

## Stima della qualità in barbabietola da zucchero (*Beta vulgaris* L. var. *saccharifera*): prime esperienze con l'uso del modello CropSyst

Stefania Poggiolini, Marcello Donatelli<sup>1</sup>, Lorenzo Barbanti, Ugo Peruch<sup>2</sup>, C. Ribeyre, Gianni Bellocchi<sup>1</sup>

Agronomica S.r.l. Consortile, via del Lavoro 17, 44100 Ferrara; Centro Sperimentale, via S. Alberto 325, 48100 Ravenna

<sup>1</sup>Istituto Sperimentale per le Colture Industriali, via di Corticella 133, 40128 Bologna

<sup>2</sup>Eridania S.p.a., via del Lavoro 17, 44100 Ferrara

### RIASSUNTO

Una prova sperimentale su barbabietola da zucchero è stata condotta a Ca' Bosco (Ravenna) nell'anno 2000 allo scopo di studiare la risposta quantitativa della coltura a clima e agrotecnica. L'ambiente di prova è stato caratterizzato mediante il rilievo di variabili climatiche e pedologiche. La coltura è stata seminata a febbraio e condotta sia in regime asciutto sia irriguo e applicando tre livelli di concimazione azotata: 0, 90, 180 kg ha<sup>-1</sup>. Sulla coltura sono stati eseguiti rilievi produttivi in due epoche di estirpamento (22 agosto e 18 settembre). Per ciascuna epoca sono stati rilevati: resa radici, polarizzazione, melassigeni (N alfa-amminico, Na, K), purezza del sugo denso (PSD). In particolare, sono state individuate relazioni empiriche tra due parametri della qualità (N alfa-amminico e PSD) e l'indice medio di stress per la nutrizione azotata della coltura (NSI) prodotto dal modello di simulazione CropSyst. Le due relazioni (esponenziale e logaritmica rispettivamente) hanno dato valori di r<sup>2</sup> superiore a 0.70. Il set di dati pedologici, climatici e colturali raccolti nel corso della prova ha permesso di calibrare il modello, che è stato utilizzato per simulare su un arco temporale esteso (50 anni) i due parametri qualitativi della barbabietola, inserita in avvicendamento biennale con il frumento tenero. L'obiettivo è stato quello di valutare la precisione di stima dei parametri qualitativi in rapporto alla variabilità climatica. I risultati non hanno messo in evidenza differenze tra le tesi asciutte e quelle irrigue mentre sensibili differenze sono state registrate tra i diversi livelli del fattore azoto (per es., nel 50% dei casi generati  $\alpha$ -N è pari a circa 8.5 mmol %S in assenza di fertilizzazione azotata, a circa 13.5 mmol %S con il livello intermedio di azoto, a circa 18.5 mmol %S con il livello più elevato). Da questo studio sono emerse le potenzialità di impiego del modello di simulazione per sistemi colturali CropSyst come strumento previsionale di parametri produttivi di tipo qualitativo.

Parole chiave: CropSyst, modellazione, qualità, barbabietola da zucchero

### ABSTRACT

#### Estimating sugar beet quality: first approach with the CropSyst model

The CropSyst model was evaluated for its ability to simulate outputs associated with yield quality in sugar beet in response to different levels of water supply (rainfed and irrigated conditions) and nitrogen fertilisation (0, 90, 180 kg ha<sup>-1</sup> N) at Ca' Bosco (Ravenna), Northern Italy. This area is a critical environment, since weather variability may affect both crop yield and quality, via water and nitrogen availability.

Experimental data collected during the 2000 growing season were used for this study. Soil features were analysed prior to crop sowing. A complete data set of daily weather data was recorded. Crop sampling regarded biomass components every week and yield data at two harvest dates (August 22 and September 18). With reference to yield samplings, the following were determined at both times: root yield, polarisation, non-sucrose components (alpha-amino-nitrogen, sodium, potassium), thick juice purity (PSD). The whole data set provided inputs for the CropSyst model and made it possible to calibrate growth parameters.

Close relationships (goodness-of-fit higher than 0.70) were identified between two parameters of sugar beet quality (i.e. alpha-amino-nitrogen and PSD) and the average nitrogen stress index (NSI), the latter estimated by means of the simulation model CropSyst. The greater the NSI, the smaller the amount of alpha-amino-nitrogen in the sugar beet and the larger the juice purity. Fifty years of synthetic daily weather data, produced by the weather generator ClimGen, allowed CropSyst to simulate a long-term rotation sugar beet-winter wheat, in order to evaluate the impact of weather variability on quality parameter estimation. The variability of both alpha-amino-nitrogen and PSD was evaluated by means of probability of exceedence. No consistent difference emerged between rainfed and irrigated crops. On the contrary, the difference between fertilisation treatments was considerable. Taking for instance the probability of 50% for alpha-amino-nitrogen, it occurred at about 8.5 mmol %S when no nitrogen was applied, at about 13.5 mmol %S when an intermediate level of nitrogen was applied, and at about 18.5 mmol %S when the crops were well-supplied.

Even if improvements in the model are required to simulate growth based on variable source-sink relationships, these preliminary simulation results are encouraging. A better knowledge of the relationship between nitrogen availability for the crop and sugar beet quality would make it possible to develop a modelling tool for quality prediction and farmer assistance.

Key words: CropSyst, modelling, quality, sugar beet

### INTRODUZIONE

L'areale di coltivazione della barbabietola da zucchero nel Nord Italia è inserito in un ambiente di transizione tra la situazione tipicamente mediterranea, a semina

Autore corrispondente: Donatelli M., Istituto Sperimentale per le Colture Industriali, via di Corticella 133, 40128 Bologna. Tel.: 051 6316843 - Fax: 051 374857 E-mail: m.donatelli@isci.it

Ricerca finanziata da Eridania S.p.a. (prova sperimentale) e con il contributo del programma finalizzato del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali su "Miglioramento della barbabietola da zucchero per l'ambiente mediterraneo.

autunnale e con significativo supporto irriguo, e quella d'oltralpe, fino al limite nord del 60°-63° parallelo, dove la barbabietola viene seminata in primavera e la disponibilità idrica naturale è generalmente sufficiente per le esigenze della coltura (Cavazza *et al.*, 1983). La produzione areica potenziale di saccarosio che emerge da una serie di riscontri oggettivi è elevata. Nella pratica si riscontra, invece, una differenza di produzione areica media con i Paesi dell'areale più vocato, che testimonia la difficoltà di conseguire il potenziale produttivo (Casarini *et al.*, 1999).

Ne deriva un ristagno produttivo particolarmente pericoloso, perché allontana l'Italia dal resto dell'Unione Europea alla vigilia della liberalizzazione del commercio dello zucchero. La variabilità climatica che è tipica di questa zona è la principale responsabile delle altalenanti performance colturali (Peruch *et al.*, 2000) e della difficoltà di tenere il passo con i Paesi a più spiccata vocazione bieticola: infatti, in queste condizioni si accentuano gli effetti negativi sulla produzione di una serie di fattori quali elementi patogeni, in particolare cercospora, nematodi e

Tabella 1 - Caratteristiche della prova sperimentale.  
Table 1 - Experimental layout.

Fattori studiati	Fattore 1: Acqua (2 livelli)
	1. Asciutto 2. Irriguo (restituzione 100% ETo)
Schema sperimentale	Fattore 2: Azoto (3 livelli)
	1. N = 0 kg ha <sup>-1</sup>
	2. N = 90 kg ha <sup>-1</sup>
	3. N = 180 kg ha <sup>-1</sup> (90 kg ha <sup>-1</sup> alla semina + 90 kg ha <sup>-1</sup> in copertura)
Superficie parcellare	Blocco randomizzato con 4 ripetizioni
Semina	18.9 m <sup>2</sup>
Raccolta	22/02/2000
Precessione:	1° estirpamento (22/08/00)
	2° estirpamento (18/09/00)
Cultivar	Frutteto
Tolleranze genetiche	Dorotea (tipologia EN)
	Media (Cercopsora) Buona (Rizomania)

rizomania, dei problemi dell'epoca di raccolta e dello stoccaggio in cumulo delle barbabietole. A questi si aggiungono una spesso errata nutrizione azotata e l'incostante disponibilità idrica, che sono causa non marginale della variabilità produttiva (Draycott e Martindale, 2000; Gnudi, 2000; Barbanti *et al.*, 2002). L'assorbimento di azoto, il suo impiego da parte della pianta e la sua allocazione nei diversi organi dipendono dall'umidità del terreno, il cui andamento nel corso del ciclo non sempre corrisponde alle esigenze della pianta. In particolare, la fase più critica nel corso della campagna saccarifera è quella finale, che si identifica

con il cosiddetto "terzo modulo di raccolta" (orientativamente dal 20 settembre in poi). In questa fase, in corrispondenza di una ripresa delle precipitazioni caratteristica della fine estate, avviene sovente una caduta del titolo polarimetrico non sufficientemente compensata da un aumento proporzionale di resa in radici, che si traduce quindi in un calo della produzione lorda vendibile (PLV) e in un peggioramento qualitativo. I livelli produttivi non elevati e il basso titolo zuccherino mettono a rischio sia il reddito del coltivatore sia l'industria saccarifera. Il fenomeno delle basse produzioni possiede una serie di sfaccettature che sfuggono al con-

trollo dei mezzi tecnici in tutte le epoche di raccolta, come emerge anche dalla sperimentazione condotta finora. L'assistenza agli agricoltori richiede una chiara comprensione del sistema suolo-cultura in rapporto all'interazione acqua-azoto, condizionata dall'agrotecnica e dalle precedenti colture. I modelli di simulazione, supportati dalla sperimentazione in campo, possono migliorare la comprensione del sistema, permettendo lo sviluppo di strumenti per l'assistenza tecnica e per la stima della qualità del prodotto.

Gli obiettivi di questo lavoro sono quindi:

- studiare la risposta della coltura a clima e agrotecnica;
- utilizzare un modello di simulazione per coltura/sistema colturale al fine di valutare l'effetto dell'agrotecnica sui parametri qualitativi.

## MATERIALI E METODI

**Prova agronomica.** La sperimentazione è stata realizzata nell'anno 2000 presso la stazione di ricerca di Agronomica S.r.l. di Cà Bosco (Ravenna) (lat.: 44° 28' Nord, long.: 12° 10' Est, alt. 3 m slm). La prova è stata effettuata in assenza di fattori limitanti per condizioni agronomiche generali, di parassiti, malattie e infestanti. Le caratteristiche della prova nonché le variabili rilevate nel corso del ciclo colturale sono riportate nelle tabelle 1 e 2 rispettivamente.

**Il modello CropSyst.** Le simulazioni sono state effettuate con il modello per la simulazione di sistemi colturali CropSyst (Stöckle *et al.*, 2002). Il modello CropSyst consente la simulazione di sviluppo e crescita delle colture anche in risposta alla concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria, del bilancio idrico e dell'azoto nel suolo, dell'erosione e della salinizzazione del suolo, e dell'agrotecnica (irrigazioni, lavorazioni e concimazioni). Il modello CropSyst è stato sviluppato con l'obiettivo di rendere disponibile uno strumento che consentisse lo studio dei sistemi colturali in rapporto a clima, suolo e agrotecnica. Il modello ha un passo di integrazione giornaliero e rende disponibili in *output* valori giornalieri e annuali di variabili relative al ciclo della coltura. Per le simulazioni è stata utilizzata la versione 3.17 della suite di programmi CropSyst.

**Le simulazioni.** Le simulazioni effettuate hanno avuto due scopi: 1) calibrare il modello sulla prova sperimentale e sviluppare relazioni empiriche tra nutrizione azotata e qualità del prodotto; 2) simulare scenari stimando la qualità del prodotto ottenibile in un avvicendamento barbabietola-frumento tenero per 6 trattamenti derivanti da 3 livelli di concimazione azotata e 2 livelli di disponibilità idrica (Tab. 1).

Gli *input* giornalieri di precipitazione e temperatura (massima e minima) sono stati

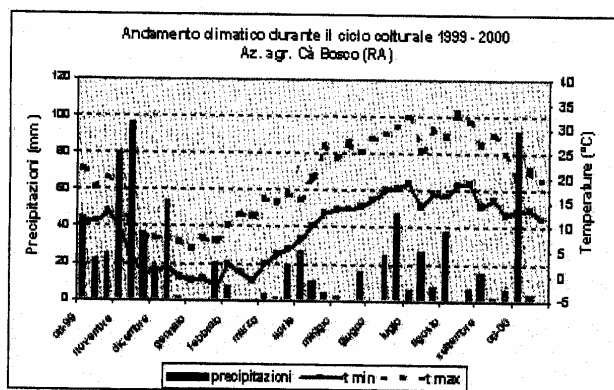
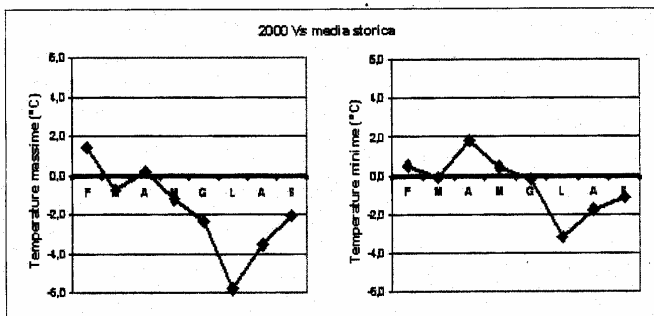


Figura 1 - Andamento delle principali variabili climatiche (precipitazioni, temperature massime e minime) durante il ciclo colturale 1999/2000.

Figure 1 - Time course of the main weather variables (rainfall, maximum and minimum temperature) during the crop cycle 1999/2000.

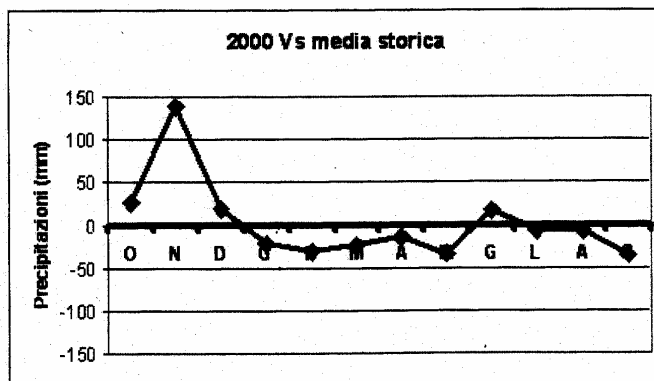
**Tabella 2 - Variabili rilevate.**  
**Table 2 - Sampled variables.**

Variabile	Periodicità
Raccolta dati meteorologici: precipitazioni, temperature massime e minime, evaporato	Giornaliera
Disponibilità idrica nel suolo negli strati 0.00-0.30, 0.30-0.60, 0.60-0.90 e 0.90-1.20 m di profondità	Settimanale (primo rilievo: 4 maggio)
Caratteristiche chimico - fisiche del suolo negli strati 0.00-0.30, 0.30-0.60, 0.60-0.90 e 0.90-1.20 m di profondità: tessitura, pH, CSC, calcare tot. e att., sostanza organica, C/N, salinità, N tot. (Kjeldahl), N ass. (CaCl <sub>2</sub> 0.01 M), P ass. (Olsen), K sc., Fe ass., Mn ass., Zn ass., Cu ass., B ass.	inizio ciclo
Partizione della biomassa vegetale: peso fresco e sostanza secca di radici, colletti, piccioli e lamine (sup. 2.25 m <sup>2</sup> )	Settimanale
Indice di area fogliare (LAI) (campioni di 5 piante)	Settimanale
Azoto totale (Kjeldahl) assimilato nei diversi organi (radici, colletti, piccioli e lamine)	Settimanale
Azoto assimilabile (CaCl <sub>2</sub> 0.01 M) del suolo negli strati 0.00-0.30, 0.30-0.60, 0.60-0.90 e 0.90-1.20 m di profondità	Settimanale
Parametri quanti-qualitativi della produzione in due epoche di raccolta (sup. 6.3 m <sup>2</sup> )	1° estirpamento (22/08/00) 2° estirpamento (18/09/00)



**Figura 2 - Anomalie delle temperature massime e minime mensili registrate nel 1999/2000 a Ravenna rispetto alla media 1978/1979 - 1998/1999 dell'areale di sperimentazione.**

**Figure 2 - Monthly maximum and minimum air temperature anomalies recorded at Ravenna during the crop cycle 1999/2000, compared to long-term average values (1978/1979 - 1998/1999) recorded in the experimental area.**



**Figura 3 - Anomalie delle precipitazioni mensili registrate nel 1999/2000 a Ravenna rispetto alla media 1978/1979 - 1998/1999 dell'areale di sperimentazione.**

**Figure 3 - Monthly rainfall anomalies recorded at Ravenna during the crop cycle 1999/2000, compared to long-term average values (1978/1979 - 1998/1999) recorded in the experimental area.**

rilevati mediante una stazione agro-meteorologica ubicata in prossimità del sito sperimentale. I dati giornalieri di radiazione solare sono stati stimati con il modello Campbell-Donatelli (Donatelli e Campbell, 1998) implementato nel software RadEst (Donatelli *et al.*, 2002).

I valori dei parametri colturali sono stati estratti prevalentemente dal manuale di CropSyst. Alcuni parametri sono stati calibrati utilizzando i dati sperimentali. In particolare, il valore del coefficiente biomassa-traspirazione ( $K_{BT}=9$ ) è stato calibrato sui dati di crescita della biomassa aerea. Alcuni parametri idrologici del suolo (es. massa volumica apparente) sono stati stimati utilizzando funzioni di *pedotransfer* implementate nel software SOILPAR (Acutis e Donatelli, 2002).

Relazioni empiriche sono state individuate tra l'indice di stress azotato (NSI) prodotto da CropSyst e i due parametri qualitativi azoto alfa-amminico ( $\alpha-N$ , mmol % S) e purezza del sugo denso (PSD, %). La qualità della barbabietola è associata a bassi valori di  $\alpha-N$  e ad alti valori di PSD.

Da una serie di 10 anni di dati meteorologici giornalieri rilevati in prossimità del sito sperimentale (anche se pochi in relazione alla variabilità attesa delle precipitazioni in una località) sono stati ricavati i parametri utilizzati per generare 50 anni di dati sintetici attraverso il generatore di clima ClimGen (Stöckle *et al.*, 2001). I dati climatici sintetici sono stati impiegati per simulare scenari di lungo periodo per un avvicendamento biennale barbabietola-frumento tenero mediante CropSyst. I parametri colturali per il frumento tenero sono stati ricavati da simula-

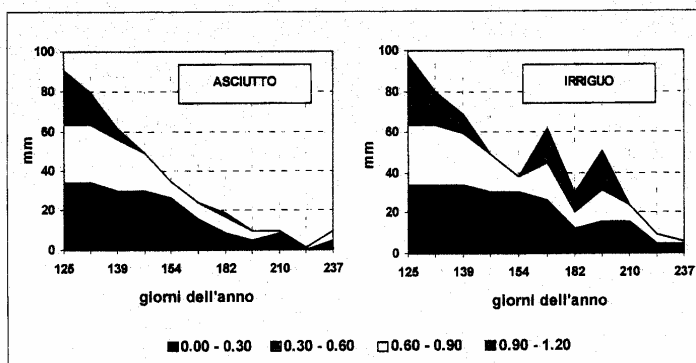


Figura 4 - Andamento della riserva idrica facilmente utilizzabile.  
Figure 4 - Available soil water content during the crop cycle.

zioni precedenti (Donatelli e Bellocchi, comunicazione personale). La conduzione agronomica del frumento è stata implementata in conformità con l'agrotecnica tradizionale della zona, con applicazione di 150 kg ha<sup>-1</sup> N (40 kg ha<sup>-1</sup> alla semina, 110 kg ha<sup>-1</sup> in copertura). L'irrigazione è stata applicata alla barbabietola usando l'opzione automatica di CropSyst, impostata in modo da approssimare un normale ciclo di irrigazione. I residui di entrambe le colture sono stati interrati 30 giorni dopo la raccolta. Ciascun trattamento è stato simulato senza reinizializzare le variabili di stato ogni anno, in modo da consi-

derare l'evoluzione dello stato del suolo nel tempo.

L'output di riferimento delle simulazioni di lungo periodo è stato l'indice medio di stress per la nutrizione azotata della coltura (NSI). Questo indice viene calcolato come:

$$NSI = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{AEN_i}{APN_i} / i$$

dove:  
AEN = stima dell'assorbimento giornaliero effettivo di azoto  
APN = stima dell'assorbimento giornaliero

potenziale di azoto

i = giorno del ciclo della coltura  
n = numero totale di giorni dall'emergenza della coltura alla raccolta.

I valori di NSI sono adimensionali e variano da 0 (assenza di stress) a 1 (assenza di crescita).

Le relazioni empiriche che legano NSI a  $\alpha$ -N e PSD hanno permesso di stimare la variabilità dei due parametri di qualità in rapporto ai sei trattamenti risultanti dalla combinazione di tre livelli di azoto per due livelli di disponibilità idrica. Per le variabili di output NSI,  $\alpha$ -N e PSD sono stati presentati i grafici delle probabilità cumulate dell'eccedenza, ovvero la probabilità di ottenere dati eguali o superiori a un dato valore. Per ciascuna variabile, dopo aver ordinato tutti i valori dal più grande al più piccolo, la probabilità dell'eccedenza (Pe, %) è calcolata come (Weibull, 1961):

$$Pe = \frac{m}{n+1} \cdot 100$$

dove:

m = numero d'ordine dei valori nella scala decrescente (m=1 corrisponde al valore più elevato)  
n = numero totale dei valori

## RISULTATI E DISCUSSIONE

**Andamento climatico.** L'andamento climatico che ha caratterizzato l'annata è ripor-

Tabella 3 - Parametri quanti-qualitativi della produzione.  
Table 3 - Quantitative yield parameters.

TESI	Resa radici (t ha <sup>-1</sup> )	Pol. (%)	Sacc. teorico (t ha <sup>-1</sup> )	K mmol (% °S)	Na mmol (% °S)	$\alpha$ -N mmol (% °S)	AK	PSD (%)	PLV (ha <sup>-1</sup> )
<b>1° Estirpamento 22/08/00</b>									
Fattore 1. irrigazione									
ASCIUTTO	85.6	B 17.4	ns 14.8	B 29.2	B 4.7	B 16.1	ns 2.23	ns 92.2	A 4467 B
IRRIGUO	100.4	A 17.2	ns 17.2	A 32.5	A 8.6	A 17.6	ns 2.48	ns 91.0	B 5165 A
Fattore 2. Azoto									
N = 0 kg ha <sup>-1</sup>	83.1	C 18.2	A 15.2	b 26.8	C 3.6	B 11.6	C 2.69	a 93.4	A 4648 ns
N = 90 kg ha <sup>-1</sup>	93.4	B 17.7	B 16.5	a 29.4	B 4.7	B 14.8	B 2.34	ab 92.4	B 5030 ns
N = 180 kg ha <sup>-1</sup>	102.4	A 16.0	C 16.4	ab 36.3	A 11.6	A 24.2	A 2.03	b 89.1	C 4777 ns
MEDIA	85.6	17.39	14.82	29.23	4.69	16.13	2.22	92.22	4471
CV%	5.9	1.7	6.6	6.2	30.0	17.5	20.2	0.6	6.9
<b>2° Estirpamento 18/09/00</b>									
Fattore 1. irrigazione									
ASCIUTTO	91.8	B 18.3	A 16.8	B 22.2	B 4.0	B 18.3	b 1.47	b 93.0	A 5165 B
IRRIGUO	113.0	A 17.0	B 19.2	A 26.4	A 7.4	A 21.5	a 1.64	a 91.5	B 5753 A
Fattore 2. azoto									
N = 0 kg ha <sup>-1</sup>	95.1	B 18.3	A 17.4	ns 21.1	C 3.2	B 14.3	C 1.71	a 93.9	A 5345 ns
N = 90 kg ha <sup>-1</sup>	105.2	A 18.0	A 18.9	ns 23.0	B 4.1	B 18.4	B 1.53	ab 92.9	B 5753 ns
N = 180 kg ha <sup>-1</sup>	106.8	A 16.8	B 17.8	ns 28.8	A 9.8	A 27.0	A 1.43	b 90.0	C 5278 ns
MEDIA	102.4	17.69	18.03	24.28	5.72	19.88	1.56	92.24	5459
CV%	5.0	2.7	6.8	4.7	24.0	13.2	11.8	0.8	7.8

Lettere diverse indicano differenze significative per P<sub>0.05</sub> (lettere minuscole) e P<sub>0.01</sub> (lettere maiuscole), ns indica differenze non significative (test di Student-Newman-Keuls di separazione delle medie).

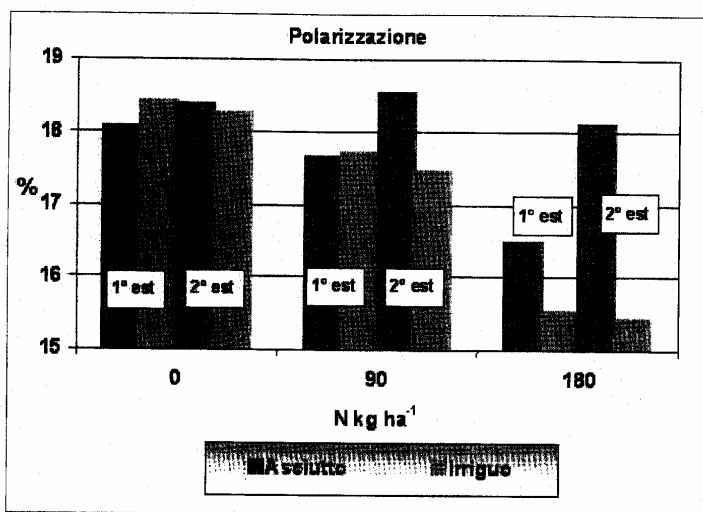


Figura 5 - Valori della polarizzazione in funzione dell'azoto, dell'irrigazione e dell'epoca di raccolta.  
 Figure 5 - Sugar content in sugar beet (polarization) as affected by nitrogen supplied, irrigation water supplied and harvest date.

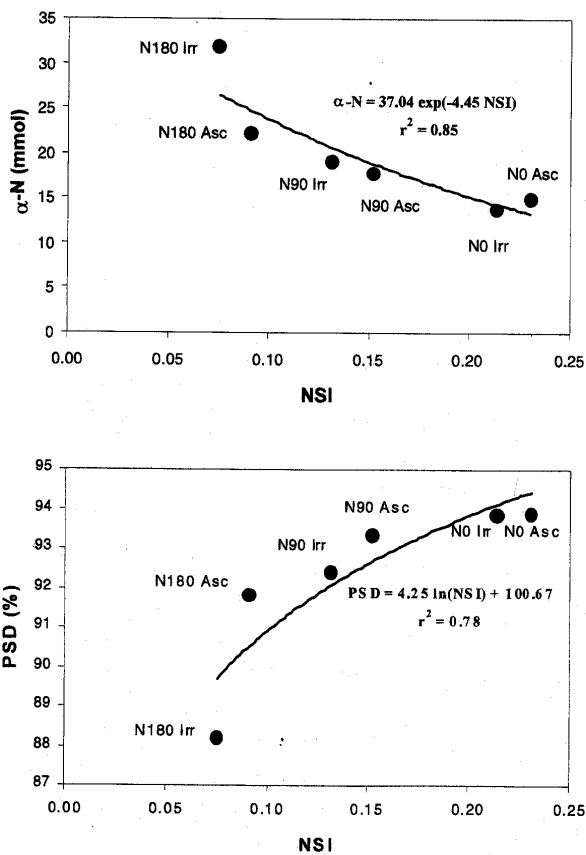


Figura 6 - Relazioni tra due parametri qualitativi della barbabietola ( $\alpha\text{-N}$  e PSD) rilevati durante il ciclo colturale 1999-2000 e l'indice medio di stress azotato (NSI) simulato con il modello CropSyst.  
 Figure 6 - Relationships between two quality parameters in sugar beet ( $\alpha\text{-N}$  and PSD) detected during the crop cycle 1999-2000, and the CropSyst-simulated average nitrogen stress index (NSI).

tato nella figura 1.

Prendendo come riferimento i dati di temperatura e di precipitazioni storiche di una stazione meteo rappresentativa dell'areale di prova, si evidenziano gli aspetti che hanno caratterizzato l'andamento climatico nel 1999/2000 (Figg. 2 e 3). Le temperature massime indicano un momento di sensibile scostamento in diminuzione dai valori medi dell'ultimo ventennio nel mese di luglio, con valori inferiori fino a 6 °C. Le temperature minime indicano due momenti di scostamento dai valori medi della serie storica: aprile con variazioni di 2-3 °C in aumento e luglio con valori da 1 a 2.5 °C in diminuzione. Per quanto riguarda l'andamento delle precipitazioni, si rilevano condizioni di elevata piovosità nel periodo ottobre-dicembre 1999 (Fig. 1), con forte incremento rispetto alla media storica considerata (+182 mm) (Fig. 3). Nell'arco di questi 3 mesi si è accumulato il 57% delle piogge dell'annata. Nei periodi successivi, infatti, le precipitazioni registrate sono risultate inferiori (-75 mm a gennaio-marzo; -32 mm ad aprile-giugno; -51 mm a luglio-settembre 2000) rispetto alla media storica.

**Umidità del suolo.** In corrispondenza delle parcelle non irrigue, l'acqua disponibile si è esaurita nello strato 0.00-0.30 m a 80 giorni dalla semina (12 maggio), nello strato 0.30-0.60 m a 93 giorni dalla semina (25 maggio) e nello strato 0.60-1.20 m a 170 giorni (10 agosto) (Fig. 4). Gli apporti idrici dovuti alle precipitazioni hanno consentito un lieve recupero dell'umidità solamente in corrispondenza del 181° e del 236° giorno dell'anno (30 giugno e 24 agosto rispettivamente).

In base al bilancio idrico calcolato su base evaporimetrica, dalla fase fenologica di 6 coppie di foglie vere (18 maggio) fino all'epoca del 1° estirpamento (24 agosto), è risultato un deficit idrico pari a 380 mm.

Nelle parcelle irrigue un volume utile di 190 mm suddiviso in 5 adacquamenti di 35-40 mm (5, 12, 19, 26 giugno, 10 luglio), ha sopperito alle esigenze idriche della coltura nella fase di maggior accumulo della biomassa, contrastando il progressivo disseccamento del suolo sia negli strati più superficiali (0.00-0.60 m), sia in quelli più profondi (0.60-1.20 m) (Fig. 4). Il deficit idrico cumulato dall'inizio del computo (18 maggio) alla fine della stagione irrigua (10 luglio) è stato di 221 mm. L'irrigazione ha pertanto compensato l'86% di tale deficit, poiché il primo intervento, programmato per il 2 maggio, è stato posticipato per stimolare l'approfondimento delle radici. La falda freatica superficiale si è mantenuta costantemente al di sotto di 2 metri dalla superficie del suolo, quindi difficilmente emungibile da parte della pianta.

**Caratteristiche del suolo.** La tessitura è risultata limo-argillosa nello strato 0.00-0.30

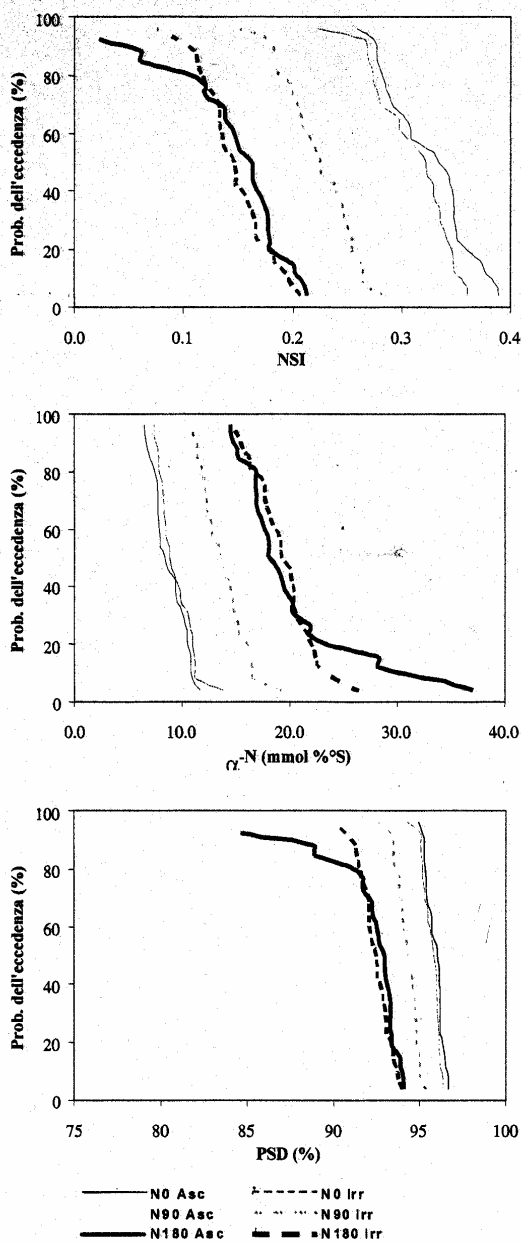


Figura 7 - Simulazioni con il modello CropSyst dell'avvicendamento barbabietola da zucchero-frumento tenero su 50 anni: probabilità cumulate dell'eccedenza dei valori di NSI,  $\alpha$ -N e PSD su barbabietola. Figure 7 - Exceedence probability distributions of NSI,  $\alpha$ -N e PSD in sugar beet for 50 years CropSyst simulations of the sugar beet-winter wheat rotation.

m e argillosa nei due strati più profondi. Lungo il profilo considerato si verifica una progressiva sostituzione delle diverse componenti granulometriche, con una diminuzione del contenuto di sabbia che passa dal 28 all'8%, un incremento del limo da 48 a 60%, e un aumento dell'argilla da 24 a 32%.

In base alle analisi chimiche, risulta un

suolo a reazione alcalina (pH=8.4), sensibilmente calcareo (28% di calcare totale e 11% di calcare attivo), con una buona dotazione di sostanza organica, decrescente lungo il profilo da 2.88 a 1.32%. Anche il contenuto di azoto totale decresce lungo il profilo analizzato da 1.30 a 0.73%. Il rapporto C/N indica una tendenza all'immobilizzazione

dell'azoto per processi di organizzazione, più marcata nello strato 0.00-0.30 m (C/N=13.3) rispetto ai due successivi (C/N=11).

Il contenuto di fosforo assimilabile è buono nello strato più superficiale (17 mg kg<sup>-1</sup>, metodo Olsen), mentre è molto scarso in quelli più profondi (1 mg kg<sup>-1</sup>). In termini di azoto disponibile (N-CaCl<sub>2</sub>, somma delle frazioni estratte), a inizio prova è emersa una dotazione sufficiente (19 mg kg<sup>-1</sup>). Dalle analisi non risultano, infine, carenze di microelementi.

**Parametri quanti-qualitativi della produzione.** I risultati produttivi nei due estirpamenti (resa radici, polarizzazione, saccarosio, potassio, sodio, azoto alfa-amminico, coefficiente di alcalinità dei sughi, purezza del sugo denso) sono riportati nella Tab. 3.

Tra i due estirpamenti la resa in radici è incrementata come atteso, ma senza apprezzabili flessioni polarimetriche. La qualità interna del prodotto, espressa come PSD, migliora leggermente in virtù di un abbassamento del potassio. Il prolungamento della vegetazione si è quindi tradotto in un beneficio di reddito sia agricolo sia industriale, in contrasto con l'andamento tipico per la coltura.

All'interno dei singoli estirpamenti, l'efficienza dei due fattori studiati, acqua e azoto, è risultata variabile: entrambi determinano aumenti di resa in radici dell'ordine del 15-20%, ma la polarizzazione flette vistosamente per effetto dell'azoto, assai meno per effetto dell'irrigazione. Anche dal punto di vista qualitativo, l'azoto induce un calo di PSD di circa 3.5 punti percentuali in entrambe le epoche, laddove la diminuzione legata all'irrigazione è di poco più di un punto.

In pratica, entrambi i fattori tecnici si confermano determinanti ai fini produttivi, ma il loro impiego richiede un'attenta calibrazione per far fronte ai relativi costi (soprattutto l'irrigazione) ed alle controindicazioni tecniche (soprattutto l'azoto).

L'aspetto della polarizzazione, che è attualmente motivo di particolare attenzione sia da parte agricola sia industriale, merita un esame più approfondito. L'interazione irrigazione x azoto x epoche di raccolta (Fig. 5) evidenzia una sostanziale tenuta del dato in assenza di azoto, a prescindere dal regime irriguo e dall'epoca di raccolta. Viceversa, con la dose più alta di azoto (180 kg ha<sup>-1</sup>), la polarizzazione regge apprezzabilmente rispetto al non concimato solo in asciutto nell'estirpamento tardivo, mentre decresce nelle altre tre combinazioni (irriguo in entrambe le epoche e asciutto-precocce).

Complessivamente, il contenuto calo della polarizzazione tra prima e seconda raccolta contrasta con i timori di fondo della bieticoltura legati alla "retrogradazione" del titolo nel corso della campagna, ma rispecchia fedelmente le caratteristiche dell'annata, ca-

ratterizzata anche a livello macroareico da un simile comportamento. Invece, il calo di polarizzazione indotto dall'azoto, ben noto in letteratura (Draycott, 1993), risulta più accentuato in irriguo che in asciutto. Questo in conseguenza del fatto che la disponibilità effettiva di azoto per la coltura è correlata positivamente alla disponibilità idrica nel suolo nel corso del ciclo colturale (vedi in tabella 3 i valori di  $\alpha$ -N).

**Relazioni empiriche tra indice di stress azotato e parametri qualitativi.** I dati prodotti nel corso della prova hanno permesso di individuare relazioni tra i due parametri della qualità della barbabietola  $\alpha$ -N, PSD e l'indice medio di stress azotato (Fig. 6). Le relazioni trovate appaiono consistenti ( $r^2 > 0.70$ ) e in entrambi i casi è chiara la tendenza da parte della coltura a esprimere parametri di qualità migliori in presenza di livelli alti di stress da azoto simulati con il modello CropSyst.

**Simulazioni di lungo periodo.** Le simulazioni condotte con il modello CropSyst su 50 anni hanno permesso di valutare la variabilità temporale dei valori di NSI e, di conseguenza, dei valori di  $\alpha$ -N e PSD, in quanto correlati ai livelli di stress azotato. I risultati, nella forma di grafici della probabilità cumulata di eccedere un dato valore, sono riportati in figura 7. In generale non si osservano apprezzabili variazioni tra le tesi irrigue e quelle asciutte, sebbene una certa differenza si registri in presenza dei livelli più alti di fertilizzazione. Le probabilità di maggiori livelli di stress che si verificano in assenza di fertilizzazione azotata (50% di probabilità per le seguenti combinazioni: NSI-0.32 con N 0, NSI-0.23 con N 90, NSI-0.15 con N 180) si trasferiscono a entrambi i parametri qualitativi. Per  $\alpha$ -N il 50% di probabilità si ottiene a circa 8.5 mmol %S con N 0, 13.5 mmol %S con N 90, 18.5 mmol %S con N 180. Per PSD il 50% di probabilità si verifica approssimativamente intorno al 96% con N 0, 94% con N 90, 92% con N 180. In regime irriguo e per elevate dosi di azoto (N 180), la probabilità di avere valori molto bassi di NSI (<0.1) è alta (>80%), mentre gli stessi valori non si regi-

strano nelle altre tesi. Di conseguenza, per le tesi molto concimate, risultano elevate sia la probabilità (>80%) di avere alti livelli di  $\alpha$ -N (>15 mmol %S) sia la probabilità (>90%) di avere bassi valori di PSD (<90%).

#### CONCLUSIONI

La ricerca condotta, ancora in corso, ha consentito di quantificare la risposta produttiva della barbabietola da zucchero ai fattori acqua e azoto e di definire un *data set* di valori per i parametri del modello per sistemi colturali CropSyst. È stata valutata la possibilità di impiegare un modello per sistemi colturali nello studio di alcuni aspetti qualitativi della barbabietola da zucchero. I risultati presentati sono i primi del genere realizzati nelle aree bieticole della Pianura Padana. La calibrazione del modello appare critica in relazione ai parametri legati alle trasformazioni azotate, al fine di stimare correttamente l'assorbimento azotato da parte della coltura. Anche le relazioni tra i due parametri di qualità considerati e l'indice dello stress azotato soffrono dell'empirismo legato alla limitatezza dei dati disponibili ma la loro robustezza (tra anni e suoli diversi) potrà essere incrementata con nuovi dati.

In questo studio il modello CropSyst ha fornito risultati soddisfacenti, nella prospettiva di essere utilizzato come strumento previsionale della qualità delle produzioni bieticole. I dati sperimentali hanno permesso di evidenziare aree del modello che possono essere migliorate in rapporto a un suo uso per la coltura di barbabietola da zucchero. In particolare, si avverte la necessità di sviluppare un approccio concettuale per la simulazione della crescita colturale basata su relazioni *source-sink* variabili durante il ciclo della coltura. L'approccio seguito in questo studio può orientare i futuri sviluppi del modello CropSyst nella prospettiva di un adattamento del modulo colturale alla stima degli aspetti qualitativi delle produzioni.

#### BIBLIOGRAFIA

- Acutis M., Donatelli M., 2002. *SOILPAR 2.00*: software to estimate soil hydrological parameters and functions. Eur. J. Agron., special issue on the ESA Symposium in Florence 2001. (in stampa) (*software* disponibile *on-line*: <http://www.isci.it/tools>)
- Barbanti L., Beltrami G., Franesi A., Bettini G., Cecchini M., Telloli R., Zavanella M., Campagna G., 2002. Bietola, prime indicazioni per la concimazione azotata. *Terra & Vita*, 4, 40-43.
- Casarini B., Biancardi E., Ranalli P., 1999. La barbabietola negli ambienti mediterranei. Edagricole, Bologna.
- Cavazza L., Amaducci M.T., Venturi G., Pesci C., 1993. Ecologie de la betterave à sucre dans la région méditerranéenne. Commission de la culture betteravière dans le bassin méditerranéen (IIRB), pp. 1-80.
- Donatelli M., Bellocchi G., Fontana F., 2002. RadEst3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. Eur. J. Agron., special issue on the ESA Symposium in Florence 2001. (in stampa) (*software* disponibile *on-line*: <http://www.isci.it/tools>)
- Donatelli M., Campbell G.S., 1998. A simple model to estimate global solar radiation. Proc. 5<sup>th</sup> European Society for Agronomy Congress, Nitra, The Slovak Republic, 2, 133-134.
- Draycott A.P., 1993. Nutrition. In: Cooke D.A., Scott R.K. (eds). *The sugar beet crop: science into practice*. Chapman & Hall, pp.239-250.
- Draycott A.P., Martindale W., 2000. Effective use of nitrogen fertiliser. *British Sugar Beet Review*, 68, 18-21.
- Gnudi G., 2000. La bietola, l'azoto e i difficili equilibri. *Terra e Vita*, 48, 12-13.
- Peruch, U., Poggiolini S., Barbanti L., Rosso F., 2000. Effetto della piovosità sulla purezza del sugo denso. *L'Industria Saccarifera Italiana*, 6, 183-188.
- Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R., 2002. CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron., special issue on the ESA Symposium in Florence 2001 (in stampa) (*software* disponibile *on-line*: <http://www.bsysse.wsu.edu/cropsyst>)
- Stöckle C.O., Nelson R.L., Donatelli M., Castellvi F., 2001. ClimGen: a flexible weather generation program. Proc. 2<sup>nd</sup> International Symposium Modelling Cropping Systems, 16-18 July, Florence, Italy, 229-230 (*software* disponibile *on-line*: <http://www.bsysse.wsu.edu/climgen>).
- Weibull W., 1961. *Fatigue testing and analysis of results*. Pergamon Press. Oxford, United Kingdom.