica dell'azoto nel suolo, i moduli maggiormente utilizzati considerano l'azoto adsorbito dai colloidi in forma ammoniacale, mentre nella soluzione circolante l'azoto viene considerato sia in forma ammoniacale che in forma nitrica. Il bilancio azotato considera l'azoto contenuto nella coltura, nei residui colturali e nella sostanza organica del suolo. Vengono inoltre considerati gli eventuali fenomeni di dilavamento e di denitrificazione. Esistono moduli che trattano anche l'azoto-fissazione simbiotica delle leguminose. I processi di trasporto e trasformazione dell'azoto sono comunque legati alla simulazione del bilancio idrico.

² Ad esempio, per una corretta simulazione della dinamica dell'acqua nei suoli argillosi in ambiente arido va considerato il processo di crepacciatura del suolo.

Il bilancio dell'azoto si lega anche al bilancio dell'humus e dei residui colturali, attraverso i processi di umificazione e mineralizzazione. In proposito, la sostanza organica del suolo viene distinta in frazioni diverse in funzione della facilità di decomposizione. Nei processi simulati per ciascuna frazione si utilizzano quindi coefficienti di umificazione e mineralizzazione diversi. Nei modelli più sofisticati esistono moduli che nella dinamica del carbonio e dell'azoto organico del suolo trattano anche la biomassa microbica.

Pur non essendo molto comuni nei modelli maggiormente diffusi, sono stati sviluppati moduli che simulano le dinamiche del fosforo identificandone diverse frazioni: fosforo nella coltura, nei residui colturali, nell'humus, fosforo labile nel suolo (adsorbito e in soluzione), fosforo stabile nel suolo.

Il modulo delle pratiche colturali consente di trattare, all'interno della simulazione del sistema, i vari interventi agronomici che influenzano la coltura. I dati relativi alle pratiche colturali (ad esempio, apporti irrigui e quantità di fertilizzante) vengono integrati nei moduli dei relativi processi cui si riferiscono (ad esempio, bilancio idrico e azotato). Gli interventi colturali possono essere inseriti a date fisse oppure in funzione dell'andamento di altri processi (fenologia della coltura, contenuto idrico del suolo ecc.). Ciò permette di simulare condizioni passate (ad esempio, valutazione dei modelli sulla base di prove sperimentali) oppure di simulare scenari futuri operando secondo determinati criteri (ad esempio, concimazione azotata dei cereali alla fase di fine accostamento – inizio levata).

I modelli di simulazione colturale maggiormente interessati alle problematiche ambientali contengono dei moduli che simulano la dinamica degli erbicidi nel sistema. Tali moduli in genere considerano quattro frazioni: erbicida adsorbito nel complesso di scambio del suolo, erbicida nella soluzione circolante, erbicida assorbito dalla pianta ed erbicida presente nei residui colturali. I processi di trasporto e di trasformazione delle molecole dell'erbicida sono: intercettazione fogliare del prodotto irrorato, adsorbimento sui colloidi del suolo e successivo rilascio, assorbimento da parte della coltura, dilavamento in profondità, inattivazione dell'erbicida (nella coltura, nei residui colturali e in soluzione), volatilizzazione, liberazione di erbicida per degradazione dei residui colturali, interrimento con i residui e asportazione con la raccolta del prodotto.

Un modello, nel suo complesso, si caratterizza per il modo in cui viene rappresentato il suolo e per il passo di simulazione (*time-step*, passo di calcolo o di integrazione numerica) utilizzato.

Il suolo può essere rappresentato come un insieme di strati sovrapposti aventi caratteristiche pedologiche differenti. Ai fini della simulazione dell'infiltrazione dell'acqua, ciascuno strato può essere ulteriormente suddiviso in strati più sottili che vengono saturati in successione. Lo spessore del suolo può essere costante nel tempo oppure dinamico.

In molti modelli il passo di simulazione (*time-step*) è di un giorno quindi vengono richiesti dati meteorologici di input a scansione giornaliera. I modelli con passo giornaliero in genere simulano adeguatamente la crescita e lo sviluppo della coltura. Vi sono modelli che possono anche utilizzare un *time-step* orario, più adeguato nella simulazione di processi che possono evolvere rapidamente, ad esempio erosione del suolo dovuta alle precipitazioni, infestazioni di insetti e di patogeni in generale.

I modelli utilizzano sia l'approccio per processi sia l'approccio per eventi. Nell'approccio per processi, i valori delle variabili che rappresentano gli stati del sistema (ad esempio, biomassa della coltura, contenuto idrico del suolo) cambiano, ad ogni passo d'integrazione, secondo le variabili di tasso coinvolte (ad esempio, evapotraspirazione, percolazione). I tassi di variazione dipendono a loro volta dai valori correnti delle variabili e dai parametri³ che rappresentano lo specifico sistema. Nell'approccio basato su eventi, le variazioni nel sistema sono istantanee e agiscono direttamente sui valori delle variabili. In genere i modelli di simulazione colturale trattano come eventi tutte le operazioni colturali: irrigazione, concimazione, lavorazione del suolo ecc..

Ai fini della realizzazione del modello, le relazioni sviluppate per la simulazione dei processi devono essere codificate in un programma informatico per permetterne l'esecuzione tramite computer. La struttura del software deve permettere un facile inserimento o disinserimento dei diversi moduli e/o delle loro nuove versioni. In tal modo è possibile creare componenti riutilizzabili per facilitare gli

³ In generale, le quantità che non mutano durante il corso della simulazione vengono definite parametri.

scambi tra gruppi di ricerca, comparare approcci diversi e mantenere adeguati standard qualitativi nei programmi applicativi.

Non esiste un modello che simuli nel dettaglio tutti i processi di un sistema per cui anche i modelli meccanicistici più complessi hanno un certo livello di empirismo. Per simulare correttamente il sistema, il modello deve essere adattato alle condizioni specifiche determinate dal particolare ambiente pedo-climatico e colturale in cui si svolgono i processi da simulare. Ciò si effettua assegnando adeguati valori ai parametri del modello che rientrano nella simulazione dei processi maggiormente dipendenti dalle situazioni locali o dal genotipo coltivato⁴. Tale operazione, comunemente definita “calibrazione” o, meno frequentemente, “parametrizzazione”, è necessaria per migliorare la precisione del modello in una specifica situazione colturale. Si tratta in sostanza di individuare quei valori dei parametri che determinano una maggiore concordanza tra i valori simulati dal modello (output) e i valori misurati sperimentalmente.

Per la calibrazione del modello è necessario quindi fare riferimento a delle precise prove sperimentali e fornire in input⁵ al modello stesso i dati che descrivono le condizioni di tali prove: dati che descrivono il sito (latitudine, pendenza dei campi ecc.), dati climatici, dati relativi al suolo, valori di alcune variabili alla data di inizio della simulazione (ad esempio, contenuto di acqua nel suolo, contenuto di nitrati), le operazioni colturali svolte (irrigazione, concimazioni, ecc.).

È necessario ricordare che generalmente alcuni processi, in particolare quelli riguardanti la coltura, sono simulati facendo riferimento a condizioni ottimali e poi applicando fattori di stress per tener conto delle limitazioni dovute a condizioni sub-ottimali di disponibilità di acqua e di nutrienti. Pertanto, per la calibrazione, vanno usati come riferimento dati sperimentali rilevati in condizioni ottimali (rifornimento idrico e nutrizionale) e in assenza di stress dovuti a squilibri termici, infestanti, insetti e fitopatie.

⁴ Proprio tramite la calibrazione è possibile adattare il modello a una data specie o, ancor più in dettaglio, a un dato genotipo (cultivar o ibrido commerciale) attraverso parametri riguardanti la durata del ciclo biologico, la fotosintesi, la traspirazione, la ripartizione dei fotosintetati ecc..

⁵ I dati richiesti in input potrebbero non essere disponibili, in tal caso i dati mancanti possono essere stimati sulla base di dati più facilmente reperibili. Ad esempio, il software RadEst (DONATELLI M. *et al.*, 2002) stima la radiazione solare dai dati di temperatura; SOILPAR (ACUTIS M., DONATELLI M., 2002) stima alcuni parametri pedologici in base alla tessitura (*pedotransfer functions*).

La calibrazione di un modello potrebbe sembrare un problema facilmente risolvibile modificando i valori dei parametri fino ad ottenere un soddisfacente adattamento dei valori simulati ai dati sperimentali. Nel caso di un modello con numerosi parametri e una struttura a rete, anziché di tipo lineare-gerarchica, la calibrazione non è semplice in quanto l'effetto di un parametro dipende anche dal valore assunto dagli altri parametri. Inoltre non vi è la certezza di avere ottenuto il migliore adattamento ai dati misurati in quanto potrebbe sempre esistere un'altra combinazione dei parametri più adeguata.

In un modello meccanicistico, dovrebbe essere noto, per ciascun parametro, l'intervallo di valori oltre il quale lo stesso parametro perde di significato reale. Se nell'operazione di calibrazione si assegna ad un parametro un valore esterno al suo possibile intervallo di variazione significa che si sta degradando il modello meccanicistico ad un modello empirico di tipo regressivo (PENNING DE VRIES F.W.T., VAN LAAR H.H., 1982). Tuttavia, come sopra riportato, un certo livello di empirismo è sempre presente in ogni modello per cui nella calibrazione dei parametri empirici che vi compaiono può essere accettata una maggiore oscillazione rispetto ai parametri che hanno un preciso significato bio-fisico e il cui intervallo di variazione risulta ben noto da numerose evidenze sperimentali.

La calibrazione va fatta iniziando dai parametri che sono alla base dei principali processi simulati dal modello, per poi passare ai parametri che interessano il successivo svolgimento dei processi in esame. Ad esempio, prima deve essere calibrato un parametro responsabile dell'intercettazione della radiazione solare e dopo un parametro riguardante la conversione radiazione/biomassa. Per agevolare la calibrazione, il valore di alcuni parametri può essere fissato a priori sulla base di determinate informazioni mentre gli altri parametri vengono successivamente calibrati in funzione dell'adattamento ai dati sperimentali.

Il problema della calibrazione viene trattato da numerosi ricercatori (BECHINI L. *et al.* 2006; CONFALONIERI R. *et al.* 2009a; RICHTER G.M. *et al.*, 2010) e attualmente si lavora alla realizzazione di moduli per la calibrazione automatica da inserire all'interno dei modelli (ACUTIS M., 2010).

Calibrato il modello si procede alla sua validazione ossia alla valutazione dell'accuratezza del modello stesso, intendendo per accuratezza la stima dello scarto tra i valori simulati e i valori misurati sperimentalmente (DONATELLI M. *et al.* 2003a;

DONATELLI M. *et al.* 2004). In tal modo si verifica l'applicabilità del modello ossia la sua capacità di simulare correttamente il sistema colturale per il quale è stato calibrato. I valori misurati utilizzati come riferimento per la validazione devono essere diversi da quelli utilizzati per la precedente operazione di calibrazione.

Di seguito si presentano alcuni indici proposti per il calcolo dell'accuratezza (indici di *fitting*), di comune utilizzo nella modellistica.

S_i è l'*i*-esimo valore simulato.

M_i è l'*i*-esimo valore misurato.

n è il numero di coppie di valore simulato e valore misurato.

Root Mean Square Error, RMSE (FOX D.G., 1981):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}}$$

$0 \leq \text{RMSE} \leq \infty$; il valore ottimale è 0.

Relative Root Mean Square Error, RRMSE (JORGENSEN S.E., *et al.*, 1986):

$$\text{RRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n}}}{\bar{M}} \cdot 100$$

\bar{M} è la media dei valori misurati.

$0\% \leq \text{RRMSE} \leq \infty$; il valore ottimale è 0. Rapportare RMSE alla media dei valori misurati consente di confrontare le capacità previsionali del modello rispetto a variabili i cui ordini di grandezza sono diversi.

Modelling Efficiency, EF (LOAGUE K.M., GREEN R.E., 1991):

$$\text{EF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$$

$-\infty \leq \text{EF} \leq 1$; il valore ottimale è 1. Se EF è negativo, la media dei valori misurati è uno stimatore migliore per la variabile in studio. Se $\text{EF} > 0$, le stime del modello sono migliori della media dei valori osservati.

Coefficient of Residual Mass, CRM (LOAGUE K.M., GREEN R.E., 1991):

$$\text{CRM} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

$-\infty \leq \text{CRM} \leq +\infty$; il valore ottimale è 0. Se CRM è positivo, il modello sottostima la variabile in studio. Se CRM è negativo il modello sovrastima la variabile.

Coefficient of Determination, CD (MARTORANA F., BELLOCCHI G., 1999).

$$\text{CD} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$$

$0 \leq \text{CD} \leq +\infty$; il valore ottimale è 1.

Per il calcolo dei diversi indici, esistono dei software appositamente sviluppati⁶.

Nella validazione del modello bisogna saper considerare diversi fattori.

- La statistica insegna che i dati sperimentali non sono “veri” ma sono stime della realtà alle quali è associato un errore sperimentale. Pertanto nella validazione va considerata la qualità dei dati sperimentali utilizzati.
- Quanto più differenziati sono i trattamenti da cui hanno origine i dati sperimentali, tanto più la validazione sarà affidabile perché basata su situazioni differenti (livelli di concimazione, variabilità climatica tra le annate ecc.).
- L'affidabilità della validazione dipende anche dalla corretta impostazione nel modello, tramite i dati di input, delle condizioni in cui ha inizio la simulazione (ad esempio, contenuto idrico del suolo, contenuto di sostanza organica ed elementi nutritivi ecc.).
- Per verificare il corretto funzionamento del modello bisogna considerare, con il miglior dettaglio possibile, tutti i processi simulati (crescita e sviluppo della coltura, idrologia, nutrienti, residui colturali ecc.) e di tali processi sono quindi necessari i dati sperimentali.
- Teoricamente i dati sperimentali dovrebbero coprire tutto il periodo di simulazione con la stessa cadenza del *time-step* del modello; ciò

⁶ Ad esempio, il software IRENE (Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates) (FILA G. *et al.*, 2003).

consentirebbe la validazione del modello nell'intero arco temporale della simulazione e non soltanto in alcuni momenti.

Da quanto esposto si evidenzia l'importanza, nella calibrazione e validazione dei modelli, della disponibilità di dati sperimentali di buona qualità, ossia di dati rilevati secondo protocolli appositamente predisposti per le applicazioni modellistiche.

La scelta dell'utilizzo di un determinato modello piuttosto che di un altro comporta il dover valutare i modelli stessi confrontandoli tra loro. A causa della molteplicità dei modelli esistenti e della varietà delle loro possibilità operative, non esistono metodi e criteri univoci di valutazione (MARTORANA F., BELLOCCHI G., 1999).

La valutazione dei modelli è un tema di crescente importanza nell'ambito della modellistica e non può essere affrontato soltanto sulla base dell'accuratezza evidenziata nella validazione dei singoli modelli. Per valutare i modelli è necessario identificare chiaramente gli obiettivi e le condizioni di applicazione. (CONFALONIERI R., 2010a).

Gli obiettivi che ci si prefigge di raggiungere tramite l'uso di un modello sono, ad esempio, la simulazione del ciclo colturale, dell'erosione, della variazione del contenuto idrico del suolo, della lisciviazione dell'azoto ecc.. Le condizioni di applicazione si riferiscono alla scala di applicazione (aziendale, di bacino ecc.) e alla disponibilità di dati (quantità e qualità dei dati di input).

Definiti gli obiettivi e le condizioni di applicazione, la conoscenza dei modelli (processi simulati dal modello, input necessari, scala di applicazione) permette di individuare i modelli più adatti per una specifica applicazione.

Sono molteplici gli elementi da considerare nella valutazione:

- complessità: input necessari e componenti utilizzate (equazioni, parametri, sub-processi ecc.) per simulare un processo;
- robustezza: applicabilità del modello in una ampia gamma di condizioni pedoclimatiche e gestionali;
- bilanciamento: quando un processo è correttamente ponderato ("sensibile") nei confronti di ciascuno dei molteplici fattori da cui dipende.

Per la valutazione di ciascun elemento esistono diversi indici che, a loro volta, possono essere aggregati per valutazioni multi-metriche (CONFALONIERI R. *et al.*, 2009b).

II.3 La simulazione dei sistemi colturali: applicazioni e limiti

Per simulazione si intende l'imitazione nel tempo di un processo reale, o di un sistema reale comprendente più processi (BANKS J., CARSON J.S, 1984). Un modello di simulazione del sistema colturale può imitare correttamente il sistema colturale reale in funzione degli obiettivi per i quali è stato sviluppato e delle condizioni di applicazione previste durante il suo sviluppo. Inoltre, nel contesto in cui si colloca la simulazione da effettuare, prima di procedere alla simulazione stessa, il modello deve essere stato opportunamente calibrato e la sua applicabilità deve essere stata evidenziata tramite la validazione.

La simulazione dei sistemi colturali, mediante i modelli matematici, può essere applicata in diversi ambiti di studio, ricerca e sperimentazione, volti sia alla gestione attuale dei sistemi colturali sia alla valutazione di possibili scenari futuri per supportare i processi decisionali.

Per la gestione attuale del sistema colturale, la simulazione condotta dal modello è di fondamentale ausilio nel monitoraggio delle condizioni attuali del sistema nei casi in cui tali condizioni siano troppo difficili e/o costose da rilevare mediante le tradizionali sperimentazioni (DANUSO F. *et al.*, 1994). Il modello può monitorare diversi elementi del sistema (contenuto idrico del suolo, disponibilità degli elementi nutritivi, stadio fenologico della coltura, andamento climatico, insorgenza delle fitopatie ecc.) fornendo indicazioni operative riguardanti diversi interventi agronomici. Insieme ad altre fonti conoscitive (ad esempio, indagini in campo e previsioni meteorologiche), i modelli sono alla base dei servizi informativi agrometeorologici che indicano agli agricoltori i tempi e le modalità dei diversi interventi (irrigazione, trattamenti fitosanitari ecc.). La modellistica trova largo impiego nell'agricoltura di precisione che si va sempre più affermando per i benefici economici e ambientali dovuti alla razionalizzazione degli interventi agronomici (FRAISSE C.W. *et al.*, 1998).

Sempre nell'ambito della gestione attuale del sistema colturale, è possibile applicare i modelli di simulazione allo studio, a scala di bacino, dei processi determinati dalle pratiche agricole a livello aziendale. È il caso di processi, quali l'erosione del suolo e la lisciviazione in falda di nitrati e pesticidi, che hanno un impatto a livello di bacino ma hanno origine a livello aziendale. Queste applicazioni

dei modelli trovano riscontro negli interventi di gestione del territorio, ad esempio nella progettazione irrigua a livello di comprensorio (CICOGLIA A. *et al.* 2000; DANUSO F. *et al.*, 1995) e nel supporto alle attività di pianificazione territoriale come nel caso degli studi riguardanti l'inquinamento delle falde idriche dovuto alla concimazione azotata e allo spandimento dei liquami (ACUTIS M. *et al.*, 2007; DANUSO F. *et al.*, 1999a). In proposito si evidenzia il contributo della modellistica nei programmi di prevenzione dell'inquinamento di tipo diffuso di origine agricola. L'acqua, fattore produttivo essenziale del settore agricolo, civile e industriale, può essere veicolo di trasporto di sostanze chimiche usate in agricoltura determinando l'inquinamento dei corpi idrici superficiali e delle falde. Le tecniche modellistiche, relazionando gli aspetti pedologici, i fattori climatici e la gestione agronomica di un territorio, consentono di valutare i rischi ambientali, reali e potenziali, dovuti all'attività agricola, permettendo così l'attuazione di possibili interventi volti a una gestione agronomica sostenibile e alla mitigazione degli impatti ambientali dovuti alle attività agricole (ZINONI F. *et al.*, 2001). I modelli rappresentano un indispensabile strumento di indagine e valutazione della qualità del suolo, delle sue attitudini e della sua vulnerabilità nei confronti dell'inquinamento (BARBERIS R. *et al.*, 2001).

I modelli di simulazione trovano applicazione anche nei sistemi colturali diffusi nei Paesi Tropicali, interessando quindi diversi paesi in via di sviluppo le cui produzioni agricole (canna da zucchero, banane, ananas, cacao, caffè) hanno una rilevante importanza nel mercato mondiale. Risultano applicazioni modellistiche inerenti il *multiple cropping* (TSAI Y.J. *et al.*, 1987), la *shifting cultivation* (TRENATH B.R., PROCTOR J., 1989), la consociazione (THORNTON P.K. *et al.*, 1990) e l'*agroforestry* (MENDOZA G.A., 1987; HUDA A.K.S. *et al.*, 1989).

La capacità previsionale è una peculiarità dei modelli di simulazione ed è invece in molti casi preclusa alla sperimentazione tradizionale. I modelli consentono la simulazione di diverse tecniche di gestione agronomica permettendo di valutarne i possibili effetti, nel corso del tempo, in termini di produttività e impatto ambientale. In tal senso si evidenzia l'uso dei modelli per la previsione delle rese sulla base delle condizioni climatiche e colturali reali (SUPIT I., 1997) e per la valutazione, nel lungo periodo, dell'impatto ambientale dovuto a diverse strategie di concimazione (DONATELLI *et al.*, 1999). Con riferimento a una specifica coltura, la capacità

previsionale dei modelli viene anche utilizzata per valutare i possibili incrementi produttivi dovuti all'applicazione di diverse tecniche agronomiche (HABEKOTTÉ B., 1997).

I modelli di simulazione vengono utilizzati per valutare gli effetti sui sistemi colturali dei cambiamenti climatici, sulla base di possibili scenari climatici futuri e in funzione delle diverse teorie riguardanti gli effetti delle elevate concentrazioni di anidride carbonica (CO₂) sulle colture (BINDI M., 2010; TUBIELLO F.N., EWERT F., 2002). L'impiego dei modelli in tal senso risulta crescente in questi ultimi anni a causa dell'intensificarsi del dibattito riguardante il possibile riscaldamento globale e i suoi effetti sulle attività umane. In questo caso le applicazioni modellistiche possono essere rivolte a singole colture (EL AFANDI G. *et al.*, 2010; KHALIL F.A. *et al.*, 2009; OUDA S.A. *et al.*, 2010; RINALDI M. *et al.*, 2007) oppure possono tendere ad una analisi complessiva dei sistemi colturali evidenziando le possibili ripercussioni in termini di uso del suolo (MORIONDO M. *et al.*, 2010; TUBIELLO F.N. *et al.*, 2000; SMITH P. *et al.*, 1999). Sempre nell'ambito degli studi riguardanti i cambiamenti climatici, i modelli di simulazione vengono utilizzati per valutazioni integrate degli scenari futuri, ossia valutazioni che affiancano alle risultanze degli scenari agronomici le possibili relazioni socio-economiche e politiche (RIVINGTON M. *et al.*, 2007).

La modellistica svolge una interessante funzione nell'ambito della ricerca di base, infatti il confronto tra i risultati applicativi di un modello e le osservazioni sperimentali permette di evidenziare le lacune di conoscenza nei singoli processi simulati, indirizzando opportunamente l'attività di ricerca. La simulazione del sistema colturale mediante i modelli può consentire di scindere l'effetto di un determinato trattamento (concimazione, irrigazione ecc.) dagli altri numerosi elementi del sistema che ne perturbano l'effetto. Lo studio di un meccanismo causa-effetto, indisturbato da altri fattori, facilita la comprensione dei processi in esame.

Numerose discipline afferiscono al settore della modellistica, permettendone lo sviluppo e l'applicazione: pedologia, idrologia, agrometeorologia, fisiologia vegetale, informatica e statistica. La multidisciplinarietà della modellistica facilita la genesi di nuove idee, il trasferimento delle informazioni, l'integrazione delle conoscenze e la standardizzazione delle terminologie. Tutto ciò è certamente positivo per il progresso scientifico e tecnologico.

Ad ogni modo, è bene precisare che, nelle diverse possibili applicazioni, i modelli sono un ausilio alla tradizionale sperimentazione di campo e di laboratorio e da tale sperimentazione dipende l'ulteriore sviluppo dei modelli stessi (THORNTON P.K., 1991).

I modelli di simulazione colturale sono caratterizzati da limiti ben precisi che devono essere noti agli utilizzatori per evitare applicazioni del tutto errate.

In funzione dell'obiettivo per il quale un modello viene realizzato e in funzione delle condizioni di applicazione previste, spesso si procede, nella fase di realizzazione del modello, a delle semplificazioni nella definizione dei processi da simulare. Tali semplificazioni, determinate anche dall'incapacità di formalizzare in equazioni alcuni processi del sistema e dalla necessità di limitare i dati di input richiesti dal modello, servono a migliorare il funzionamento complessivo del modello e a facilitarne l'utilizzo nelle condizioni e per gli obiettivi previsti in fase di realizzazione. Al di fuori di tale contesto, le semplificazioni adottate determinano l'errato funzionamento del modello. Gli utenti pertanto devono percepire i modelli come "strumenti" più o meno affidabili in funzione degli obiettivi e delle condizioni di applicazione.

Ad esempio, per quanto riguarda la simulazione della dinamica dell'acqua nel suolo, va evidenziato che l'approccio generalmente utilizzato nei modelli è di tipo unidimensionale, ciò significa che, in base alla forza di gravità e alla evapotraspirazione potenziale, si considera il movimento dell'acqua all'interno del suolo in senso verticale (dagli strati superiori agli strati sottostanti e viceversa) ma non in senso orizzontale (da zone più umide a zone più asciutte poste ad una stessa profondità). Inoltre i modelli non tengono conto della variazione dei parametri idrologici del suolo in funzione delle lavorazioni. Tale aspetto può risultare limitante nei suoli caratterizzati da tessitura argillosa e limitata disponibilità idrica.

Un altro aspetto simulato in modo semplificato è la salinità del suolo e dell'acqua di irrigazione. La concentrazione dei sali viene considerata responsabile della diminuzione del potenziale idrico per cui i modelli traducono il fenomeno in termini di stress idrico dovuto a un più difficile assorbimento dell'acqua da parte della coltura (VAN GENUCHTEN R.J., HUTSON J.L., 1989). In genere non vengono specificamente considerati gli elementi responsabili della salinità, ossia i modelli non fanno distinzione tra i cationi bivalenti e i cationi monovalenti per cui non simulano

il processo di deflocculazione delle argille dovuto al sodio (Na^+) e i vari fenomeni negativi conseguenti che interessano il suolo: disfacimento della struttura, compattamento, asfissia ecc..

Per quanto concerne la nutrizione azotata delle colture, la dinamica dell'azoto nel suolo e i processi a carico della sostanza organica (umificazione e mineralizzazione), si evidenzia in generale una rilevante componente empirica dovuta all'uso, nelle equazioni, di parametri validi in specifiche situazioni pedologiche. Tale problematica può essere risolta nella fase di calibrazione del modello, purché siano disponibili precisi dati sperimentali. Con riferimento alla nutrizione minerale, molti modelli non considerano il fosforo, per difficoltà oggettive nella simulazione dei processi di solubilizzazione e immobilizzazione dell'elemento stesso.

Anche riguardo la fisiologia vegetale si possono evidenziare processi simulati dai modelli in maniera semplificata. Ad esempio, molti modelli considerano la superficie fogliare specifica (*Specific Leaf Area*, SLA, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, area fogliare prodotta per unità di biomassa ripartita verso le foglie) costante per tutto il ciclo colturale di una data specie ma ciò non corrisponde alla realtà. Infatti, in situazioni di squilibrio, intese sia come stress (termico, idrico, nutrizionale) sia come “consumo di lusso”, la pianta produce lamine fogliari con superficie specifica differenziata. Pertanto, processi fondamentali alla crescita della coltura, quali l'intercettazione della luce e la traspirazione, risultano dipendenti da una approssimazione empirica.

I limiti dei modelli di simulazione si manifestano nei processi di difficile quantificazione. Si pensi, per esempio, alla qualità delle produzioni (in particolare la qualità organolettica) e ad alcuni fenomeni agronomici tipo “gli effetti di avvicendamento” e la “stanchezza del terreno”. Oltre alla difficoltà di quantificare il fenomeno, è molto difficile formalizzare in equazioni i numerosi processi che vi concorrono. Per esempio, la qualità delle produzioni dipende dal genotipo, dalla nutrizione minerale, dall'andamento climatico, dalle tecniche colturali, dalla difesa fitosanitaria ecc., mentre la “stanchezza del terreno” dipende dalle colture in rotazione, dalla gestione dei residui colturali, dalle lavorazioni, dalla nutrizione minerale, dall'accumulo di patogeni nel suolo ecc..

Il corretto funzionamento di un modello nel simulare un sistema colturale dipende notevolmente dalla qualità dei dati sperimentali disponibili per le operazioni

di calibrazione e validazione. La mancanza di dati sperimentali spesso limita lo sviluppo e/o l'impiego di modelli di tipo meccanicistico caratterizzati da un maggior livello di dettaglio.

Un altro limite delle applicazioni modellistiche è dato dalla scarsa documentazione che generalmente accompagna i singoli modelli. La difficoltà di reperire manuali d'uso dettagliati spesso determina un cattivo uso dei modelli da parte di molti utilizzatori.

La conoscenza di un modello di simulazione e la consapevolezza dei suoi limiti sono alla base di un appropriato utilizzo del modello stesso nei diversi ambiti di studio e di ricerca. La grande attenzione con la quale si pretende di valutare il rigore scientifico della modellistica dovrebbe sempre accompagnare anche la sperimentazione tradizionale. Sono da evitare sia il pregiudizio negativo nei confronti della modellistica sia la fiducia incondizionata nella tradizionale sperimentazione di campo.

“Nobody believes in simulation models except their developers... Everybody believes in experimental data except who collected them” (Gaylon S. Campbell). (Nessuno crede ai modelli di simulazione eccetto chi li ha sviluppati ... Tutti credono ai dati sperimentali eccetto chi li ha rilevati). (CONFALONIERI R., 2010b).

II.4 Breve excursus sulla modellistica, situazione attuale e possibili sviluppi

Le prime esperienze di modellizzazione dei sistemi colturali risalgono alla fine degli anni '60 del secolo scorso e sono riconducibili al lavoro pionieristico di C.T. de Wit e alla nascita della scuola di modellistica olandese di Wageningen. In tale ambito è stato sviluppato il modello SUCROS, basato sulla modellizzazione meccanicistica della fotosintesi in funzione dell'assimilazione della CO₂. SUCROS è un modello di simulazione generico e tramite la calibrazione viene adattato ad una specifica coltura. Dal modello SUCROS sono stati successivamente derivati altri modelli volti a specifiche applicazioni ma concettualmente molto simili tra loro (VAN ITTERSUM M.K. *et al.*, 2002), ad esempio ORYZA e WoFoSt⁷.

Come in Olanda, anche nelle Università degli Stati Uniti d'America l'attività di ricerca nell'ambito della modellistica ha avuto inizio sul finire degli anni '60. La scuola di modellistica americana ha incentrato la propria attività di sviluppo dei modelli di simulazione basandosi sul concetto di efficienza d'uso della radiazione solare (*Radiation Use Efficiency*, RUE) e sul concetto che lega la crescita della biomassa alla traspirazione (*Transpiration Use Efficiency*, TUE).

Sul concetto di RUE, in base all'equazione di Monteith (MONTEITH J.L., 1977), è stato sviluppato il modello CERES da cui sono derivati DSSAT (JONES J.W. *et al.*, 2002) e CROPGRO (BOOTE K.J. *et al.*, 1998), quest'ultimo sviluppato nell'ambito di collaborazioni USA-Olanda. I modelli derivati da CERES sono modelli composti da moduli specifici per ciascuna coltura. Sul concetto di TUE è stato invece sviluppato il modello GLAM, basato sull'equazione di Tanner e Sinclair (TANNER C.B., SINCLAIR T.R., 1983).

Agli inizi degli anni '80, ad opera dei gruppi di ricerca americani, si è avuto lo sviluppo dei primi modelli *management oriented*, ossia di quei modelli di simulazione appositamente concepiti per la valutazione dell'impatto di scenari gestionali e climatici sugli agro-ecosistemi. Pertanto, dai modelli di simulazione della coltura si è passati ai modelli di simulazione dei sistemi colturali, al fine di descrivere gli effetti del clima, delle rotazioni e delle tecniche agronomiche, nel

⁷ Attualmente il modello WoFoSt (*World Food Studies*) è impiegato dal *Joint Research Centre (JRC) – European Commission* – (Ispra, Varese) come nucleo centrale del *Crop Growth Monitoring System* (SUPIT I. *et al.*, 1994).

corso degli anni su un determinato agro-ecosistema, in termini di erosione, fertilità ecc..

Il primo modello di questo tipo, principalmente realizzato per trattare i fenomeni erosivi, è stato EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) (WILLIAMS J.R., *et al.*, 1984; EASTERLING W.E., *et al.*, 1992). Il modello EPIC è stato successivamente migliorato da ricercatori francesi soprattutto per quanto riguarda la simulazione dei processi biologici (QUINONES H., CABELGUENNE M., 1990; CABELGUENNE M. *et al.*, 1999). EPIC è un modello di simulazione generico (come SUCROS) ed è uno dei pochi modelli che simula i processi legati al fosforo nel sistema suolo-pianta.

Un altro modello *management oriented*, di scuola americana, è CropSyst (prima versione: STÖCKLE C.O. *et al.*, 1994), un modello di simulazione generico che combina insieme i concetti di RUE e TUE considerando quindi sia la radiazione che la traspirazione.

Per la valutazione dell'impatto ambientale delle attività agricole a scala di bacino sono stati sviluppati appositi modelli, tra i quali SWAT (<http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>) e STICS (BRISSON N. *et al.*, 1998; BRISSON N. *et al.*, 2002).

Diversi ricercatori italiani hanno dato, all'estero, un importante contributo alla realizzazione di modelli (ad esempio, le successive versioni di CropSyst, STÖCKLE C.O. *et al.*, 2003), mentre i principali modelli di simulazione realizzati in Italia sono: CRITERIA (MARLETTO V. *et al.*, 1993), CSYMBA (DONATELLI M. *et al.*, 1997a), CSS (DANUSO F. *et al.*, 1999b) e ARMOSA (ACUTIS M. *et al.*, 2007). Peculiare del modello CSS (*Cropping System Simulator*) è la rappresentazione del suolo come uno strato di spessore variabile in funzione della crescita dell'apparato radicale della coltura.

Da alcuni anni si assiste ad una sorta di arresto nello sviluppo di nuovi modelli, si continuano ad usare gli stessi algoritmi e non si rilevano sostanziali progressi nella formalizzazione dei processi biofisici tramite equazioni matematiche (CONFALONIERI R., 2007). Il progresso informatico ha determinato il miglioramento degli elementi secondari dei modelli quali l'interfaccia grafica, la facilità di immissione dei dati di input, la presentazione degli output, ma il funzionamento fondamentale dei modelli è

rimasto invariato a causa della mancata comprensione dei vari processi non ancora implementati nei modelli attuali.

Più che a un vero sviluppo di nuovi modelli, negli ultimi anni si è proceduto all'applicazione dei modelli su scala territoriale, associandoli all'utilizzo del GIS (*Global Information System*) per creare mappe di vario tipo (carte di potenzialità agronomica, carte di rischio ecc.). Tale applicazione dei modelli (*map panting*), relativamente facile e poco dispendiosa in termini di costi, di tempo e di energie, è spesso specificamente richiesta dagli amministratori finanziatori dei progetti di ricerca. Gli stessi amministratori sono meno propensi a finanziare quei progetti di ricerca di lungo periodo che sarebbero necessari alla comprensione e alla modellizzazione dei processi biofisici non ancora trattati nei modelli attuali.

Sono ancora gli stessi algoritmi sviluppati durante il secolo scorso che descrivono la crescita delle colture. Per un ulteriore sviluppo della modellistica, è necessario formalizzare nuove conoscenze attraverso leggi matematiche per meglio descrivere la crescita delle colture in funzione dei numerosi processi non ancora adeguatamente simulati.

Si pensi, per esempio, al processo evaporativo dell'acqua dal suolo. In genere i modelli attuali considerano solo i fattori climatici mentre l'evaporazione dipende anche dalle caratteristiche strutturali dello strato superficiale del suolo (interfaccia suolo/atmosfera), caratteristiche che sono influenzate dalle lavorazioni (erpature superficiali, sarchiature ecc.).

Solo recentemente, nelle applicazioni modellistiche è stata considerata la competizione delle erbe infestanti nei confronti della coltura per quanto riguarda la luce, l'acqua e gli elementi nutritivi (COLBACH N. *et al.*, 2007; DAVIS A.S. *et al.*, 2004).

Oltre alla comprensione dei processi non ancora adeguatamente simulati, il progresso della modellistica richiede nuove tecniche di programmazione informatica basate sulla costruzione di ambienti di sviluppo che permettano l'uso di modelli modulari e quindi la creazione di componenti da riutilizzare per modelli più complessi. In tal senso, un esempio è dato dal progetto APSIM (KEATING B.A. *et al.*, 2002), condotto in Australia da un numeroso gruppo di ricerca composto da agronomi e informatici.

Un altro progresso in corso nella modellistica è rappresentato dalla calibrazione automatica tramite l'inserimento, nei modelli di simulazione colturale, di specifici algoritmi per la ricerca iterativa delle soluzioni ottimali di calibrazione. La calibrazione automatica facilita l'uso del modello da parte dell'utente e migliora la validità delle applicazioni evitando le incongruenze causate da una errata calibrazione da parte dell'utente (ACUTIS M., 2010).

Nonostante gli attuali limiti e le problematiche nello sviluppo, la modellistica è uno strumento fondamentale, da affiancare alla tradizionale sperimentazione di campo e di laboratorio, per l'analisi dei sistemi colturali. Attraverso la simulazione dei diversi processi biofisici, l'applicazione dei modelli evidenzia i punti di forza e di debolezza di un determinato sistema colturale e permette di valutare i possibili scenari gestionali. In tal modo è possibile migliorare l'efficienza degli agro-ecosistemi, in un'ottica di sostenibilità economica e ambientale.

Capitolo III

Il modello CropSyst

III.1 Descrizione generale del modello

Il modello di simulazione colturale CropSyst (*Cropping Systems Simulation Model*) è stato sviluppato da Claudio O. Stöckle del *Biological Systems Engineering Department* della *Washington State University* (Pullman, WA, USA), con la collaborazione di diversi ricercatori di varie nazionalità, a partire dai primi anni '90.

CropSyst è stato concepito come uno strumento analitico per lo studio degli effetti del clima, del suolo e della gestione agronomica sulla produttività dei sistemi colturali e sull'ambiente. CropSyst simula il bilancio idrico del suolo, il bilancio dell'azoto nel sistema suolo-pianta, la crescita della coltura (radicale e aerea), la produttività della coltura, l'evoluzione dei residui colturali, l'erosione del suolo (dovuta all'acqua) e la salinità (STÖCKLE C.O., DONATELLI M., NELSON R., 2003: versione "3." di CropSyst). Tutti i processi simulati sono influenzati dalle condizioni climatiche e pedologiche, dalle caratteristiche morfo-fisiologiche delle colture e dagli interventi agronomici. CropSyst è un modello meccanicistico ossia un modello in cui i meccanismi e i processi che determinano il comportamento del sistema sono quantificati da equazioni ispirate a principi e leggi di validità generale.

CropSyst si compone di diversi programmi.

Il programma principale, denominato anch'esso CropSyst, è il simulatore di sistemi colturali. Si tratta di un simulatore generico di colture, erbacee e arboree. I processi di crescita e sviluppo di colture molto diverse tra loro sono simulati con lo stesso *set* di equazioni (CONFALONIERI R., BECHINI L., 2004), mentre le differenze tra le varie colture (o tra le varietà di una stessa specie) sono descritte variando (calibrando) i parametri delle equazioni stesse. Il modello CropSyst simula un *single land block fragment* ossia un'area omogenea dal punto di vista bio-fisico sottoposta a una gestione (*management*) uniforme (STÖCKLE C.O., DONATELLI M., NELSON R., 2003).

Gli altri programmi sono ClimGen, ArcCS e CropSyst Watershed.

ClimGen è un generatore climatico, ossia un programma che sulla base di dati climatici reali determina dei parametri che vengono utilizzati per generare una serie di dati climatici giornalieri. I dati generati, da un punto di vista statistico, sono simili ai dati reali utilizzati; in tal modo è possibile, per esempio, ricostruire delle serie storiche in cui vi sono dati mancanti. I dati che possono essere generati sono: pioggia, temperatura giornaliera massima e minima, radiazione solare, umidità atmosferica e deficit di pressione di vapore atmosferico.

ArcCS è un programma che permette di basare sul GIS le simulazioni condotte da CropSyst, utilizzando i poligoni derivati da ARCVIEW o da ARC/Info GIS. Gli output di CropSyst possono così essere facilmente georeferenziati e utilizzati per la realizzazione di mappe di vario tipo (potenzialità agronomica, erosione, lisciviazione dei nitrati ecc.).

CropSyst Watershed è una evoluzione di ArcCS e permette di associare le simulazioni a scala di bacino. Il bacino idrografico viene rappresentato come una griglia le cui celle componenti sono tra loro connesse da un punto di vista idrologico. Le simulazioni vengono condotte per ciascuna cella del bacino, iniziando da quelle poste alla quota più elevata (a monte) e continuando verso le quote inferiori fino a coprire tutto il bacino.

Il modello CropSyst è stato valutato in diverse località del mondo, differenti tra loro per condizioni pedoclimatiche e culturali. In Italia sono stati condotti studi riguardanti sia i sistemi colturali nel loro complesso (DONATELLI M. *et al.*, 1997b; GIARDINI L. *et al.*, 1998) sia le singole colture, quali l'erba medica (CONFALONIERI R., BECHINI L., 2004) e il riso (CONFALONIERI R., BOCCHI S., 2005). Il modello è stato anche applicato nella simulazione di sistemi colturali caratterizzati da differenti livelli di input, facendo riferimento ad esperimenti condotti nel lungo periodo (MORARI F. *et al.*, 2000). Sono stati inoltre svolti specifici lavori riguardanti la parametrizzazione del modello per la coltura del frumento (BECHINI L. *et al.*, 2006) e la valutazione comparata con altri modelli di simulazione con riferimento alla coltura del riso (CONFALONIERI R. *et al.*, 2009). Di particolare interesse per la Sicilia sono gli studi riguardanti l'applicazione del modello CropSyst in altre regioni del Bacino del Mediterraneo quali l'Egitto (EL AFANDI G. *et al.*, 2010. OUDA S.A. *et al.*, 2010) e la Siria (PALA M. *et al.*, 1996).

Il programma CropSyst richiede il sistema operativo Windows. Un'interfaccia *user-friendly* permette agli utenti di manipolare facilmente i *file* di input, assegnare i valori ai parametri di input, creare simulazioni, eseguire simulazioni singole o in *batch*, personalizzare gli output, produrre report grafici e di testo, collegare programmi con fogli elettronici. Per semplificare la parametrizzazione del modello, le simulazioni possono essere condotte utilizzando solo i moduli di interesse. Ad esempio, i moduli dell'erosione e del bilancio azotato possono essere opzionalmente disattivati (DONATELLI M., BELLOCCHI G., 2001).

Il programma eseguibile CropSyst, insieme al manuale d'uso, è liberamente scaricabile da internet all'indirizzo <http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst>. Il codice del modello, scritto nel linguaggio informatico C++, non è invece distribuito.

Nei paragrafi seguenti si espongono i concetti fondamentali su cui si basa il funzionamento del modello e le principali equazioni che formalizzano tali concetti. Ulteriori e più dettagliate informazioni possono essere desunte dal manuale del modello stesso e dal lavoro di DONATELLI M., 1995.

III.2 Crescita e sviluppo della coltura

La versione “4.” di CropSyst permette di scegliere il *time step*: giornaliero o orario. Ciò significa che le diverse equazioni possono essere svolte per ogni giorno di simulazione oppure per ciascuna delle 24 ore di ogni giorno di simulazione.

Lo sviluppo della coltura, ossia il procedere della coltura stessa attraverso i vari stadi fenologici (per esempio, dall'emergenza alla prima foglia vera) si basa sulla somma, calcolata dalla semina, delle unità termiche (o gradi giorno). L'accumulo dei gradi giorno dipende:

- dalla temperatura media dell'aria;
- dalla temperatura minima e massima per lo sviluppo della coltura;
- dal fotoperiodo e dalla vernalizzazione;
- dallo stress idrico.

L'equazione per il calcolo dei gradi giorno è:

$$\text{GDD}_{\text{oggi}} = (T_{\text{media}} - T_{\text{base}}) \cdot \min(f_{\text{ver}}, f_{\text{foto}})$$

GDD = *Growing Degree Days* (gradi giorno);

T_{media} (°C) è la temperatura media dell'aria a 2 m dal suolo;

Generalmente $T_{\text{media}} = \frac{(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}{2}$;

Se $T_{\text{media}} < T_{\text{base}}$ allora $T_{\text{media}} = T_{\text{base}}$;

Se $T_{\text{media}} > T_{\text{cutoff}}$ allora $T_{\text{media}} = T_{\text{cutoff}}$;

T_{base} (°C) è la temperatura minima per lo sviluppo della coltura;

T_{cutoff} (°C) è la temperatura massima per lo sviluppo della coltura;

f_{ver} e f_{foto} sono fattori di correzione per la vernalizzazione e il fotoperiodo, variano da 0 a 1 in funzione delle temperature limiti e ottimali dei processi di vernalizzazione e fotoperiodo della coltura. I moduli della vernalizzazione e del fotoperiodo sono disattivabili.

L'accumulo dei gradi giorno influenza anche la durata dell'area fogliare.

Per le colture erbacee a ciclo annuale destinate alla produzione di granella, le fasi fenologiche considerate da CropSyst sono:

- *Planting event* = semina;
- *Emergence* = emergenza;
- *Maximum root depth* = massima profondità radicale;
- *End of vegetative growth* = fine dello sviluppo vegetativo;

- *Begin flowering* = inizio della fioritura;
- *Begin filling* = inizio del riempimento (delle cariossidi);
- *Physiological maturity* = maturazione fisiologica.

La crescita della coltura consiste nell'accumulo di biomassa e nella sua ripartizione tra gli organi della pianta. La crescita (produzione) potenziale della biomassa aerea (*AboveGround Biomass*, AGB) è basata:

- sulla traspirazione potenziale della coltura;
- sulla radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla coltura.

Per ogni giorno o per ogni ora di simulazione, in funzione del *time step* scelto, la crescita potenziale considerata è quella minima (più bassa) tra le due, in modo da considerare il fattore più limitante tra la richiesta traspirativa e la radiazione disponibile. Questa crescita potenziale è poi corretta in funzione delle limitazioni imposte dallo stress idrico e dalla carenza di azoto in modo da ottenere la produzione reale di biomassa.

Considerato che gli scambi gassosi di carbonio e di vapore acqueo, tra la foglia e l'ambiente esterno, avvengono entrambi attraverso gli stomi, esiste una relazione tra la traspirazione e la produzione di biomassa. Pertanto, secondo l'equazione di Tanner e Sinclair (1983), la produzione potenziale giornaliera di biomassa può essere calcolata come:

$$AGB_{PT} = \frac{K_{BT} \cdot T_P}{VPD}$$

(simbologia di BECHINI L. *et al*, 2006).

AGB_{PT} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) è la produzione potenziale giornaliera di biomassa aerea dipendente dalla traspirazione (d *day*, "giornaliera", se è stato impostato il *time step* giornaliero).

K_{BT} ($\text{kPa} \cdot \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) è il *biomass-transpiration coefficient* che corrisponde all'efficienza d'uso dell'acqua moltiplicata per VPD. Per efficienza d'uso dell'acqua (*Water Use Efficiency*, WUE) si intende il rapporto tra la biomassa aerea accumulata e l'acqua traspirata ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Pertanto K_{BT} rappresenta il tasso di fotosintesi netta, ossia già decurtato della sostanza organica consumata nella respirazione.

T_P ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) è la traspirazione potenziale della coltura.

VPD (kPa) è il deficit medio giornaliero della pressione di vapore atmosferico.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, CropSyst fa riferimento sia al metodo Priestley-Taylor (1972) sia al metodo Penman-Monteith (1965), in funzione dei dati climatici di input. Il metodo Penman-Monteith richiede la temperatura giornaliera massima e minima, la radiazione solare, l'umidità relativa massima e minima, la velocità del vento. Il metodo Priestley-Taylor richiede soltanto la temperatura giornaliera massima e minima, la radiazione solare e un opportuno valore della costante prevista dal metodo stesso. La ripartizione dell'evapotraspirazione in evaporazione dal suolo ed in traspirazione dalla pianta viene fatta in funzione della copertura del terreno da parte della coltura.

L'equazione di Tanner-Sinclair, sopra riportata, non è valida per bassi valori di VPD in quanto, con valori di VPD tendenti a 0, la produzione di biomassa tenderebbe a infinito. Per risolvere tale problema, il modello CropSyst calcola la crescita potenziale della biomassa aerea anche in funzione della radiazione fotosinteticamente attiva (*Photosynthetically Active Radiation*, PAR) intercettata dalla coltura, secondo l'equazione di Monteith (1977):

$$AGB_{iPAR} = RUE \cdot iPar \cdot T_{lim}$$

(simbologia di BECHINI L. *et al*, 2006).

AGB_{iPAR} ($kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) è la produzione potenziale di biomassa dipendente dalla radiazione fotosinteticamente attiva intercettata.

RUE ($kg \cdot MJ^{-1}$) *Radiation Use Efficiency* è l'efficienza d'uso della Par.

$iPar$ ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) è la quantità giornaliera di radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla coltura.

T_{lim} è un fattore che descrive l'effetto della temperatura sull'accumulo di biomassa in funzione della radiazione. T_{lim} varia linearmente, da 0 a 1, con il variare della temperatura dell'aria dal valore minimo per lo sviluppo (T_{base}) al valore ottimale (T_{opt}). In particolare, indicando con T_m ($^{\circ}C$) la temperatura media giornaliera dell'aria:

se $T_m < T_{base}$ allora $T_{lim} = 0$;

se $T_{base} \leq T_m \leq T_{opt}$ allora $T_{lim} = \frac{T_m - T_{base}}{T_{opt} - T_{base}}$;

se $T_m > T_{opt}$ allora $T_{lim} = 1$.

Come sopra riferito, il modello CropSyst considera quale produzione potenziale di biomassa quella minima tra la produzione ottenibile in funzione della

traspirazione e la produzione ottenibile in funzione della radiazione. In entrambi i casi il modello provvede al calcolo del LAI (*Leaf Area Index*) in quanto proprio dall'indice di area fogliare (ossia dalla copertura del terreno da parte della coltura) dipendono la traspirazione potenziale (T_p) e la quantità di radiazione intercettata ($iPar$). Inoltre dipende dal LAI anche la crescita dell'apparato radicale che, a sua volta, influenza l'assorbimento dell'acqua dal suolo. Il LAI, inteso come superficie fogliare insistente sull'unità di superficie di suolo, è calcolato da:

$$LAI = \frac{SLA \cdot B}{1 + pB}$$

(simbologia di STÖCKLE C.O. *et al.*, 2003).

LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$).

SLA ($m^2 \cdot kg^{-1}$) *Specific Leaf Area* è la quantità di area fogliare prodotta per unità di biomassa ripartita verso le foglie. Il modello la considera costante ma nella realtà non lo è. Quindi si fornisce al modello una media di valori misurati all'inizio del periodo di crescita in una coltura posta in condizioni ottimali.

B ($kg \cdot m^{-2}$) è la biomassa aerea accumulata.

p è un coefficiente empirico (*Stem/Leaf partition coefficient*) da cui dipende la frazione di biomassa apportata alle foglie. Un valore di p pari a 0 apporta tutta la biomassa alle foglie.

Il calcolo dell'area fogliare, ovviamente, considera anche il processo di senescenza della foglia. La durata dell'area fogliare (*Leaf Area Duration*, LAD) viene espressa in unità termiche (gradi giorno) e viene calcolata per ciascuna unità di LAI giornalmente prodotta. Quando una data porzione giornaliera di LAI completa la sua durata viene rimossa dal LAI corrente, simulando così il processo di senescenza fogliare. Un apposito parametro permette di considerare la sensibilità del LAD nei confronti dello stress idrico.

La produzione potenziale di biomassa viene usata per calcolare la produzione reale di biomassa, considerando le limitazioni imposte dallo stress idrico e dalla carenza di azoto.

Per determinare la produzione di biomassa aerea in funzione dello stress idrico si usa l'equazione:

$$G_W = G_P \cdot \frac{T_a}{T_p}$$

(simbologia di CONFALONIERI R., 2010b).

G_W ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) è la *Growth* (crescita, produzione) di biomassa aerea limitata da W (*Water*).

G_P ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) è la crescita potenziale di biomassa aerea.

$\frac{T_a}{T_p}$ è il rapporto tra la traspirazione reale (a, *actual*, reale) e la traspirazione potenziale. Il modello CropSyst calcola la traspirazione reale in base all'acqua disponibile nel suolo e in base alla capacità della pianta di estrarla, considerando anche l'aumento della resistenza stomatica che si verifica in condizioni di deficit di azoto (STÖCKLE C.O. *et al.*, 2003; VAN KEULEN H., SELIGMAN N.G., 1987).

La produzione di biomassa aerea in funzione dello stress azotato è data da:

$$G_N = G_P \cdot \text{NSI}$$

(simbologia di BECHINI L., 2010).

G_N ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) è la *Growth* (crescita, produzione) di biomassa aerea limitata da N (*Nitrogen*).

G_P ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) è la crescita potenziale di biomassa aerea.

NSI è il *Nitrogen Stress Index* pari a:

$$1 - \frac{N_{\text{crit}} - N_c}{N_{\text{crit}} - N_{\text{min}}}$$

(simbologia di STÖCKLE C.O. *et al.*, 2003).

N_{crit} ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) è la concentrazione critica (*critical*) di azoto nella pianta, ossia la concentrazione al di sotto della quale si riduce (rallenta) la crescita della biomassa.

N_{min} ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) è la concentrazione minima (*minimum*) di azoto nella pianta, ossia la concentrazione al di sotto della quale si ferma (cessa del tutto) la crescita della biomassa.

N_c ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) è la concentrazione attuale (*current*) di azoto nella pianta.

Se $N_c > N_{\text{crit}}$ la crescita della biomassa non è influenzata dal contenuto di azoto nella pianta.

I valori di N_c , N_{crit} e N_{min} sono calcolati dal modello per ciascun giorno di simulazione, variando, nel corso della stagione di crescita, in funzione della biomassa accumulata (teoria della diluizione dell'azoto, GREENWOOD D.J. *et al.*, 1990; STÖCKLE C.O., DEBAEKE P., 1997).

La crescita reale della biomassa aerea è quella minima tra G_W e G_N , in modo da considerare il fattore più limitante (stress idrico o carenza di azoto). Tale crescita reale della biomassa viene usata dal modello per simulare la produzione finale della coltura in funzione dell'*Harvest Index* ($HI = \text{Prodotto utile} / \text{biomassa aerea}$):

$$Y = B_{PM} \cdot HI$$

(simbologia di STÖCKLE C.O. *et al.*, 2003).

Y ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) *Yield* è la produzione (ad esempio, la produzione di granella di una coltura cerealicola).

B_{PM} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) è la biomassa reale accumulata in tutto il ciclo colturale, fino alla maturazione fisiologica.

HI è l'*Harvest Index* determinato in base all' HI ottimale della coltura (in assenza di stress) modificato in funzione dell'intensità dello stress avvenuto (idrico e azotato) e in funzione della sensibilità della coltura allo stress durante la fase di fioritura e di riempimento delle cariossidi. Come sopra riferito, le diverse fasi fenologiche della coltura vengono calcolate in base ai gradi giorno.

III.3 Simulazione dei processi del suolo

Tra i processi del suolo, CropSyst considera principale il bilancio idrico, infatti la dinamica dell'azoto e dei sali viene simulata in interazione con il bilancio idrico stesso.

Il profilo del suolo viene suddiviso in strati sovrapposti (modello unidimensionale). Ciascuno strato, lungo tutto il proprio spessore, viene considerato omogeneo da un punto di vista chimico-fisico.

Nel modello CropSyst, il bilancio idrico considera: precipitazione, irrigazione, scorrimento superficiale (ruscellamento), intercettazione da parte della coltura, infiltrazione, redistribuzione lungo il profilo di suolo (infiltrazione), percolazione profonda, traspirazione della coltura ed evaporazione (STÖCKLE C.O., DONATELLI M., NELSON R., 2003).

La redistribuzione dell'acqua lungo il profilo del suolo può essere modellizzata, opzionalmente, mediante un semplice metodo *cascading* (a cascata) (LEENHARDT D. *et al.*, 1995) o mediante la soluzione numerica dell'equazione di Richard del flusso nel suolo (CAMPBELL G.S., 1985; ROSS P.J., BRISTOW K.L., 1990).

Il metodo *cascading*, generalmente più utilizzato, vede il suolo come una riserva idrica. Gli apporti sono dati dalle piogge e dall'irrigazione, mentre le perdite sono dovute all'evapotraspirazione e al drenaggio. Quando un determinato strato di suolo raggiunge la capacità di campo, l'acqua si infiltra nello strato di suolo sottostante. Una volta portato l'intero profilo del suolo alla capacità di campo (ad esempio, nel caso di abbondanti piogge e/o irrigazioni), l'acqua rimanente è considerata persa per percolazione profonda. La risalita capillare viene invece simulata in funzione dell'evapotraspirazione. Un parametro empirico, denominato coefficiente di *by-pass*, variabile da 0 a 1, incide sul trasporto dei soluti.

In alternativa all'approccio a cascata, CropSyst prevede l'applicazione di un metodo numerico per la soluzione dell'equazione di Richard e quindi per la stima del flusso idrico nel suolo. Tale metodo numerico divide il profilo del suolo in elementi separati da nodi. Ad ogni nodo si riferiscono i valori del potenziale idrico, del contenuto idrico, della concentrazione del soluto (se il trasporto del soluto è richiesto) e della frazione radicale. Per ogni singolo nodo si applica un sistema di equazioni la cui risoluzione descrive, simultaneamente, il trasporto idrico e

l'assorbimento dell'acqua da parte delle colture (DONATELLI M., BELLOCCHI G., 2001).

Il bilancio azotato viene considerato in CropSyst calcolando, separatamente, il bilancio dell'azoto in forma nitrica (ione nitrato, NO_3^-) e il bilancio dell'azoto in forma ammoniacale (ione ammonio, NH_4^+). I processi considerati sono: le trasformazioni dell'azoto, l'adsorbimento dello ione ammonio nel complesso di scambio (STÖCKLE C.O., CAMPBELL G.S., 1989), la fissazione simbiotica (BOUNIOLS A. *et al.*, 1991), la domanda e l'asportazione delle colture (GODWIN D.C., JONES C.A., 1991, modificato).

Le trasformazioni dell'azoto riguardano la nitrificazione, la denitrificazione e la mineralizzazione. Il concetto di mineralizzazione implica la necessità, da parte del modello, di simulare anche il bilancio della sostanza organica tramite il coefficiente isoumico (K_1) e il coefficiente di mineralizzazione (K_2), considerando la gestione dei residui colturali (SACCO D., 2010). Per ogni strato di suolo, CropSyst considera tre *pools* di sostanza organica (*labile active*, *metastabile active* e *passive*) e un *pool* di biomassa microbica.

III.4 Input e output

Di seguito si presentano le principali informazioni inerenti gli input e gli output del modello. Diversi sono i *file* di input di cui necessita il modello. Ciascun *file*, spesso articolato in più sezioni (denominate indifferentemente “schede” o “finestre”), richiede, a sua volta, diversi dati.

Il modello CropSyst racchiude le diverse simulazioni nel *file* “*Project*” (estensione: .csp). Gli elementi di ciascuna simulazione si trovano nel *file* “*Scenario*” (.csn). In tale *file*, la scheda *Options* consente di specificare il periodo di simulazione e alcune caratteristiche generali della simulazione stessa, in particolare:

- processi da simulare (neve, congelamento del suolo, bilancio dell’azoto, salinità);
- metodo da utilizzare per il calcolo dell’evapotraspirazione (Priestley-Taylor o Penman-Monteith);
- sub-modelli per simulare l’infiltrazione dell’acqua, il ruscellamento, l’erosione, l’evoluzione della sostanza organica;
- *time step* (orario o giornaliero) per simulare lo sviluppo della coltura, il gradiente di temperatura lungo il profilo del suolo e il bilancio dell’azoto.

La scheda “*Initialization*” consente di definire i valori iniziali (ossia all’inizio del periodo di simulazione) delle variabili relative al suolo (ad esempio il contenuto idrico), ai residui colturali (presenza o assenza, quantità ecc.) e alla sostanza organica (umificata, biomassa microbica ecc.).

La scheda “*Recalibration*” permette di considerare la profondità della falda idrica, creando un apposito *file* (.wtb).

I dati geografici e meteorologici, relativi allo specifico sito in cui si svolgono i processi da simulare, sono contenuti nel *file* “*Weather*” (.ued). Tale *file* contiene due sezioni: *Geolocation* e *Daily weather*. I dati geografici sono latitudine, longitudine e altezza (m) s.l.m.. Le coordinate geografiche possono essere inserite in gradi oppure in metri in base al sistema UTM. I dati meteorologici giornalieri che devono essere necessariamente inseriti sono: precipitazione (mm), temperatura massima e minima (°C), radiazione solare ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$). Per un maggior dettaglio è possibile inserire anche l’umidità relativa massima e minima (%), il punto di rugiada (°C) e la velocità del vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

I dati pedologici del sito considerato per la simulazione sono contenuti nel *file* “*Soil*” (.sil). Numerosi sono i dati richiesti nelle varie sezioni del *file*, tra cui: spessore del suolo, suddivisione lungo il profilo in diversi strati in funzione della tessitura, spessore di ciascuno strato, proprietà idrauliche (contenuto idrico alla capacità di campo e al punto di appassimento ecc.), densità, capacità di scambio cationico, pH, pendenza e lunghezza della pendice (ai fini del calcolo dell’erosione), proprietà della superficie (colore, albedo). Per ciascuno strato di suolo, le proprietà idrauliche possono essere stimate dal modello sulla base dello spessore e della tessitura mediante le *pedotransfer functions* (SAXTON K.E. *et al.*, 1986; CAMPBELL G.S., 1985).

Come già riferito, CropSyst simula tutte le colture con lo stesso *set* di equazioni. Le differenze tra le varie colture e/o tra le varietà di una stessa specie sono descritte calibrando i parametri delle equazioni stesse. Tali parametri vengono inseriti nel *file* “*Crop*” (.crp). All’interno di questo *file*, la sezione *Defaults* consente di selezionare una coltura ossia un *set* di parametri che CropSyst propone per una determinata coltura. Le sezioni successive consentono di modificare tali parametri in modo da calibrare al meglio il modello per la coltura (o per la varietà) desiderata nel sito pedo-climatico d’interesse.

La sezione *Classification* permette di definire il tipo di coltura: erbacea o arborea, fase oscura della fotosintesi C3 o C4, biomassa raccolta (granella, foraggio, tuberi ecc.), ciclo vegeto-produttivo (annuale, biennale, perenne). Le sezioni *Emergence*, *Vernalization* e *Photo-period* riguardano, rispettivamente, l’emergenza della coltura, la vernalizzazione e il fotoperiodo. Nella sezione *Thermal time accumulation* si definiscono i valori (°C) della temperatura minima (T_{base}) e massima (T_{cutoff}) per lo sviluppo della coltura. È inoltre possibile selezionare il *time step* desiderato (orario o giornaliero). La sezione *Phenology* contiene i valori dei gradi giorno necessari per lo sviluppo della coltura attraverso i vari stadi fenologici.

La sezione *Transpiration* contiene i parametri relativi alla traspirazione, quali:

- coefficiente della *canopy* per l’estinzione della radiazione solare;
- coefficiente di evapotraspirazione della coltura nella fase di massimo sviluppo della *canopy*;
- potenziale idrico della foglia quando ha inizio la chiusura stomatica dovuta a stress idrico ($-J \cdot kg^{-1}$);

- potenziale idrico della foglia al punto di appassimento ($- J \cdot kg^{-1}$);
- massima quantità di acqua asportata dal suolo ($mm \cdot d^{-1}$).

La sezione *Attainable growth* riguarda la produzione potenziale di biomassa che, come già riferito, dipende dalla traspirazione potenziale della coltura e dalla radiazione fotosinteticamente attiva intercettata dalla coltura. Pertanto vi sono due schede: *Transpiration dependent growth* e *Radiation dependent growth*. In queste schede è possibile inserire i parametri della WUE e della RUE.

La sezione *Canopy growth* contiene i valori relativi a LAI, SLA e *Stem/leaf partition coefficient* mentre la sezione *Root* riguarda l'apparato radicale (profondità delle radici, lunghezza delle radici per unità di massa delle stesse, distribuzione dell'apparato radicale lungo il profilo di suolo ecc.). Tramite la sezione *Senescence* è possibile calibrare il LAD e la sua sensibilità nei confronti dello stress idrico.

La sezione *Harvest* contiene il valore dell'*Harvest index* e i valori della sensibilità della coltura, durante la fase di fioritura, allo stress idrico e alla carenza di azoto.

La sezione *Hardiness* permette di parametrizzare la resistenza della coltura alle basse temperature mentre la sezione *Dormancy/Seasonal* riguarda la dormienza delle colture polienni (ad esempio, colture prative e colture arboree). La quantità e la tipologia dei residui colturali vengono specificate nella sezione *Residue*.

I parametri relativi alla simulazione dell'azoto si trovano nella sezione *Nitrogen*: asportazione, concentrazione negli organi della pianta e nei residui colturali, concentrazione limitante nel suolo, contenuto idrico del suolo limitante l'assorbimento dell'azoto, azotofissazione per le leguminose ecc.. La sezione *Salinity* riguarda la tolleranza della coltura alla salinità, riferendosi al potenziale osmotico della soluzione circolante del suolo. Nella sezione *CO₂* è possibile inserire il valore dell'incremento percentuale di produzione in presenza di una maggiore concentrazione atmosferica di CO₂.

La tecnica colturale, ossia la gestione agronomica, viene considerata da CropSyst attraverso il file "*Management*" (.mgt). Tale file è composto da diverse sezioni: *Irrigation*, *Fertilization*, *Harvest/Clipping*, *Tillage*, *Residue* e *Conservation*. È possibile inserire i dati riguardanti l'irrigazione, la fertilizzazione (azotata e organica), il momento di raccolta, le lavorazioni del suolo, la gestione dei residui colturali e l'erosione del suolo. I diversi interventi di gestione possono essere riferiti ad una specifica data (calendario), oppure a una fase del ciclo biologico della coltura

(in funzione dei gradi giorno), oppure in funzione di determinate condizioni (ad esempio, contenuto idrico del suolo, bilancio azotato ecc.). Nel modello CropSyst le lavorazioni del suolo determinano la redistribuzione dell'azoto e della sostanza organica lungo il profilo del suolo.

La rotazione colturale, ossia il susseguirsi nel tempo di diverse colture su uno stesso appezzamento di terreno, viene inserita nel modello attraverso il *file* “*Rotation*” (.rot). La semina (in generale l'impianto) di una coltura può essere riferita ad una specifica data oppure può avvenire in funzione di determinate circostanze riguardanti la piovosità e l'andamento termico. Per inserire una coltura nel *file* “*Rotation*” è necessario collegare il *file* “*Crop*” e il *file* “*Management*”.

Gli output della simulazione condotta sono contenuti nel *file* “*Report*” (.fmt). Tramite le diverse sezioni di tale *file* è possibile scegliere quali output visualizzare, in forma tabellare o in forma grafica, ad esempio: fenologia della coltura, biomassa aerea e radicale prodotta, LAI, esiti sul suolo (lisciviazione dei nitrati, erosione, ecc.). Gli output possono essere mostrati per ogni giorno del periodo di simulazione, in modo da valutare l'andamento dei fenomeni d'interesse, oppure possono essere riferiti alla fine del ciclo colturale, per avere un quadro riassuntivo del sistema colturale simulato.

Capitolo IV

Applicazione del modello CropSyst

IV.1 Dati sperimentali

In Italia, da diversi anni, è attiva una rete nazionale di sperimentazione sui cereali, promossa dal Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura (CRA) che coordina le prove di confronto varietale in tutto il territorio italiano: Nord, Centro, Sud e Isole. In Sicilia, insieme ad altri Enti, partecipa a tale sperimentazione il Dipartimento dei Sistemi Agro-Ambientali (già Dipartimento di Agronomia Ambientale e Territoriale) dell'Università degli Studi di Palermo. Annualmente, le attività e i risultati della sperimentazione sono riportati sulla rivista *“L'Informatore Agrario”*.

I dati sperimentali utilizzati, nel presente lavoro, per la calibrazione e la validazione del modello CropSyst, si riferiscono alle prove di confronto varietale realizzate presso l'Azienda Sperimentale “Sparacia” del Dipartimento dei Sistemi Agro-Ambientali, nell'ambito della sperimentazione nazionale sul grano duro, grano tenero e orzo.

L'Azienda Sperimentale “Sparacia”, coordinate geografiche 37°38' N e 13°45' E, altezza 460 m s.l.m., è sita nell'omonima contrada del comune di Cammarata, provincia di Agrigento. Si tratta di una località rappresentativa, per le caratteristiche pedo-climatiche e colturali, dell'area collinare interna della Sicilia.

Il clima è di tipo mediterraneo. Le precipitazioni sono concentrate soprattutto nel periodo autunno-vernino e sono quasi assenti nei mesi estivi. Le temperature si attestano sui valori minimi nei mesi invernali per poi crescere fino ai valori massimi nei mesi estivi.

Secondo l'indice bioclimatico di Rivas-Martinez, il clima della zona è di tipo Mesomediterraneo-Secco superiore. Nel trentennio di riferimento 1965-1994, la piovosità media annua è di circa 600 mm, la temperatura media annua è compresa tra 15 e 16 °C, la temperatura minima del mese più freddo tra 2 e 4 °C mentre la

temperatura massima del mese più caldo è compresa tra 30 e 32 °C (DRAGO A. *et al.*, 2000).

I dati meteorologici giornalieri, relativi al sito di Sparacia, utilizzati nella presente applicazione modellistica, sono stati forniti dal SIAS – Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano dell'Assessorato Regionale delle Risorse Agricole e Alimentari – Palermo.

Riguardo gli aspetti pedologici, l'Azienda "Sparacia" ricade nella tipica catena dei suoli della collina argillosa, costituita nella parte più alta dai Typic Xerorthents (Regosuoli), nella parte mediana dagli Xerochrepts (Suoli Bruni), nella parte inferiore dagli Haploxererts (Vertisuoli) e dagli Xerofluvents (Suoli alluvionali). Si tratta quindi dell'Unità Cartografica (associazione di suoli) n. 12 della "Carta dei Suoli della Sicilia" (FIEROTTI G., 1997).

In particolare, il suolo su cui sono state svolte le prove di confronto varietale è classificato, secondo la USDA-Soil Taxonomy, come Typic Chromoxererts e le principali caratteristiche chimico-fisiche sono riportate nella seguente tabella.

Tab. 4 – Caratteristiche chimico-fisiche del suolo sede delle prove di confronto varietale, presso l'Azienda "Sparacia" (Cammarata – AG).

Reazione	pH	8.10
C.S.C.	meq/100	24
Calcare totale	%	14.51
Calcare attivo	%	7.22
S.O. (met. Walkley Black)	%	1.51
N tot. (met. Kjeldahl)	‰	0.85
P ₂ O ₅ (met. Olsen)	p.p.m.	30
K ₂ O (met. Dirks-Sheffer)	p.p.m.	27
C.E. (1:5)	mS·cm ⁻¹	0.15
Argilla	%	34.32
Limo	%	22.46
Sabbia	%	43.22

Per l'applicazione del modello CropSyst, riguardo il grano duro e l'orzo, si fa riferimento ai dati relativi a cinque annate agrarie, dall'annata 2003/2004 all'annata

agraria 2007/2008. Per il grano tenero, invece, vengono considerate quattro annate, dal 2004/2005 al 2007/2008.

Al fine di valutare l'applicabilità del modello nel comparto cerealicolo siciliano, per ciascuna specie in esame è stata considerata la varietà ritenuta tra le più importanti, in Sicilia, in termini di stabilità produttiva, qualità della granella e superficie annualmente investita.

Per il grano duro, la varietà considerata è stata Simeto, la più coltivata in Sicilia, costituita da Proseme. Per l'orzo è stata considerata Dasio, varietà da zootecnia, alternativa, a spiga distica, costituita dal Centro di ricerca per la cerealicoltura di Foggia (già Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura – Sezione di Foggia). La varietà di grano tenero considerata è stata Bologna, costituita dalla Società Italiana Sementi (SIS) e dotata di ottima qualità della granella ai fini della panificazione.

La coltura del grano tenero in Sicilia interessa una superficie molto limitata (circa 1000 ha, come riportato al Capitolo I) ma è stata comunque considerata nel presente lavoro per verificare l'applicabilità del modello nei confronti di specie cerealicole caratterizzate da diversa fenologia (in termini di epoca di spigatura e durata complessiva del ciclo vegeto-produttivo), resistenza allo stress idrico e produttività.

Le prove parcellari di confronto varietale, per tutte le tre specie in esame, sono state svolte secondo uno schema sperimentale a blocco completo randomizzato. La superficie di ogni parcella era di 10 m². In ciascun anno di prova, per il grano duro e l'orzo sono state realizzate quattro repliche, mentre per il grano tenero sono state realizzate tre repliche. Pertanto, i dati sperimentali osservati, che vengono riportati successivamente nel prosieguo del presente lavoro, corrispondono alla media dei dati delle tre repliche per il grano tenero e delle quattro repliche per il grano duro e l'orzo.

In ciascuna annata agraria, tutte le tre specie hanno seguito una precedente coltura di leguminose. Per la semina, si è fatto uso di seme conciato alla dose di 300 semi germinabili · m⁻². La concimazione in pre-semina è stata effettuata utilizzando il fosfato biammonico (titolo: N 18 – P₂O₅ 46) e somministrando 92 kg·ha⁻¹ di P₂O₅ e 36 kg·ha⁻¹ di N. Per la concimazione di copertura, eseguita in corrispondenza della

fase fenologica di accestimento, è stata utilizzata l'urea (titolo N 46), somministrando $46 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ di N.

Il trattamento chimico diserbante è stato effettuato con i principi attivi 2,4 D + metosulam, al fine di controllare le infestanti dicotiledoni (infestanti a foglia larga).

IV.2 Calibrazione del modello

Nel presente lavoro è stata utilizzata la versione “4.13.09” del modello CropSyst, disponibile sul sito Internet del *Biological Systems Engineering Department* della *Washington State University* (Pullman, WA, USA): <http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst>.

Per lo *Scenario* simulato, tramite la scheda *Options*, sono state specificate le caratteristiche generali della simulazione stessa. In particolare, all'interno della scheda *Options*, tramite la finestra *Submodels* sono state adottate le seguenti impostazioni:

- *Chemistry*: è stata impostata l'opzione *Nitrogen*. Ciò significa che, per tutte le tre specie cerealicole, si è proceduto alla simulazione del bilancio azotato;
- *Evapotranspiration*: è stata impostata la funzione “Automatic” per cui il modello può adottare sia l'equazione di Priestley-Taylor sia quella di Penman-Monteith;
- *Soil*: ai fini della simulazione dell'infiltrazione dell'acqua nel suolo è stato scelto il modello *Cascade*;
- *Hourly submodels*, è stato impostato il *time step* giornaliero per simulare lo sviluppo della coltura, il gradiente di temperatura lungo il profilo del suolo e il bilancio dell'azoto.

Tramite la scheda *Weather*, sulla base dei dati forniti dal SIAS, è stato creato il *file* meteo (estensione .ued). I dati meteorologici giornalieri in input sono stati:

- precipitazione, espressa in mm;
- temperatura massima dell'aria, espressa in °C e rilevata a 2 m di altezza dal suolo;
- temperatura minima dell'aria, espressa in °C e rilevata a 2 m di altezza dal suolo;
- radiazione solare, espressa in MJ·m⁻².

Nella scheda *Soil*, è stato creato il *file* (.sil) relativo alle caratteristiche pedologiche. Definito il numero di strati omogenei identificati nel profilo del suolo, sono stati inseriti, per ciascuno strato, i seguenti dati:

- spessore, espresso in cm;

- tessitura, espressa in percentuale (%) di sabbia, limo e argilla;
- capacità di scambio cationico, espressa in meq;
- pH.

All'interno del *Project* di ciascuna specie, tramite il file "*Rotation*" (.rot), per ciascuna annata agraria, è stata impostata la data di semina. Tramite il file "*Management*" (.mgt) si è proceduto ad inserire i dati relativi alla fertilizzazione azotata: numero di interventi, epoca, modalità di applicazione, dose e forma di azoto.

Per la calibrazione del modello, è necessario fare riferimento a un ciclo colturale svoltosi in condizioni pressoché ottimali e in assenza di stress (PALA M. *et al.*, 1996). Pertanto, sempre in *Project*, tramite il file "*Crop*" (.crp), si è proceduto alla calibrazione dei parametri colturali, utilizzando, come riferimento, i dati fenologici e produttivi dell'annata agraria 2003/2004 per il grano duro Simeto e l'orzo Dasio, mentre per il grano tenero Bologna si è fatto riferimento all'annata agraria 2004/2005. Tali annate sono state ritenute idonee alla calibrazione del modello in quanto caratterizzate, in Sicilia, da un andamento termopluviometrico favorevole alle colture cerealicole (PALUMBO M. *et al.*, 2004; AA.VV., 2004; CODIANNI P. *et al.*, 2005). Oltre alle risultanze sperimentali delle annate agrarie sopra considerate, per la calibrazione sono stati utilizzati opportuni riferimenti bibliografici relativi alle specie considerate coltivate negli areali del Mediterraneo (DONATELLI M. *et al.*, 1997b; PALA M. *et al.*, 1996).

Per la simulazione della fase di emergenza della coltura, all'interno del file "*Crop*", è stato impostato il sub-modello "*Thermal time*".

Riguardo "*Attainable growth*", nella sezione "*Transpiration dependent growth*", è stato impostato il sub-modello Tanner & Sinclair per la "*Water use efficiency*" mentre, nella sezione "*Radiation dependent growth*", è stato impostato il sub-modello "*Photosynthetically Active Radiation*".

Nella sezione "*Canopy growth*", si è fatto riferimento a "*Leaf Area Index based*".

I moduli relativi a "*Vernalization*" e "*Photo-period*" non sono stati abilitati, ritenendo ininfluenti la vernalizzazione e il fotoperiodo per le varietà considerate. Similmente, nella scheda "*Hardiness*" non è stata abilitata la funzione "*Sensitive to cold temperatures*" in quanto, negli anni simulati, come tipicamente avviene nelle

aree collinari interne siciliane, non sono stati rilevati valori talmente bassi di temperatura da causare la morte delle colture cerealicole.

Nella seguente tabella si riportano i valori dei principali parametri adottati in seguito alla calibrazione e utilizzati per le successive simulazioni.

Tab. 5 – Principali parametri utilizzati per le simulazioni.

	Grano duro Simeto	Grano tenero Bologna	Orzo Dasio
Classification			
<i>Land use</i>	Small grain	Small grain	Small grain
<i>Life cycle</i>	Annual	Annual	Annual
<i>Stem Type</i>	Herbaceous	Herbaceous	Herbaceous
<i>Photosynthetic pathway</i>	C3	C3	C3
<i>Harvested biomass</i>	Seed	Seed	Seed
Thermal time accumulation			
<i>Base temperature (°C)</i>	0	0	0
<i>Cutoff temperature (°C)</i>	27	27	27
Transpiration			
<i>Canopy extinction coefficient for total (global) solar radiation</i>	0.50	0.50	0.50
<i>Evapotranspiration crop coefficient at full canopy</i>	1.15	1.20	1.05
<i>Leaf water potential at the onset of stomatal closure (J/kg)</i>	-1500.00	-1300.00	-2000.00
<i>Wilting leaf water potential (J/kg)</i>	-2200.00	-2000.00	-2500.00
<i>Maximum water uptake (mm/day)</i>	10.00	10.00	10.00
Attainable growth			
<i>Above ground biomass transpiration coefficient (K) for annuals (Pa)</i>	5.00	4.50	5.80
<i>Maximum Radiation Use Efficiency PAR (kg/MJ)</i>	0.0030	0.0032	0.33

Segue Tab. 5 – Principali parametri utilizzati per le simulazioni.

	Grano duro Simeto	Grano tenero Bologna	Orzo Dasio
Canopy growth			
Leaf Area Index Based			
<i>Maximum expected leaf area index (LAI) (m^2/m^2)</i>	5.00	5.00	5.00
<i>Specific Leaf Area at optimum temperature (SLA) (m^2/kg)</i>	25.00	25.00	25.00
<i>Fraction of max. LAI at physiological maturity</i>	0.50	0.50	0.50
<i>Stem/leaf partition coefficient</i>	3.00	3.00	3.00
Phenology			
<i>GDD Emergence ($^{\circ}C$)</i>	120	120	100
<i>GDD Maximum root depth ($^{\circ}C$)</i>	1150	1400	1000
<i>GDD End of vegetative growth ($^{\circ}C$)</i>	1270	1480	1100
<i>GDD Begin flowering ($^{\circ}C$)</i>	1200	1450	1050
<i>GDD Begin filling ($^{\circ}C$)</i>	1270	1480	1100
<i>GDD Physiological maturity ($^{\circ}C$)</i>	2000	2000	2000
<i>Adjustment factor for phenologic response to stress</i>	0.50	0.50	0.50
Root			
<i>Maximum rooting depth (m)</i>	0.90	0.90	0.90
Harvest			
<i>Unstressed Harvest Index</i>	0.48	0.48	0.48
<i>Sensitivity to water and nitrogen stress during flowering</i>	0.50	0.50	0.50
<i>Sensitivity to temperature stress during flowering</i>	0.50	0.50	0.50
Senescence			
<i>GDD Leaf Area Duration ($^{\circ}C$)</i>	700	700	700
<i>Leaf Area Duration sensitivity to water stress</i>	2.00	2.00	1.00

Per le tre specie in esame, nelle tabelle seguenti si riportano i dati simulati dal modello e i dati sperimentali osservati nelle prove di campo, relativi all'annata agraria di riferimento per la calibrazione.

Tab. 6 – Risultati della calibrazione: grano duro Simeto.

	Semina	Date in gg/mm/aaaa			Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione	Raccolta	
Dati Simulati	27/12/2003	29/04/2004	17/06/2004	-	5.24
Dati Osservati	27/12/2003	03/05/2004	-	29/06/2004	5.41

Tab. 7 – Risultati della calibrazione: grano tenero Bologna.

	Semina	Date in gg/mm/aaaa			Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione	Raccolta	
Dati Simulati	03/01/2005	23/05/2005	22/06/2005	-	4.87
Dati Osservati	03/01/2005	19/05/2005	-	28/06/2005	4.52

Tab. 8 – Risultati della calibrazione: orzo Dasio.

	Semina	Date in gg/mm/aaaa			Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione	Raccolta	
Dati Simulati	27/12/2003	20/04/2004	15/06/2004	-	6.51
Dati Osservati	27/12/2003	26/04/2004	-	23/06/2004	6.79

Per ciascuna coltura, riguardo le date di “Maturazione” e “Raccolta”, si precisa che il modello fornisce in output una data di maturazione (dato simulato) relativa al raggiungimento dei “gradi giorno” (*Growing Degree Days*, GDD) calcolati dalla semina, in funzione dell'andamento termico dell'annata. Il dato osservato di “Raccolta”, invece, indica la data in cui, successivamente all'essiccazione naturale della granella e in funzione dell'organizzazione aziendale, si è proceduto alla mietitura del campo sperimentale. Pertanto, il fatto che la data simulata di “Maturazione” preceda sempre di alcuni giorni la data effettiva di “Raccolta” indica, relativamente alla fenologia della coltura, una soddisfacente calibrazione del modello.

Anche riguardo la “Produzione”, i dati simulati sono molto simili ai dati osservati e gli scarti rilevati sono in linea con quanto riportato in analoghi lavori. Pertanto la calibrazione del modello, per le tre colture, si è ritenuta soddisfacente.

IV.3 Validazione del modello

Eseguita la calibrazione, si è proceduto alla validazione del modello.

Per il grano duro e l'orzo, la validazione è stata effettuata sulla base dei dati sperimentali relativi a quattro annate agrarie: dal 2004/2005 al 2007/2008. Per il grano tenero la validazione è stata effettuata sulla base di tre annate agrarie: dal 2005/2006 al 2007/2008.

Per ciascuna coltura, ogni annata agraria è stata simulata singolarmente, all'interno di un periodo di simulazione compreso tra il giorno 1 del mese di settembre e il giorno 1 del mese di luglio. Il contenuto idrico del suolo all'inizio della simulazione è stato impostato al valore corrispondente al punto di appassimento.

Nelle seguenti tabelle si riportano, per ciascuna coltura, i dati simulati e i dati osservati nelle diverse annate. Ai fini della validazione del modello, tali dati sono stati utilizzati per il calcolo degli indici di *fitting* (indici già illustrati al Capitolo II – paragrafo 2). Gli indici si riferiscono alla data di spigatura e alla produzione. La data di spigatura, ai fini del calcolo degli indici, è stata espressa in numero di giorni dalla semina.

Tab. 9 – Grano duro Simeto.

Annata agraria 2004/2005					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	03/01/2005	12/05/2005	21/06/2005	-	4.97
Dati Osservati	03/01/2005	09/05/2005	-	29/06/2005	5.35
Annata agraria 2005/2006					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	28/12/2005	28/04/2006	14/06/2006	-	5.28
Dati Osservati	28/12/2005	28/04/2006	-	26/06/2006	5.00
Annata agraria 2006/2007					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	04/01/2007	26/04/2007	11/06/2007	-	2.92
Dati Osservati	04/01/2007	26/04/2007	-	20/06/2007	1.70
Annata agraria 2007/2008					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	12/12/2007	15/04/2008	02/06/2008	-	2.57
Dati Osservati	12/12/2007	15/04/2008	-	13/06/2008	1.52

Tab. 10 – Grano duro Simeto: indici di *fitting*.

	RRMSE	EF	CRM	CD
Spigatura	1.24	0.93	-0.01	0.78
Produzione	24.72	0.78	-0.16	1.84

Tab. 11 – Grano tenero Bologna.

Annata agraria 2005/2006					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	27/12/2005	15/05/2006	14/06/2006	-	3.69
Dati Osservati	27/12/2005	20/05/2006	-	28/06/2006	3.30
Annata agraria 2006/2007					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	04/01/2007	12/05/2006	12/06/2006	-	1.47
Dati Osservati	04/01/2007	16/05/2007	-	21/06/2007	0.50
Annata agraria 2007/2008					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	11/12/2007	02/05/2008	03/06/2008	-	1.83
Dati Osservati	11/12/2007	04/05/2008	-	11/06/2008	0.74

Tab. 12 – Grano tenero Bologna: indici di *fitting*.

	RRMSE	EF	CRM	CD
Spigatura	2.76	0.57	0.03	0.65
Produzione	57.62	0.53	-0.54	1

Tab. 13 – Orzo Dasio.

Annata agraria 2004/2005					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	03/01/2005	03/05/2005	21/06/2005	-	6.43
Dati Osservati	03/01/2005	28/04/2005	-	27/06/2005	6.86
Annata agraria 2005/2006					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	27/12/2005	18/04/2006	13/06/2006	-	5.39
Dati Osservati	27/12/2005	18/04/2006	-	27/06/2006	5.10
Annata agraria 2006/2007					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	05/01/2007	16/04/2007	11/06/2007	-	5.31
Dati Osservati	05/01/2007	13/04/2007	-	23/06/2007	4.62
Annata agraria 2007/2008					
	Semina	Date in gg/mm/aaaa		Raccolta	Produzione (t/ha)
		Spigatura	Maturazione		
Dati Simulati	11/12/2007	03/04/2008	02/06/2008	-	4.18
Dati Osservati	11/12/2007	05/04/2008	-	12/06/2008	3.62

Tab. 14 – Orzo Dasio: indici di *fitting*.

	RRMSE	EF	CRM	CD
Spigatura	2.90	0.82	-0.01	0.68
Produzione	10.19	0.81	-0.05	1.94

Riguardo i dati sperimentali (“Dati Osservati”) utilizzati per la validazione del modello, va considerato che le annate agrarie 2006/2007 e 2007/2008, nell’areale dell’azienda Sparacia, non sono state favorevoli alle colture cerealicole.

Nell’annata agraria 2006/2007, l’assenza di piogge nel periodo autunnale ha ritardato le operazioni di semina e le piogge invernali sono state inferiori alla media poliennale. Ciò ha determinato uno scarso accostamento delle colture e quindi, in fase di raccolta, un ridotto numero di spighe per metro quadrato (PALUMBO M. *et al.*, 2007; SPINA A. *et al.*, 2007).

Nell’annata agraria 2007/2008, la siccità primaverile ha causato il fenomeno della “stretta” dei cereali (tipico degli areali mediterranei), determinando basse produzioni di granella, evidenziate anche dalla ridotta crescita in altezza delle piante, dal basso peso ettolitrico e dal basso peso unitario delle cariossidi (peso dei 1000 semi) (CODIANNI P. *et al.*, 2008; PALUMBO M. *et al.*, 2008).

Confrontando i dati simulati e i dati osservati e considerando gli indici di *fitting* risultanti, si evidenzia, per le tre colture, che le simulazioni condotte dal modello CropSyst risultano soddisfacenti in termini di durata del ciclo colturale e fenologia. Vi è un buon adattamento tra i dati simulati e i dati osservati, sia per la durata del ciclo colturale (confronto “Data di Maturazione” e “Data di Raccolta”), sia per la “Data di spigatura”. Pertanto, la validazione del modello si ritiene positiva per quanto riguarda la descrizione della fenologia delle tre colture in esame.

Per quanto attiene ai dati relativi alla “Produzione”, per la coltura del grano duro e per la coltura dell’orzo, i valori degli indici di *fitting* ottenuti sono analoghi a quelli riportati in altri lavori relativi alla validazione del modello CropSyst (BECHINI L. *et al.* 2006; PALA M. *et al.*, 1996; WANG Z.M. *et al.*, 2006). Per la coltura del grano tenero, il valore dell’indice RRMSE è da ritenersi molto elevato indicando quindi una scarsa concordanza tra i dati osservati e i dati simulati.

Il grano tenero, rispetto al grano duro e all’orzo, per raggiungere produzioni di granella soddisfacenti, necessita di un ciclo vegeto-produttivo più lungo, come evidenziato dal ritardo della data di spigatura. Inoltre il grano tenero presenta una minore efficienza d’uso dell’acqua per cui risente maggiormente lo stress idrico. Nelle annate agrarie 2006/2007 e 2007/2008, l’andamento termo-pluviometrico sfavorevole, ha determinato, soprattutto per il grano tenero, bassissime produzioni di granella, che il modello, sovrastimando i dati, non ha correttamente simulato. Ciò si

ritiene dovuto alla difficoltà del modello CropSyst nel simulare il contenuto idrico del suolo negli ambienti caldo-aridi caratterizzati da suoli con tessitura prevalentemente argillosa. In tale contesto pedoclimatico, il movimento dell'acqua nel suolo è di difficile simulazione a causa dei possibili movimenti dell'acqua in senso orizzontale (in genere trascurabili nei suoli con tessitura prevalentemente sabbiosa) e a causa delle crepacciature che costituiscono vie preferenziali del flusso idrico nell'infiltrazione verticale (DONATELLI M. *et al.*, 1997b).

In base agli indici di *fitting* ottenuti, la validazione del modello si ritiene soddisfacente per il grano duro e l'orzo, non sovrastimando eccessivamente la produzione di granella nelle annate climaticamente sfavorevoli. Per il grano tenero, meno adatto rispetto al grano duro e all'orzo agli ambienti caldo-aridi (per la tardiva spigatura e la maggior suscettibilità allo stress idrico), la sovrastima della produzione simulata dal modello risulta eccessiva, pertanto la validazione non è ritenuta soddisfacente.

Capitolo V

Scenari climatici futuri

V.1 I cambiamenti climatici e gli effetti sull'agricoltura

I vari fenomeni meteorologici estremi (temperature anomale rispetto alle stagioni considerate, alluvioni, siccità, ecc.), che dalla seconda metà del XX secolo ad oggi sono avvenuti in diverse parti del mondo, vengono da molti studiosi additati come effetti del cambiamento climatico dovuto all'inquinamento e quindi alle attività umane (CRUTZEN P., 2005). Osservando il fenomeno dell'*isola di calore* tipico delle aree urbane, è evidente che il microclima è fortemente condizionato dalle attività antropiche. Inoltre appare chiaro che determinate attività, ad esempio la deforestazione, influenzino il clima se condotte su vasta scala (a livello continentale) (FERRARA V., FARRUGGIA A., 2007).

La concentrazione atmosferica di anidride carbonica (CO₂) è aumentata di oltre il 30% rispetto al valore registrato nel 1880, ossia agli inizi dell'era industriale: da 280 ppm al valore attuale di 375 ppm. Tale aumento si reputa dovuto ad attività umane, quali il massiccio uso di combustibili fossili e il diverso uso del suolo con la deforestazione di vaste aree del Pianeta. Se le emissioni di CO₂ continueranno ad aumentare ai ritmi attuali (0.5% all'anno), alla fine del XXI secolo la concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica, il gas principale responsabile dell'effetto serra, sarà il doppio di quella attuale. Tale incremento della CO₂ modificherà il clima causando un aumento generalizzato della temperatura, alterando la distribuzione delle piogge e aumentando la frequenza di eventi climatici estremi quali periodi siccitosi e alluvioni (IPCC⁸ – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007).

Altri studiosi (MASI M. *et al.* 2010), invece, sostengono che i fenomeni meteorologici estremi rientrino in una normale variabilità meteorologica naturale (non rilevata nei secoli precedenti per mancanza di strumentazioni) e che l'inquinamento non influisca sul clima a livello globale. Ancor prima della comparsa

⁸ Organismo ufficiale delle Nazioni Unite che coordina le indagini sui cambiamenti climatici.

dell'Uomo, la storia del pianeta Terra è stata fortemente caratterizzata da imponenti cambiamenti climatici, si pensi alle ere glaciali e post-glaciali. Le cause di tali cambiamenti sembrano spiegabili in termini di variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre e in funzione dell'attività solare ma certamente non sono imputabili alle attività umane.

Indipendentemente dal fatto che sia veramente in atto o meno un cambiamento climatico e indipendentemente dalle possibili cause antropiche che lo abbiano determinato, è importante poter valutare gli effetti del clima sui sistemi colturali e le possibili ricadute in termini di produzione, soddisfacimento dei fabbisogni alimentari, risvolti economici e sociali (ROSENZWEIG C., PARRY M.L., 1994).

I sistemi biologici sono basati sulla fotosintesi e pertanto dipendono dalla radiazione solare. Gli effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura sono molteplici e tra loro correlati in maniera complessa. L'aumento della concentrazione atmosferica di CO₂, a parità di altri fattori, determina un incremento della fotosintesi da parte dei vegetali (KIMBALL B.A. *et al.*, 2002). Oltre la fotosintesi, ai fini dell'assimilazione netta di CO₂, va considerata anche la fotorespirazione che tende ad aumentare con l'aumento della temperatura (MORISON J.I.L., LAWLOR D.W., 1999). Inoltre, la variazione dell'andamento termico influisce sulla crescita (intesa come accumulo di biomassa) delle colture, modificandone i cicli vegeto-produttivi. La variazione della temperatura e la variazione della distribuzione delle piogge modificano diversi processi a carico del suolo (contenuto idrico, trasporto dei soluti, mineralizzazione della sostanza organica), influenzando conseguentemente l'assorbimento radicale e la nutrizione idrica e minerale delle colture (ROSENZWEIG C., HILLEL D., 1998).

Ragionando in termini di agro-ecosistema, vanno anche considerati gli effetti dei cambiamenti climatici sulle malerbe, sugli insetti fitofagi e sui patogeni, nonché sugli insetti pronubi e sui vari organismi utilizzati nel controllo biologico (GIORNATE FITOPATOLOGICHE 2010/2).

Gli effetti dei cambiamenti climatici dipendono dalle aree geografiche considerate. Ad esempio, alle latitudini più elevate, dove le basse temperature permettono lo svolgimento dell'attività agricola solo nel periodo primaverile-estivo, l'aumento della temperatura può determinare un allungamento del periodo utile per la crescita e lo sviluppo delle colture, favorendo oltre ad un aumento delle produzioni

anche la possibilità di coltivare nuove specie. Al contrario, negli ambienti già caratterizzati dall'aridità estiva, quali gli areali del Mediterraneo, ulteriori aumenti termici risulterebbero fortemente limitanti (OLESEN J.E., BINDI M., 2002).

Un altro elemento da cui dipendono gli effetti dei cambiamenti climatici in agricoltura è la tipologia dei sistemi colturali considerati. Dalle simulazioni condotte, con riferimento alla regione Toscana, risulta che i sistemi colturali di tipo conservativo (caratterizzati da ampie rotazioni e pratiche agronomiche quali il sovescio e la letamazione) si adatteranno meglio ai mutati scenari climatici mentre i sistemi intensivi risulteranno penalizzati per la maggiore richiesta di input chimici necessari a supportare l'agro-ecosistema in uno scenario climatico più favorevole ai patogeni. (MORIONDO M. *et al.* 2010).

V.2 Simulazione con il modello CropSyst

Per la seguente simulazione degli effetti dei futuri scenari climatici sulle colture cerealicole, i dati meteorologici utilizzati sono stati elaborati sulla base del modello climatico HADCM3, facendo riferimento a scenari futuri di emissione di CO₂ ipotizzati dall'IPCC e applicando serie storiche di dati climatici relativi alla Sicilia e al sito di Sparacia. Tale elaborazione è stata svolta dal gruppo di ricerca guidato dal Prof. Marco Bindi del Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali, del Suolo e dell'Ambiente Agroforestale (DI.P.S.A.) dell'Università degli Studi di Firenze.

Il modello HADCM3 (GORDON C. *et al.*, 2000; POPE V.D. *et al.*, 2000) è un modello climatico di circolazione generale (General Circulation Model, GCM) sviluppato dall'*Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, un istituto di ricerca climatologica del Servizio Meteorologico del Regno Unito (Met Office: www.metoffice.gov.uk). Schematicamente, il modello HADCM3 si compone di un modello di circolazione atmosferica (AGCM) e di un modello di circolazione oceanica (OGCM), basati su equazioni che descrivono i processi fisici, rispettivamente, della chimica dell'atmosfera e del ciclo del carbonio.

In generale, i modelli di simulazione climatica forniscono indicazioni evolutive del clima ma non stime assolute dei parametri atmosferici trattati, per cui non sono assimilabili ai modelli di previsione meteorologica, pur sfruttando gli stessi insiemi di equazioni (BARCAIOLI G. *et al.*, 2004).

Secondo il modello AGCM, la componente relativa all'atmosfera è rappresentata da 19 livelli con una risoluzione orizzontale di 2.5° in latitudine e 3.75° in longitudine mentre, secondo il modello OGCM, la componente oceanica è rappresentata da 20 livelli con una risoluzione orizzontale di 1.25° in latitudine e 1.25° in longitudine. Sulla base di tali elementi, le simulazioni del modello HADCM3 si riferiscono ad un reticolo (griglia) costituito da diverse maglie, ciascuna con una superficie dell'ordine delle centinaia di migliaia di chilometri quadrati (417 km x 278 km in prossimità dell'equatore; 295 km x 278 km alla latitudine di 45°). L'evoluzione climatica di un'ampia area è riferita in un punto, detto "punto griglia", rappresentativo dell'intera maglia di cui costituisce il baricentro. Ai fini delle applicazioni agronomiche in una specifica località, i dati climatici devono avere un maggior dettaglio geografico per cui, dalla scala globale, vanno riferiti alla scala

locale mediante una operazione di *downscaling* (MORIONDO M., BINDI M., 2006; BARCAIOLI G. *et al.*, 2004).

Gli scenari ipotizzati dall'IPCC si basano sulle future emissioni di anidride carbonica (considerata la principale responsabile dei cambiamenti climatici), previste in funzione di diverse ipotesi di sviluppo socio-economico. Tali scenari vengono indicati con le sigle A1, A2, B1 e B2. Gli scenari classificati con la lettera "A" corrispondono a uno sviluppo di tipo prettamente economico, mentre gli scenari classificati con la lettera "B" corrispondono a uno sviluppo più attento alle problematiche ambientali. La cifra "1" indica uno sviluppo incentrato sulla globalizzazione, ossia uno sviluppo che interessa allo stesso modo (nel bene o nel male) tutti i continenti. La cifra "2" indica uno sviluppo di tipo regionale, ossia diverso per le diverse aree del Pianeta (ad esempio, uno sviluppo più sostenibile in alcune aree e uno sviluppo meno sostenibile in altre). (IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, SRES, 2000).

In particolare, il D.I.P.S.A. di Firenze, nell'elaborazione tramite l'HADCM3, ha utilizzato gli scenari A2 e B2, considerati dall'IPCC come opzioni intermedie di incremento dei gas serra. Per entrambi gli scenari, A2 e B2, l'elaborazione ha generato due serie temporali di dati meteorologici giornalieri: la prima serie va dall'anno 2030 all'anno 2060 mentre la seconda serie riguarda il periodo 2070-2100.

Per il periodo 2030-2060, lo scenario B2 ipotizza una concentrazione atmosferica di CO₂ pari a 465 ppm mentre lo scenario A2 ipotizza una concentrazione di CO₂ di 515 ppm. Per il periodo 2070-2100 la concentrazione di CO₂ prevista da B2 è di 560 ppm mentre quella prevista da A2 è di 725 ppm.

Per l'area geografica in cui ricade il sito Sparacia (Sicilia centro-occidentale, area collinare interna), i dati meteorologici generati, riassunti nelle medie annue, sono riportati nella tabella seguente.

Tab. 15 – Medie annue dei dati meteorologici generati riferiti alla Sicilia centro-occidentale, area collinare interna.

Periodo	Scenario	[CO ₂] (ppm)	T max media (°C)	T min media (°C)	Pioggia (mm)	Radiazione (MJ/m ²)	ETP (mm)
2030-2060	B2	465	25.48	10.26	570	5931	1411
2030-2060	A2	515	25.73	10.43	542	5971	1428
2070-2100	B2	560	27.24	11.64	480	6019	1469
2070-2100	A2	725	28.82	12.92	457	6219	1555

Tramite il modello CropSyst, utilizzando i parametri individuati attraverso la precedente calibrazione e validazione, è stata condotta, sempre con riferimento al sito di Sparacia, una simulazione per le colture di grano duro e orzo nei periodi 2030-2060 e 2070-2100, applicando le concentrazioni di CO₂ ipotizzate dagli scenari B2 e A2 dell'IPCC e i dati meteorologici generati dal D.I.P.S.A. di Firenze mediante il modello HADCM3. Per il grano tenero, considerata la validazione non soddisfacente del modello, non si è ritenuto opportuno applicare il modello stesso per la simulazione della coltura negli scenari climatici futuri ipotizzati.

I valori relativi alla concentrazione atmosferica della CO₂, espressi in ppm, sono stati inseriti nel modello tramite le schede *Options*, *Submodels*, *Environment* e *CO₂* e tramite il file "*Crop*" (.crp) nella scheda *CO₂*.

Per ogni simulazione, la data di semina è stata impostata in funzione del contenuto idrico del suolo, tramite il file "*Rotation*" (.rot), selezionando, all'interno della scheda *Sowing event*, l'opzione *Conditional sowing date (computed)*. È stata impostata la data del 15 novembre come data a partire dalla quale il modello verifica la presenza delle condizioni idonee alla semina, in funzione dei valori inseriti nella scheda *Delay sowing condition* relativi all'evento piovoso significativo (10 mm) e al contenuto idrico del suolo (50% della capacità di campo).

Riguardo la concimazione azotata sono stati mantenuti i valori utilizzati nelle prove di campo: 36 kg·ha⁻¹ di N in presemina e 46 kg·ha⁻¹ di N in copertura.

Per ciascuno scenario (B2 e A2) e per ciascuna coltura, si riportano i valori medi del periodo di spigatura, della durata del ciclo colturale e della produzione

(espressa in t·ha⁻¹) ottenuti nei 30 anni di simulazione di ciascun periodo (2030-2060 e 2070-2100).

Tab. 16 – La coltura del grano duro e dell’orzo negli scenari futuri ipotizzati.

	Periodo	Scenario	Spigatura*	Durata* del ciclo colturale	Produzione (t/ha)
Grano duro Simeto	2030-2060	B2	117	164	4.25
	2030-2060	A2	114	157	3.73
	2070-2100	B2	112	152	3.45
	2070-2100	A2	110	146	3.02
Orzo Dasio	2030-2060	B2	102	155	5.20
	2030-2060	A2	99	149	4.84
	2070-2100	B2	95	141	4.46
	2070-2100	A2	92	133	3.91

* numero di giorni dalla semina.

Dall’esame dei valori sopra riportati, per entrambe le colture, si evidenzia la riduzione della durata del ciclo colturale e una minore resa di granella.

L’aumento della concentrazione atmosferica di CO₂ e l’aumento della radiazione solare, come previsti dagli scenari B2 e A2 nei periodi 2030-2060 e 2070-2100, dovrebbero determinare un aumento della fissazione della stessa CO₂ e quindi un aumento della produzione di biomassa. Ciò nonostante, l’aumento della temperatura e la riduzione delle piogge determinano invece una riduzione del ciclo colturale e uno stress idrico tale da limitare, complessivamente, la resa finale delle colture.

Nell’estendere le rese ipotizzate al complessivo comparto cerealicolo siciliano va considerato che tali valori produttivi fanno riferimento, sulla base della calibrazione e della validazione del modello, a prove parcellari e non a colture in pieno campo condotte secondo l’agrotecnica ordinaria delle aziende cerealicole siciliane. Inoltre le rese previste dal modello negli scenari futuri ipotizzati sono da ritenersi “potenziali” in quanto tutti i diversi e numerosi processi di competizione con la coltura (quali ad esempio malerbe, patogeni e fitofagi) non sono stati simulati.

Con riferimento alle prove parcellari condotte presso l'Azienda "Sparacia" nell'ambito della sperimentazione nazionale sui cereali, si può assumere per il grano duro Simeto una resa poliennale media di circa 5 t/ha e per l'orzo Dasio una resa di circa 6 t/ha. Con riferimento a tali valori, le produzioni ipotizzate nei diversi scenari futuri mostrano una riduzione percentuale paragonabile a quella evidenziata negli areali del Mediterraneo da diversi autori (KHALIL F.A. *et al.*, 2009; RINALDI M. *et al.*, 2007; TUBIELLO F.N. *et al.*, 2000).

I risultati ottenuti indicano la necessità di ricorrere a nuove varietà, maggiormente tolleranti nei confronti dello stress idrico e dotate di una migliore efficienza d'uso dell'acqua, per far fronte agli scenari climatici sfavorevoli alle colture del grano duro e dell'orzo.

Conclusioni

La ricerca condotta ha permesso di delineare gli aspetti salienti della modellistica dei sistemi colturali, trattandone i presupposti teorici, i limiti e le attuali applicazioni.

In particolare, l'obiettivo della ricerca è stato quello di verificare l'applicabilità dei modelli di simulazione ai sistemi colturali tipici delle aree collinari interne della Sicilia.

Con riferimento al sito di Sparacia (Cammarata – AG), il modello CropSyst, per la coltura del grano duro e dell'orzo, ha dato risultati soddisfacenti, sia riguardo la fenologia sia riguardo la produzione di granella. Per il grano tenero, coltura più sensibile allo stress idrico, il modello ha sovrastimato eccessivamente le produzioni, pur simulando correttamente l'andamento fenologico.

La soddisfacente calibrazione e validazione del modello, per le colture di grano duro e orzo, ha permesso la simulazione colturale nel contesto di scenari climatici futuri caratterizzati, rispetto al clima attuale, da temperature più elevate, piovosità ridotta e maggiore concentrazione atmosferica di CO₂.

I risultati di tale simulazione indicano, sia per il grano duro sia per l'orzo, una riduzione della durata del ciclo colturale e una minore produttività.

Il lavoro svolto, pur limitato dalla mancata disponibilità di alcuni dati sperimentali quali il contenuto idrico del suolo e la produzione di biomassa aerea, ha evidenziato comunque la possibilità di applicare i modelli di simulazione alle colture cerealicole comunemente praticate in Sicilia.

Ulteriori verifiche ed approfondimenti potranno consentire un valido utilizzo dei modelli di simulazione nelle attività di studio e di ricerca inerenti l'agrometeorologia, l'agronomia ambientale e la pianificazione territoriale.

Bibliografia

1. AA.VV., 2004. *La sperimentazione nazionale sulle varietà di orzo. I risultati 2003-2004*. L'Informatore Agrario 33/2004, 49-56.
2. AA.VV., 2005. *Varietà di orzo da zootecnia, da malto e a seme nudo. Risultati delle prove nazionali*. L'Informatore Agrario 32/2005, 43-56.
3. AA.VV., 2006. *Orzo da zootecnica: quali varietà scegliere. Risultati 2005-2006 delle prove nazionali*. L'Informatore Agrario 32/2006, 32-39.
4. AA.VV., 2007. *Quali varietà scegliere per l'orzo da zootecnia. Risultati delle prove nazionali 2006-2007 su 34 cultivar*. L'Informatore Agrario 31/2007, 64-70.
5. AA.VV., 2008. *Le varietà per le semine 2008 di orzo zootecnico. Risultati delle prove nazionali 2007-2008*. L'Informatore Agrario 31/2008, 34-41.
6. ACOCK B., ACOCK M.C., 1991. *Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators*. Agron. J., 83,1, 56-61.
7. ACUTIS M., DONATELLI M., 2003. *SOILPAR2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions*. European Journal of Agronomy, 18, 373-377.
8. ACUTIS M., BASILE A., BRENNIA S., TERRIBILE F., giugno 2007. *Modellizzazione della dinamica dell'acqua e dell'azoto nei suoli agricoli lombardi – Progetto ARMOSA*. Regione Lombardia, n. 65 giugno 2007.
9. ACUTIS M., 2010. *Introduzione al corso (sistema, modello, tipologie di modelli). Corso "Elementi di base di modellistica agrometeorologica e dei sistemi colturali"*. AIAM/SIA, Torino 22-26 febbraio 2010.
10. BALDONI R., GIARDINI L., 2000. *COLTIVAZIONI ERBACEE – Cerali e Proteaginose*. Patron Editore, Bologna. 409 pp.
11. BANKS J., CARSON J.S, 1984. *Discrete-eventy system simulation*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 514 pp.
12. BARBERIS R., ALESSIO G., FABIETTI G., REGIS F., ROAGNA C., 2001. *Il censimento dei principali modelli utilizzati per il suolo*. In: "Modellistica e qualità ambientale dei suoli". Coordinamento R. Barberis e A. Pugliese. Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA).
13. BARCAIOLI G., CRISCI A., ZIPOLI G., 2004. *Costruzione di scenari climatici futuri ad alta risoluzione destinati allo studio del loro effetto sull'agricoltura italiana*.

- In “Climagri – Cambiamenti climatici e agricoltura – Risultati attività II anno”. UCEA, Roma giugno 2004. ISBN 88-901472-1-0.
14. BECHINI L., BOCCHI S., MAGGIORE T., CONFALONIERI R., 2006. *Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (Triticum aestivum L.)*. Environmental Modelling & Software 21, 1042-1054.
 15. BECHINI L., 2010. *Il modello di simulazione CropSyst (ver. 4)*. Corso “Elementi di base di modellistica agrometeorologica e dei sistemi colturali”. AIAM/SIA, Torino 22-26 febbraio 2010.
 16. BINDI M., 2010. *Applicazione dei modelli di simulazione allo studio dell’impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi colturali*. Corso “Elementi di base di modellistica agrometeorologica e dei sistemi colturali”. AIAM/SIA, Torino 22-26 febbraio 2010.
 17. BONCIARELLI F., 1995. *Fondamenti di agronomia generale*. Edagricole, Bologna. 372 pp.
 18. BOOTE K.J., JONES J.W., HOOGENBOOM G., 1998. *Simulation of crop growth: CROPGRO Model*. In: Peart R.M., Curry R.B. (eds): Agricultural Systems Modeling Simulation, Chapter 18, 651-692. Marcel Dekker Inc., New York.
 19. BOUNIOLS A., CABELGUENNE M., JONES C.A., CHAMALET A., CHARPENTEAU J.L., MARTY J.R., 1991. *Simulation of soy-bean nitrogen nutrition for a silty clay soil in southern France*. Field Crop Research 26, 19-34.
 20. BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.H., RUGET F., NICOUILLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRETT F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.M., MEYNARD Y.M., DELECOLLE R., 1998. *STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. 1. Theory and parametrization applied to wheat and corn*. Agronomy, 18, 311-346.
 21. BRISSON N., GARY C., JUSTES E., ROCHE R., MARY B., RIPOCHE D., ZIMMER D., SIERRA J., BERTUZZI P., BURGER P., BUSSIÈRE F., CABIDOCHÉ Y.M., CELLIER P., DEBAEKE P., GAUDILLÈRE J.P., HÉNAULT C., MARAUX F., SEGUIN F.B., SINOQUET H., 2003. *An overview of the crop model STICS*. European Journal of Agronomy, 18, 309-332.
 22. BRISTOW K.L., CAMPBELL G.S., 1984. *On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature*. Agricultural and Forest Meteorology 31, 159-166.
 23. CABELGUENNE M., DEBAEKE P., BOUNIOLS A., 1991. *EPICphase, a version of the EPIC model simulating the effects of water and nitrogen stress on biomass*

- and yield, taking account of development stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soya and winter wheat. Agric. Syst.*, 60, 3, 175-196.
24. CAMPBELL G.S., 1985. *Soil Physics with Basic*. Elsevier, Amsterdam.
 25. CICOGNA A., GANI M., DANUSO F., 2000. *Applicazioni modellistiche per la gestione e la pianificazione delle risorse idriche del territorio*. Bollettino Società Italiana Scienza del Suolo, 49, 3, 505-528.
 26. CODIANNI P., GALLO A., CAMBREA M., LICCIARDELLO S., LOMBARDO G.M., GALLO G., DI PRIMA G., POMA I., INFANTINO S., CATTIVELLI L., 2005. *Risultati della 32^a sperimentazione nazionale: grano tenero – Puglia, Basilicata e Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 33/2005, 40-42.
 27. CODIANNI P., DE VITA P., CARONE F., CAMBREA M., LOMBARDO G.M., LICCIARDELLO S., GALLO G., DI PRIMA G., POMA I., GIANCIPOLI G., CATTIVELLI L., 2006. *Risultati della 33^a sperimentazione nazionale: grano tenero – Puglia, Campania, Basilicata e Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 33/2006, 40-42.
 28. CODIANNI P., DE VITA P., CATTIVELLI L., PALUMBO M., LICCIARDELLO S., GALLO G., LOMBARDO G.M., DI PRIMA G., POMA I., 2008. *Risultati della 35^a sperimentazione nazionale: grano tenero – Puglia, Campania, Basilicata e Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 32/2008, 42.
 29. COLBACH N., SESTER M., DÜRR C., DARMENCY H., 2007. *Modelling the effects of cropping systems on the seed bank dynamics and the emergence of weed beet*. Ecological Modelling 204, 47-58.
 30. COLELLA A.M., O' SULLIVAN M.J., CARLINO D.J., 1974. *Systems simulation, methods and applications*. Lexington Books, Lexington, Massachusetts, USA. 292 pp.
 31. CONFALONIERI R., BECHINI L., 2004. *A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa*. European Journal of Agronomy 21, 223-237.
 32. CONFALONIERI R., BOCCHI S., 2005. *Evaluation of CropSyst for simulating the yield of flooded rice in northern Italy*. European Journal of Agronomy 23, 315-326.
 33. CONFALONIERI R., 2007. *Modellizzazione dei sistemi colturali. Cosa sta accadendo?* Italian Journal of Agrometeorology (1) – supplemento – Quaderno degli Abstract del 10° Convegno nazionale di Agrometeorologia – AIAM.
 34. CONFALONIERI R., BELLOCCHI G., BOSCHETTI M., ACUTIS M., 2009a. *Evaluation of parameterization strategies for rice modeling*. Spanish Journal of Agricultural Research, 7(3), 680-686.

35. CONFALONIERI R., ACUTIS M., BELLOCCHI G., DONATELLI M., 2009b. *Multi-metric evaluation of the models WARM, Cropsyst, and WOFOST for rice*. Ecological Modelling 220, 1395-1410.
36. CONFALONIERI R., 2010a. *Valutare modelli di simulazione*. Corso “Elementi di base di modellistica agrometeorologica e dei sistemi colturali”. AIAM/SIA, Torino 22-26 febbraio 2010.
37. CONFALONIERI R., 2010b. *Modellizzazione. Sistemi Colturali. CropSyst – crescita e sviluppo delle colture. Analisi e Modellistica Agronomico-Ambientale*. Università degli Studi di Milano.
38. CONSORZIO DI RICERCA “GIAN PIETRO BALLATORE”, 2008. *Osservatorio della Filiera Cerealicola Siciliana – quarto rapporto – La filiera del grano duro in Sicilia*. Palermo, giugno 2008.
39. CRUTZEN P., 2005. *Benvenuti nell’Antropocene. L’uomo ha cambiato il clima, la Terra entra in una nuova era*. Segrate (Milano), Mondadori. 94 pp. ISBN 88-04-53730-2.
40. DANUSO F., GANI M., CONTIN M., GIOVANARDI R., 1994. *BIDRICO: un supporto informatico alle decisioni irrigue*. L’Informatore Agrario, 20, 45-49.
41. DANUSO F., GANI M., GIOVANARDI R., 1995. *Field water balance: BidriCo 2*. In: Preira L.S., Van de Broek B.J., Kabat P., Allen R.G. (eds): *Crop Water Models in Pratiche*, 49-73. Wageningen Pers, Wageningen.
42. DANUSO F., GIOVANARDI R., FRANZ D., 1998. *Il reperimento e trattamento delle informazioni agro-ambientali*. In: Paolillo P.L. (ed): *Al confine del nord-est*, 136-172. Forum, Udine.
43. DANUSO F., FRANZ D., BIGOT L., BUDOI G., 1999b. *CSS: a modular software for cropping system simulation*. Proc. Int. Symposium Modelling Cropping Systems, 287-288. Lleyda, 21-23 June.
44. DANUSO F., FRANZ D., GIOVANARDI R., 1999a. *Valutazione per punti e per aree omogenee del rilascio in falda di azoto da terreni agricoli*. Atti 3° Conferenza Nazionale ASITA. Napoli, 9-12 novembre.
45. DANUSO F., DONATELLI M., 2002. *La simulazione dei sistemi colturali*. In: “Verso un approccio integrato allo studio dei sistemi colturali”, p. 73-119. A cura di E. Bonari e P. Ceccon. Franco Angeli, Milano.
46. DAVIS A.S., DIXON P.M., LIEBMAN M., 2004. *Using matrix models to determine cropping system effects on annual weed demography*. Ecological Applications 14: 655-668.

47. DONATELLI M., 1995. *Sistemi nella gestione integrata delle colture – Appunti dalle lezioni*. Pubblicazione speciale dell'Istituto Sperimentale Agronomico, ISA – Sezione di Modena. <http://www.isci.it/isciTC/references/>.
48. DONATELLI M., CEOTTO E., MARCHETTI R., 1997a. *CSYMBA: un ambiente software integrato per lo sviluppo di modelli modulari per la simulazione di sistemi colturali*. *Agricoltura Ricerca*, 172, 13-20.
49. DONATELLI M., STÖCKLE C., CEOTTO E., RINALDI M., 1997b. *Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy*. *European Journal of Agronomy* 6, 35-45.
50. DONATELLI M., STÖCKLE C., NELSON R., GARDI C., BITTELLI M., CAMPBELL G., 1999. *Using the software cropsyst and arcview in evaluating the effect of management in cropping systems in two areas of the low Po valley, Italy*. *Rev de Cien. Agr.*, 22, 87-108.
51. DONATELLI M., BELLOCCHI G., 2001. *Il modello per la simulazione di sistemi colturali CROPSYST e gli strumenti collegati*. In: “Modellistica e qualità ambientale dei suoli”. Coordinamento R. Barberis e A. Pugliese. Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA).
52. DONATELLI M., ACUTIS M., DANUSO F., 2003a. *Valutazione dei modelli di simulazione*. In “Mobilità dei prodotti fitosanitari nel suolo”. A cura di E. Capri e R. Francaviglia. Quaderni del Progetto P.A.N.D.A. diretti da P. Sequi, numero 2, p.75-96. Estratto da “Agricoltura e Ricerca” – Roma – numero 190, novembre/dicembre 2002.
53. DONATELLI M., BELLOCCHI G., FONTANA F., 2003b. *Radest3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables*. *European Journal of Agronomy*, 18, 363-367.
54. DONATELLI M., ACUTIS M., BELLOCCHI G., FILA G., 2004. *New indices to quantify patterns of residuals produced by model estimates*. *Agronomy Journal* Vol. 96 No. 3, p. 631-645.
55. DRAGO A., CARTABELLOTTA D., LO BIANCO B., LOMBARDO M., 2000. *Atlante climatologico della Sicilia*. Regione Siciliana (Palermo).
56. EASTERLING W.E., ROSENBERG N.J., MCKENNEY M.S., JONES C.A., DYKE P.T., WILLIAMS J.R., 1992. *Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model*. *Agric. For. Meteorol.*, 59, 1-2. 17-34.
57. EL AFANDI G., OUDA S.A., KHALIL F.A., EWIS M.M., 2010. *Using CropSyst Model to Predict Barley Yield under Climate Change Conditions in Egypt: II. Simulation of the Effect Rescheduling Irrigation on Barley Yield*. *The African*

- Journal of Plant Science and Biotechnology 4 (Special Issue 1), 6-10. Global Science Books.
58. FERRARA V., FARRUGGIA A., 2007. *Clima: istruzioni per l'uso*. Milano, Edizioni Ambiente. 320 pp, ISBN 978-88-98014-43-1.
 59. FIEROTTI G., 1997. *I suoli della Sicilia*. 359 pp, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
 60. FILA G., BELLOCCHI G., ACUTIS M., DONATELLI M., 2003. *IRENE: a software to evaluate model performance*. European Journal of Agronomy, Volume 18, Issues 3-4, 369-372.
 61. FIOCCA F., 2005. *Monitoraggio dell'erosione interrill nell'area sperimentale di Sparacia*. Tesi di laurea. Relatore Ferro V.. Facoltà di Agraria – Università degli Studi di Palermo.
 62. FOX D.G., 1981. *Judging air quality model performance: A summary of the AMS Workshop on Dispersion Models Performance*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 62:599-609.
 63. FRAISSE C.W., SUDDUTH K.A., KITCHEN N.R., 1998. *Evaluation of crop models to simulate site-specific crop development and yield*. Proc. 3rd International Conference on Precision Agriculture. July 19-22, St. Paul, MN
 64. GIARDINI L., BERTI A., MORARI F., 1998. *Simulation of two cropping systems with EPIC and CropSyst models*. Ital. J. Agron. 2 (1), 29-38.
 65. GIORNATE FITOPATOLOGICHE 2010/2. Cervia (Ravenna), 9 – 12 marzo 2010. Organizzate dall'Università degli Studi di Bologna (DiProVal – Dipartimento di Protezione e Valorizzazione Agroalimentare, DiSTA – Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali) e da Agrofarma.
 66. GODWIN D.C., JONES C.A., 1991. *Nitrogen dynamics in soil plant system*. In: Hanks J., Ritchie J.T. (Eds), Modeling plant and soil system. American Society of Agronomy 31, 297-302.
 67. GORDON C., COOPER C., SENIOR C.A., BANKS H., GREGORY J.M., JOHNS T.C., MITCHELL J.F.B, WOOD R.A., 2000. *Simulation of sea surface temperature (SST), sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments*. Clim. Dyn. 16: 147-168.
 68. GREENWOOD D.J., LEMAIRE G., GOSSE G., CRUZ P., DRAYCOTT A., NEETESON J.J., 1990. *Decline in percentage N of C₃ and C₄ crops with increasing plant mass*. Ann. Bot. 66, 425-436.

69. HABEKOTTÉ B., 1997. *Options for increasing seed yield of winter oilseed rape (Brassica napus L.): a simulation study*. Field Crops Research 54, p. 109-126.
70. HUDA A.K.S., ONG C.K., REIFSNYDER W.S., DARNHOFER T.O. (eds.), 1989. *Crop simulation models and some implications for agroforestry systems*. Meteorology and Agroforestry Proceedings of an International Workshop on the Application of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management. Nairobi, Kenya, 9-13 February.
71. IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*. Cambridge University Press, Cambridge.
72. IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri R.K., Reisinger A., (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. Pp 104.
73. JONES J.W., HOOGENBOOM G., PORTER C.H., BOOTE K.J., BATCHELOR W.D., HUNT L.A., WILKENS P.W., SINGH U., GIJSMAN A.J., RITCHIE J.T., 2003. *The DSSAT Cropping System Model*. European Journal of Agronomy, 18, 235-265.
74. JORGENSEN S.E., KAMP-NIELSEN L., CHRISTENSEN T., WINDOLF-NIELSEN J., WESTERGAARD B., 1986. *Validation of a prognosis based upon a eutrophication model*. Ecological Modelling 32, 165-182.
75. KHALIL F.A., FARAG H., EL AFANDI G., OUDA S.A., 2009. *Vulnerability and adaptation of wheat to climate change in Middle Egypt*. 13th Conference on Water Technology, 12-15 March, Hurgada, Egypt, pp 71-88.
76. KEATING B.A., CARBERRY P.S., HAMMER G.L., PROBERT M.E., ROBERTSON M.J., HOLZWORTH D., HUTH N.I., HARGREAVES J.N.G., MEINKE H., HOCHMAN Z., MCLEAN G., VERBURG K., SNOW V., DIMES J.P., SILBURN M., WANG E., BROEN S., BRISTOW K.L., ASSENG S., CHAPMAN S., MCCOWN R.L., FREEBAIRN D.M., SMITH C.J., 2003. *An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation*. European Journal of Agronomy, 18, 267-288.
77. KIMBALL B.A., KOBAYASHI K., BINDI M., 2002. *Response of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment*. Adv. Agron. 77, 293-368.
78. LEENHARDT D., VOLTZ M., RANBAL L., 1995. *A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application*. European Journal of Agronomy, 4, 1-14.
79. LEFFELAAR P.A., FERRARI T.J., 1989. *Some elements of dynamic simulation*. In: "Simulation and systems management in crop protection". In: Rabbinge R.,

- Ward S.A., van Laar H.H. (eds.). Simulation Monograph 32, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
80. LETO C., 2010. *Herbaceous crops in sustainable crop systems in Sicily*. Workshop “Sicilian agriculture and new prospects for turfgrass in the Mediterranean” (Palermo – Facoltà di Agraria, 20 maggio 2010).
81. LOAGUE K.M., GREEN R.E., 1991. *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application*. J. Contam. Hydrol. 7, 51-73.
82. MARTORANA F., BELLOCCHI G., 1999. *A review of methodologies to evaluate agroecosystem simulation models*. Ital. J. Agron. 3, 19-39.
83. MARLETTO V., ZINONI F., FILIPPI N., ANGELELLI A., LARUCCIA N., LEGA P., TONELLI T., 1993. *CRITERIA: an integrated geographical system for soil water monitoring* (poster summary). Proc. of the JRC-IRSA Conf. on the MARS project, Belgirate, 17-18 novembre 1993.
84. MASI M., MARIANI L., TEODORO G., 2010. *No slogan. L'eco ottimismo ai tempi del catastrofismo*. Cortona (Arezzo), Sangel Edizioni. 100 pp, ISBN 8890427132.
85. MENDOZA G.A., 1987. *A mathematical model for generating land-use allocation alternatives for agroforestry systems*. Agroforest. Syst., 5, 4, 443-453.
86. MONTEITH J.L., 1965. *Evaporation and the environment*. In: State and movement of water in living organisms. XIX Symposium Soc. for Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press. 205-234 pp.
87. MONTEITH J.L., 1977. *Climate and the efficiency of crop production in Britain*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. Great Britain, 81: 277-294.
88. MORARI F., BERTI A., BORIN M., GIARDINI L., 2000. *CropSyst model in simulating cropping systems with different input levels*. 9th International Conference on the UN-FAO ESCORENA network, 6-9 September, Gargnano del Garda (BS), Italy, 257-262.
89. MORIONDO M., BINDI M., 2006. *Comparison of temperatures simulated by GCMs, RCMs and statistical downscaling and their potential application in studies of future crop development*. Climatic Research 30: 149-160.
90. MORIONDO M., PACINI C., TROMBI C., VAZZANA C., BINDI M., 2010. *Sustainability of dairy farming system in Tuscany in a changing climate*. European Journal of Agronomy 32, 80-90.

91. MORISON J.I.L., LAWLOR D.W., 1999. *Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth*. Plant Cell Environ. 22, 659-682.
92. OLESEN J.E., BINDI M., 2002. *Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy*. European Journal of Agronomy 16, 239-262.
93. OUDA S.A., KHALIL F.A., EL AFANDI G., EWIS M.M., 2010. *Using CropSyst Model to Predict Barley Yield under Climate Change Conditions in Egypt: I. Model Calibration and Validation under Current Climate*. The African Journal of Plant Science and Biotechnology 4 (Special Issue 1), 1-5. Global Science Books.
94. PALUMBO M., DI PRIMA G., GALLO G., LOMBARDO G.M., SCARPELLO C., VIRZÌ N., 2004. *Risultati 2003-04 della rete nazionale: grano duro – Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 36/2004, 20-22.
95. PALUMBO M., GALLO G., LOMBARDO G.M., RANDAZZO B., SCARPELLO C., VIRZÌ N., 2005. *Risultati 2004-05 della rete nazionale: grano duro – Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 35/2005, 20-22.
96. PALUMBO M., GALLO G., LOMBARDO G.M., DI PRIMA G., STRINGI L., VIRZÌ N., 2006. *Risultati 2005-06 della rete nazionale: grano duro – Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 35/2006, 14-16.
97. PALUMBO M., DI PRIMA G., GALLO G., LOMBARDO G.M., STRINGI L., VIRZÌ N., 2007. *Risultati 2006-07 della rete nazionale: grano duro – Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 34/2007, 17-19.
98. PALUMBO M., DI PRIMA G., GALLO G., LOMBARDO G.M., STRINGI L., VIRZÌ N., 2008. *Risultati 2007-08 della rete nazionale: grano duro – Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 34/2008, 39-40.
99. PALA M., STOCKLE C.O., HARRIS H.C., 1996. *Simulation of durum wheat (Triticum turgidum ssp. Durum) growth under different water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using CropSyst*. Agricultural Systems 51, 147-163.
100. PECETTI L., HOLLINGTON P.A., 1997. *Application of the CERES-Wheat simulation model to durum wheat in two diverse Mediterranean environments*. European Journal of Agronomy 6, 125-139.
101. PENNING DE VRIES F.W.T., VAN LAAR H.H., 1982. *Simulation of Plant Growth and Crop Production*. Simulation Monograph, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 308 pp.

102. POGNA N., 2008. *La nuova era dell'agricoltura*. In: CONSORZIO DI RICERCA "GIAN PIETRO BALLATORE". *Osservatorio della Filiera Cerealicola Siciliana – quarto rapporto – La filiera del grano duro in Sicilia*. Palermo, giugno 2008
103. POPE V.D., GALLANI M.L., ROWNTREE P.R., STRATTON R.A., 2000. *The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3*. *Lim Dyn* 16: 123-146.
104. PRIESTLEY C.H.B., TAYLOR R.J., 1972. *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. *Mon. Weath. Rev.* 100: 81-92.
105. QUINONES H., CABELGUENNE M., 1990. *Use of EPIC to study cropping systems. II. Improved simulation*. *Agr. MED.*, 120, 3, 241-248.
106. REGIONE SICILIANA – SIAS – Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano.
107. RICHTER G.M., ACUTIS M., TREVISIOL P., LATIRI K., CONFALONIERI R., 2010. *Sensitivity analysis for a complex crop model applied to Durum wheat in the Mediterranean*. *European Journal of Agronomy* 32, 127-136.
108. RINALDI M., D'ANDREA L., RUGGIERI S., GAROFALO P., MORIONDO M., VENTRELLA D., 2007. *Influenza dei cambiamenti climatici sulla coltivazione del frumento duro*. Ricerca eseguita nell'ambito del Progetto "Evoluzione dei sistemi colturali a seguito di cambiamenti climatici" (CLIMESCO), D.D. MIUR del 20/02/2006, prot. n 285.
109. RIVINGTON M., MATTHEWS K.B., BELLOCCHI G., BUCHAN K., STÖCKLE C.O., DONATELLI M., 2007. *An integrated assessment approach to conduct analyses of climate change impacts on whole-farm systems*. *Environmental Modelling & Software* 22, 202-210.
110. ROSENZWEIG C., PARRY M.L., 1994. *Potential impact of climate change on world food supply*. *Nature* 367, 133-138.
111. ROSENZWEIG C., HILLEL D., 1998. *Climate Change and the Global Harvest*. Oxford University Press, Oxford, UK.
112. ROSS P.J., BRISTOW K.L., 1990. *Simulating water movement in layered and gradational soils using the Kirchhoff transfor*. *Soil Science Society of America Journal*. 54, 1519-1524
113. SACCO D., 2010. *Dinamica dell'azoto nel suolo e suo assorbimento*. Corso "Elementi di base di modellistica agrometeorologica e dei sistemi colturali". AIAM/SIA, Torino 22-26 febbraio 2010.

- 114.SAXTON, K.E., RAWLS W.J., ROMBERGER J.S., PAPENDICK R.I., 1986. *Estimating generalized soil-water characteristics from texture*. Soil Science Society of America Journal. 50(4):1031-1036.
- 115.SIAS - SERVIZIO INFORMATIVO AGROMETEOROLOGICO SICILIANO dell'Assessorato Regionale delle Risorse Agricole e Alimentari – Palermo.
- 116.SINCLAIR T.R., MOSCA G., BONA S., 1993. *Simulation analysis of variation among seasons in winter yields*. J. Agron. Crop Sci., 170,3, 202-207.
- 117.SMITH P., WHITMORE A., WECHSUNG F., DONATELLI M., COLEMAN K., YIN X., CRAMER W., SMITH J., AGOSTINI F., 1999. *A regional-scale tool for examining the effects of global change on agro-ecosystems: the MAGEC project*. Proceeding of the Symposium Modelling Cropping Systems, 257-258. Lleida, Spain.
- 118.SPAN J.D., 1982. *BASIC microcomputer models in biology*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts. 354 pp.
- 119.SPINA A., CARONE F., CATTIVELLI L., CODIANNI P., DI PRIMA G., GALLO G., LOMBARDO G.M., MATTEU L., POMA I., PALUMBO M., 2007. *Risultati della 34^a sperimentazione nazionale: grano tenero – Puglia, Campania, Basilicata e Sicilia*. Supplemento a L'Informatore Agrario 32/2007, 40-42.
- 120.STÖCKLE C.O., 1989. *Simulation models in agriculture: From cellular level to field scale*. Proceedings of the 1989 Summer Computer Simulation Conference, Austin, Texas, 24-27 July.
- 121.STÖCKLE C.O., CAMPBELL G.S., 1989. *Simulation of crop response to water and nitrogen: an application example using spring wheat*. Trans. ASAE 32, 66-74.
- 122.STÖCKLE C.O., MARTIN S.A., CAMPBELL G.S., 1994. *CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets*. Agr. Syst., 46, 3, 335-359.
- 123.STÖCKLE C.O., DEBAEKE P., 1997. *Modelling crop nitrogen requirements: a critical analysis*. European Journal of Agronomy 7, 161-169.
- 124.STÖCKLE C.O., DONATELLI M., NELSON R., 2003. *CropSyst, a cropping systems simulation model*. European Journal of Agronomy 18, 289-307.
- 125.SUPIT I., HOOIJER A.A., VAN DIEPEN C.A., 1994. *System description of the Wofost 6.0 crop simulation model implemented in CGMS*. Joint Research Centre European Commission, 146. Agricultural series, CL-NA-15956-EN-C.
- 126.SUPIT I., 1997. *Predicting national wheat yields using a crop simulation and trend models*. Agricultural and Forest Meteorology 88, 199-214.

127. TANNER C.B., SINCLAIR T.R., 1983. *Efficient water use in crop production: research or research?* In: Taylor H.M., Jordan W.R., Sinclair T.R. (eds.), *Limitations to efficient water use in crop production*, ASA, Madison, WI pp. 1-27.
128. THORNLEY J.H.M., JOHNSON I.R., 1990. *Plant and crop modelling, a mathematical approach to plant and crop physiology*. Clarendon Press, Oxford, Great Britain. 669 pp.
129. THORNTON P.K., DENT J.B., CALDWELL R.M., 1990. *Application and issues in the modelling of intercropping systems*. *Agric. Ecosyst. Environ.* 31, 2, 133-146.
130. THORNTON P.K., 1991. *Application of crop simulation models in agricultural research and Paper Series*. International Fertilizer Development Center, P-15:26.
131. TRENBATH B.R., PROCTOR J. (eds), 1989. *The use of mathematical models in the development of shifting cultivation*. *Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems*, 353-369.
132. TSAI Y.J., JONES J.W., MISHOE J.W., 1987. *Optimizing multiple cropping systems: a systems approach*. *Trans. ASAE*, 30, 6, 1554-1561.
133. TUBIELLO F.N., DONATELLI M., ROSENZWEIG C., STOCKLE C.O., 2000. *Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations*. *European Journal of Agronomy* 13, 179-189.
134. TUBIELLO F.N., EWERT F., 2002. *Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change*. *European Journal of Agronomy* 18, 57-74.
135. VAN GENUCHTEN R.J., HUTSON J.L., 1989. *Leaching estimation and chemistry model: a process based model for water and solute movement, transformation, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone continuum*. Water Resources Inst., Center for Environ. Research, Cornell Univ. New York, NY, USA.
136. VAN KEULEN H., SELIGMAN N.G., 1987. *Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop*, Pudoc, Wageningen.
137. VAN ITTERSUM M.K., DONATELLI M., JETTEN T.H., 2002. *Towards an integrated system for agro-ecological and environmental modeling*. Proc. 7th ESA Congress, 335-336. Cordoba, Spain.
138. VIGGIANI P., 2007. *Fumento in Italia*. In: "il grano". A cura di R. Angelini e N. Di Fonzo; Bayer CropScience S.r.l.; ART Servizi Editoriali S.p.A., Bologna.

-
139. WANG Z.M., ZHANG B., LI X.Y, SONG K.S., LIU D.W., ZHANG S.Q., 2006. *Using CropSyst to simulate spring wheat growth in black soil zone of Northeast China*. *Pedosphere* 16(3): 354-361, 2006.
140. WILLIAMS J.R., JONES C.A., DYKE P.T., 1984. *The EPIC Model and Its Application*. In: *Proceedings of ICRISAT-IBSNAT-SMSS Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer (Hyderabad, India, March 21-26, 1983)*, 111-121.
141. ZINONI F., DUCCO G., MARLETTO V., VAN SOETENDAEL M., 2001. *Uso del modello CRITERIA per la valutazione del rischio di inquinamento agricolo dei corpi idrici*. In: "Modellistica e qualità ambientale dei suoli". Coordinamento R. Barberis e A. Pugliese. Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA).
142. Appunti del Corso "*Elementi di base di modellistica agrometeorologica e dei sistemi colturali*". Corso organizzato da AIAM (Associazione Italiana di Agrometeorologia) e SIA (Società Italiana di Agronomia), svoltosi a Torino, dal 22/02/2010 al 26/02/2010, della durata di 32 ore corrispondenti a 4 c.f.u..
143. <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>
144. <http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst>
145. www.istat.it
146. www.metoffice.gov.uk

Indice

Introduzione	1
Capitolo I	
Principali aspetti della cerealicoltura	3
Capitolo II	
I modelli di simulazione del sistema colturale	10
II.1 Il sistema colturale e la rappresentazione tramite i modelli	10
II.2 Sviluppo del modello, calibrazione e validazione	16
II.3 La simulazione dei sistemi colturali: applicazioni e limiti	25
II.4 Breve excursus sulla modellistica, situazione attuale e possibili sviluppi	31
Capitolo III	
Il modello CropSyst	35
III.1 Descrizione generale del modello	35
III.2 Crescita e sviluppo della coltura	38
III.3 Simulazione dei processi del suolo	44
III.4 Input e output	46
Capitolo IV	
Applicazione del modello CropSyst	50
IV.1 Dati sperimentali	50
IV.2 Calibrazione del modello	54
IV.3 Validazione del modello	60
Capitolo V	
Scenari climatici futuri	66
V.1 I cambiamenti climatici e gli effetti sull'agricoltura	66
V.2 Simulazione con il modello CropSyst	69
Conclusioni	74
Bibliografia	75