

Voi non dite forse: ancora quattro mesi e poi viene la mietitura? Ecco, io vi dico: alzate i vostri occhi e guardate i campi che già biondeggiano per la mietitura.

Giovanni, 4,5-42

La natura è un grande libro aperto a chi abbia occhi sulla fronte e nella mente...

Galileo Galilei

Capitolo 1

Agronomia e produzione agraria

1.1 L'AGRONOMIA

Facendo nostra la definizione del Bonciarelli¹, l'agronomia ha per oggetto lo studio dei fattori che condizionano la produzione vegetale e le tecniche della loro regolazione per realizzare le massime o le più convenienti produzioni nel rispetto della conservazione della fertilità del terreno e dell'ambiente. L'agronomia assolve il compito di coordinare, integrare e trasporre sul piano dell'operatività pratica le conoscenze fondamentali che la biologia, la chimica, la fisica, la meteorologia, ecc. hanno acquisito o vanno man mano acquisendo. Questa funzione di sintesi è oggi più importante di ieri, tenuto conto dell'attuale tendenza delle scienze pure ad evolvere verso specializzazioni sempre più ristrette.

L'agronomia è una scienza dell'agro-ecosistema, inteso come un ecosistema ed in cui si svolgono le attività agricole e che è condizionato dalle attività umane che vedono i cicli degli elementi modificati in virtù dell'apporto dall'esterno di elementi nutritivi e acqua ed in virtù dell'asportazione di quote rilevanti della biomassa prodotta. In tale ecosistema le piante coltivate e gli animali domestici interagiscono con l'insieme dei viventi presenti.

Il nostro rapporto con l'agro-ecosistema e più in generale con il mondo reale si fonda su tre fondamentali elementi di indagine:

- le osservazioni sensoriali (a vista) e strumentali (con termometri, pHmetri, ecc.)
- le tassonomie, utili ad esempio ad attribuire il nome corretto ai vegetali, agli animali, ai fenomeni atmosferici, alle caratteristiche dei suoli, ai mezzi tecnici.
- i modelli, intesi in generale come schemi interpretativi della realtà o di sue porzioni più o meno vaste.

Negli ultimi decenni gli strumenti di misura hanno manifestato un'evoluzione assai rapida consentendo oggi di effettuare misure accurate anche in condizioni operative difficili.

Anche le tassonomie sono in rapida evoluzione e soggette a continui perfezionamenti. Si pensi ad esempio a come sia cambiata la definizione di specie nel mondo animale e vegetale negli ultimi 300 anni.

¹ Bonciarelli F., 1998. Agronomia, Edagricole, 363 pp.

I modelli si possono classificare in modelli concettuali (si pensi ad esempio allo schema descrittivo dei processi di degradazione della sostanza organica in un suolo) e modelli matematici, che possono essere a loro volta suddivisi in modelli empirici e meccanicistici. I modelli empirici si accontentano di mettere in relazione le cause e gli effetti (es: la temperatura media e la piovosità messe in relazione con la produzione di una coltura) senza analizzare i meccanismi insiti in tali relazioni, meccanismi che vengono invece descritti dai modelli meccanicistici.

I modelli matematici costituiscono oggi una risorsa importante per dare risposte a problemi pratici di grande rilevanza per le attività agricole a livello di campo o territoriale, come d esempio la quantificazione delle esigenze idriche e nutrizionali delle colture agrarie o la valutazione dell'impatto dell'agricoltura sull'ambiente.

I modelli matematici sono strumenti potenti e che tuttavia richiedono di essere utilizzati con prudenza e senza trascurare la necessaria verifica dei loro risultati tramite il confronto con dati reali. A questo ci richiama un importante scritto di J.L. Monteith² che mette in luce pregi e difetti dei modelli e dei modellisti.

1.2 LE ORIGINI DELL'AGRICOLTURA

L'agricoltura si fonda sul fatto che una specie che in natura si presenta in associazione con altre specie, rappresentando una quota limitata della biomassa presente in un appezzamento di terreno, viene portata a rappresentare quote assai più rilevanti della biomassa stessa, in modo tale da ottenere un numero di calorie per ettaro assai più elevato. Come conseguenza è possibile sostenere molti più esseri umani (da 10 a 100 volte) di quanto non potesse garantire un ettaro di terra vergine sfruttata da cacciatori – raccoglitori³.

L'agricoltura può essere considerata come una delle maggiori invenzioni della storia dell'umanità, il cui valore epocale la assimila ad esempio all'invenzione della ruota o della scrittura; contro tale evidenza ha scarso peso la teoria secondo cui la rivoluzione neolitica sarebbe stata in realtà una catastrofe che avrebbe minato lo stile di vita e la stessa salute delle popolazioni⁴.

Esiste oggi una vasta concordanza sul fatto che la nascita dell'agricoltura in Eurasia si deve ad un gruppo umano relativamente piccolo, che fece il salto dallo stadio della caccia e della raccolta a quello della coltivazione di vegetali per la sopravvivenza. Tale fenomeno ebbe luogo in tre culle poste nella cosiddetta “mezzaluna fertile”, area del medio oriente che comprende i seguenti territori:

- la regione compresa fra le odierne Israele, Giordania, Libano e Siria occidentale;
- la Turchia sudorientale;
- l'area lungo il Tigri e l'Eufrate (fra Iraq e Iran occidentale).

Circa lo scenario naturale teatro della rivoluzione neolitica, la maggior parte degli studiosi propende per un territorio ricco di risorse naturali (animali selvatici, piante spontanee) che consentivano una dieta ricca di proteine e abitato da popolazioni che raccolsero a lungo i cereali spontanei prima di iniziarne la coltivazione.

Possiamo ipotizzare che i progenitori selvatici dei cereali coltivati fossero presenti nelle praterie e nel sottobosco delle rade foreste di querce submediterranee ove formavano grandi distese uniformi che maturavano a inizio estate, in coincidenza con l'esaurimento della riserva idrica dei suoli.

Le ragioni del successo in Eurasia della rivoluzione neolitica sono così riassunte da Diamond⁵.

² J. L. Monteith, 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*, 88/1996, pp. 695–697

³

J. Diamond, *Armi, acciaio e malattie, breve storia del mondo negli ultimi 13000 anni*, Torino, 1998.

⁴ C.S. Larsen, *The Agricultural Revolution as Environmental Catastrophe: Implications for Health and Lifestyle in the Holocene*. In (Hélène Jousse, special issue editor) *Environmental Catastrophe and Human Response in the Last 11,500 Years. Quaternary International*.

⁵ J. Diamond, *Armi, acciaio e malattie, breve storia del mondo negli ultimi 13000 anni*, cit.

- l'ampia disponibilità di specie vegetali domesticabili e con produttività già elevata in natura (tabella 1) e che dunque non potevano sfuggire ai popoli di cacciatori – raccoglitori, che infatti nella mezzaluna fertile divennero probabilmente sedentari prima ancora di iniziare a coltivare;
- l'ampia disponibilità di specie animali con caratteristiche fenologiche ed etologiche favorevoli alla domesticazione (tabella 2)
- la forma dell'area continentale eurasiatica, molto sviluppata in direzione est-ovest e che perciò garantiva la facile diffusione delle specie animali e vegetali su fasce omogenee dal punto di vista del clima e della durata del giorno (in Eurasia, dall'Europa a Giappone, esiste una vasta fascia a clima relativamente omogeneo, seppur localmente interrotta dall'orografia e dalla presenza di deserti).
- l'assenza di grandi barriere ecologiche e orografiche che impedissero la diffusione dell'agricoltura e della tecnologia (ad esempio la ruota apparve nel 3.000 a.C. nel vicino Oriente e nel giro di pochi secoli si diffuse a tutta l'Eurasia).

Fra le conseguenze di tali fatti rammentiamo:

- la domesticazione (tabella 3) di molte specie animali e vegetali, per cui in Eurasia e Nordafrica vennero domesticati pecora, capra, bue, maiale e cavallo;
- la rapida diffusione a tutta l'Eurasia delle specie domesticate nella mezzaluna fertile: all'epoca di Cristo i cereali mediorientali erano coltivati lungo tutti i 16.000 km che separano l'Irlanda dal Giappone;
- la comparsa di surplus alimentari immagazzinabili e la possibilità con questi di alimentare gruppi sociali non dediti alla produzione agricola, ponendo le basi di quella specializzazione che uno dei tratti distintivi di gran parte delle civiltà umane.

Tabella 1 - Disponibilità di specie erbacee a seme grosso in diversi ambiti geografici (Diamond, 1998).

| Areale | Numero di specie erbacee a seme grosso |
|---------------------------------------|---|
| Asia Occidentale, Europa e Nordafrica | 33 |
| Mediterraneo | 32 |
| Gran Bretagna | 1 |
| Asia orientale | 6 |
| Africa sub – sahariana | 4 |
| America | 11 |
| Nord America | 4 |
| Centro America | 5 |
| Sud America | 2 |
| Australia settentrionale | 2 |
| TOTALE | 56 |

Tabella 2 – disponibilità di grandi animali domesticabili (candidati sono i mammiferi terrestri, erbivori o onnivori, con peso medio > 45 kg). Si noti che solo una piccola parte dei mammiferi candidati presentavano una etologia che li rese effettivamente domesticabili, mentre per molti altri – es: bufalo africano, rinoceronte, elefante africano, zebra, ecc. – la domesticazione risultò invece impossibile (Diamond, 1998).

| | Eurasia | Africa sahariana | sub-Americhe | Australia |
|--------------------|----------------|-------------------------|---------------------|------------------|
| Specie candidate | 72 | 51 | 24 | 1 |
| Specie domesticate | 13 (*) | 0 | 1 (**) | 0 |
| % di successo | 18% | 0% | 4% | 0% |

(*) pecora, capra, bue, maiale, cavallo, cammello, dromedario, asino, renna, bufalo asiatico, yak, banteng (bovide indonesiano), mithan (bovide indo-birmano).

(**) lama

Tabella 3 - Epoca e luogo di prima domesticazione di alcune specie (Diamond, 1998).

| specie | Data (a.C.) | Area |
|-----------------|-------------|--|
| Cane | 10.000 | Asia sudoccidentale, Cina, Nordamerica |
| Pecora | 8.000 | Asia sudoccidentale |
| Capra | 8.000 | Asia sudoccidentale |
| Maiiale | 8.000 | Cina, Asia sudoccidentale |
| Bue | 6.000 | India, Asia sudoccidentale, Nordafrica |
| Cavallo | 4.000 | Ucraina |
| Asino | 4.000 | Egitto |
| Bufalo asiatico | 4.000 | Cina (?) |
| Lama, alpaca | 3.500 | Ande |
| Cammello | 2.500 | Asia centrale |
| Dromedario | 2.500 | Arabia |

Con l'agricoltura si ebbe dunque la comparsa di società sedentarie, ad alta densità di popolazione e con una stratificazione sociale che si fece più significativa a seguito dell'introduzione di nuove



Figura 1 - Norman Borlaug.

tecnologie (in particolare dell'aratro) che avrebbero consentito il raggiungimento di una produttività sufficiente a tale scopo⁶.

Ciò si tradusse anche in una maggiore possibilità di innovazioni tecnologiche con la conseguenza di un più rapido progresso. Infatti l'innovazione tecnologica è autocatalitica, nel senso che i grandi progressi derivano spesso dalla soluzione di problemi più semplici (ad esempio in Inghilterra occorsero 2.000 anni per acquisire la tecnologia del rame e del bronzo dall'area della sua creazione e solo 250 anni per acquisire la tecnologia del ferro) è subordinata alla nascita di gruppi di specialisti non dediti alla produzione di cibo ed infine viene favorita dalla presenza di società molto affollate e dalla compresenza di più società sullo stesso territorio⁷.

⁶ G. Forni. *Gli albori dell'agricoltura, origine ed evoluzione dagli Etruschi agli Italici*, Roma, 1990.

⁷ J. Diamond, *Armi, acciaio e malattie, breve storia del mondo negli ultimi 13000 anni*, cit.

1.3 L'AGRICOLTURA, GOVERNO DEL CICLO DEL CARBONIO

L'attività agricola si fonda sulla reazione chimica per cui 6 molecole di CO₂ + 6 molecole d'acqua danno origine ad una molecola di glucosio e 6 molecole di ossigeno.



Tale reazione è il cuore del processo di fotosintesi e l'energia necessaria al processo è data da una sessantina di fotoni (quanti di luce solare) per ogni molecola di glucosio assimilata.

Altrettanto necessario per la vita è il processo inverso (respirazione) attraverso il quale l'energia immagazzinata negli zuccheri con la fotosintesi viene liberata a vantaggio di tutti gli organismi viventi (piante, animali, uomo).

Qui di seguito si citano i principali passaggi evolutivi che hanno segnato lo strettissimo rapporto fra CO₂ e piante:

- 2,7 miliardi di anni orsono compaiono i primi batteri in grado di svolgere la fotosintesi
- 1,9 miliardi di anni orsono compaiono le prime alghe rosse
- 490 milioni di anni orsono compaiono le piante vascolari con xilema e tessuti (oggi di gran lunga i primi produttori di biomassa vegetale nelle terre emerse)
- 400 milioni di anni orsono compaiono le prime piante con stomi
- 300 milioni di anni orsono compaiono le foreste e le prime piante con semi.
- 120 milioni di anni orsono compaiono le fanerogame (piante con fiori).

Da notare che quando fecero la loro comparsa le piante vascolari, che oggi dominano incontrastate nella grande maggioranza degli ecosistemi, il nostro pianeta presentava un'atmosfera con 2000-6000 ppm di CO₂ (contro le 380 ppm attuali) mentre le temperature non erano molto diverse da quelle attuali (Hetherington e Raven, 2005; Veizer et al., 2000).

E poiché il sistema fotosintetico nel 95% delle specie vegetali (quelle che i fisiologi chiamano piante C3) è cambiato assai poco rispetto ad allora, le piante vascolari si sentono ancor oggi "orfane" di un'età dell'oro in cui la CO₂ scorreva a fiumi. La conseguenza è che se alle piante odierne si somministrano 2000 – 3000 ppm (concimazione carbonica) la produzione aumenta,





| anno 1200 | anno 1500 | anno 1900 | anno 2000 |
|---|---|--|--|
| altezza di 150-170 cm | altezza di 150-170 cm | altezza di 160-180 cm | altezza di 70-100 cm |
|  |  |  |  |
| Benedetto Antelami Il mietitore - Battistero di Parma fine XII°-inizio XIII° secolo | Pieter Bruegel, 1565 http://www.abcgallery.com | Facoltà di Agraria – Milano – materiale storico Istituto di Agronomia | Oregon State University http://cropandsoil.oregonstate.edu/wheat/pics.htm |

Figura 2 – Evoluzione della taglia dei frumenti dal XII° al XX° secolo. Tale evoluzione indica l'enorme ruolo del miglioramento genetico nell'incremento quali-quantitativo delle produzioni agrarie.

crece la resistenza alla siccità, e parimenti cresce il rapporto radici/chioma e di conseguenza la possibilità di accumulo di CO₂ nei suoli.

In virtù delle evidenze summenzionate emerge una definizione alternativa di agricoltura. Infatti alla definizione classica (coltivazione di piante e allevamento di animali finalizzato a produrre cibo e beni di consumo) si può affiancare una definizione fisiologica secondo cui l'agricoltura è da

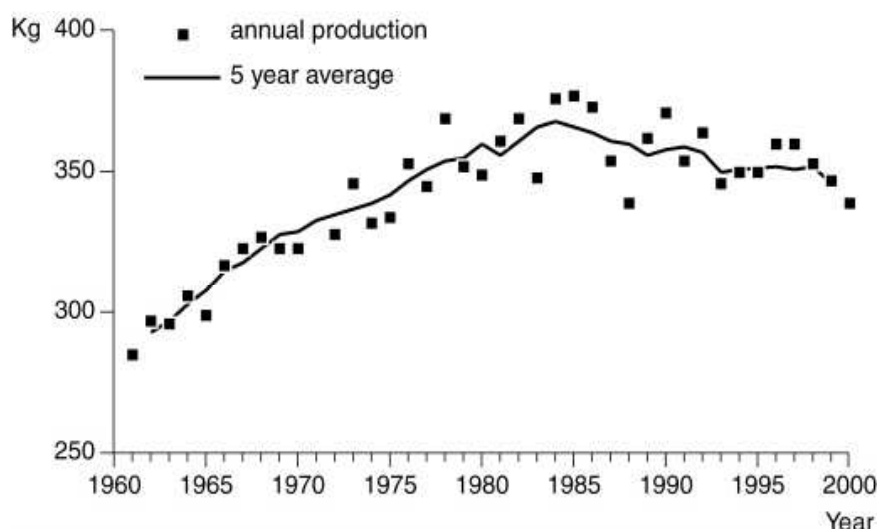
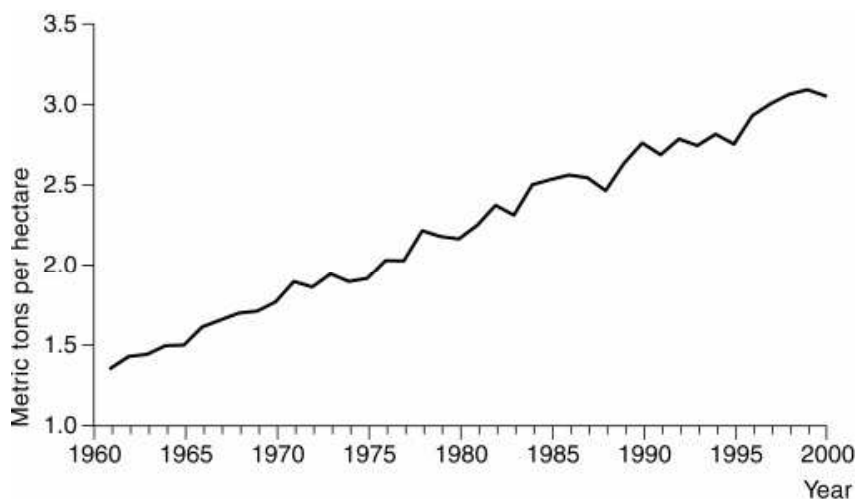


Figura 3 – Produzione mondiale di cereali 1961-2000: in alto si riporta la produzione ettariale media e in basso la produzione pro-capite. (fonte: Tim Dyson, 2001, *World Food Trends: A Neo-Malthusian Prospect?*, proceedings of the American Philosophical Society, vol. 145, no. 4, december 2001).

intendere come “governo del ciclo del carbonio nelle due fasi di fotosintesi e respirazione”.

Per “governare” si intende qui chiudere il ciclo del carbonio mantenendo in condizioni di relativa stazionarietà i suoi valori nei diversi comparti (atmosfera, terreno, acque, ecc.). E mentre è ben compreso il ruolo dell'agricoltura per quanto concerne il carbonio nel suolo (al terreno ritornano i residui colturali ed i reflui zootecnici e lo stesso avveniva in passato con i reflui urbani i quali purtroppo oggi sfuggono ad un tale utilizzo per ragioni che sarebbe qui troppo lungo indagare) tarda a essere colto il ruolo che l'agricoltura gioca e ancor più potrebbe in futuro giocare nei confronti del carbonio atmosferico.

Nel 20° secolo la popolazione è passata dagli 1.5 miliardi del 1900 ai 6.2 miliardi del 2000. In assenza di adeguate

disponibilità di cibo e beni di consumo tale incremento, che non ha precedenti nella storia umana avrebbe, potuto trasformarsi in una tragedia di proporzioni bibliche. Tale tragedia è stata evitata da un intenso processo di innovazione della tecnologia agricola che è noto come rivoluzione verde e che ha interessato tutte le agricolture evolute, portando le rese dei principali cereali (mais, frumento e riso) a quadruplicarsi o quintuplicarsi. Tutto ciò ha potuto aver luogo grazie agli enormi progressi registrati nel settore delle tecniche colturali (macchinari, concimi chimici, antiparassitari, diserbanti, ecc.) e nel settore della genetica (nuove varietà più produttive e che danno prodotti di migliore qualità). Ad esempio per quanto concerne il comparto dei cereali vernini, la produzione media annua italiana del 2006 è stata di 51 q/ha per il frumento tenero (circa 5 volte rispetto agli 11 q/ha del 1910) e di 28 q/ha per il duro (poco meno di 5 volte rispetto ai 6 q/ha del 1910).

Ancora più eclatante il caso del mais, che dalle medie produttive per ettaro di 15 q del 1910 è passato alle medie attuali di oltre 90 q/ha.

Si osservi inoltre che un progresso enorme si è avuto non solo in quantità ma anche in qualità, in quanto i frumenti da pasta, da pane e da biscotti presentano caratteristiche qualitative enormemente più elevate rispetto a quelle dei frumenti coltivati all'inizio del '900. Per inciso tali progressi si sono registrati in assenza di applicazione generalizzata di biotecnologie innovative, che oggi garantirebbero una ben più consistente accelerazione dei processi di miglioramento genetico.

Fra i personaggi più rappresentativi della rivoluzione verde si deve ricordare Norman Borlaug (figura 1), che a cavallo fra gli anni 40 e 50 fu artefice del miglioramento genetico su frumento in cui introdusse i caratteri di taglia bassa e resistenza all'allettamento che resero possibile

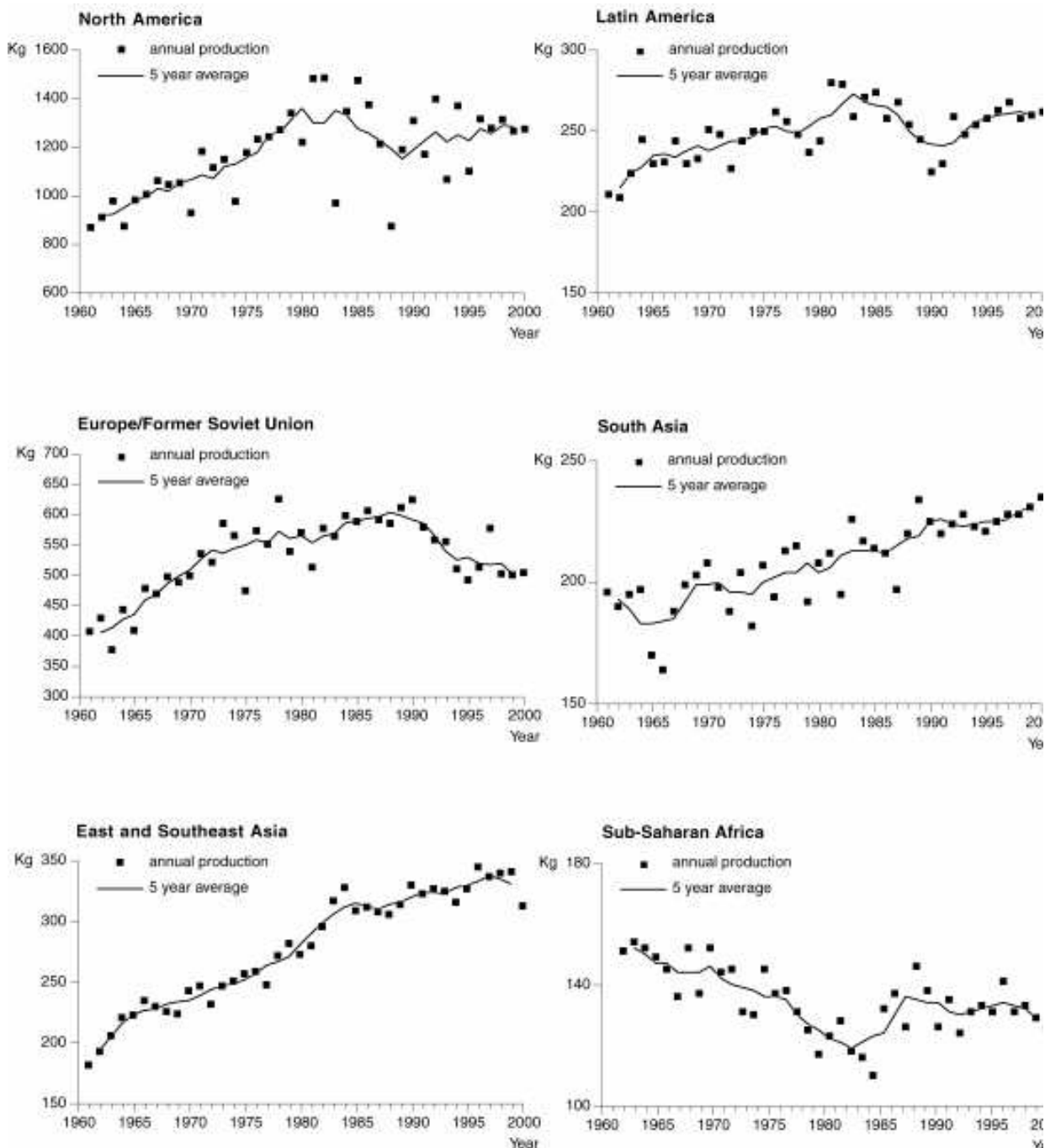


Figura 4 – Produzione mondiale pro-capite di cereali 1961-2000 per macroaree (fonte: Tim Dyson, 2001, *World Food Trends: A Neo-Malthusian Prospect?*, proceedings of the American Philosophical Society, vol. 145, no. 4, december 2001).

l'incremento della concimazione azotata con conseguente aumento generalizzato delle rese. Per tale motivo nel 1970 gli fu attribuito il Nobel per la Pace, avendo egli contribuito a salvare dalla morte per fame miliardi di esseri viventi.

Gli effetti del miglioramento genetico su frumento avvenuto nel 20° secolo si evidenziano osservando la figura 2, da cui si osserva in particolare la sensibile riduzione di taglia cui è corrisposto il parallelo aumento dell'Harvest Index⁸.

Ma quanto cibo occorre a un essere umano per vivere? Secondo Oliva⁹, durante l'impero romano i tribuni erano particolarmente attenti al fatto che le scorte di cereali per ogni cittadino dell'Urbe non scendessero mai al di sotto del fabbisogno annuo, che per un maschio adulto era stimato in 40 modii (264 kg). Ancor oggi possiamo in linea di massima porre intorno ai 300 kg pro-capite di cereali il fabbisogno medio annuo di un individuo adulto. Ciò fornisce un chiave di lettura per i diagrammi delle figure 3 e 4. In particolare dalla figura 3 si evince che mentre la produttività media ettariale è in continua crescita, la produttività pro-capite si è stabilizzata dal 1970 (peraltro su livelli superiori al fabbisogno base di 300 kg). Tale stabilizzazione si deve alla necessità dei grandi Paesi produttori di evitare lo sviluppo di eccedenze.

La figura 4 fa emergere invece un quadro più chiaroscurale, con continenti come l'Asia che appaiono definitivamente usciti dalle condizioni di penuria alimentare in cui versavano grandi Paesi come India e Cina fino agli anni '70. Il vero problema aperto resta ancor oggi l'Africa, che non solo presenta una produzione di molto inferiore alla soglia di autosufficienza ma manifesta anche un progressivo calo delle rese pro-capite. Da questo punto di vista il continente africano costituisce una vera e propria emergenza planetaria.

Guardando invece alle prospettive del settore agricolo, la priorità assoluta a livello globale è data dalla necessità di far fronte all'ulteriore aumento della popolazione mondiale, che secondo l'U.S. Census Bureau (2007) dovrebbe raggiungere i 9 miliardi di individui intorno al 2050.

Sul pianeta gli arativi (terreni per piante alimentari, da fibra, da foraggio, fruttiferi, vite) sono 1,4 miliardi di ettari e dunque, poiché gli abitanti del pianeta sono oggi 6,5 miliardi, ognuno di noi mangia con il prodotto di soli 0.21 ettari di terreno. Inoltre si deve considerare che le terre migliori sono già tutte a coltura mentre l'espansione dell'agricoltura verso areali semiaridi potrà avvenire solo a condizione di impostare una seria e lungimirante politica globale delle risorse idriche, di cui a tutt'oggi non si colgono segnali evidenti nelle agende della politica internazionale.

In ogni caso, poiché la disponibilità di terre idonee alla messa a coltura non è comunque elevatissima, per far fronte all'aumento di popolazione atteso per il 2050 si dovrà sicuramente mirare a massicci ammodernamenti nei settori delle agrotecniche e della genetica; anche su questi temi si renderebbe oggi necessario un dibattito approfondito in sede nazionale e internazionale.

1.4 DAI VEGETALI AI MODELLI DI PRODUZIONE

Nella parte iniziale del capitolo si è accennato all'approccio cognitivo basato su modelli concettuali e matematici. Per rendere più chiaro ed efficace tale concetto in relazione al settore agronomico proporrei di provare ad immedesimarsi in una pianta cercando di coglierne finalità, esigenze e problemi, con lo scopo di pervenire ad un modello concettuale di coltura da tradurre poi in un modello matematico.

L'obiettivo principale di ogni vegetale è quello di portare alla maturazione i semi, dal che discendono svariati fenomeni non sempre compatibili con le esigenze agronomiche (es: indesiderati passaggi alla fase riproduttiva in ortaggi da foglia, indesiderato accorciamento del durata del ciclo nelle colture, con decurtazione della biomassa totale prodotta).

Salvo eccezioni rappresentate dalle colture protette, le piante coltivate vivono all'aperto tutto l'anno, in un ambiente alquanto variabile e che impone svariate limitazioni rispetto allo sviluppo dei

⁸ Harvest Index: percentuale di prodotto finale (in questo caso granella) rispetto alla biomassa totale della coltura.

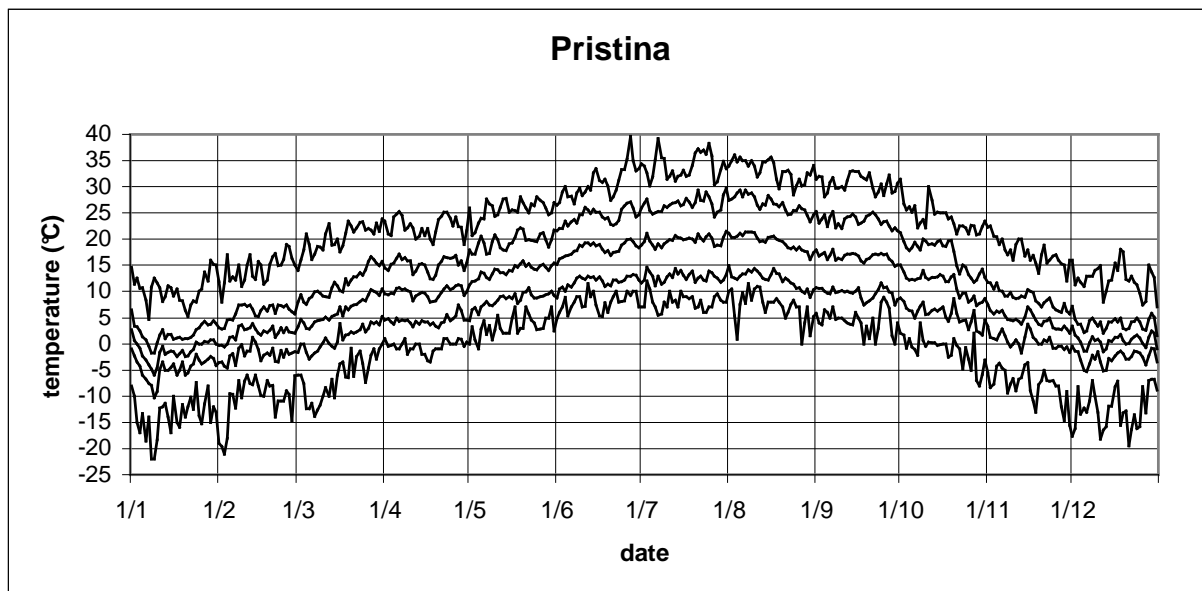
⁹ Oliva A., 1930. La politica granaria di Roma antica, Piacenza, Federazione Italiana dei Consorzi Agrari, 285 pp.

vegetali, quali il gelo, le temperature elevate, la carenza idrica, le carenze nutrizionali, la grandine, il vento, i parassiti vegetali ed animali, l'eccesso idrico nel terreno. In proposito, a titolo di esempio, si veda il diagramma in figura 5, che riporta le temperature medie giornaliere di Pristina, capoluogo del Kosovo, località balcanica sita a 42°N, la stessa latitudine di Roma. Si osservi ad esempio che a gennaio una coltura che vegeti in quel luogo (ad esempio un cereale vernino) potrebbe trovarsi di fronte ad un'assai mite +15°C oppure ad una rigidissima -22°C. E' evidente che da un lato la coltura non dovrà confondere la temporanea mitezza con l'arrivo della primavera, evitando le conseguenze disastrose di una ripresa vegetativa fuori stagione, e dall'altro la coltura stessa dovrà disporre dei meccanismi fisiologici idonei ad evitare la morte per gelo.

I vegetali coltivati si collocano fra terra e cielo (le radici nel terreno, fusto e chioma nell'aria) e fanno parte di un ecosistema complesso, il che comporta un quantità rilevante di interazioni con altri organismi, vegetali e animali, anch'essi viventi all'aperto.

Le piante hanno esigenze radiative, termiche, idriche e di nutrienti chimici (macro e microelementi). Più nello specifico la chioma necessita di luce (radiazione solare), di condizioni termiche favorevoli ai processi biochimici e di condizioni meteorologiche favorevoli alla traspirazione.

Figura 5 – Temperature medie ed estreme mensili per la stazione di Pristina in Kosovo (il grafico riporta dall'alto verso il basso le seguenti linee: massima assoluta, media delle massime, media delle medie, media delle minime e minima assoluta per il quindicennio 1977-91).



Inoltre l'apparato radicale necessita di acqua, di nutrienti, di aria, di condizioni termiche favorevoli ai processi biochimici ed infine di una matrice solida sufficientemente consistente per garantire l'ancoraggio delle radici.

Si noti inoltre che la pianta tende per sua natura ad essere soggetto attivo e non solo passivo rispetto all'ambiente in cui vive, e ciò è tanto più rilevante se dalla singola pianta si passa a considerare l'insieme delle piante e cioè la canopy¹⁰. Ad esempio gli essudati radicali alterano il terreno e ne selezionano microflora e microfauna, con lo scopo di favorire la disponibilità di nutrienti. Inoltre la canopy vegetale modifica il microclima riducendo la forza del vento e smorzando la turbolenza, con lo scopo di limitare le perdite idriche per traspirazione e di impedire all'aria di asportare la CO₂ che viene emessa dal terreno e di cui la pianta ha necessità assoluta.

Quello che si è fin qui illustrato è un modello concettuale che illustra le relazioni fra piante e ambiente. Partendo da tale visione naturalistica è tuttavia possibile passare ad un vero e proprio

¹⁰ Canopy: con tale termine si intende la massa di vegetazione compresa fra la superficie del suolo e la cima dei vegetali.

modello matematico meccanicistico (modello di produzione) che esprima il legame fra le variabili guida ed i caratteri quali – quantitativi delle produzioni agrarie.

Un modello di produzione valido per tutte le colture è schematizzato in figura 6, utilizzando un formalismo proprio della modellistica che classifica le variabili in gioco come variabili di stato (decrivono lo stato del sistema), variabili di flusso (i rubinetti che regolano i flussi fra una variabile di stato e la successiva) e variabili guida (che guidano il sistema verso un certo risultato produttivo). Tale modello vede la radiazione solare come fonte di energia, la fotosintesi come processo che trasforma la radiazione in energia di legame chimico ed una serie di organi di accumulo in cui la sostanza organica prodotta viene trasferita (foglie, fusto, radici, organi di riserva).

Secondo tale schema, il flusso di radiazione solare fotosinteticamente attiva intercettato dalla canopy (Absorbed PAR - APAR) determina una certa assimilazione lorda (Gross ASSimilation - GASS).

La conversione della APAR in Gross Assimilation avviene utilizzando un coefficiente moltiplicativo denominato Radiation Use Efficiency (RUE) che indica i grammi di zucchero assimilati per ogni MJ m⁻² di APAR e viene dunque espresso in g CH₂O MJ⁻¹ m⁻².

Valori orientativi di RUE, tratti dal manuale del modello CROPSYST¹¹ sono riportati in tabella 4.

Tabella 4 – Valori di RUE [g CH₂O MJ⁻¹ m⁻²] per alcune importanti specie C3 e C4 (fonte: manuale operativo del modello CROPSYS - modificato).

| Specie | tipo | Da | a |
|---------------------|-------------|-----------|----------|
| Orzo | C3 | 2.3 | 2.7 |
| Lenticchie | C3 | 2.0 | 2.5 |
| Avena | C3 | 2.3 | 2.7 |
| Pisello | C3 | 2.0 | 2.5 |
| Segale | C3 | 2.3 | 2.7 |
| Soia | C3 | 2.0 | 2.5 |
| Frumento tenero | C3 | 2.0 | 3.0 |
| Prato di graminacea | C3 | 2.4 | 2.6 |
| Girasole | C3 | 2.5 | 3.5 |
| Mais | C4 | 3.5 | 4.0 |
| Sorgo | C4 | 3.5 | 4.0 |

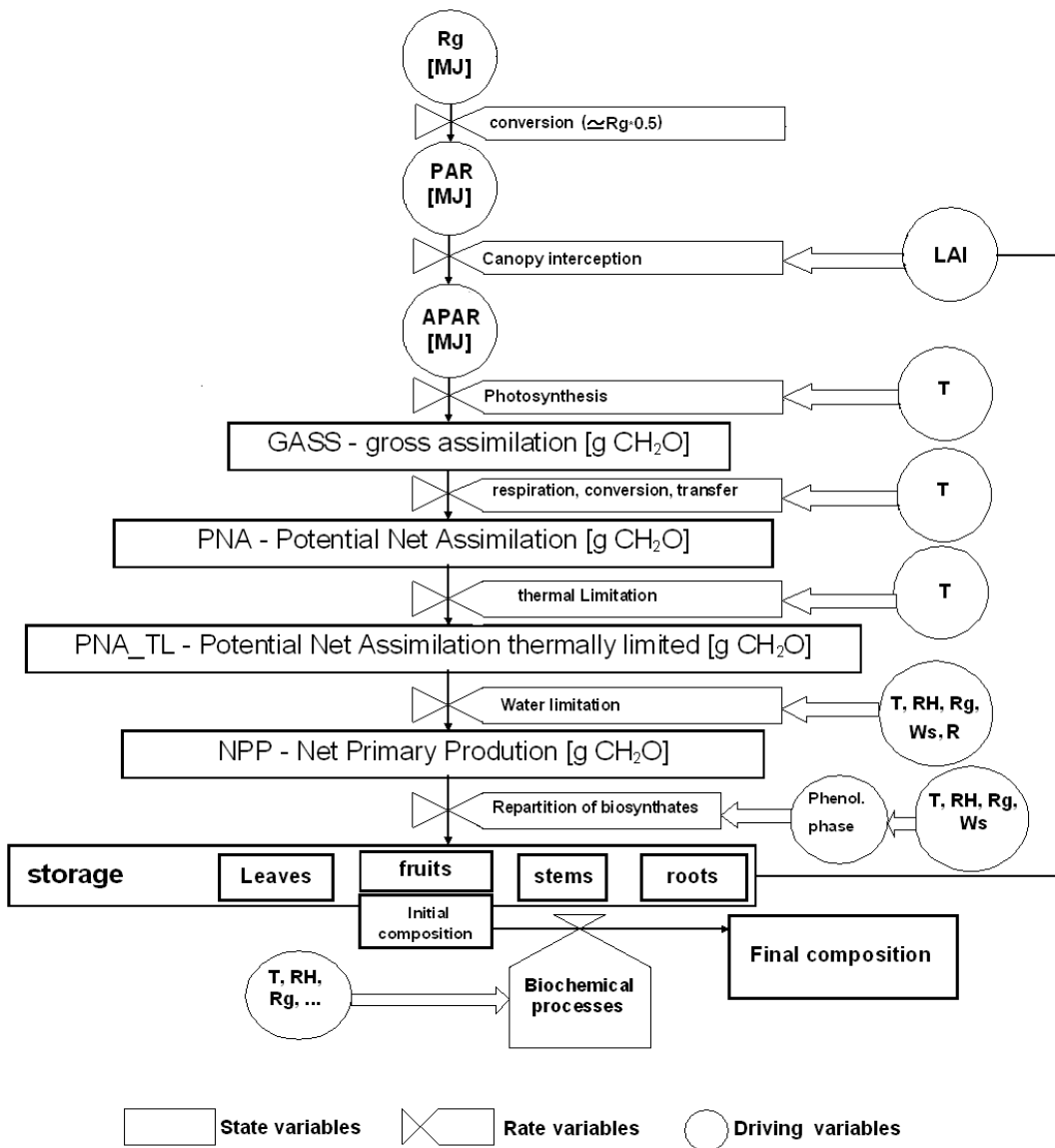
Se alla GASS si detraggono le perdite di traslocazione e conversione da zuccheri a sostanza organica (perdite influenzate ad esempio dalla temperatura) si giunge ad una produzione potenziale netta (PNA - Potential Net Assimilation). Su PNA agiscono quindi le limitazioni termiche (ogni specie e varietà presenta infatti dei cardinali termici specifici), idriche (funzione delle variabili atmosferiche che determinano il bilancio idrico del suolo) e nutrizionali (funzione delle variabili fisiche atmosferiche e del terreno che agiscono sui cicli dei macro e dei microelementi). Si perviene così ad una sostanza organica finale da ripartire fra foglie, fusti, radici e organi di riserva, applicando quote di ripartizione che sono variabili in funzione della fase fenologica, a sua volta condizionata dalle variabili guida atmosferiche.

¹¹ Stöckle C.A., Donatelli M., Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model, European Journal of Agronomy, Volume 18, Issues 3-4, January 2003, Pages 289-307

In conclusione il modello di produzione sopra descritto mostra in sostanza una “cascata di materia” che viene innescata dalla radiazione solare attraverso la fotosintesi e che è diretta verso gli organi di accumulo. Tale modello riassume in sé tutti gli elementi di questo corso di agronomia e consente di tradurre in termini quantitativi le conoscenze via via acquisite. Qui di seguito si riportano due esercizi fondati sull’applicazione del modello.

Esercizio 1 – Per un vigneto si stimi l’accumulo finale di zucchero negli acini in un giorno di luglio e nelle seguenti ipotesi: Radiazione solare globale R_g di 30 MJ m^{-2} , 50% della R_g per la PAR; 1.0 per il LAI, con primo strato fogliare che assorbe il 50% della PAR, 2.5 per la Radiation Use Efficiency (RUE); 0.60 per il rendimento di conversione da fotosintati a strutture del vegetale; 0.9 e

Figura 6 - Schema di un modello di produzione a guida meteorologica. I diversi simboli indicano le variabili di stato (state variables), quelle di flusso (rate v.) e quelle guida (driving v.). Si noti il ruolo giocato dalle variabili guida atmosferiche che sono rispettivamente la temperatura (T), l’umidità relativa (RH), la velocità del vento (Ws) e la Radiazione solare globale (Rg).



0.8 e 1 per i coefficienti di limitazione termica e idrica e nutrizionale; percentuale di accumulo nel grappolo di 0.75.

| Voce | Valore | Unità di misura |
|--|--------|------------------------------------|
| Radiazione solare globale | 30 | MJ m ⁻² |
| Coefficiente di conversione in PAR | 0.5 | |
| PAR | 15 | MJ m ⁻² |
| Quota assorbita della canopy | 0.50 | |
| APAR | 7.5 | MJ m ⁻² |
| RUE | 2.5 | g m ⁻² MJ ⁻¹ |
| CH ₂ O lorda assimilata | 18.8 | g m ⁻² |
| rendimento di conversione | 0.60 | |
| CH ₂ O al netto di perdite di conversione | 11.3 | g m ⁻² |
| CH ₂ O al netto di perdite di conversione | 1.13 | q ha ⁻¹ |
| Limitazioni (termiche, idriche e nutrizionali) | 0.72 | |
| Produzione finale limitata | 0.81 | q ha ⁻¹ |
| Percentuale di accumulo nel grappolo | 0.75 | |
| Accumulo finale zuccheri nel grappolo | 0.61 | q ha ⁻¹ |

Esercizio 2 – Per una coltura di girasole che permane in campo per 120 giorni si stimi la produzione finale di granella nell'ipotesi di una Radiazione solare globale Rg cumulata sull'intero ciclo colturale di 3500 MJ m⁻² e dei seguenti valori medi sull'intero ciclo: 50% della Rg per la PAR; 2.0 per il LAI, con primo strato fogliare che assorbe il 55% della PAR ed il secondo il 20%; 3.0 per la Radiation Use Efficiency (RUE); 0.75 per il rendimento di conversione da fotosintati a strutture del vegetale; 0.8 e 0.8 e 1 per i coefficienti di limitazione termica, idrica e nutrizionale; 0.50 per l'Harvest index.

| Voce | Valore | Unità di misura |
|--|--------|------------------------------------|
| Radiazione solare globale | 3500 | MJ m ⁻² |
| Coefficiente di conversione in PAR | 0.5 | |
| PAR | 1750 | MJ m ⁻² |
| Quota assorbita della canopy | 0.75 | |
| APAR | 1313 | MJ m ⁻² |
| RUE | 3 | g m ⁻² MJ ⁻¹ |
| CH ₂ O lorda assimilata | 3938 | g m ⁻² |
| rendimento di conversione | 0.75 | |
| CH ₂ O al netto di perdite di conversione | 2953 | g m ⁻² |
| CH ₂ O al netto di perdite di conversione | 295.3 | q ha ⁻¹ |
| Limitazioni (termiche, idriche e nutrizionali) | 0.64 | |
| Produzione limitata | 189.0 | q ha ⁻¹ |
| Harvest Index | 0.5 | |
| produzione finale di CH ₂ O (q/ha) | 94.5 | q ha ⁻¹ |