

Sistemi colturali erbacei. Modellizzarli? Perchè?

“Nobody believes in simulation models
except their developers...

Everybody believes in experimental
data except who collected them”



(Gaylon S. Campbell)

modelli oppure (!) misure dirette?

Galileo (fine del XVI secolo) iniziò la rivoluzione (completata da Newton circa 1 secolo dopo) che ha elevato l'induzione al di sopra della deduzione: nascita del moderno metodo scientifico



Metodo scientifico

Asimov (1984 - Guide to science/Libro di Fisica):

1. raccogliere osservazioni
2. ordinarle
3. trovare una legge in grado di spiegarle



Cosa significa trovare una legge in grado di spiegare delle osservazioni?

Einstein sul metodo di Galileo

"Si è spesso dichiarato che Galileo divenne il padre della scienza moderna sostituendo il metodo speculativo o deduttivo con il metodo empirico o sperimentale. Credo invece che questa interpretazione non sia in grado di reggere a un esame accurato. Non esiste alcun metodo sperimentale in mancanza di concetti e sistemi speculativi, e non esiste alcuna forma speculativa di pensiero i cui concetti non rivelino, ad esami accurati, il materiale empirico da cui emergono. Il fatto di porre in contrasto netto fra loro l'apparecchio empirico e quello deduttivo è fuorviante, ed era del tutto estraneo allo stesso Galileo."
(Albert Einstein)



Galileo e la modellistica

"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'aggrarsi vanamente per un oscuro labirinto."
(Galileo Galilei, Il Saggiatore ~1620)

Cosa ha spinto la nascita e lo sviluppo dei modelli di sistemi colturali / 1

Effettuare misure

1. Determinazione delle dimensioni del campione
(Confalonieri, 2004; Confalonieri et al., 2006;
<http://agrifish.jrc.it/marsstat/warm/archive.htm>) e di
adeguati schemi di campionamento
2. Raccogliere i campioni
3. Immagazzinare/conservare i campioni
4. Analizzarli
5. Registrare i dati in modo sensato
6. Post-processamento dei dati

Cosa ha spinto la nascita e lo sviluppo dei modelli di sistemi colturali / 2

Realtà dei fatti

1. Bisogno di indicazioni rapide (quasi in tempo
reale) su ciò che sta accadendo in una
determinata situazione o su ciò che cambierà in
rapporto a perturbazioni del sistema (analisi di
scenari)
2. Limitatezza delle risorse per osservazioni dirette
(soprattutto per valutazioni a larga scala)

I modelli sono quindi
dei "sostituti" delle osservazioni dirette?
Ovviamente NO.



Esempi di problematiche
tecniche inerenti i sistemi colturali
risolte con l'uso di modelli di
simulazione

- Scala di appezzamento: gestione delle colture
- Scala aziendale: causa roggia Vettabbia
- Scala territoriale: esempio PASM - corso Modellistica Agronomica (L. Bechini)
- Scala continentale: Sistema di previsione delle rese della Commissione Europea (CGMS) per la regolazione dei mercati (PAC)

Es. scala di appezzamento / 1

L'utilizzo di modelli per la gestione dei sistemi colturali
(es. piani di irrigazione, di concimazione; protezione da avversità biotiche e abiotiche)

Es. scala di appezzamento / 2

Vi ricordate le quantità di azoto consigliate dal vostro testo di erbacee e quelle utilizzate dagli agricoltori delle 3 aziende del sud Milano?

Es. scala di appezzamento / 3

Durante il corso un modello di simulazione sarà utilizzato per compilare piani di concimazione e di irrigazione.

Poi ragioneremo e cercheremo di tirare delle conclusioni sulla concimazione del mais

Es. scala aziendale / 1

Causa per la gestione della roggia Vettabbia nell'estate del 2001

Es. scala aziendale / 2

Nel 2001 si è aperto un contenzioso tra il comune di Milano e 4 (+ 3) aziende del sud Milano per via della gestione "anomala" della roggia Vettabbia.

In questa parte di nord Italia, riso e mais sono tra le colture più rappresentate.

Il comune ha bloccato l'approvvigionamento idrico mentre queste colture si trovavano nelle fasi di accestimento (riso) - 4° foglia e la levata.

Es. scala aziendale / 3

Gli agricoltori proprietari delle aziende hanno intentato una causa contro il comune di Milano per essere rimborsati e attraverso la il loro principale rappresentante, hanno contattato il DiProVe per ottenere una perizia nella quale le perdite fossero stimate in modo quantitativo e oggettivo

Es. scala aziendale / 4

Essendo stato il 2001 un anno poco piovoso nel periodo di interesse, gli agricoltori temevano infatti che la controparte attribuisse le colpe della mancata produzione all'annata invece che alla gestione della Vettabbia.

In pratica, hanno chiesto di quantificare le perdite effettivamente dovute al particolare andamento pluviometrico e quelle dovute invece alla gestione della roggia in questione.

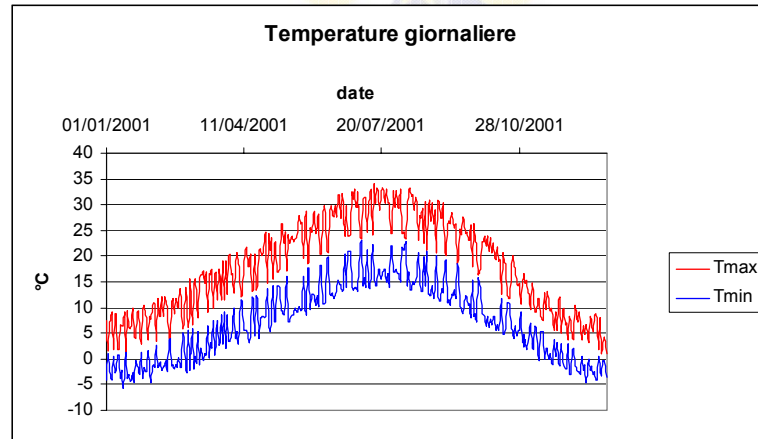
Es. scala aziendale / 5

I dati disponibili

- Agrotecniche da interviste agli agricoltori
- Dati meteo da stazione di Landriano (PV)
- Dati sui profili da carta dei suoli Regione Lombardia
- Parametri colturali (nota la varietà) da calibrazioni effettuate in Dipartimento

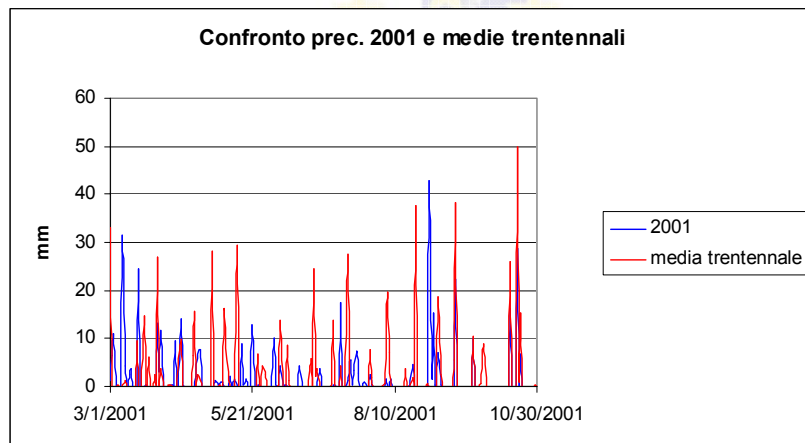
Es. scala aziendale / 6

L'annata meteorologica / 1



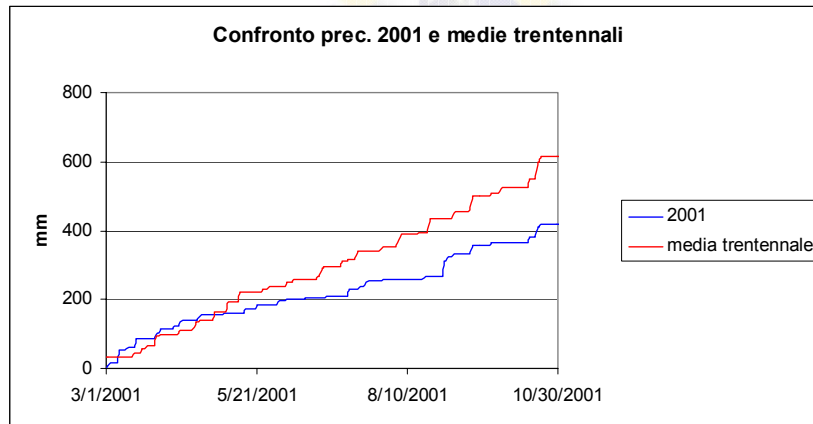
Es. scala aziendale / 7

L'annata meteorologica / 2



Es. scala aziendale / 8

L'annata meteorologica / 3



Es. scala aziendale / 9

L'annata meteorologica / 4

- Le precipitazioni nel 2001 sono state inferiori alla media dei 30 anni e la loro distribuzione non è stata del tutto adeguata alle richieste della coltura
- Questo ha probabilmente fatto il paio con maggiori giornate con scarsa nuvolosità. Ne segue che il fabbisogno idrico della coltura, in base all'andamento termico e radiativo, è stato, probabilmente, superiore

Es. scala aziendale / 10

L'annata meteorologica / 5

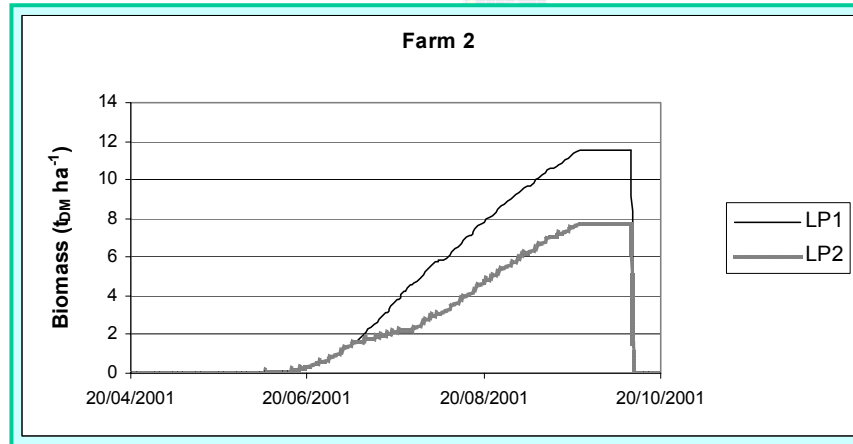
- Per mais (ho perso i risultati delle simulazioni ed i relativi file necessari per le simulazioni) si era dimostrato che l'annata influiva solo per una piccola parte delle perdite produttive totali. Il resto era dovuto alla mancata disponibilità idrica
- Essendo il riso normalmente irrigato nel territorio interessato, la tesi della controparte, ovviamente, non regge: a meno di annate drammaticamente siccitose, le riserve idriche sono in grado di assicurare la completa sommersione delle risaie

Es. scala aziendale / 11

Per prima cosa, le rese dichiarate dagli agricoltori sono state "validate" analizzando i risultati di simulazioni effettuate con CropSyst in configurazione *livello produttivo potenziale*

	Farm 1	Farm 2	Farm 3	Farm 4
Simulated Yield (t ha-1)	4.453	3.8455	3.4405	3.736
Unofficial Yield (t ha-1)	4.5	3.5	3.5	4

Es. scala aziendale / 12



Es. scala aziendale / 13

	Farm 1	Farm 2	Farm 3	Farm 4
LP1 Yield ($t_{DM} ha^{-1}$)	5.7505	5.758	6.142	6.059
LP2 Yield ($t_{DM} ha^{-1}$)	4.5	3.5	3.5	4
Yield Gap (%)	22	39	43	34
Yield Gap (euro ha^{-1})	360.14	808.36	945.84	592.99

LP1: livello produttivo potenziale
LP2: resa dichiarata dagli agricoltori e
validata utilizzando le opzioni di
management dichiarate

Es. scala aziendale / 14

- Quale è stato il punto di forza di questa perizia?
- Perché la Coldiretti ha chiesto una perizia di questo tipo?
- Cosa ha prodotto il perito di controparte?

Es. scala continentale

Il sistema di previsione delle rese della
Commissione Europea

A cosa serve?

Il sistema di monitoraggio delle colture della Commissione Europea (CGMS) / 1

Serve alla DG AGRI per...

Il sistema di monitoraggio delle colture della Commissione Europea (CGMS) / 2

- Molti diversi sistemi di analisi dei sistemi colturali (specialisti in diversi settori)
- Salti di scala

Dunque,
possiamo concludere che i modelli di
simulazione sono efficaci strumenti per
l'analisi dei sistemi colturali



Ma ne esistono molti



Come scegliere?

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 1

La qualità degli output dipende:

- dall'adeguatezza del modello
- dalla sua robustezza
- da come è stato parametrizzato
- dalla qualità degli input

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 2

Per poter scegliere un modello
bisogna

- aver chiaro il problema da risolvere
- derivarne il criterio più adatto di classificazione
- ...

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 3

E' necessari definire un punto di vista
(funzione del problema da risolvere)
prima di tentare una classificazione dei
modelli di simulazione di sistemi colturali
che aiuti nella scelta

$$\begin{array}{c} \# \text{ di possibili classificazioni} \\ = \\ \# \text{ di possibili punti di vista} \end{array}$$

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 4

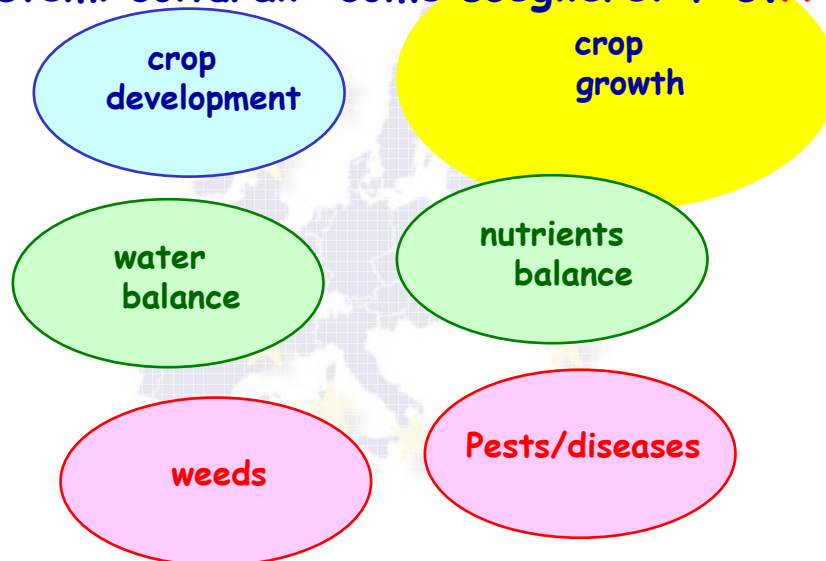
Il modello non è il sistema reale:
fare bene attenzione ai suoi
limiti (un modello può dare
risultati aberranti se usato senza
considerare le sue
caratteristiche)
(documentazione!!!)

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 5

Criteri proposti da van Ittersum et al.
(2003):

- una gerarchia dei fattori di produzione (**A**)
- obiettivi del modello, scala e livello di dettaglio nella rappresentazione dei processi (**B**)
- campo di applicazione, i.e. ricerca, didattica, supporto alle decisioni (**C**)

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 5.A

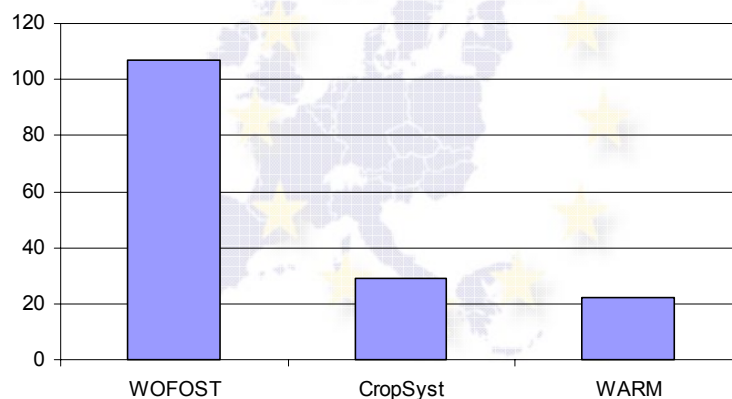


Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 5.B

- **Obiettivi:** voglio valutare scenari gestionali? Scenari climatici? Tentare di guidare i breeders? Valutare gli effetti della coltivazione in ambienti collinari? Voglio simulare una sola coltura? Ecc.
- **Scala e livello di dettaglio:** disponibilità input, numero e grado di "stimabilità" dei parametri

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 5.B

parametri colturali - crescita e sviluppo



Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 5.C

- Si può fare **didattica** con i modelli di simulazione?
- Si può fare **ricerca**? O sono la logica conclusione di una ricerca?
- **Supporto alle decisioni**: di chi?

Modelli di simulazione di sistemi colturali: come scegliere? / 6

Prendiamo come criterio
l'approccio per la simulazione
della crescita

Approcci per la simulazione della crescita delle colture

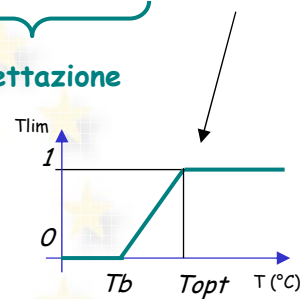
Esistono 4 approcci principali:

- Assimilazione di CO_2
SUCROS family (van Ittersum et al., 2003)
- radiation use efficiency (RUE)
e.g. **CERES family, STICS** (rispettivamente Uehara and Tsuji, 1993 e Brisson et al., 2003)
- transpiration use efficiency (TUE)
e.g. **GLAM**; Challinor et al., 2004) (Tanner e Sinclair, 1983)
- Combinazione di RUE e TUE
CropSyst (Stöckle et al., 1994)

1. Modelli basati sul concetto di RUE

$$B = \underbrace{\text{RUE} \times \text{Rad}}_{\text{PAR}} \times \underbrace{0.5 \times [1 - e^{(-k \times \text{LAI})}]}_{\text{Intercettazione}} \times T_{\text{lim}}$$

- B = biomassa aerea ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- RUE = efficienza uso della radiazione (kg MJ^{-1})
- Rad = radiazione globale giornaliera ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- PAR = photosynthetically active radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- K = coeff. di estinzione della radiazione solare
- LAI = indice di area fogliare ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)



Fotosintesi **NETTA** giornaliera

Warren Wilson (1967) e, solo più tardi,
Monteith (1977)

2. Modelli basati sul concetto di TUE

$$B = k_{BT} \times (T_p / VPD)$$

$$ET_c = ET_0 \times k_c$$

$$T_p = ET_c \times [1 - \exp(-k \times LAI)]$$

- B = biomassa aerea ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- k_{BT} = biomass-transpiration coefficient ($\text{kg m}^{-3} \text{kPa}$)
- T_p = crop potential transpiration (m d^{-1})
- VPD = daytime mean atm. vapour pressure deficit (kPa) = $e_s - e_m$
 $[e_s = 6.11 \times \exp\{(17.27 \times T)/(T+239)\}]$

Fotosintesi **NETTA** giornaliera

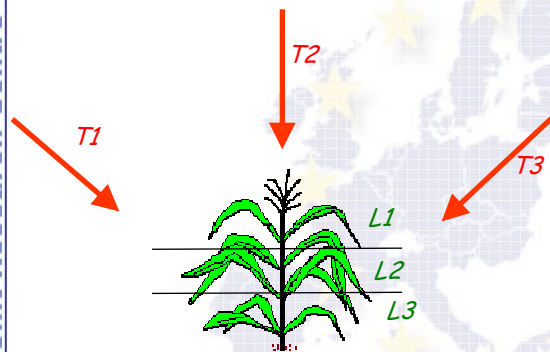
L'approccio TUE-based sviluppato da
Tanner e Sinclair (1983) diventa
instabile a bassi valori di VPD

3. Modelli combinati RUE - TUE

Ogni giorno, la biomassa è calcolata
usando entrambi gli approcci
(B_{RUE} e B_{TUE})

$$B = \min (B_{RUE}, B_{TUE})$$

4. Modelli basati sull'assimilazione di CO₂



La fotosintesi è calcolata per 3 livelli all'interno della canopy (L_i) e per 3 momenti nel corso della giornata (T_j)

4. Modelli basati sull'assimilazione di CO₂

$$PAR_L = PAR_0 \times (1-p) \times \exp(-k \times LAI_L)$$

flussi diversi di radiazione (diretta/diffusa) → diversi k!

$$LAI_L = (0.5 + p \times 0.15^{0.5}) \times LAI \quad (p = -1, 0, 1)$$

$$A_L = A_m \times \{1 - \exp[(-\varepsilon \times PAR_{aL})/A_m]\}$$

(sunlit/shaded)

- PAR_0 e PAR_L = PAR totale e PAR al livello L
- LAI_L = LAI cumulato su livelli inferiori di canopy
- p = coefficiente di riflessione di una canopy verde
- A_m = tasso istantaneo di assimilazione lorda a saturazione
- ε = efficienza d'uso iniziale della radiazione di una singola foglia
- PAR_{aL} = PAR assorbita

4. Modelli basati sull'assimilazione di CO₂

$$AC_{uLAI} = (A_{T,L-1} + 1.6 \times A_{T,L0} + A_{T,L+1}) / 3.6$$

Gaussian
Integration

$$AC = AC_{uLAI} \times LAI$$

- AC_{uLAI} = tasso istantaneo di assimilazione lorda totale per unità di LAI
- $A_{T,L-1}$ (or $L0$ or $L+1$) = tasso istantaneo di assimilazione lorda ai livelli -1, 0, +1
- AC = tasso istantaneo di assimilazione lorda totale

4. Modelli basati sull'assimilazione di CO₂

Tutti questi conti sono effettuati per 3 momenti nel corso della giornata.

Una media pesata restituisce il valore medio del tasso di assimilazione lorda totale (MAC).

$$G = MAC \times \text{daylength}$$

- G = assimilazione lorda giornaliera
- MAC = tasso medio di assimilazione lorda

4. Modelli basati sull'assimilazione di CO₂

La respirazione di mantenimento viene sottratta all'assimilazione lorda totale

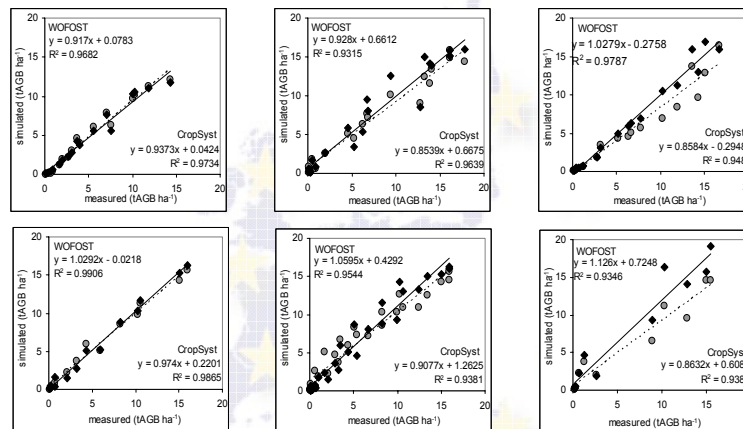
RIPARTIZIONE

Growth respiration as a function of main chemical components of leaves, stems, storage organs and roots



ACCUMULO NETTO GIORNALIERO DI BIOMASSA!!!!!!

Accuratezza di questi approcci?



	RRMSE	EF	CRM	CD	Slope	Intercept	R ²
CropSyst	20.11	0.94	0.03	0.87	1.06	-0.17	0.96
WOFOST	17.75	0.96	-0.02	1.03	0.97	0.05	0.96

ok ma quanto sono affamati?

Parameter	Determination			Value			Units
	Group of varieties			Group of varieties			
	JE*	JM**	I***	JE*	JM**	I***	
Photosynthetic pathway					C3		/
Above ground biomass-transpiration coefficient (BTR)	D				5		kPa kg m ⁻³
Light to above ground biomass conversion (LTBC)	D				3		g MJ ⁻¹
Actual to potential transpiration ratio that limits leaf area growth	D				0.95		/
Actual to potential transpiration ratio that limits root growth	D				0.5		/
Optimum mean daily temperature for growth (Topt)	C			28	28	27	°C
Maximum water uptake	D				13		mm day ⁻¹
Leaf water potential at the onset of stomatal closure	J				1200		J kg ⁻¹
Wilting leaf water potential	D				1800		J kg ⁻¹
Maximum rooting depth	E				0.3		m
Fraction of max. LAI at physiological maturity	E				0.5		/
Specific leaf area (SLA)	C	M		27.0	29.5	39.0	m ² kg ⁻¹
Stem/Leaf partition coefficient (SLP)	C			4.5	3.0	1.5	/
Leaf duration	C			700	850	950	C-days
Extinction coefficient for solar radiation (k)	D				0.5		/
ET crop coefficient at full canopy	D				1.05		/
Degree days Emergence	M			82	80	80	C-days
Degree days Peak LAI	M			800	950	893	C-days
Degree days Begin flowering	M			825	975	900	C-days
Degree days Begin grain filling	M			864	1020	952	C-days
Degree days Physiological maturity	M			1087	1500	1328	C-days
Base temperature (Tbase)	E			12	11	12	°C
Cutoff temperature (Tcutoff)	L				42		°C
Unstressed harvest index	M				0.6	0.48	0.48
Maximum N concentration during early growth	E	E	M	0.050	0.050	0.036	kgN kgAGB ⁻¹
Maximum N concentration at maturity	E	E	M	0.012	0.012	0.008	kgN kgAGB ⁻¹
Minimum N concentration at maturity	E	E	M		0.007		kgN kgAGB ⁻¹

* Japonica, early

** Japonica, medium-late

*** Indica

JRC – Ispra

53

... quanto sono affamati?

Parameter	Units	JE*	Parameter	Units	JE*	Value		Description	Determination		
						JE*	JE**		JE*	JE**	JE**
Particulate-related parameters											
TBASEM	°C	10	CVL	kg kg ⁻¹	0.750	0.454	0.754	efficiency of conversion into leaves	C	C	D
TEFFMX	°C		CVO	kg kg ⁻¹	0.684	0.784	0.684	efficiency of conversion into st. org.	C	C	D
TSUMEM	°C-days	90	CIR	kg kg ⁻¹	0.754	0.754	0.754	efficiency of conversion into roots	C	C	D
IDSL	°C-days		OV0	kg kg ⁻¹	0.242	0.654	0.754	rel. incr. in respiration rate per 10 °C	C	C	D
TSUMJ	°C-days	770	RML	kg CH ₂ O kg ⁻¹ day ⁻¹	-	0.020	-	rel. maint. resp. rate leaves	D		
TSUMJ2	°C-days	400	RMD	kg CH ₂ O kg ⁻¹ day ⁻¹	-	0.003	-	rel. maint. resp. rate st. org.	D		
	°C-days	00.00	RMR	kg kg ⁻¹	0.010	-	-	rel. maint. resp. rate roots	D		
DTSM1	°C · °C-days	11.00	RMS	kg CH ₂ O kg ⁻¹ day ⁻¹	-	0.015	-	rel. maint. resp. rate stems	D		
DYB	-	-	RSETB	-	-	-	-	-	-	-	-
DYBEND	-	2.3									
Other parameters											
LAEM	ha ha ⁻¹ °C ⁻¹ day ⁻¹	0.012	FR1B	-	kg kg ⁻¹	PERDL	-	0.5	max. relative death rate of leaves due to water stress	D	
RCGLAI	ha ha ⁻¹ °C ⁻¹ day ⁻¹	0.0020286						0.000000-0.00			
		0.13-0.00296				RORR1B	-	1.50000-0.00	relative death rate of roots as a function of development stage	D	
		0.24-0.00280						1.50000-0.02			
		0.28-0.00230						2.00000-0.02			
SLAT1	- · ha kg ⁻¹	0.31-0.00030				RORR1B	-	0.00000-0.00	relative death rate of stems as a function of development stage	D	
		0.27-0.00180						1.50000-0.00			
		0.67-0.00180	FLTB	-	kg kg ⁻¹			1.50000-0.02			
		2.01-0.00170						2.00000-0.02			
SPA	ha kg ⁻¹					CJET	-	-	correction factor transpiration rate	D	
						DEPMR	-	3.5	crop group's R for soil water depletion	D	
SSATB	ha kg ⁻¹					WARDU	-	-	air ducts in roots present (+1) or not (-0)	D	
						RSD	-	6	initial rooting depth	D	
SBATB	days	38				RMR	cm day ⁻¹	1.2	maximum daily increase in rooting depth	D	
TBASE	°C					RMRGR	cm	80	maximum rooting depth	D	
* Japanese, early ** Japanese, medium-late *** Indian											
KOFTB	-		FSTB	-	kg kg ⁻¹	0.350-0.374	0.350-0.574	0.350-0.574	fraction of aboveground biomass to stems as a function of development stage	C	
						0.435-0.383	0.435-0.683	0.435-0.383			
						0.530-0.480	0.530-0.580	0.530-0.580			
						0.625-0.650	0.625-0.581	0.625-0.650			
						0.720-0.700	0.720-0.600	0.720-0.600			
						0.820-0.700	0.820-0.616	0.820-0.600			
						0.900-0.928	1.000-0.928	1.000-0.928			
						1.335-0.000	1.335-0.000	1.335-0.000			
						2.000-0.000	2.000-0.000	2.000-0.000			
						0.000-0.000	0.000-0.000	0.000-0.000			
						0.720-0.000	0.720-0.000	0.720-0.000			
						0.820-0.020	0.820-0.020	0.820-0.020	fraction of aboveground biomass to storage organs as a function of development stage	D	
						1.000-0.072	1.000-0.072	1.000-0.072			
						1.335-1.000	1.335-1.000	1.335-1.000			
						1.220-1.000	1.220-1.000	1.220-1.000			
						2.000-1.000	2.000-1.000	2.000-1.000			

* Japonica, early

** Japonica, medium-late
*** Indica

*** Index

JRC – Ispra

54



Bibliografia

- Asimov, I., 1984. Asimov's new guide to science. Basic Books, New York, USA.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, H nault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Slingo, J.M., Grimes, D.I.F., 2004. Design and optimization of a large-scale process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 99-120.
- Confalonieri, R., 2004. A jackknife – derived visual approach for sample size determination. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 1, 9-13.
- Confalonieri, R., Stroppiana, D., Boschetti, M., Gusberty, D., Bocchi, S., Acutis, M., 2005. Analysis of rice sample size variability due to development stage, nitrogen fertilization, sowing technique and variety using the visual jackknife. *Field Crops Research*, article in press.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B. Biol. Sci.* 281 (980), 277-294.
- St ckle, C.O., Martin, S.A., Campbell, G.S., 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield, *Agricultural Systems*, 46, 335-359.
- Tanner, C.B., Sinclair, T.R., 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.). *Limitations to efficient water use in crop production*. Amer. Soc. Agron, Madison, WI.
- Uehara, G., Tsuji, G.Y., 1993. The IBSNAT project. In *Systems approaches for sustainable agricultural development*, eds F.W.T. Penning de Vries, P. Teng, and K. Metselaar. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands. pp. 505-513.
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18, 201-234.
- Warren Wilson, J., 1967. Ecological data on dry-matter production by plants and plant communities. p. 77-123. In E.F. Bradley and O.T. Denmead (ed.). *The collection and processing of field data*. Interscience Publishers, New York.