



Diffusione di un modello sostenibile
per la produzione di bioetanolo di 1^a generazione
dal sorgo zuccherino in impianti decentralizzati

Manuale Tecnico



Editore
Poligrafiche San Marco S.a.s.
Via Fermi 29 – 34071 Cormons (Gorizia) - Italia
Tel. +39 0481 630750, fax +39 0481 60691

Layout
CETA
<http://www.ceta.ts.it>



Foto in copertina: CETA, INIPA



L'unica responsabilità per il contenuto di questa pubblicazione è degli autori. Essa non rappresenta l'opinione della Comunità europea. La Commissione europea non è responsabile di alcun utilizzo che possa essere fatto delle informazioni contenute nella pubblicazione.

**Diffusione di un modello sostenibile
per la produzione
di bioetanolo di 1^a generazione
dal sorgo zuccherino
in impianti decentralizzati**

Manuale Tecnico

1. INDICE DEI CONTENUTI

1.	Indice dei contenuti	5
2.	Prefazione	7
3.	Lista degli acronimi e delle abbreviazioni.....	9
4.	Il progetto Sweethanol.....	13
5.	Il partenariato del progetto Sweethanol.....	15
6.	Il sorgo zuccherino come coltura energetica sostenibile	17
6.1	Perché il sorgo zuccherino?	17
6.2	Caratteristiche botaniche e morfologiche	19
6.3	Tecnica colturale	23
6.4	Programmi di selezione degli ibridi.....	28
6.5	Esperienze nella coltivazione del sorgo zuccherino condotte nell'UE.....	29
7.	Linee guida per il modello di filiera sviluppato per l'UE	37
7.1	Introduzione.....	37
7.2	Dimensionamento della filiera di approvvigionamento	38
7.3	Processamento della biomassa a bioetanolo	40
7.4	Unità di valorizzazione energetica dei sottoprodotti	49
8.	Il modello 1 sviluppato per l'UE: il sorgo zuccherino come unica materia prima processata nell'impianto decentralizzato	53
8.1	Caso studio: l'applicazione del modello 1 nella Pianura Padana, Italia.....	56
8.2	Caso studio: l'applicazione del modello 1 nell'area industriale di Salonicco, Grecia.....	66
8.3	Caso studio: l'applicazione del modello 1 in Andalusia, Spagna	74
9.	Il modello 2 sviluppato per l'UE: il sorgo zuccherino e la barbabietola da zucchero come materie prime processate alternativamente nell'impianto decentralizzato	81
9.1	Caso studio: l'applicazione del modello 2 in Andalusia, Spagna	81
10.	Riferimenti bibliografici e fonti.....	85

2. PRAFAZIONE

Il bioetanolo prodotto dal sorgo zuccherino è sostenibile dai punti di vista ambientale ed economico: il suo utilizzo in sostituzione della benzina consente un risparmio nelle emissioni di GHGs in linea con l'obiettivo europeo per il 2018 (i.e. 60%) e la possibilità di valorizzare i sottoprodotti rende remunerativi anche gli impianti decentralizzati di dimensioni medio-piccole (i.e. capacità fino a 15.000 t/anno).

Attualmente il mercato europeo del bioetanolo è controllato dai grossi gruppi industriali e dalle grandi cooperative agricole legati al settore saccarifero e la produzione si concentra in impianti di elevata capacità (100.000-200.000 t/anno), dove sono processati principalmente i cereali. La scarsa differenziazione delle materie prime e la produzione centralizzata trovano spiegazione nella persistenza di alcune barriere non tecnologiche, che frenano la penetrazione di diversi modelli produttivi applicati in altre realtà al di fuori dell'UE.

Il progetto SWEETHANOL, finanziato nell'ambito del programma Intelligent Energy Europe della Commissione europea, è finalizzato a superare tali barriere, legate soprattutto all'assenza di informazione e conoscenza, e promuove azioni a favore dell'aumento della diversificazione delle materie prime, della produzione decentralizzata e dello sviluppo di filiere locali per l'utilizzo del sorgo zuccherino come coltura energetica dedicata.

Uno dei principali risultati del progetto SWEETHANOL è la validazione di un modello di filiera da proporre nei Paesi dell'Europa meridionale, in quanto areale di coltivazione del sorgo zuccherino. La validazione è stata conseguita parallelamente in Italia, Spagna e Grecia attraverso la discussione dei suoi aspetti tecnici e non tecnici, coinvolgendo i rappresentanti nazionali di tutti gli attori del mercato, in modo da recepirne i suggerimenti e le osservazioni. Nel prosieguo del progetto in Italia, Grecia e Spagna saranno predisposti dei piani di formazione per il profilo specifico di ciascuno degli attori della filiera, diretti a divulgare i contenuti e ad enfatizzare le opportunità che questo modello produttivo può offrire.

Il presente manuale tecnico si configura come l'aggiornamento del precedente "Sweethanol – Manuale introduttivo" e si differenzia da quest'ultimo, poiché il modello produttivo è stato arricchito attraverso le esperienze maturate nel corso delle visite in India, Perù e Spagna e grazie alla discussione con gli attori della filiera.

Il presente manuale tecnico si configura come una guida per fornire agli *stakeholders* tutte le informazioni tecniche di base che risultano funzionali alla predisposizione degli studi di fattibilità a favore di iniziative imprenditoriali nel settore agro-energetico.

A questo scopo lo "Sweethanol – Manuale tecnico" riporta delle linee guida generali per il dimensionamento della filiera in tutti i suoi aspetti (e.g. superficie agricola asservita, logistica, potenza per le unità di valorizzazione energetica dei sottoprodotti) e declina il modello di filiera validato con gli *stakeholders* in due approcci, che possono essere adottati alternativamente in funzione delle caratteristiche tipiche dei territori in esame.

La trattazione è completata dall'analisi di alcuni casi studio, contestualizzati nei Paesi coinvolti nel progetto.

La versione del manuale tecnico in lingua inglese è stata pensata come strumento per ottimizzare la trasferibilità delle informazioni nei Paesi dell'areale del sorgo zuccherino, che non partecipano direttamente al progetto SWEETHANOL (e.g. Romania, Ungheria, Francia, Croazia).

I testi dello “Sweethanol – Manuale tecnico” sono stati prodotti da Michela Pin, Denis Picco ed Alessia Vecchiet (CETA – Centro di ecologia teorica ed applicata, Italia), Oscar León, Paloma González, Roberto Marcos ed Anabel Elisa Ruiz (Fondazione Cartif – Centro tecnologico, Spagna), Kostas Konstantinou, Iakovos Sarigiannis, Irene Tsakiridou e Nikos Remvos (REACM – Agenzia regionale per l'energia della Macedonia Centrale Anatoliki S.A., Grecia), Luca D'Apote e Luisa Daidone (INIPA – Coldiretti, Italia), Marina Sanz Gallego, Maria Hernando Sanz e M^a Dolores Curt (ADABE – Associazione per la diffusione della biomassa, Spagna), Fernando Mosquera Escribano (Gruppo di agro-energetica dell'Università Politecnica di Madrid, Spagna), Athanasios Bartsios, Migdalias Prodromos e Tsimpos Ioannis (Cooperativa agricola di Halastra, Grecia).

Si ringraziano tutti gli autori e gli enti finanziatori per la loro cooperazione.

31 ottobre 2011

Michela Pin – Project Manager
CETA, Italia

Alessia Vecchiet
CETA, Italia

Denis Picco
CETA, Italia

3. LISTA DEGLI ACRONOMI E DELLE ABBREVIAZIONI

AEBIOM associazione europea delle biomasse

Bio-ETBE etil-ter-butil-etere ottenuto dal bioetanolo

CAICYT comitato consultivo per la ricerca scientifica e tecnica (Spagna)

CH₄ metano

CHP cogenerazione di energia termica ed elettrica

CO monossido di carbonio

CO₂ anidride carbonica

COD domanda chimica di ossigeno

CRA-CIN centro di ricerca in agricoltura – centro di ricerca per le colture industriali (Italia)

CRA-ING centro di ricerca in agricoltura – unità di ricerca per l'ingegneria agraria (Italia)

CRA-RPS centro di ricerca in agricoltura – centro di ricerca per lo studio delle relazioni tra pianta e suolo (Italia)

CRES centro per le fonti rinnovabili di energia (Grecia)

Crpa S.p.A. centro ricerche produzioni animali (Italia)

DDG *distillers dried grains*, sottoprodotto del processamento a bioetanolo della granella dei cereali

DDGS *distillers dried grains with solubles*, sottoprodotto del processamento a bioetanolo della granella dei cereali con le componenti solubili

DPI disciplinare di produzione integrata

E100 bioetanolo al 100%

EC commissione europea

E85 bioetanolo in miscela al 85%

ENEA agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (Italia)

FER fonti energetiche rinnovabili

FIT conto energia

FORSU frazione organica dei rifiuti solidi urbani

FP programma quadro per la ricerca e lo sviluppo tecnologico

FFV *flexible fuel vehicles*, veicoli adatti ad essere alimentati con E85 o benzina

FYROM Former Yugoslav Republic of Macedonia

GHGs gas ad effetto serra

H₂S acido sulfidrico

HHST *higher-heat shorter time*, tecnica di pastorizzazione con temperature elevate e tempi brevi

HRT tempo di ritenzione idraulica

HTST *high temperature short time pasteurisation*, tecnica di pastorizzazione con temperature elevate e tempi brevi

IEE programma *intelligent energy europe*

INIA centro nazionale di ricerca tecnologica in agricoltura ed alimentazione (Spagna)

LCA analisi dell'intero ciclo di vita

LUC cambio di uso del suolo

MIPAAF ministero delle politiche agricole, alimentari e forestali (Italia)

MON *motor octane number*, numero di ottano calcolato con il motore sotto carico, ossia con regime di rotazione superiore

MSE ministero dello sviluppo economico (Italia)

MTBE metil-ter-butil-etere

N₂ azoto molecolare

NO_x ossidi di azoto

O₂ ossigeno molecolare

ORC *organic Rankine cycle*, ciclo termodinamico Rankine con fluido organico

O&M *operative and maintenance*, costi di gestione e manutenzione

PCI potere calorifico inferiore

PIL prodotto interno lordo

PMI piccole medie imprese

p/p peso/peso

R&S ricerca e sviluppo

RED direttiva sulla promozione dell'uso delle fonti rinnovabili, 2009/28/CE

REP piano per le energie rinnovabili (Grecia)

rpm giri al minuto

RON *research octane number*, numero di ottano con il motore a freddo

RUE efficienza nell'uso della radiazione solare

s.s. sostanza secca

tep tonnellate equivalenti di petrolio

TIR tasso interno di rendimento

TRPF sistema di estrazione a coppie di cilindri dentati

UP ultra pastorizzazione

USA Stati Uniti d'America

VOC composti organici volatili

v/v volume/volume

wb sostanza umida

WUE efficienza nell'uso dell'acqua

4. IL PROGETTO SWEETHANOL

SWEETHANOL è un progetto finanziato dalla Commissione europea nell'ambito del programma IEE-II 2009 (*Intelligent Energy Europe*), azione "ALTENER" – Fonti di Energia Nuove e Rinnovabili.

SWEETHANOL è un progetto relativo alla diffusione di un modello sostenibile da proporre nell'UE per produrre bioetanolo di prima generazione dal sorgo zuccherino in impianti decentralizzati.

Il progetto è organizzato nelle seguenti azioni:

- il perfezionamento del *know-how* in merito alla produzione del bioetanolo dal sorgo zuccherino. I dati più interessanti (e.g. costi di investimento, consumi energetici, costi di produzione, resa in bioetanolo, sfruttamento dei sottoprodotti) sono raccolti, visitando centri di ricerca in agricoltura, processisti ed impianti esistenti ed analizzando i relativi modelli di gestione;
- la discussione di un modello sostenibile da introdurre nell'UE, coinvolgendo tutti gli attori della filiera produttiva (i.e. agricoltori, associazioni di categoria agricole, processisti, PMI, ditte sementiere, investitori, legislatori e rappresentanti delle autorità pubbliche e delle agenzie per l'energia). La discussione è articolata in seminari settoriali (i.e. tecnici, amministrativi) ed intersettoriali, realizzati in ciascuno dei Paesi partecipanti;
- la formazione degli attori della filiera attraverso corsi specifici per ogni profilo;
- la creazione e la gestione della "*Esse community*" (link: <http://esse-community.eu/>), che costituisce un luogo virtuale dove tutti i soggetti interessati possono interagire, per condividere ed acquisire informazioni in merito alla filiera del bioetanolo dal sorgo zuccherino. La "*Esse Community*" aggiorna gli *stakeholders* su articoli ed eventi a tema specifico, permette di interloquire attraverso *blog*, *forum* e *social network* e mette a disposizione teleconferenze e video. La sua vitalità è garantita da un sistema di gestione delle conversazioni ed è monitorata attraverso analisi statistiche sull'affluenza.

Il progetto SWEETHANOL recepisce le seguenti priorità del programma IEE:

- incoraggiare gli attori di mercato della filiera del bioetanolo ad aumentarne la competitività e la sostenibilità ambientale;
- supportare e promuovere l'applicazione dei criteri di sostenibilità per il bioetanolo;
- indirizzare le tematiche di discussione sull'utilizzo del suolo e sulla sostenibilità;
- facilitare e promuovere un dibattito ben informato come momento di confronto tra i decisori ed il grande pubblico.

I principali obiettivi del progetto SWEETHANOL sono i seguenti.

- La diffusione del *know-how* in merito al modello di filiera sostenibile da introdurre nell'UE.

Il modello è condiviso con i rappresentanti di tutti gli attori della filiera, analizzando in dettaglio gli aspetti tecnici, logistici, economici, finanziari, energetici, ambientali ed amministrativi. Tale modello è successivamente diffuso mediante corsi di formazione rivolti a ciascuno dei profili degli attori di filiera. Come conseguenza

è incoraggiato l'avvio di nuove iniziative imprenditoriali, in grado di conciliare la competitività economica con la sostenibilità ambientale del bioetanolo prodotto. Sono attesi i seguenti cambiamenti nel mercato del bioetanolo: l'aumento nella diversificazione delle materie prime, la decentralizzazione della produzione e la disponibilità di bioetanolo di prima generazione sostenibile in termini di risparmio in emissioni di GHGs e, pertanto, computabile ai fini degli obiettivi comunitari di utilizzo delle FER nel settore dei trasporti. L'ampia discussione prevista nel progetto contribuisce ad indirizzare i dibattiti correnti sull'uso del suolo e sulla sostenibilità del bioetanolo, nonché a facilitare e promuovere un confronto consapevole e ben informato su questi temi.

- L'aggiornamento giornaliero ed il coordinamento della filiera di approvvigionamento attraverso la "Esse Community".

Consultando la "Esse Community" gli attori della filiera possono contare su un aggiornamento giornaliero in merito agli aspetti legislativi, amministrativi e tecnici relativi alla produzione ed al mercato del bioetanolo (in generale, e specificatamente legato al sorgo zuccherino). Questo servizio semplifica l'analisi di mercato necessaria per l'avvio di nuove iniziative imprenditoriali e favorisce la diversificazione del mercato del bioetanolo, in contrapposizione all'attuale centralizzazione. Inoltre, la costruzione della "Esse Community" contribuisce ad indirizzare le discussioni in atto sull'uso del suolo e sulla sostenibilità del bioetanolo, nonché a facilitare e promuovere un dibattito ben informato come momento di confronto tra i decisori ed il grande pubblico.

5. IL PARTERNARIATO DEL PROGETTO SWEETHANOL

CETA – Centro di ecologia teorica e applicata – Italia

Il CETA è stato fondato nel 1987 a Gorizia (Italia) ed è un'associazione senza fini di lucro impegnata nella ricerca e nella sperimentazione di tecnologie e di modelli innovativi da applicare nelle seguenti aree operative e settori: ambiente, nei settori: gestione sostenibile delle risorse ambientali (acque, suolo, paesaggio), costruzione di bilanci ambientali e sviluppo di modelli di contabilità ambientale; energia, nei settori: promozione dell'uso delle fonti rinnovabili – biomasse, biogas, biocarburanti e bioliquidi, solare, geotermia, idroelettrico –, miglioramento dell'efficienza energetica, pianificazione energetica, diagnosi energetiche, sviluppo di modelli di gestione territoriale, analisi multicriteri, analisi costi-benefici, economia delle fonti energetiche rinnovabili; territorio, nei settori: VAS, VIA, governo del territorio; conoscenza, nei settori: sperimentazione per la produzione e per lo sviluppo di modelli innovativi per i biocarburanti di seconda e terza generazione e per la diffusione di colture agrarie a basso impatto ambientale. Nelle aree operative di competenza il CETA applica un approccio multidisciplinare, in virtù dell'impiego di professionisti di elevato livello formativo (i.e. PhD, master) e con profili diversificati (ingegneri, biologi, agronomi, economisti, architetti, naturalisti, geologi).

Fondazione CARTIF – Centro tecnologico - Spagna

CARTIF è stato fondato nel 1994 come Centro di automazione, robotica, informazione e produzione tecnologica ed è un'associazione *non-profit* focalizzata sulla ricerca applicata; è situato presso il Parco tecnologico di Boecillo a Valladolid (Spagna). Da Ottobre 2005, CARTIF è legalmente istituito come Fondazione e ha come fini principali: identificare le necessità tecnologiche e sviluppare conoscenza e sviluppo basati sulla ricerca, supportare l'innovazione tecnologica nell'industria, principalmente tra le PMI, e diffondere la ricerca, lo sviluppo ed i risultati nell'innovazione.

REACM – Agenzia regionale per l'energia della Macedonia Centrale – Anatoliki S.A. - Grecia

La regione della Macedonia Centrale e l'agenzia di sviluppo locale (Anatoliki S.A.) hanno fondato REACM nel 1997, grazie al programma SAVE della CE. Le principali attività dell'agenzia includono: l'acquisizione di dati per la produzione ed il consumo di energia nella regione, il supporto alle autorità locali nella pianificazione delle politiche energetiche, le attività di disseminazione relativamente alle FER ed alle tecnologie RUE, la formazione e l'educazione, la gestione della mobilità a livello municipale, la promozione dei biocarburanti, il supporto all'industria locale, alle PMI ed al settore commerciale, le applicazioni pilota delle certificazioni EMAS nell'industria pesante a Salonico, la formazione del personale nel settore industriale sulle verifiche di ECO-Energy, la promozione delle tecnologie che impiegano le FER nel settore agricolo, la definizione del REP, la collaborazione con i Paesi limitrofi sul tema del risparmio energetico, la partecipazione nella pianificazione regionale per lo sviluppo e la gestione delle zone geotermiche.

INIPA- Coldiretti - Italia

INIPA, Ente di formazione nell'agro-alimentare, è una associazione senza scopo di

lucro, giuridicamente riconosciuta, promossa e sostenuta da Coldiretti. Coldiretti, con un milione e mezzo di associati, è la principale organizzazione degli imprenditori agricoli a livello nazionale ed a livello europeo. La presenza sul territorio è accompagnata dalla crescente rappresentatività ed a Coldiretti fa capo il 69% delle imprese agricole italiane iscritte, pari a 504.000, con la maggioranza assoluta della superficie agricola coltivata, dei capi allevati e del PIL agricolo nazionale. INIPA, in linea con gli orientamenti e gli indirizzi strategici di Coldiretti, svolge attività di formazione ricerca e divulgazione per lo sviluppo delle risorse umane nei settori agro-alimentare, ambientale e dei servizi, orientandone i risultati nella direzione dell'innovazione e del cambiamento culturale ed organizzativo nelle imprese agro-alimentari, nelle organizzazioni di rappresentanza e servizi nei territori agricoli e rurali. INIPA opera anche attraverso una fitta rete territoriale, di livello regionale, dedicata alla formazione ed allo sviluppo delle risorse umane del settore, svolgendo funzioni di indirizzo, coordinamento e monitoraggio delle attività e degli interventi formativi territoriali e realizzando, all'interno di un'uniforme visione di sistema, interventi di formazione e divulgazione di interesse nazionale e locale. INIPA, inoltre, si distingue per azioni di interesse economico e sociale, volte alla diffusione di un modello di impresa agricola moderna e multifunzionale fondata su principi di responsabilità sociale. In questo ambito, l'ente realizza iniziative di educazione alimentare ed ambientale nelle scuole, iniziative di formazione continua degli operatori del settore e progetti di ricerca sociale per la costruzione di modelli di sviluppo ecosostenibili.

ADABE – Associazione per la diffusione della biomassa - Spagna

ADABE è un'associazione nazionale *non-profit* fondata nel 1986 in accordo con la Direzione Generale delle Politiche Nazionali del Ministero dell'Interno. È un membro fondatore dell'AEBIOM situato a Bruxelles e fondato nel 1990. ADABE è costituita da persone fisiche e da persone giuridiche, che sono coinvolte a diverso titolo nella ricerca tecnologica e nella disseminazione sull'uso della biomassa in Spagna.

Cooperativa agricola di Halastra - Grecia

Le principali attività della cooperativa agricola di Halastra includono servizi a favore del commercio dei prodotti agricoli dei soci (e.g. riso, mais, cotone, frumento, cereali), quali la raccolta, l'essiccazione e lo stoccaggio, il confezionamento e la vendita.

6. IL SORGO ZUCCHERINO COME COLTURA ENERGETICA SOSTENIBILE

6.1 Perché il sorgo zuccherino?^{1,2,3,4,5,6,7}

Con il nome comune di "sorgo" ci si riferisce ad una vasta gamma di genotipi riconducibili alla specie *Sorghum bicolor* (L.) Moench, che fa parte della famiglia delle graminacee (*Poaceae*).

In base all'espressione fenotipica, possono essere riconosciuti cinque gruppi di varietà.

- A. Sorgo da granella. Comunemente sono varietà nane (50-80 cm di altezza), coltivate per la produzione alimentare di granella. Il sorgo da granella è la quarta coltura cerealicola nel mondo dopo il frumento, il riso ed il mais.
- B. Sorgo da foraggio. Sono varietà impiegate principalmente per la produzione di insilati per l'alimentazione animale, grazie al loro elevato contenuto in proteine e fibra.
- C. Sorgo da fibra. Sono varietà con alti culmi, ricchi in cellulosa ed emicellulosa ed adatti alla produzione di biocombustibili solidi.
- D. Sorgo da saggina. Sono varietà con infiorescenze caratterizzate da diramazioni lunghe ed elastiche ed utilizzate principalmente per la produzione di scope.
- E. Sorgo zuccherino. Sono varietà con culmi grossi e lunghi, contenenti elevate concentrazioni di zucchero; per questa caratteristica possono essere utilizzate per la produzione di bioetanolo.

Tutte le varietà di sorgo sono accomunate da alcune caratteristiche fisiologiche, quali l'alta efficienza fotosintetica e la sensibilità al fotoperiodo ed alle elevate temperature, e da alcuni tratti morfologici, tra cui l'altezza tipica delle grandi colture erbacee di origine tropicale. Il sorgo zuccherino si distingue dagli altri gruppi di varietà grazie ad una caratteristica fisiologica tipica, che è la sua capacità di accumulare nei culmi zuccheri semplici, e non solo carboidrati strutturali.

Nella trattazione che segue, quindi, ci si riferirà specificatamente al sorgo inteso come zuccherino.

Il sorgo zuccherino è una coltura con ciclo fotosintetico di tipo C_4 . Tra le peculiarità delle piante C_4 si richiama la caratteristica anatomia della foglia, chiamata "anatomia Kranz", che presenta una separazione specifica tra la fissazione fotosintetica della CO_2 e la sintesi degli assimilati (i.e. composti prodotti dalla pianta come risultato della fotosintesi e responsabili della crescita della pianta stessa). Questa compartimentazione permette un uso più efficiente della radiazione solare ed una elevata resa fotosintetica della coltura, se confrontata con le colture a metabolismo C_3 , più comuni nelle regioni temperate. Il rapporto di assimilazione fotosintetica è evidente specialmente in condizioni di elevate radiazione solare e disponibilità di acqua. Alcuni studi condotti nel sud dell'Europa hanno evidenziato alti valori di RUE, dimostrando l'elevata produttività di questa coltura, se coltivata in condizioni favorevoli (i.e. temperatura, radiazione solare, disponibilità di acqua). Sono stati riportati valori compresi tra 3,10 in Francia e 4,96 in Spagna.

La resa produttiva si colloca in un intervallo tra le 40 e le 110 tonnellate di biomassa fresca per ettaro per anno. In ragione dell'elevata umidità, il contenuto in biomassa secca varia tra il 19% ed il 30%, in funzione della varietà, delle condizioni di coltivazione e del momento scelto per la raccolta.

Alla fine del ciclo i culmi solitamente rappresentano più del 75% del peso finale della biomassa raccolta come s.s. e per certe varietà si può arrivare al 90%.

Gli zuccheri accumulati nei culmi del sorgo zuccherino sono idrosolubili e direttamente fermentabili. Sono costituiti principalmente da saccarosio ed in quota minore da glucosio e fruttosio. Il contenuto di succo nei culmi è pari al 65-80%, mentre il loro contenuto in zuccheri è del 9-15%. Al momento della raccolta, la concentrazione degli zuccheri nei culmi, espressa come s.s., è del 20-45%, con una variabilità che dipende dalla lunghezza del ciclo.

Le rese in biomassa del sorgo zuccherino, quando è coltivato in regioni mediterranee ed in condizioni non limitanti per quanto riguarda la disponibilità idrica, sono comprese tra le 25 e le 35 tonnellate di sostanza secca per ettaro.

Assumendo una proporzione culmo/pianta del 75-85% sul peso umido, un contenuto in zuccheri corrispondente al 40% su base secca ed un fattore di conversione di 0,591 litri di bioetanolo per chilogrammo di zucchero, la produzione stimata per il bioetanolo dal sorgo zuccherino può raggiungere valori di 4.400–7.000 l/ha.

Il sorgo zuccherino può essere coltivato in una grande varietà di suoli e climi (i.e. tropicale, sub-tropicale, temperato). Sebbene le rese migliori si ottengano in suoli fertili, profondi e ben drenati, può essere coltivato in condizioni peggiori, come ad esempio in terreni poco profondi o con scarso contenuto in sostanza organica. Il sorgo tollera bene anche la reazione del suolo (pH tra 5,0–8,5); inoltre, dimostra una buona adattabilità ai suoli salini. Tale coltura, infine, è resistente alla siccità (mostra grande resistenza agli stress idrici), se comparato ad altre colture tropicali; al contempo è tollerante al ristagno idrico.

Questa grande adattabilità ne permette la coltivazione in aree dove altre colture non potrebbero essere coltivate.

In relazione alle esigenze idriche della coltura, nelle regioni mediterranee il sorgo zuccherino può necessitare dell'irrigazione, ma la sua efficienza nell'uso dell'acqua è molto elevata. Per la Spagna sono riportati valori compresi tra 3,7 e 5,4 g di biomassa aerea come s.s. per litro di acqua.

Il sorgo zuccherino mostra una resistenza più elevata alla siccità rispetto a quelle del mais e della canna da zucchero, in virtù della sua bassa evapotraspirazione e dell'abilità di bloccare la traspirazione in condizioni limitanti.

Nella prospettiva dell'impiego come coltura energetica, quindi, richiede minori apporti idrici per unità di bioetanolo prodotto. Infatti, la quantità di acqua necessaria per il sorgo zuccherino è 1/3 di quella richiesta dalla canna da zucchero e 2/3 di quella necessaria alla barbabietola da zucchero.

Per quanto riguarda le esigenze nutrizionali, il sorgo zuccherino richiede bassi apporti di fertilizzanti azotati rispetto ad altre colture, tra cui ad esempio il mais.

La coltivazione del sorgo è facilitata dalla possibilità di meccanizzare la fase di semina (3,0–6,0 kg semi/ha). Questo aspetto rappresenta un vantaggio significativo rispetto alla canna da zucchero, che deve essere propagata tramite culmi tagliati, che successivamente emettono germogli (4.500–6.000 kg/ha).

Analogamente anche la raccolta può essere meccanizzata. La criticità in questa fase è insita nella elevata deperibilità della biomassa, a causa dei suoi alti contenuti in zuccheri ed acqua. Ne consegue che, per prevenire perdite significative di zuccheri, le operazioni di processamento devono essere effettuate in un breve periodo di tempo

dopo la raccolta. Alcune soluzioni per risolvere questo inconveniente sono una corretta programmazione della raccolta, ricorrendo a varietà con cicli di diversa durata (corti, medi, lunghi), e la conservazione degli zuccheri attraverso la concentrazione del succo estratto dai culmi o, in alternativa, l'insilamento della biomassa.

Due ulteriori caratteristiche favorevoli del sorgo sono la durata annuale del ciclo vegetativo e la sua brevità (4-6 mesi). Questi elementi rendono il sorgo adatto ad avvicendamenti colturali o a doppi cicli di coltura; infatti, in condizioni adeguate (i.e. in climi tropicali o sub-tropicali) può essere coltivato due volte all'anno, aumentando la sua redditività. Con una scelta accurata, questa configurazione è positiva in termini di agro-diversità, in quanto si dilata il periodo di copertura del suolo, contribuendo a ridurre l'erosione ed a preservarne la fertilità.

Il processamento a bioetanolo del sorgo zuccherino rende disponibili diversi sottoprodotti (i.e. bagassa, borlanda), che possono essere recuperati e valorizzati. Inoltre, alcune varietà producono anche granella, che può essere convertita in bioetanolo di prima generazione, come materia prima amidacea.

La bagassa, residuo dell'estrazione degli zuccheri, può essere valorizzata seguendo due approcci alternativi: la combustione per la produzione di energia termica ed elettrica oppure la conversione in bioetanolo di seconda generazione. In attesa che siano disponibili le tecnologie per la seconda ipotesi di recupero, si può ricorrere alla prima, analogamente a quanto accade per la bagassa della canna da zucchero. Dunque, nel medio termine il sorgo zuccherino potrà essere usato per la produzione di biocarburanti di prima e di seconda generazione. Le foglie, ed anche la bagassa, se non valorizzata in altro modo, possono essere recuperate come foraggio.

In sintesi, il sorgo zuccherino è stato scelto, in quanto è una materia prima molto versatile ed interessante per la produzione di bioetanolo, principalmente in virtù della sua elevata resa in biomassa, del suo alto contenuto in zuccheri fermentescibili, della sua adattabilità ad una vasta tipologia di suoli ed ambienti, della sua modesta richiesta idrica (più bassa di quella di altre colture irrigue, come il mais e la canna da zucchero), della sua resistenza alla siccità, della meccanizzazione agricola per la sua coltivazione e della possibilità di valorizzare i sottoprodotti, anche a scopi energetici.

6.2 Caratteristiche botaniche e morfologiche^{8,9,10,11,12,13}

Classificazione sistematica

Divisione: Magnoliophyta

Classe: Liliopsida

Sottoclasse: Commelinidae

Ordine: Cyperales

Famiglia: Poaceae

Tribù: Andropogoneae

Sottotribù: Sorghinae

Genere: *Sorghum* Moench

Specie: *Sorghum bicolor* (L.) Moench

Sottospecie: *Sorghum bicolor* sottospecie *bicolor*

Tutte le varietà di sorgo, classificate come *Sorghum bicolor* sottospecie *bicolor*, presentano un corredo cromosomico diploide di 20 cromosomi. Tuttavia, a seconda dell'espressione fenotipica, che le rende adatte a diversi utilizzi, le varietà di Sor-

ghum bicolor (L.) Moench sono commercializzate come sorgo da granella, sorgo da fibra, sorgo da foraggio, sorgo da saggina e sorgo zuccherino.

Il luogo di origine di *Sorghum bicolor* è collocato nelle regioni aride dell'Africa orientale, comprese tra l'Etiopia ed il Sudan. Si stima che l'uomo abbia iniziato a coltivarlo attorno al 4000-3000 a.C. e che sia stato introdotto in India attorno al 1500-1000 a.C., nell'Europa centro-orientale nel 900-700 a.C. e nell'Europa orientale nel 400 a.C.; in America la sua coltivazione è più recente (1850 d.C.).

Morfologia

Il sorgo è una pianta erbacea annuale e presenta una buona capacità di ricaccio.

Culmi

I culmi del sorgo, analogamente a quelli della canna da zucchero, sono compatti e ricchi in midollo, e per questa caratteristica si distinguono all'interno della famiglia delle graminacee. La lunghezza dei culmi rientra nell'intervallo 0,5-5,0 m ed il diametro oscilla da 1,5 a 5,0 cm, a seconda della varietà; anche il numero dei nodi e degli internodi varia in funzione della varietà.

La sezione trasversale dei culmi mette in evidenza una corona esterna ricca in fasci vascolari densamente sistemati e, più internamente, un tessuto midollare parenchimatico, di consistenza soffice, in cui sono sparsi alcuni fasci vascolari e dove è accumulata la maggior parte degli zuccheri (i.e. glucosio, fruttosio e soprattutto saccarosio).

Per quanto riguarda la disposizione delle foglie sul culmo, da ciascun nodo si sviluppa una foglia. Nel nodo, in corrispondenza del punto di inserzione, si crea un incavo da cui si forma una gemma ascellare. Tutte le gemme ascellari sono dormienti,



Figura 1: confronto tra 2 varietà di sorgo zuccherino (fonte: CETA)

ad eccezione di quelle poste nei nodi inferiori del culmo; da queste ultime gemme possono prendere origine germogli, determinando l'accestimento della pianta.

La tendenza all'accestimento dipende sia dalle caratteristiche varietali (i.e. massima nelle varietà da foraggio, modesta nelle varietà da granella), sia dalle condizioni in cui la coltivazione è condotta, quali, a titolo di esempio, la densità delle piante in campo, il fotoperiodo e la temperatura.

Foglie

Il culmo del sorgo presenta generalmente da 7 a 24 foglie opposte, ossia inserite alterne ad ogni nodo, e decussate. Il numero delle foglie varia in funzione della varietà (i.e. più numerose nelle specie più tardive), della latitudine, della maturità che la pianta può raggiungere compatibilmente con i suoi utilizzi e con le condizioni climatiche.

Le foglie sono lineari, lanceolate, lucide e parallelinervie; hanno una lunga guaina glauca (per la presenza di una spessa pruina cerosa), che avvolge il culmo. La lamina fogliare è lunga 30-135 cm e larga 1,5-13,0 cm ed è piatta, sebbene in condizioni di stress idrico possa arrotolarsi longitudinalmente, come succede alle foglie del mais. Gli stomi sono localizzati su entrambe le lamine della foglia.

Infiorescenza

Le infiorescenze sono organizzate in un racemo generalmente apicale, detto panico, la cui lunghezza può raggiungere i 60 cm, peduncolo incluso. L'infiorescenza presenta numerose diramazioni; al termine di ciascuna ramificazione laterale si trovano spighe secondarie (i.e. spighe), sempre accoppiate a due a due, di cui quella sessile è fertile e l'altra pedunculata è sterile. La spigetta sessile è formata



Figura 2: semi di sorgo zuccherino (fonte: CETA)

da due glume che a maturità diventano coriacee e lucenti, da due glumelle, di cui la superiore è piccolissima e l'inferiore è cartacea, e da un fiore bisessuato tipico delle graminacee, formato da un ovario supero, uniovulare, con stilo biforcuto e stigma piumoso, e da un androceo composto da tre stami.

Frutto

Il frutto è una cariosside ruvida di forma arrotondata e di colore diverso in funzione delle varietà. Nelle varietà zuccherine la cariosside ha dimensione generalmente inferiore rispetto a quella delle varietà da granella. Il peso di mille semi è in media di 21 grammi, con una variabilità tra 16 e 28 grammi.

Apparato radicale

L'apparato radicale del sorgo è fascicolato e formato da radici embrionali ed avventizie e si può estendere fino a 1,5 metri di profondità. La radice primaria va incontro a senescenza precoce, come generalmente succede nella famiglia delle graminacee, e la sua funzione è svolta da radici avventizie originatesi dalla parte inferiore dei culmi. Questa tendenza è particolarmente spiccata nelle varietà zuccherine, in cui i culmi beneficiano di un supporto nella loro funzione principale di sostegno dell'apparato fogliare. L'apparato radicale del sorgo è più espanso rispetto a quello del mais, sia in larghezza, sia in profondità; inoltre, le radici sono più robuste e fibrose. Queste caratteristiche rendono il sorgo più efficiente del mais nella capacità di utilizzare la risorsa idrica e la risorsa suolo.

Biologia

Ciclo vegetativo

Il ciclo vegetativo del sorgo occupa indicativamente quattro mesi, da maggio a settembre, con una certa variabilità in funzione della localizzazione geografica e della varietà specifica. La fase in cui la crescita è massima (i.e. allungamento dei culmi) deve coincidere con il periodo di massimo irradiazione solare.

Fasi fenologiche

Nell'ipotesi di collocare la semina in primavera, quando la temperatura è mite, l'emergenza avviene generalmente dopo 7-10 giorni dalla semina e la fase di allungamento dopo altri 47-55 giorni. La durata della fase di allungamento oscilla tra i 30 ed i 90 giorni, in funzione della varietà. La fioritura avviene dopo 5-7 giorni dalla formazione del panicolo; la granigione richiede indicativamente altri 30 giorni, con una certa variabilità in relazione alla varietà considerata.

Accumulo degli zuccheri

L'andamento dell'accumulo degli zuccheri è legato alla scelta varietale, alla data della semina ed alle condizioni climatiche nel corso dello sviluppo vegetativo. L'accumulo raggiunge il suo picco in corrispondenza della formazione del panicolo, più specificatamente dopo la fioritura.

Gli zuccheri sono accumulati nel tessuto midollare del culmo, sottoforma di saccarosio, glucosio e fruttosio; tra questi il saccarosio è il più abbondante.

Il profilo quali-quantitativo degli zuccheri accumulati cambia nel corso della maturazione e progressivamente aumenta la frazione di saccarosio, a spese della presenza di glucosio e fruttosio.

Nelle aree geografiche in cui nel mese di settembre le temperature sono basse, il sorgo interrompe lo sviluppo vegetativo e contestualmente blocca anche l'accumulo degli zuccheri.

6.3 Tecnica colturale^{14,15,16,17,18,19,20}

Il sorgo tollera bene la siccità e si adatta a crescere in terreni con caratteristiche pedologiche differenti. Queste peculiarità sono legate all'ampia disponibilità di genotipi di sorgo (circa 4.600), che si distinguono per la diversa risposta al fotoperiodo, per la durata variabile del ciclo vegetativo e per l'idoneità a crescere in differenti condizioni pedo-climatiche.



Figura 3: varietà di sorgo zuccherino Sugargraze (fonte: CETA)

6.3.1 Preparazione del terreno

Nella preparazione del letto di semina le operazioni di aratura ed erpicatura sono il presupposto essenziale per consentire una buona emergenza delle *plantule*, per favorire la protezione della coltura dalle infestanti e per prevenire il compattamento del terreno. Il controllo delle infestanti può essere eventualmente completato con l'applicazione di erbicidi (e.g. glifosato).

Nel caso in cui la coltivazione avvenga in regime irriguo, la preparazione del letto di semina deve tenerne conto. In particolare è stato evidenziato che l'irrigazione a scorrimento previene l'allettamento del sorgo; in questa ipotesi i solchi devono essere realizzati già nel corso della preparazione del letto di semina. In alternativa, nel caso si intenda ricorrere all'irrigazione per aspersione o di soccorso, il terreno deve essere livellato e mantenuto piatto.

6.3.2 Fertilizzazione

La quantità di fertilizzanti da applicare alla coltura varia in funzione della fertilità del suolo e dei livelli produttivi pianificati. Nelle regioni mediterranee, in cui la fertilità del suolo oscilla tra bassa e moderata, gli apporti richiesti dalla coltura, espressi per ettaro, sono: 100-150 kgN, 60-100 kgP₂O₅ e 60-100 kgK₂O. L'applicazione dell'azoto è consigliata in due fasi: prima della semina e indicativamente 20-30 giorni dopo l'emergenza.

6.3.3 Semina

La semina deve essere programmata in modo che la temperatura sia compatibile con la germinazione del sorgo (i.e. almeno 10-12 °C) e non vi sia rischio di gelate tardive. Inoltre, l'umidità del suolo dovrebbe essere prossima alla capacità di campo.

In considerazione della lunghezza del ciclo vegetativo e dell'effetto inibitorio delle basse temperature sull'accumulo degli zuccheri, nelle regioni mediterranee la semina dovrebbe collocarsi all'inizio di maggio.

La semina è generalmente condotta con una interfila di 0,75 m, mentre sulla fila le distanze sono di 0,10-0,15 m. Il seme dovrebbe essere deposto ad una profondità superiore o uguale ai 3-5 cm, in funzione della varietà prescelta.

La quantità di semente usata dipende dalla varietà scelta e dalla forza germoglia-tiva dei semi. A questo scopo è consigliato un saggio di germinazione preliminare, che metta in luce la qualità della semente da utilizzare. Il peso specifico dei semi normalmente varia tra 30-70 semi per grammo.

Per garantire l'emergenza della coltura, è essenziale che, successivamente alla semina, nel terreno sia mantenuto un buon tenore di umidità.

La scelta varietale è un fattore cruciale per assicurare buoni livelli produttivi. Come principio generale, le varietà a ciclo lungo sono più produttive di quelle a ciclo breve.

Va sottolineato, tuttavia, che in alcuni contesti territoriali l'utilizzo delle varietà a ciclo lungo non è opportuno, perché, per esprimere pienamente il loro potenziale, esse dovrebbero beneficiare di temperature elevate durante l'intero ciclo vegetativo. Nelle regioni mediterranee questa condizione è soddisfatta se le temperature si mantengono miti o calde durante l'intero mese di settembre.

- Varietà a ciclo breve: nei climi mediterranei 70-90 giorni dall'emergenza alla fioritura. A questa categoria appartengono ad esempio le varietà denominate Mer 60-2, Mer 78-13, Soave, Atlas e Madhura.
- Varietà a ciclo lungo: indicativamente 110 giorni dall'emergenza alla fioritura. A questa categoria appartengono ad esempio le varietà denominate Keller, Dale e Wray.

6.3.4 Irrigazione

Il fabbisogno irriguo del sorgo dipende soprattutto dalle caratteristiche climatiche



Figura 4: semina di sorgo zuccherino in Pianura Padana, Italia (fonte: CETA)

del sito di coltivazione, quali, a titolo di esempio, le temperature medie e massime e la piovosità; inoltre, vi è un fattore intrinseco, legato alle esigenze specifiche della varietà scelta.

Generalmente il fabbisogno idrico del sorgo è di 500-1.000 mm.

È stato evidenziato come per molte varietà di sorgo zuccherino, coltivate in terreni con buona riserva idrica, i valori di WUE diminuiscano ad alti regimi idrici: a questo proposito, in prove condotte nelle regioni centrali della Spagna, per la varietà Keller in letteratura sono riportati valori di 3,7-6,1 kg s.s./m³ di acqua evapotraspirata.

Il sorgo zuccherino tollera le condizioni di stress idrico, ma le produzioni ne sono penalizzate. Ne consegue che nelle regioni mediterranee, caratterizzate da carenze idriche estive, la coltivazione del sorgo richieda un compromesso tra apporto irriguo e livelli produttivi.

6.3.5 Protezione della coltura

Il sorgo è molto sensibile alla competizione con le infestanti, soprattutto nelle prime fasi del ciclo biologico (i.e. dalla semina alla completa copertura del suolo, quando la pianta raggiunge l'altezza di 1 m). Dunque, è essenziale che nel corso della preparazione del letto di semina siano eliminate le infestanti, anche mediante l'applicazione di prodotti fitoiatrici. Inoltre, l'applicazione di diserbanti deve essere ripetuta immediatamente dopo la semina (i.e. in pre-emergenza), perché la germinazione del sorgo è molto rapida e la coltura potrebbe essere danneggiata in caso di ritardo nell'applicazione.

Il sorgo è suscettibile alle stesse malattie ed all'attacco da parte degli stessi parassiti che danneggiano le coltivazioni estensive di mais e canna da zucchero, rispettivamente negli USA ed in Brasile. Contrariamente, se le coltivazioni non sono vaste, questi problemi non si verificano. A titolo di esempio, in campi realizzati nelle regioni centrali della Spagna non sono stati registrati né attacchi da parassiti, né malattie;



Figura 5: coltivazione di sorgo zuccherino ad 1 mese dalla semina in Pianura Padana, Italia (fonte: CETA)

tuttavia, occasionalmente è stato notato l'attacco da parte della piralide.

Per quanto riguarda i danni da agenti abiotici, il sorgo è sensibile soprattutto al freddo ed è soggetto all'allettamento.

1. Freddo. Si può ovviare a questa criticità attraverso un'adeguata scelta della varietà (i.e. sulla base della durata del ciclo biologico) e del periodo di semina.
2. Allettamento fisiologico. Si può ovviare a questa criticità attraverso un'adeguata scelta della varietà e della tecnica colturale applicata (i.e. altezza delle piante, diametro dei culmi, densità delle piante, fertilizzazioni azotate), nonché della data di raccolta.
3. Allettamento per effetto del vento. Nelle località ventose, si può optare per delle varietà, che non raggiungono altezze elevate e che sono caratterizzate da una bassa tendenza all'allettamento spontaneo, e si può ridurre l'apporto di azoto; inoltre, nel caso in cui la ventosità si accentui in autunno, si può anticipare la raccolta.

6.3.6 Raccolta

Il periodo di raccolta varia in funzione della varietà e delle condizioni climatiche e coincide con il picco nella crescita della pianta e nell'accumulo degli zuccheri nel culmo. Generalmente questa condizione è raggiunta in corrispondenza dello sviluppo del panicolo, ossia immediatamente dopo la fioritura; tuttavia, un monitoraggio della concentrazione degli zuccheri nel culmo è raccomandato almeno nel primo anno in cui si coltiva una certa varietà, in modo da testarne le prestazioni.

Nel caso delle varietà zuccherine, la raccolta è specificatamente finalizzata a massimizzare il recupero degli zuccheri, che sono accumulati quasi esclusivamente nei culmi. Ne consegue che le operazioni prevedono il taglio dei culmi alla base,



Figura 6: coltivazione di sorgo zuccherino a 2 mesi dalla semina in Pianura Padana, Italia (fonte: CETA)

in modo da minimizzare le perdite, e l'abbandono delle foglie in campo.

Molte attività di R&S sono indirizzate ad ottimizzare la meccanizzazione della raccolta del sorgo zuccherino. Alcune macchine agricole attualmente utilizzate sono mutate dalla foraggicoltura o dalla coltivazione della canna da zucchero, nel qual caso prevedono la raccolta e la imballatura (o rotoimballatura) dei culmi tagliati. Accanto a questi, sono in corso di sperimentazione alcuni prototipi specificatamente progettati per il sorgo zuccherino.

Negli USA sono convertite a questa coltura le macchine per la raccolta del mais da foraggio, ma in questo caso la biomassa raccolta deve essere immediatamente avviata al processamento. Da un lato questa strategia consente di utilizzare macchinari tradizionali e, dunque, di evitare dei costi legati alla predisposizione ed all'acquisto di nuove attrezzature. Per contro, però, queste macchine non sono progettate per massimizzare il recupero degli zuccheri e sono da mettere in conto delle perdite considerevoli.

6.3.7 Operazioni successive alla raccolta

Sebbene il sorgo zuccherino sia un'interessante coltura alcoligena da inserire nel panorama agricolo dei Paesi a clima temperato, finora sono stati fatti passi molto modesti in questa direzione. La ragione principale per la mancata penetrazione nel mercato del sorgo come coltura alcoligena va ricondotta all'intervallo di tempo troppo breve che deve intercorrere tra la raccolta della biomassa ed il suo processamento.

Infatti, l'elevata umidità dei culmi al momento della raccolta (70-80%), associata ad un alto contenuto in zuccheri, rende questa matrice facilmente deteriorabile. Una raccolta rapida e tempestiva nonché l'immediato processamento della biomassa



Figura 7: falcia-trincia-caricatrice (fonte: CETA)



Figura 8: falcia-trincia-caricatrice in azione durante la raccolta in Pianura Padana, Italia (fonte: CETA)

diventano, quindi, strategici per ridurre le perdite e prevenire l'irreversibile alterazione della matrice. Al contempo, nelle regioni temperate (e.g. aree a clima mediterraneo) il periodo idoneo alla raccolta è breve, poiché con l'approssimarsi dell'autunno subentrano danni alla coltura a causa dell'allettamento per effetto del vento, nonché l'interruzione della crescita e dell'accumulo degli zuccheri per il progressivo abbassamento della temperatura.

Questi fattori hanno di fatto finora precluso l'utilizzazione del sorgo zuccherino nei processi industriali per la produzione del bioetanolo. A tal riguardo sono state individuate diverse soluzioni per superare questi limiti operativi.

Una prima strategia prevede di estendere il periodo di raccolta della biomassa, diversificando le coltivazioni asservite all'impianto industriale, in termini di varietà (i.e. a ciclo breve ed a ciclo lungo) ed eventualmente anche di tipo di coltura alcoligena.



Figura 9: biomassa di sorgo zuccherino trinciata (fonte: CETA)

Un'ulteriore misura è la conservazione della biomassa e/o dell'estratto zuccherino da essa ottenuto, in condizioni che li preservino dal deterioramento.

6.4 Programmi di selezione degli ibridi^{21,22,23,24}

Gli studi sul sorgo zuccherino come coltura saccarifera da introdurre nelle regioni a clima temperato risalgono alla fine del diciannovesimo secolo. Tali programmi di ricerca sono stati finalizzati tanto al miglioramento quali-quantitativo della produzione di zucchero (e.g. come sciroppo ed in forma cristallina), quanto alla selezione di va-

rietà resistenti alle malattie (i.e. antracnosi delle foglie, fusariosi e marciumi dei culmi). Le ricerche su questa coltura proseguono anche oggi e hanno principalmente lo scopo di massimizzare la diffusione del sorgo, di ottimizzare l'estrazione degli zuccheri dai culmi e di migliorare il profilo quali-quantitativo del succo ottenuto (i.e. concentrazione di zuccheri, frazione di zuccheri non riducenti e totali, attività dell'enzima invertasi).

Alcune delle principali linee di ricerca sono sviluppate nell'ambito del progetto SWEETFUEL, finanziato dalla Commissione europea nell'ambito del 7°FP.

6.4.1 Selezione per il miglioramento dell'adattamento alle basse temperature

Il ciclo biologico del sorgo è influenzato dalla temperatura nelle fasi di emergenza e di fioritura, nell'allungamento dei culmi e nell'accumulo degli zuccheri. A fronte delle sue caratteristiche, che lo configurano come una pianta macroterma, il sorgo è adatto ad essere coltivato nelle regioni meridionali dell'Europa, mentre trova difficoltà a completare il ciclo vegetativo nell'Europa centrale e settentrionale, dove, di conseguenza, le rese produttive sono basse.

Il progetto SWEETFUEL affronta questa problematica, selezionando ibridi di sorgo zuccherino, capaci di assicurare, anche nelle più rigide condizioni climatiche dell'Europa centro-settentrionale un'alta resa in biomassa, una germinazione rapida ed omogenea ed una buona resistenza alle malattie. In queste attività progettuali sono coinvolti istituti di ricerca italiani, tedeschi e francesi.

6.4.2 Selezione per il miglioramento dell'adattamento ai climi aridi

Sebbene il sorgo evidenzia una buona risposta agli eventi siccitosi, migliore ad esempio di quella della canna da zucchero, il fabbisogno idrico continua ad essere un agente limitante la resa produttiva di questa coltura, soprattutto nelle regioni aride. La selezione di ibridi che garantiscano elevate rese in zuccheri ed in granella in ambienti aridi è uno degli obiettivi del progetto SWEETFUEL, che prevede delle attività su questa linea di ricerca in India, Messico e Sudafrica.

6.4.3 Selezione per il miglioramento dell'adattamento ai terreni con bassa fertilità

Molte delle aree in cui il sorgo può essere coltivato sono caratterizzate da terreni con reazione acida ed elevati contenuti di alluminio (e.g. savana) e questi fattori esercitano una certa tossicità sulla coltura.

Di conseguenza, un importante obiettivo del progetto SWEETFUEL è la selezione di genotipi che siano tolleranti a queste condizioni pedologiche e garantiscano buone rese produttive in termini di biomassa e zuccheri. Le attività di questa linea di ricerca sono condotte in Brasile e Sudafrica.

6.5. Esperienze nella coltivazione del sorgo zuccherino condotte nell'UE

Italia^{25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36}

Sebbene in Italia la domanda di biocarburanti sia incrementata per effetto del recepimento delle Direttive 2009/28/CE e 2009/30/CE (i.e. con il decreto legislativo n. 28 del 23 marzo 2011), la situazione della produzione interna di bioetanolo non è cambiata rispetto al passato: il bioetanolo continua ad essere ottenuto dal

processamento dei residui della lavorazione della frutta e della filiera vitivinicola e non esistono filiere e/o impianti specificatamente dedicati a questo scopo. Dal momento che la capacità produttiva rimane molto modesta, la domanda interna di bioetanolo è soddisfatta principalmente con le importazioni, soprattutto da Pakistan, Turchia e Brasile, in ordine di importanza.

Per quanto riguarda la ricerca sulle colture alcoligene, l'Italia beneficia di una lunga tradizione che ha preso avvio dalla politiche autarchiche degli anni Trenta.

In particolare gli studi sul sorgo zuccherino sono stati incentrati soprattutto sul miglioramento genetico: a partire dagli anni Trenta gli incroci delle linee parentali e la successiva selezione delle generazioni segreganti caratteri specifici sono stati i soli approcci adottati in Italia per il miglioramento genetico. Questo sviluppo piuttosto modesto trova spiegazione nello scarso peso che il sorgo ha avuto finora nel panorama agricolo italiano ed, inoltre, nell'assenza di linee genetiche maschio-sterili prettamente zuccherine.

Ulteriori studi sul sorgo sono stati condotti alla fine degli anni Ottanta e per tutti gli anni Novanta da A.Biotec su varietà utilizzate negli USA. Le ricerche sono state focalizzate sulla selezione di ibridi con elevato contenuto di zucchero nei culmi e con buon adattamento a completare il ciclo vegetativo nelle condizioni climatiche dell'Italia centro-settentrionale. Questi studi hanno permesso di ottenere un elevato numero di ibridi, tra cui alcune varietà zuccherine, altre da granella, altre ancora da fibra. In particolare tra le varietà zuccherine va segnalato l'ibrido (LP 34 M x LP 113), che ha dato risultati eccellenti, sia come produzione di zucchero, sia come resa in biomassa secca (44 t/ha).

Le prove pluriennali condotte da A.Biotec in diversi contesti territoriali dell'Italia settentrionale, hanno messo in luce come alcune varietà (i.e. Wray, Dale, Keller, Mn 1500, M 81-E, Theis, Rio) siano in grado di dare produzioni molto elevate in culmi e zuccheri fermentescibili, rispettivamente di 55-70 t/ha come wb, e di 6-8 t/ha di zuccheri. Tra le varietà testate, quelle più tardive hanno fornito i risultati migliori, poiché hanno beneficiato di un più lungo periodo di crescita. Tuttavia, queste varietà, selezionate per le regioni meridionali del Paese, hanno evidenziato una certa instabilità nelle rese produttive, riconducibile all'effetto delle basse temperature primaverili, all'alta tendenza all'allettamento ed ai forti ritardi accumulati nella gestione dei campi sperimentali, che talora non hanno consentito di effettuare la raccolta.

Altre ricerche sul sorgo zuccherino sono state condotte nel periodo 1992-1995 da ETA-Renewable Energy in campi sperimentali situati nel Sud Italia (i.e. Metaponto, Matera), nell'ambito del progetto ECHI-T, finanziato dal 5°FP. Il progetto ha analizzato, a livello di studio di pre-fattibilità, l'opportunità di avviare una produzione integrata di bioetanolo, energia elettrica e mangimi pellettizzati, utilizzando come materia prima la biomassa del sorgo zuccherino. Nel contesto del progetto è stata approfondita anche la relazione tra utilizzo della risorsa idrica, sfruttamento della radiazione solare e produzione di biomassa, quando il sorgo zuccherino è coltivato in un terreno profondo e argilloso ed in un clima caratterizzato da temperature alte ed elevata evapotraspirazione. Questa analisi ha messo in luce come il sorgo zuccherino presenti alti valori di WUE e RUE (4,8 kg/mm and 3,3 g/MJ, rispettivamente) e come in queste condizioni il regime irriguo sia necessario per ottenere delle rese soddisfacenti. Inoltre, l'esito della sperimentazione suggerisce di ricorrere alle varietà precoci con ciclo colturale breve nei contesti collinari e dove la risorsa idrica è scar-

sa. Nei campi sperimentali lucani è stata confermata, inoltre, una buona tolleranza del sorgo zuccherino alla salinità del terreno. Il periodo che è risultato più indicato per la semina del sorgo zuccherino nell'Italia meridionale si colloca tra la metà di aprile e l'inizio di maggio, mentre le condizioni ideali per la raccolta si raggiungono tra la metà di agosto e l'inizio di settembre. Al momento della raccolta l'umidità della biomassa è del 75-80% e le produzioni ottenute sono di 35-40 t/ha come s.s. con un adeguato apporto e di 20-25 t/ha come s.s., quando l'apporto idrico è basso.

A partire dall'inizio degli anni Novanta la coltura del sorgo zuccherino è stata oggetto di molteplici ricerche anche da parte delle Università degli Studi di Catania e di Bologna e dell'ENEA. A questo proposito vanno annoverati i progetti comunitari "Sweet Sorghum Network" e "Sorgo zuccherino, una coltura energetica sostenibile per l'Europa. Miglioramento ed ottimizzazione negli aspetti agricoli ed industriali", finanziati dal programma AIR, ed "Studi ambientali sul sorgo zuccherino e da fibra, come coltura energetica sostenibile", finanziato nell'ambito del programma FAIR, nonché il progetto nazionale "Tecniche innovative sostenibili di produzione e trasformazione delle colture energetiche e non food - TISEN", finanziato dal MIPAAF. Queste ricerche sono state focalizzate a studiare la risposta del sorgo zuccherino a diversi fattori ambientali e gestioni colturali (e.g. apporti di azoto, efficienza nell'utilizzo della risorsa idrica).

Nell'ultimo decennio l'interesse nei confronti del sorgo zuccherino è stato nutrito dall'opportunità di utilizzarlo come coltura foraggiera e più recentemente dalla diffusione degli impianti di digestione anaerobica per la produzione di biogas, alimentati a colture dedicate e deiezioni zootecniche.

Per quanto attiene alle applicazioni del sorgo zuccherino nella filiera del biogas, gli studi condotti dal Crpa S.p.A. hanno evidenziato che le rese produttive della coltura beneficiano significativamente della fertirrigazione con liquami zootecnici e dell'applicazione del digestato (i.e. residuo della digestione anaerobica), validando così da un punto di vista tecnico questa forma di recupero dei sottoprodotti in un'ottica di gestione integrata della filiera.

Le ricerche agronomiche hanno avuto un significativo contributo da parte delle attività svolte dal CRA-CIN sulle differenze produttive tra le varietà da fibra e quelle zuccherine: i risultati conseguiti nelle Marche ed in Emilia-Romagna (Italia centrale) suggeriscono che in queste condizioni climatiche le rese in zuccheri e biomassa sono confrontabili e che, quindi, le varietà testate (i.e. H133, Bulldozer, Padana 1) possono essere considerate a duplice attitudine.

Parallelamente ricerche pluriennali sono state realizzate dal CRA-ING per migliorare la meccanizzazione della coltivazione del sorgo: sono stati progettati e sperimentati alcuni prototipi per la raccolta ed il condizionamento della biomassa del sorgo ed uno di questi è stato recentemente applicato in una versione pre-commerciale in campi sperimentali allestiti dal Gruppo Mossi & Ghisolfi e Coprob.

Negli ultimi anni l'applicazione del sorgo alla filiera del bioetanolo è stata oggetto di ricerca da parte di alcuni istituti di ricerca e gruppi industriali, quali l'Università degli Studi di Bologna, l'Università degli Studi di Torino, il CETA, l'ENEA, il CRA-RPS ed il Gruppo Mossi & Ghisolfi (Chemtex Italia S.p.A.).

Le ricerche industriali di Chemtex S.p.A. sono state condotte in Emilia-Romagna in collaborazione con l'Amministrazione regionale, la Provincia di Parma, l'Università degli Studi di Parma e l'Università del Sacro Cuore. Le prove sperimentali sono state impostate per

confrontare alcune varietà di sorgo da fibra e da foraggio in termini di resa produttiva e per testare la logistica del rifornimento di un ipotetico impianto di produzione di bioetanolo di seconda generazione. I risultati delle prove hanno confermato le indicazioni bibliografiche di una buona produzione in biomassa anche con bassi *input* colturali: 20-25 t/ha come s.s. con un basso dosaggio di fertilizzanti (-50% DPI) e senza irrigazione. Inoltre, queste prove hanno permesso di verificare la possibilità di introdurre il sorgo nei piani colturali delle aziende agricole in rotazione con le colture autunno-vernine.

Le ricerche in campo agronomico sul sorgo zuccherino come coltura alcoligena si sono avvalse dei risultati del progetto "SWEETFUEL", finanziato dalla CE nell'ambito del 7°FP. L'Università degli Studi di Bologna, in particolare, ha selezionato e testato degli ibridi con elevata resistenza alle basse temperature, la cui applicazione in Italia consente di anticipare la semina e dilatare il ciclo vegetativo con il fine ultimo di ottimizzare il rifornimento degli impianti di processamento.

Per quanto riguarda il modello decentralizzato di utilizzo energetico del sorgo zuccherino, le esperienze in Italia sono state maturate a partire dal 2007.

Nel biennio 2007-2008 in Piemonte un progetto di ricerca finanziato dall'Amministrazione regionale e realizzato dal CETA e dall'Università degli Studi di Torino è stato incentrato sulla coltivazione di alcune varietà di sorgo zuccherino e sulla conservazione degli zuccheri nella biomassa trinciata mediante l'insilamento mutuato dalla maidicoltura.

A partire dal 2010 sono in corso delle prove sperimentali sulla valorizzazione energetica del sorgo zuccherino, finanziate dal MIPAAF e coordinate dal CETA in collaborazione con l'ENEA ed il CRA-RPS (i.e. progetto MULTISORGO). Le prove agronomiche sono condotte in campi sperimentali del Nord Italia e del Sud Italia (Friuli Venezia Giulia e Basilicata, rispettivamente) e la biomassa prodotta dalle varietà testate è processata per produrre bioetanolo di prima generazione dal succo zuccherino, bioetanolo di seconda generazione da parte della bagassa e biogas dalla borlanda e dalla restante parte della bagassa. Alla conclusione del progetto (nel 2013) lo schema sperimentale impostato fornirà delle indicazioni precise sulle potenzialità complessive della coltura se utilizzata a scopo energetico. Attualmente le prove agronomiche stanno confermando la necessità dell'irrigazione a sostegno della coltivazione del sorgo nelle regioni a clima mediterraneo: 2,4-4,6 t/ha come s.s. senza apporto irriguo versus 7,6-11,3 t/ha come s.s. con irrigazione (dati produttivi del 2010). Vice versa nelle regioni a clima temperato oceanico del Nord Italia le precipitazioni nel periodo di sviluppo vegetativo (e.g. 670 mm tra maggio e settembre 2010) sono sufficienti a coprire il fabbisogno idrico della coltura ed a garantire delle buone rese produttive (i.e. 14,3-19,0 t/ha come s.s. nel 2010 e 16,3-21,1 t/ha come s.s. nel 2011).

Grecia

In Grecia il bioetanolo è stato introdotto nel mercato dei prodotti energetici a seguito della Direttiva 2003/30/CE e recentemente l'interesse nei suoi confronti è accresciuto per effetto della RED.

Sebbene attualmente in Grecia non vi sia una produzione interna di bioetanolo, il sorgo zuccherino è una delle colture alcoligene più promettenti, poiché fornisce zuccheri semplici direttamente fermentescibili, presenta un'alta efficienza fotosintetica (i.e. pianta C_4) e richiede modesti apporti di acqua e fertilizzanti.

L'interesse a studiare il sorgo zuccherino per diffonderne la coltivazione in Gre-

cia è testimoniato da numerosi progetti di ricerca, finanziati dalla CE, ad esempio nell'ambito dei programmi comunitari AIR e FAIR.

Uno degli istituti di ricerca impegnati in questa linea di ricerca è il CRES, che, in collaborazione con la Scuola Superiore di Studi Universitari in campo agronomico di Atene (i.e. Highest Agricultural School of Athens), ha realizzato dei campi sperimentali in diversi contesti territoriali del Paese³⁷.

I risultati di queste prove sperimentali confermano anche in Grecia le prestazioni caratteristiche del sorgo zuccherino in ambiente mediterraneo.

Le ricerche di Dalianis *et al.*³⁸ sulla varietà Keller, seminata con distanza tra le righe di 0,7 m e sulle righe di 5, 10, 15 e 20 cm, hanno evidenziato che la densità di investimento di 71.000 piante/ha (i.e. corrispondente a 20 cm di distanza) è ottimale in termini di produzione di biomassa (circa 113 t/ha, espressa come biomassa fresca) e di sviluppo vegetativo (i.e. numero di foglie e altezza delle piante).

Altre ricerche di Dalianis *et al.*^{39,40} condotte nei primi anni Novanta, sono state rivolte a valutare l'adattabilità di alcune varietà di sorgo zuccherino a diversi contesti territoriali e con differenti apporti di acqua ed azoto. In particolare sono stati valutati la produzione di biomassa fresca, il contenuto di zucchero nei culmi e lo sviluppo fenologico. Complessivamente il sorgo zuccherino risulta molto adatto alla crescita in diversi ambienti della Grecia, dal nord al sud del Paese e dal livello del mare all'altitudine di 800 m s.l.m.m.. La sua coltivazione può essere condotta in diverse condizioni pedologiche, dai terreni marginali a quelli ad elevata fertilità. Tuttavia, le rese produttive riflettono le caratteristiche del terreno, poiché sono più basse nei contesti marginali (i.e. terreni abbandonati, suoli poveri in sostanza organica) e più elevate nei suoli fertili della Grecia meridionale.

Tra le varietà studiate, la Keller ha fatto registrare le rese migliori in termini di biomassa fresca e zuccheri: 87-144 t/ha e 9-12 t/ha rispettivamente⁴¹.

L'irrigazione sembra favorire, sia la produzione di biomassa, sia la resa in zuccheri; invece, l'apporto di azoto sembra non avere effetto su questi parametri. Il contenimento di questi *input* colturali, pertanto, può tradursi in una riduzione dei costi della coltura, senza riflessi sulle rese produttive.

Per quanto riguarda l'effetto dei fattori abiotici sui parametri fisiologici del sorgo, i valori di RUE sono di 3,5 g s.s./MJ PAR ed i valori di WUE di 55 kg/mm di acqua^{42,43}.

Più recentemente, alla fine degli anni Novanta, gli studi del CRES sono stati rivolti anche ad altre varietà (i.e. Sofra, Korral, Colley, MN 1500, Keller) e ad alcuni ibridi di sorgo zuccherino. Queste ricerche hanno evidenziato che le varietà Keller e MN 1500 hanno le prestazioni migliori: 105-115 t/ha come wb con una densità di impianto di 110.000 piante/ha.

In queste prove sperimentali è stato anche valutato l'effetto della fertilizzazione su alcuni parametri agronomici, quali l'altezza delle piante e l'indice di area fogliare (6,2 nelle tesi con concimazione, rispetto a 4,4 nelle tesi senza).

Alcuni studi sull'effetto dell'irrigazione sono stati condotti da Dercas *et al.*⁴⁴ negli anni 1993-1994 in alcune località della Grecia centrale (i.e., Vagias, Viotia, Kopaida) nell'ambito del programma comunitario AIR. In particolare sono stati testati quattro tesi per l'apporto irriguo (i.e. IH, IM = 1/2 IH, IL = 1/4 IH e IHA = IH fino alla fioritura) e due livelli di concimazione azotata (i.e. NL = 40 kg N/ha e NH = 120 kg N/ha). Nelle prove sperimentali condotte a Vagias nel 1993 la produzione di 12,2 kg/mm non ha

evidenziato differenze significative tra le diverse tesi irrigue. Nell'anno successivo le produzioni hanno fatto registrare delle fluttuazioni tra i livelli irrigui più alti (IH, produzione di 7,45 kg/mm) e quelli più bassi (IL, produzione di 11 kg/mm). Tale differenza è stata ricondotta all'assenza di acque sotterranee nel campo sperimentale di Kopaida. In termini di s.s., la produzione con l'apporto irriguo più alto è stata di 3,2 kg/mm in entrambi gli anni di sperimentazione. La fertilizzazione azotata non ha avuto effetti sulle rese produttive in entrambi gli anni di durata della ricerca. Questa evidenza è stata spiegata con gli alti livelli di nutrienti naturalmente presenti nel terreno, adeguati a soddisfare le basse esigenze del sorgo.

Spagna^{45,46,47}

In Spagna il sorgo zuccherino è studiato come coltura energetica dedicata a partire dagli anni Ottanta, principalmente da parte del Centro per la ricerca e lo sviluppo in agricoltura di Malaga e dell'Università Politecnica di Madrid.

I progetti più significativi in questo ambito, condotti totalmente o almeno in parte in Spagna, sono i seguenti:

- o 1981-1987. "Sorgo zuccherino: studio della coltivazione per la produzione di zucchero e/o bioetanolo in Andalusia" INIA e CAICYT, Programma di Agroenergia della Spagna;
- o 1990-1993. "Sorgo zuccherino, una coltura energetica sostenibile per l'Europa. Miglioramento ed ottimizzazione negli aspetti agricoli ed industriali", programma AIR Joule della CE;
- o 1993-1995. "Sweet sorghum network", programma AIR della CE;
- o 1997-2000. "Studi ambientali sul sorgo zuccherino e da fibra, come colture energetiche sostenibili", programma FAIR della CE;
- o 2004-2005. "Studio della fattibilità economica relative alla produzione di bioetanolo da colture energetiche innovative", Ministero dell'educazione e della scienza della Spagna, progetto Profit;
- o 2006-2007. "Progetto strategico per promuovere lo sviluppo ed azioni dimostrative in merito alla produzione di energia da colture dedicate in Spagna", Ministero dell'educazione e della scienza della Spagna, progetto Agrobihol;
- o 2010-2011. "Iniziativa per promuovere la diffusione della coltivazione del sorgo zuccherino come coltura energetica – SORGOSWEET", Ministero della scienza e dell'innovazione, progetto PlanE.

Nell'ambito dei progetti menzionati sono state condotte delle prove di coltivazione del sorgo zuccherino tra il 36° ed il 41° parallelo, in ambienti con buona disponibilità idrica. I risultati ottenuti indicano che le produzioni delle varietà testate sono influenzate sia dalla latitudine, sia dalle condizioni climatiche. La scelta della varietà è un fattore chiave per un buon esito della coltivazione: le varietà più tardive appaiono più adatte per le regioni meridionali della Spagna, se è disponibile l'irrigazione, mentre le varietà più precoci sono consigliate per le aree mediterranee e continentali.

Una linea di ricerca avviata recentemente in Spagna riguarda l'utilizzo del sorgo zuccherino come coltura in secondo raccolto in ambiente mediterraneo. Il Gruppo di agro-energetica dell'Università Politecnica di Madrid ha valutato i risultati delle prove su un'annata agraria, ottenuti con alcune varietà commerciali a duplice attitudine (i.e. zucchero e biomassa) ed a ciclo breve, ritenute promettenti a questo scopo (Tabella 1).

Varietà	Altezza	Resistenza all'alteamento	Sviluppo vegetativo				
			Ciclo	Tipo di panicolo	Granella	Biomassa	Saccarosio
Sugargraze	M	*	L	O	N	H	*/***
SSG	M	*	L	O	N	M	*
23402	M	***	L	SC	N	L	*
Biom. 133	VT	***	E	O	N	VH	**
Sugar T	T	***	I	O	N	M	*/***
Autan	T	***	I	O	Y	H	*
Such. 506	T	***	I	C	Y	VH	**/**
Such. 405	S	***	I	SC	Y	L	*
Madhura	T	**	E	C	Y	VH	*/***
Nectar	M	**	E	C	Y	M	**/**

Tabella 1: risultati conseguiti nel corso della coltivazione di varietà commerciali di sorgo zuccherino a ciclo breve. Agenda: Altezza: molto elevata (VT), elevata (T), media (M), bassa (S); Resistenza all'alteamento: bassa (*), intermedia (**), buona (***); Ciclo: precoce (E), intermedio (I), lungo (L); Tipo di panicolo: aperto (O), semi-compatto (SC), compatto (C); Granella: sì (Y), no (N); Biomassa: resa molto alta (VH), resa alta (H), resa media (M), resa bassa (L); Saccarosio: contenuto basso (*), contenuto intermedio (**), contenuto buono (***). Quando sono riportati due indici, il primo si riferisce alla raccolta anticipata (15 settembre, 85 DAS) ed il secondo alla raccolta normale (18 ottobre, 118 DAS)

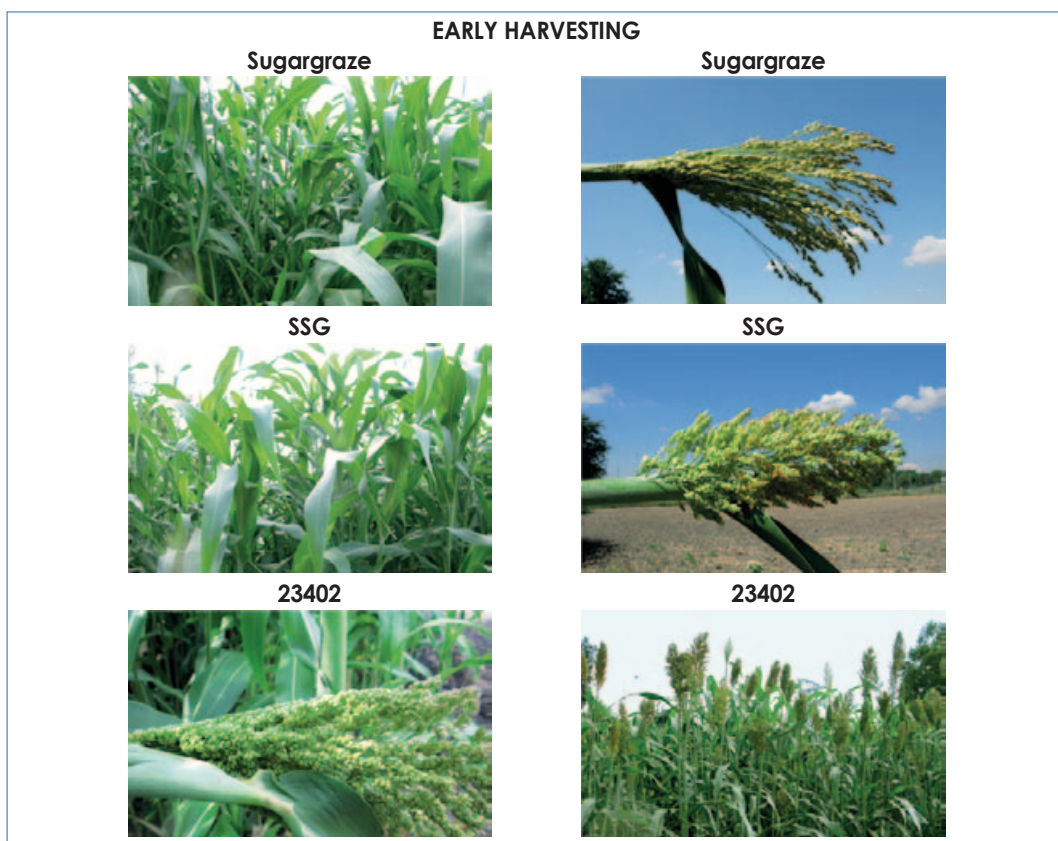


Figura 10: stato fenologico del sorgo zuccherino nelle prove condotte a Madrid, Spagna.
Data della semina: 22 giugno 2010; data della raccolta: 15 settembre 2010
(fonte: Gruppo di agro-energetica dell'Università Politecnica di Madrid)

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO: BIOETANOLO E BIO-ETBE

Con il termine bioetanolo ci si riferisce all'alcol etilico utilizzato come biocarburante per il trasporto. Analogamente all'etanolo alimentare, il bioetanolo deriva dalla fermentazione alcolica degli zuccheri, semplici (i.e. glucosio, saccarosio, fruttosio) o ottenuti dall'idrolisi dei polisaccaridi (i.e. amido, cellulosa, emicellulosa, fruttani).

Il bioetanolo può essere usato come biocarburante nei motori a ciclo Otto, poiché le sue caratteristiche sono simili a quelle della benzina:

- il PCI è elevato: 27 MJ/kg
- il numero di ottano indica un buon potere antidetonante: MON 96, RON 130, numero di ottano (i.e. calcolato come media tra MON e RON) 113.

In alternativa, il bioetanolo può essere utilizzato nei motori a ciclo Otto come antidetonante in sostituzione del MTBE. In questo caso il bioetanolo è convertito in bio-ETBE attraverso una reazione chimica con l'isobutilene. Il bio-ETBE è un buon sostituto del MTBE, in quanto:

- il PCI è elevato: 35 MJ/kg
- ha un buon comportamento come antidetonante: MON 102, RON 118, numero di ottano (i.e. calcolato come media tra MON e RON) 110.

L'utilizzo del bioetanolo è una delle misure più efficaci per contenere le emissioni di GHGs derivanti dal settore dei trasporti, in quanto deriva dalla biomassa e, quindi, il suo bilancio tra le emissioni di CO₂ e lo stoccaggio del carbonio nella vegetazione è nullo.

Il bio-ETBE è considerato neutrale agli effetti delle emissioni di GHGs solo per la sua frazione derivante dalla biomassa, ossia per il 47% p/p.

I principali substrati, che possono essere utilizzati per la produzione del bioetanolo, sono:

- materie prime zuccherine: canna da zucchero, barbabietola da zucchero, sorgo zuccherino, melassa, residui della lavorazione della frutta
- materie prime amidacee: granella dei cereali, patate, batate, manioca
- materie prime lignocellulosiche: canna comune, paglia, stocchi e tutoli del mais, FORSU.

Il bioetanolo rientra tra i biocarburanti di prima, seconda o terza generazione in funzione del tipo di substrato utilizzato e dal tipo di tecnologia applicata nella linea produttiva:

- prima generazione: se sono processate materie prime zuccherine ed amidacee
- seconda generazione: se è processata biomassa lignocellulosica ottenuta da colture dedicate (e.g. canna comune)
- terza generazione: se sono processati residui lignocellulosici (e.g. paglia, FORSU).

7. LINEE GUIDA PER IL MODELLO DI FILIERA SVILUPPATO PER L'UE

7.1 Introduzione

Il sorgo è una coltura che si presta a diverse applicazioni, in quanto, a seconda della varietà scelta, può fornire elevate rese in biomassa, zuccheri semplici e granella.

Attualmente le varietà zuccherine sono caratterizzate da buone rese in biomassa e zucchero, a scapito, però, della produzione di granella. Le ricerche in campo agronomico stanno tentando di superare questo limite, selezionando e testando ibridi che permettano di completare la granigione, mantenendo al contempo un'elevata altezza delle piante e la persistenza degli zuccheri nei culmi. Inoltre, per permettere la piena espressione delle potenzialità di questa coltura, la ricerca sta investendo molto sull'adeguamento dell'agro-meccanica a servizio della coltivazione del sorgo. In particolare si rende necessaria l'ottimizzazione della raccolta, in modo da separare già in questa fase da una parte la biomassa contenente gli zuccheri e dall'altra la granella.

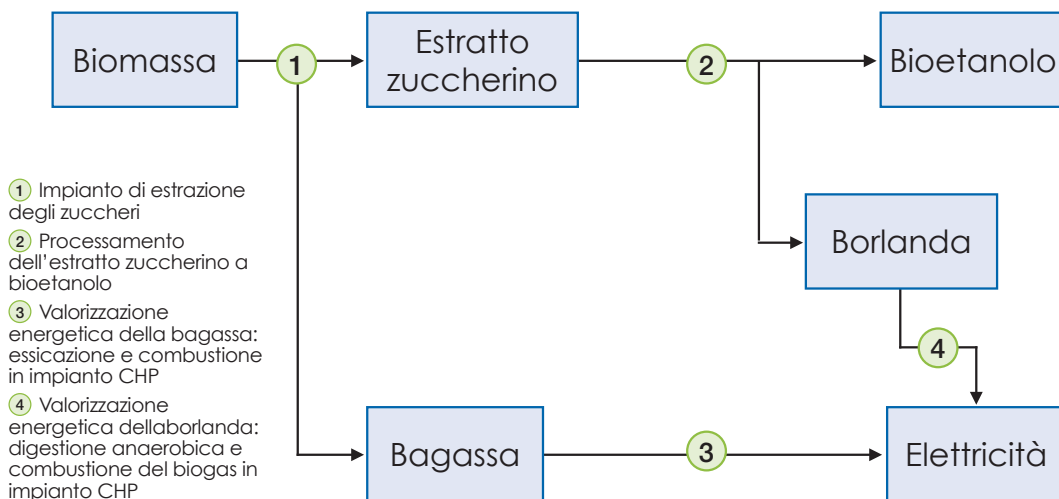


Figura 11: schema dell'impianto per il processamento del sorgo zuccherino (fonte: CETA)

Attualmente questi filoni di ricerca sono ancora in corso e, dunque, il modello sviluppato per l'UE si basa sull'utilizzo solo degli zuccheri e della biomassa lignocellulosica. Come si evince dalla Figura 11, il succo zuccherino separato dalla biomassa trinciata è convertito in bioetanolo. La bagassa, sottoprodotto della fase di estrazione, è essiccata e bruciata in un impianto CHP per fornire energia termica ed elettrica. La borlanda, residuo dell'unità di distillazione e rettifica, rappresenta un substrato idoneo per la digestione anaerobica, eventualmente in co-digestione con altri materiali, tra cui ad esempio le deiezioni zootecniche, che fungono al contempo da inoculo microbico e da fonte di azoto. Il biogas ottenuto, previa purificazione, è combusto in un impianto CHP per la produzione di energia termica ed elettrica. Sulla base di questo schema di massima è possibile inserire alcune varianti, che permettono di declinare questo modello di impianto decentralizzato in funzione delle specificità di ogni situazione.

Infatti, la linea produttiva descritta può essere l'unica all'interno di un impianto, appositamente sviluppato per il processamento del sorgo zuccherino, o, in alternativa, può costituire una delle linee di produzione implementate all'interno dello stesso stabilimento ed eventualmente può funzionare anche con altri substrati, quando il sorgo zuccherino non è disponibile.

Nel presente capitolo, sono delineate le linee guida valide per ciascuna di queste strategie, mentre nei capitoli successivi sono sviluppati nel dettaglio questi diversi approcci, portando i relativi casi studio contestualizzati alle situazioni specifiche dei Paesi partecipanti al progetto (i.e. Italia, Grecia, Spagna). In dettaglio, l'alimentazione di un impianto con il solo sorgo zuccherino è stata contestualizzata in tutti e tre i Paesi, mentre la fattibilità del processamento di sorgo zuccherino in alternanza con un altro substrato (i.e. barbabietola da zucchero) è stata approfondita solo per il contesto spagnolo, in cui questa situazione è concretamente realizzabile.

Gli elementi che accomunano i due approcci e che, quindi, sono essenziali per definire il modello sviluppato per l'UE, riguardano il dimensionamento della filiera di approvvigionamento e le sezioni tecnologiche del processamento della biomassa per ottenere bioetanolo, energia termica ed energia elettrica. Ne consegue che i seguenti paragrafi intendono fornire i dati di base per la progettazione della filiera, che sia incentrata solo sul sorgo zuccherino o che preveda anche altri materiali in ingresso. Tali informazioni si configurano come valori di massima sulla cui base contestualizzare gli studi di fattibilità relativi alle specifiche applicazioni.

7.2 Dimensionamento della filiera di approvvigionamento

La capacità dell'impianto in termini di bioetanolo anidro ottenuto dal sorgo zuccherino è assunta come criterio fondamentale per il dimensionamento della filiera di approvvigionamento, sia che il sorgo zuccherino sia l'unica materia prima processata, sia che esso sia soltanto uno dei substrati lavorati nell'impianto. In questo secondo caso, la capacità si intende riferita alla sola linea produttiva alimentata con il sorgo.

Fissato questo come criterio di base, sono due gli elementi da quantificare per la definizione del dimensionamento della filiera: la superficie agricola, che è necessario asservire all'impianto (o alla linea produttiva alimentata a sorgo), ed il raggio massimo di approvvigionamento.

Superficie agricola asservita

La superficie agricola necessaria a garantire l'approvvigionamento dell'impianto dipende dalle rese produttive della coltura nelle condizioni specifiche del territorio in esame ed in definitiva, quindi, dalla varietà scelta, dal tipo di suolo (e.g. fertilità), dalla disponibilità idrica del terreno (e.g. riserva idrica, granulometria, profondità) e dal clima (e.g. temperatura, piovosità, distribuzione degli eventi meteorici).

Le eterogeneità di ciascuna di queste variabili sono state aggregate in alcuni macroscenari di riferimento, in modo da fornire un primo elemento di valutazione agli stakeholders (Tabella 2)

Gli intervalli riportati per i valori produttivi si riferiscono alle varietà zuccherine attualmente commercializzate nell'UE.

Sono stati scelti due tipi di ambiente all'interno dell'areale di crescita del sorgo e comuni nei Paesi dell'Europa meridionale e per ciascuno di essi sono state tenute in con-

siderazione le condizioni che garantiscono la sostenibilità economica della coltura.

Dal momento che il sorgo si adatta a crescere anche in terreni marginali, questa opzione è stata inclusa nei macroscenari di riferimento soltanto nei casi in cui la sostenibilità economica per l'azienda agricola è garantita, ossia quando il costo per la lavorazione di questi terreni, tendenzialmente problematici, è adeguatamente compensato dai ricavi. I valori più bassi degli intervalli della Tabella 2 si riferiscono alle rese nei contesti marginali che rispettano questi presupposti.

Per quanto riguarda l'ambiente di tipo mediterraneo, caratteristico dell'Italia meridionale e della maggior parte del territorio della Spagna e della Grecia, la coltivazione del sorgo zuccherino senza apporto irriguo appare insostenibile, poiché le rese produttive sono troppo basse (2,4-4,6 t/ha come s.s.). Al contrario, negli ambienti a clima temperato oceanico, tipici dell'Italia settentrionale ad esempio, rese buone sono ottenute anche prevedendo la sola irrigazione di soccorso, in quanto gli eventi meteorici nel periodo di crescita del sorgo sono generalmente sufficienti a soddisfare il fabbisogno idrico della coltura (e.g. 670 mm nel periodo maggio-settembre nel 2010).

I valori della Tabella 2 costituiscono i dati di partenza per il calcolo degli ettari da destinare alla coltivazione del sorgo zuccherino, sulla base della capacità produttiva dell'impianto (o della linea produttiva). In via cautelativa, tuttavia, si suggerisce di prevedere un'area complessiva di approvvigionamento più ampia, in modo da permettere ad esempio la rotazione con altre colture come misura per diversificare l'attività agricola e per preservare la fertilità del suolo.

Si ribadisce, inoltre, che questi valori di macroscenari hanno valore come indicazione di massima e richiedono necessariamente una precisa contestualizzazione alla specificità di ciascuna situazione.

Macroscenari per pianificare la filiera di approvvigionamento			
Tipo di ambiente		Resa	
<u>Tipo MEDITERRANEO</u> Suoli con bassa fertilità Clima secco	Irrigazione	Biomassa	10,3-35,0 t/ha s.s.
		Bioetanolo	1,5-4,6 t/ha 1,9-5,8 m³/ha 40,5-123,6 GJ/ha
<u>Tipo TEMPERATO</u> Suoli con fertilità media Clima temperato oceanico	Senza irrigazione	Biomassa	14,3-19,0 t/ha s.s.
		Bioetanolo	2,1-3,4 t/ha 2,8-4,4 m³/ha 56,7-91,8 GJ/ha
	Irrigazione (di soccorso)	Biomassa	30,0-40,0 t/ha s.s.
		Bioetanolo	4,3-6,1 t/ha 5,9-7,9 m³/ha 116,1-164,7 GJ/ha

Tabella 2: resa in biomassa ed in bioetanolo conseguibili dal sorgo zuccherino in due tipi di ambienti caratteristici dell'Europa meridionale^{48,49}

Raggio di approvvigionamento

Nella definizione della distanza massima da coprire per il rifornimento dell'impianto (o della linea produttiva) è necessario incrociare diversi punti di vista. I principali elementi di valutazione sono: l'incidenza della voce relativa ai trasporti sul bilancio energetico del bioetanolo (e.g. consumo di carburante, usura dei mezzi e relativa manutenzione), il rispetto di eventuali limiti imposti dalla normativa nazionale per la definizione di "filiera corta" (e.g. in Italia attualmente 70 km), la scelta di una logistica compatibile con le esigenze delle aziende agricole e dell'impianto di processamento (e.g. numero di macchinari, distanze percorse e relative tempistiche, ritmi di conferimento) e, non ultimo, il fattore di impatto rappresentato dall'accresciuto traffico pesante nell'area interessata.

Nella Tabella 3 sono delineate due simulazioni per il raggio di approvvigionamento e per le conseguenti implicazioni in termini di attrezzature agricole da asservire.

Per quanto riguarda il dimensionamento dell'unità di valorizzazione energetica dei sottoprodotti, le potenze installate e la definizione delle componenti tecniche derivano dalle disponibilità materiali di bagassa e borlanda, che sono legate alle rese produttive e di processo e, quindi, in definitiva, alla capacità dell'impianto (o della linea produttiva). Per la trattazione dettagliata di questi aspetti si rimanda al paragrafo 7.4.

3.700-3.800 ettari coltivati a sorgo zuccherino		
Raggio massimo	Raccolta in 40 giorni	Macchinari agricoli
15 km	4 cantieri paralleli	4 falcia-trincia-caricatrici 24 trattori con <i>dumper</i>
20 km	6 cantieri paralleli	6 falcia-trincia-caricatrici 24 trattori con <i>dumper</i>

Tabella 3: risultati relativi a 2 simulazioni per l'approvvigionamento di un impianto della capacità di 10.000 t/anno di bioetanolo anidro^{50,51}

7.3 Processamento della biomassa a bioetanolo

Le sezioni tecnologiche implicate nella linea produttiva del bioetanolo di prima generazione dal sorgo zuccherino sono: l'unità di estrazione degli zuccheri, l'unità di concentrazione del succo zuccherino per la conservazione e lo stoccaggio, l'unità di fermentazione, l'unità di distillazione e rettifica, l'unità di disidratazione.

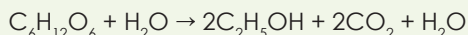


Figura 12: cantiere di raccolta del sorgo zuccherino in un campo in Pianura Padana, Italia (fonte: CETA)

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO: PRODUZIONE DEL BIOETANOLO

La produzione del bioetanolo è incentrata sulla fermentazione alcolica, che è condotta da microrganismi (e.g. lievito della birra) in condizioni controllate di pH, temperatura e pressione parziale di ossigeno.

L'intera via metabolica implicata è riconducibile in estrema sintesi alla seguente reazione stechiometrica:



Sebbene questa reazione costituisca il nucleo della produzione del bioetanolo, l'intero processo è più articolato e si differenzia in base al tipo di substrato alcoligeno: gli zuccheri semplici sono direttamente fermentabili, mentre i polisaccaridi necessitano dell'idrolisi prima della fermentazione.

Inoltre, la complessità dell'idrolisi varia in funzione del tipo di polisaccaride utilizzato: l'amido è facilmente idrolizzabile in residui glucidici liberi, mentre la cellulosa e l'emicellulosa, in virtù della loro funzione strutturale e del forte legame intermolecolare con la lignina, sono piuttosto recalcitranti all'idrolisi.

Il processamento per le varie tipologie di substrato può essere riassunto come segue:

materie prime zuccherine:

1. estrazione degli zuccheri liberi
2. fermentazione
3. distillazione e rettifica
4. disidratazione

Al termine del processamento si ottiene bioetanolo anidro, che è definito di prima generazione;

materie prime amidacee:

1. idrolisi enzimatica: liquefazione con alfa-amilasi e saccarificazione con gluco-amilasi
2. fermentazione
3. distillazione e rettifica
4. disidratazione

Al termine del processamento si ottiene bioetanolo anidro, che è definito di prima generazione;

materie prime lignocellulosiche:

1. pretrattamento per separare la lignina dai polisaccaridi strutturali
2. idrolisi enzimatica: condotta con endocellulasi, esocellulasi, emicellulasi
3. fermentazione degli zuccheri esosi, C6 (e.g. glucosio)
4. fermentazione degli zuccheri pentosi, C5 (e.g. xilosio)

Al termine del processamento si ottiene bioetanolo anidro di seconda generazione, se è stata utilizzata biomassa prodotta da colture dedicate e, in alternativa, si ottiene bioetanolo anidro di terza generazione, se è stata processata una biomassa lignocellulosica residuale.

Unità di estrazione del succo zuccherino

La separazione degli zuccheri liberi dalla biomassa trinciata può essere realizzata ricorrendo alla spremitura in mulini a coppie di cilindri dentati o, in alternativa, alla lisciviazione.

In entrambe le ipotesi la movimentazione degli zuccheri è favorita dall'aggiunta di acqua calda (75-85 °C) in un rapporto rispetto alla biomassa di 1:0,1 – 1:1. La resa estrattiva con questi dispositivi è del 85-98%, inferiore per i mulini a cilindri (85-93% in im-

pianti con 3-5 coppie di cilindri) e superiore per i sistemi a diffusione continua (93-98%).

Il principio alla base dell'estrazione nei mulini a cilindri è la separazione solido-liquido per effetto della forte compressione sulla biomassa quando viene a trovarsi tra due cilindri dentati rotanti disposti in coppia (sistema TRPF). I dispositivi possono essere verticali o orizzontali. I modelli a capacità bassa sono generalmente orizzontali e sono dotati al massimo di 3 coppie di cilindri. I modelli ad elevata capacità hanno sviluppo orizzontale e vi sono allestite fino a 9 coppie di cilindri dentati.

La velocità di rotazione dei cilindri posti in coppia varia dalle 10-12 rpm dei modelli più piccoli alle 6-8 rpm dei dispositivi ad elevata capacità.

Con questo tipo di dispositivi di estrazione le rese ottimali sono conseguite con un'aggiunta di acqua calda del 10% p/p. Lo schema di funzionamento di un mulino a cilindri è raffigurato nella Figura 13.

In alternativa, il processo di diffusione in continuo si basa su un dosatore sistematizzato che sottopone la biomassa ad un lavaggio con flusso di d'acqua corrente per favorirne l'imbibizione. Questa condizione è ottenuta depositando uno strato di biomassa trinciata o di bagassa di prima spremitura su un nastro trasportatore e aggiungendo progressivamente l'acqua, che percola attraverso i fori presenti nelle piastre del trasportatore stesso. L'acqua favorisce la movimentazione degli zuccheri presenti nel substrato e l'estratto è raccolto in un serbatoio, da cui è pompato in un unico passaggio verso un ulteriore serbatoio di raccolta. Tale processo è ripetuto più volte, in modo da ottenere la concentrazione massima all'estremità finale di alimentazione del diffusore; a questo scopo il dispositivo può essere impostato per un funzionamento a flusso di circolazione singolo del succo o a flussi paralleli.

I diffusori sono progettati per avere una lunghezza dai 35 ai 52 metri; la sezione trasversale è rettangolare e la capacità varia in funzione della larghezza. Le griglie di trasporto ed i divisori sono supportati da 2 catene a rullo con un passo di circa 3 piedi. Queste catene sono supportate alle estremità da ruote dentate. All'estremità

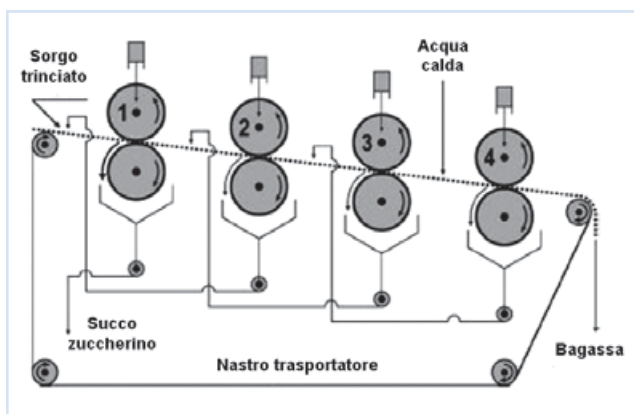


Figura 13: mulino a cilindri ⁵²

I diffusori sono progettati per avere una lunghezza dai 35 ai 52 metri; la sezione trasversale è rettangolare e la capacità varia in funzione della larghezza. Le griglie di trasporto ed i divisori sono supportati da 2 catene a rullo con un passo di circa 3 piedi. Queste catene sono supportate alle estremità da ruote dentate. All'estremità

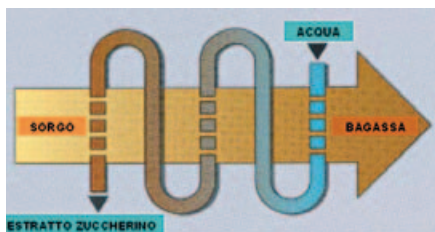


Figura 14: estrazione in continuo (fonte: CARTIF)

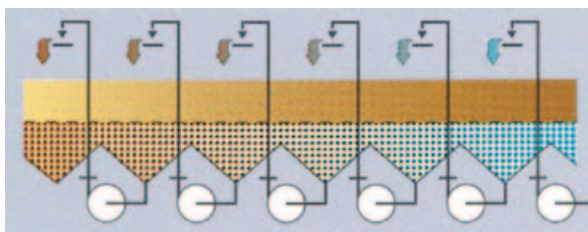


Figura 15: diagramma rappresentante il processo di diffusione in continuo (fonte: CARTIF)

tà di comando del diffusore le dentature sono accoppiate attraverso un ingranaggio ed un pignone e permettono una velocità variabile di trasmissione idraulica oppure una trasmissione con motore elettrico.

Il nastro trasportatore è composto da una struttura articolata a cui sono fissati i divisori. Questi elementi sono rigidamente assicurati alle connessioni corrispondenti delle due catene che sono dotate di raccordi auto-lubrificanti. I rulli girano su delle rotaie parallele poste sotto l'alloggiamento, dando piena accessibilità ai divisori. Lo spessore del cosiddetto letto del trasportatore, su cui è deposta la biomassa in ingresso, varia da 1,5 a 2 metri. Lo spazio tra i due trasportatori è occupato da un serbatoio con fondo inclinato di elevata capacità, diviso in singoli serbatoi più piccoli grazie a dei piatti verticali, che presentano scanalature orizzontali in punti specifici ed attraverso cui l'estratto prodotto fluisce ed è raccolto nel contenitore successivo. All'estremità del nastro trasportatore un raschiatore girevole permette di uniformare il flusso di biomassa che cade in una tramoggia di scarico. La tramoggia è dotata di un nastro trasportatore per la rimozione della bagassa. Il diffusore è, inoltre, dotato di viti di sollevamento nella zona di ritorno dell'acqua in pressione.

Nel corso dell'intero passaggio attraverso il diffusore, la biomassa di sorgo zuccherino depositata sul nastro trasportatore è sottoposta ad intensi getti di estratto diluito, la cui concentrazione decresce progressivamente. Il succo è distribuito omogeneamente sulla biomassa attraverso dei canaletti che si estendono per l'intera larghezza dell'alloggiamento e sono posti sopra ad ogni serbatoio in cui si raccoglie il succo stesso; l'accuratezza del dosaggio è del 2%. La curva rappresentata nella Figura 19 evidenzia la regolare diminuzione di concentrazione del succo nei serbatoi.

L'ultimo canaletto è alimentato con acqua. Tutti i serbatoi hanno la stessa larghezza e raccolgono l'estratto che percola attraverso i fori alla base dell'alloggiamento per il trasporto dei culmi. Ogni serbatoio è collegato ad una singola pompa centrifuga ad elevata capacità, predisposta per raccogliere l'estratto dal serbatoio e distribuirlo sulla biomassa posta sulla parte di nastro trasportatore precedente (in direzione opposta

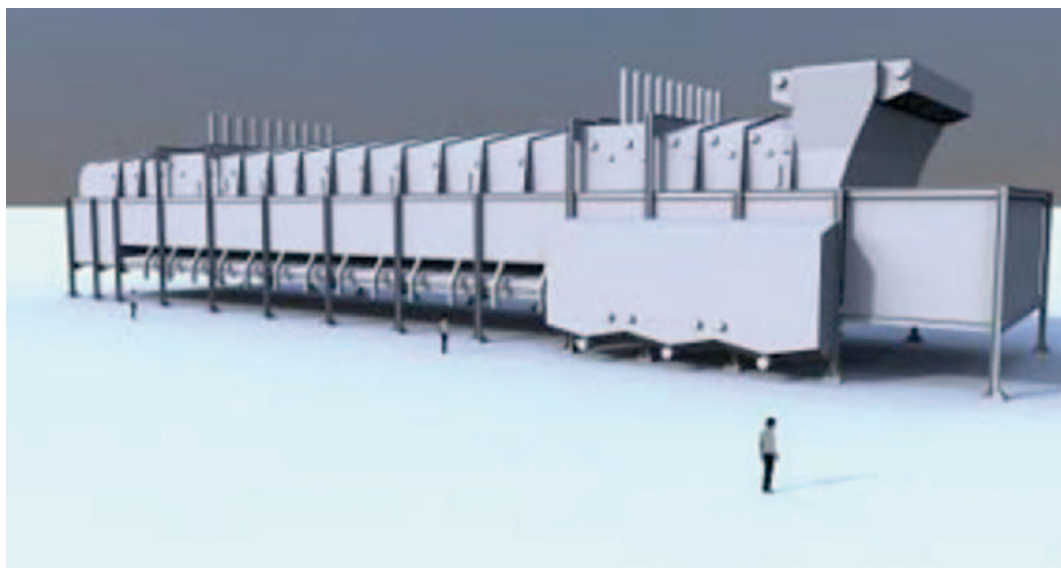


Figura 16: diffusore in continuo (fonte: CARTIF)

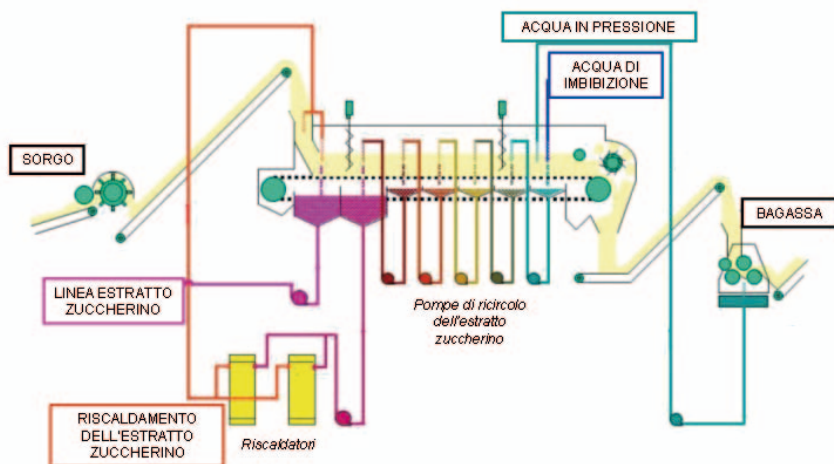


Figura 17: processo di estrazione dai culmi di sorgo zuccherino tramite il processo di tipo 1 (fonte: CARTIF)

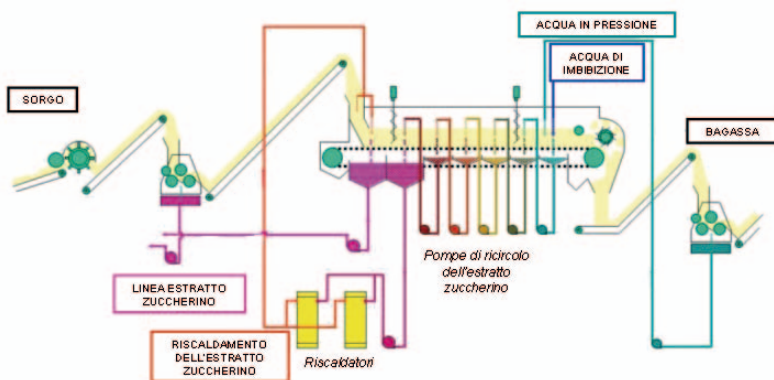


Figura 18: processo di estrazione dai culmi di sorgo zuccherino tramite il processo di tipo 2 (fonte: CARTIF)

al movimento del nastro stesso). Un'ultima singola pompa porta l'estratto più concentrato all'apposita vasca di raccolta. Un'altra pompa fa circolare continuamente l'estratto concentrato sui culmi di sorgo zuccherino in ingresso. Il flusso di biomassa è portato all'interno del diffusore per mezzo di un trasportatore a draga trasversale progettato in modo da disporre la biomassa omogeneamente per ottimizzare la resa. Il succo concentrato è poi pompato verso le successive fasi di processamento.

Il diffusore è gestito da un unico pannello di controllo centralizzato che raggruppa e comanda tutte le componenti.

I principali vantaggi della diffusione in continuo sono:

- elevata efficienza di estrazione sia in sistemi di spremitura già esistenti, sia in impianti nuovi;
- bassi costi iniziali dell'impianto di estrazione, in quanto i diffusori sono progettati per funzionare con preparazioni standard di biomassa ed in concomitanza a sistemi di spremitura esistenti; inoltre, tali diffusori possono essere installati all'aperto e non richiedono apposite opere edili;

- bassi costi di manutenzione e funzionamento: i diffusori sono completamente automatizzati ed è sufficiente un solo addetto per comandare il pannello di controllo; i costi per la lubrificazione sono trascurabili;
- basse richieste energetiche: l'unica utenza termica richiesta è una modesta quantità di vapore a bassa pressione per riscaldare l'estratto nel diffusore; tutte le parti in movimento hanno alimentazione elettrica;
- ampio intervallo di capacità: i diffusori possono operare dal 10% al 30% oltre la capacità nominale, senza modifiche e perdite significative di efficienza. Variando l'altezza dell'alloggiamento e la velocità del nastro trasportatore, l'intervallo di capacità può essere ulteriormente esteso. La progettazione del diffusore è fatta in modo tale che aumenti non previsti nel carico di biomassa in ingresso possano essere sopportati, entro un certo limite, grazie all'aggiunta di ulteriori passaggi di lavaggio;
- assenza di fermentazione: i diffusori sono progettati per evitare la formazione di zone statiche, dove potrebbero avvenire fenomeni di fermentazione incontrollata. Il nastro trasportatore è lavato ad ogni ciclo per prevenire contaminazioni. Inoltre, il diffusore è dotato di un sistema di controllo del pH ed opera a basse temperature;
- lo scarico della biomassa avviene per gravità all'estremità terminale del diffusore, dove uno speciale raschiatore fa fluire il materiale e permette un'alimentazione continua. Il diffusore può essere svuotato del tutto per lunghi periodi di tempo e non necessita di pulizia manuale;
- la qualità del succo è elevata: una chiarificazione sistematica del succo di ultima spremitura permette la rimozione delle impurità e contribuisce alla produzione di estratti idonei alle sezioni successive di processamento;
- risparmio di energia termica: tutti i sistemi di riscaldamento della biomassa e del succo sono analoghi a quelli usati negli zuccherifici. Inoltre, il diffusore è completamente chiuso e isolato.

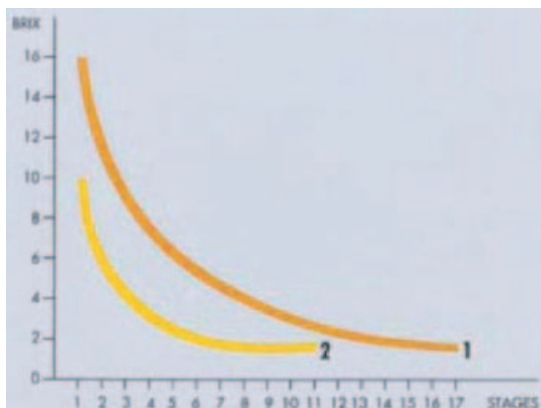


Figura 19: curva dei gradi Brix: (1) diffusione con i culmi di sorgo zuccherino, (2) diffusione con la bagassa (fonte: CARTIF)

Il processo di diffusione in continuo permette di conciliare rese di estrazione elevate con bassi consumi energetici; inoltre, l'estratto presenta un quantitativo minimo di sostanze contaminanti che potrebbero interferire con le successive fasi del processamento.

L'estratto di sorgo zuccherino, infatti, generalmente contiene solidi solubili (e.g. antociani e clorofille) ed insolubili (e.g. granuli di amido), che devono essere rimossi prima di avviare la conversione degli zuccheri a bioetanolo.

La chiarificazione dell'estratto, ottenuto attraverso un sistema a mulini o un diffusore in continuo, avviene attraverso un processo di evaporazione, che prevede la rimozione in continuo del materiale coagulato, che flotta in superficie sottoforma di

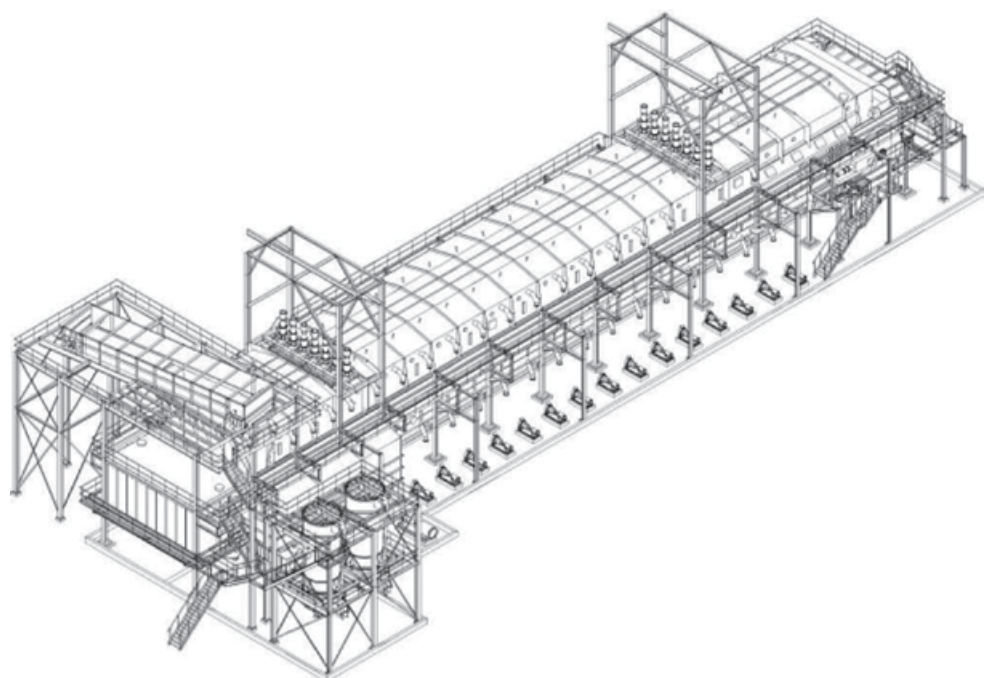


Figura 20: diffusore continuo (fonte: CARTIF)

Capacità	Da 2.000 t																a				15.000 t			
Di dimensioni	Larghezza [m]																							
	2,8	3,3	4,2	4,7	5,2	5,7	6,2	6,7	7,2	7,7	8,2	8,7	9,2	9,7	10,9	11,4	11,9	13,4						
	Lunghezza [m]																							
	Da 48,3																a		61 m					
	Altezza [m]																							
	Circa 8 m																							
Potenza a pieno regime	Circa 110 CV / 1.000 t/giorno							Circa 100 CV / 1.000 t/giorno																
Consumo di vapore	80 – 85 kg/t di biomassa																							

Figura 21: dati per la progettazione di un diffusore in continuo (fonte: CARTIF)

schiuma al lento aumentare della temperatura. Se il processo è effettuato troppo velocemente, il materiale coagulato tende a dissolversi, creando addensamenti statici nello sciroppo prodotto.

Una soluzione per migliorare ulteriormente la qualità dell'estratto è la purificazione del succo con idrossido di calcio (i.e. *lime*) e CO_2 prima di procedere con l'evaporazione. Questi composti, infatti, favoriscono la flocculazione delle componenti contaminanti, che sono successivamente eliminate per filtrazione. Tale rimozione assicura la riduzione di incrostazioni nelle tubazioni.

Evaporatore a film cadente

La concentrazione è la strategia scelta con gli *stakeholders* per il modello sviluppato per l'UE per preservare gli zuccheri e per rifornire l'impianto nei mesi successivi alla raccolta della biomassa di sorgo zuccherino. Questa sezione è necessaria sia se è previsto il processamento solamente del sorgo, sia se l'impianto è alimentato anche con altre materie prime.

Lo scopo di questo passaggio è la concentrazione del succo zuccherino dai 12-16 °Brix, ottenuti al termine dell'estrazione, ai 45-80 °Brix, a seconda del periodo di stoccaggio programmato per lo scioppo concentrato. Il principio alla base della conservazione è l'aumento della pressione osmotica a livelli in cui la crescita microbica risulta completamente impedita.

La tecnologia ritenuta più efficiente per la concentrazione dell'estratto zuccherino è l'evaporatore a film cadente con sistema sotto vuoto, in grado di assicurare al contempo il minimo consumo energetico e la migliore qualità dello sciroppo.

L'evaporatore a film cadente concentra l'estratto zuccherino in diversi passaggi (tra 2 e 4 in funzione della concentrazione finale desiderata), operando sotto vuoto, in modo da assicurare un processo a bassa temperatura, basso consumo di vapore e minima degradazione degli zuccheri stessi. Ad ogni passaggio di concentrazione, il diametro dei tubi dell'evaporatore a film cadente aumenta per ridurre l'intorbidamento e mantenere l'efficienza di concentrazione; da questo passaggio, l'acqua condensata dopo la concentrazione può essere impiegata nell'unità di estrazione degli zuccheri, minimizzando il consumo di acqua dell'intero processo.

Unità di fermentazione

Per la fermentazione alcolica si ricorre all'impiego del lievito della birra (*Saccharomyces cerevisiae*), impostando le condizioni ottimali per favorire in un primo momento la crescita cellulare e la proliferazione e successivamente il metabolismo anaerobico.

In dettaglio le impostazioni adottate sono le seguenti:

- concentrazione del glucosio nel mezzo superiore a 9 g/l (in modo da innescare l'effetto Crabtree ed assicurare la fermentazione alcolica invece del ciclo di Krebs e della fosforilazione ossidativa);
- pH 4-5;
- temperatura 30-35 °C;
- concentrazione di azoto nel mezzo 150-180 mg/l (in forma ammoniacale).

La fermentazione è articolata in cinque sezioni.

1. Pastorizzazione dell'estratto zuccherino: questa operazione previene l'avvio di

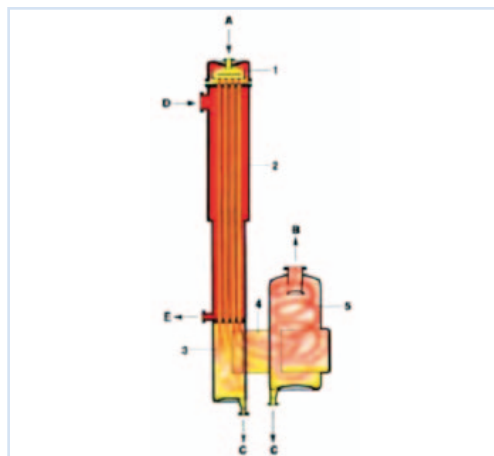


Figura 22: evaporatore a film cadente. Legenda:
A: prodotto; B: vapore; C: concentrato; D: riscaldamento a vapore; D: condensato; 1: testata; 2: calandria; 3: calandria, parte inferiore; 4: canale di miscelazione; 5: separatore di vapore (fonte: CARTIF)

fermentazioni incontrollate ed indesiderate da parte di batteri. Per ottenere la pastorizzazione possono essere impostate le condizioni riassunte

2. Preparazione dell'inoculo di lieviti: i lieviti liofilizzati sono reidratati e stabilizzati per ottenere una sospensione nella vasca madre. Questa operazione è condotta con una soluzione di glucosio, fruttosio o saccarosio alla temperatura generalmente di 35 °C ed aggiungendo una sostanza ad effetto battericida, ossigeno ed eventualmente anche ergosterolo. Al momento di avviare ogni processo fermentativo un'aliquota di sospensione madre è inoculata nel fermentatore attraverso un sistema di pompe e condotte idrauliche.
3. Fermentazione: il processo fermentativo può essere gestito in discontinuo (*in batch*) o in continuo.
 - fermentazione *in batch*: è caratterizzata dall'essere condotta in reattori indipendenti e non comunicanti direttamente gli uni con gli altri. La resa fermentativa dipende dalla tolleranza dei lieviti nei confronti dell'alcol, che progressivamente si accumula nel mezzo nel corso della fermentazione (tolleranza massima per ceppi selezionati 19% v/v). A fronte del limite fisiologico alla resa fermentativa dovuto alle caratteristiche proprie dei lieviti, questo processo assicura un'elevata possibilità di contenimento delle eventuali contaminazioni batteriche con un alto livello di sicurezza dell'unità, poiché il reattore contaminato può essere rapidamente isolato, prevenendo l'estensione del problema agli altri.
 - Fermentazione in continuo: il processo è impostato in modo che l'estratto zuccherino pastorizzato fluisca nel primo fermentatore, dove avviene l'inoculo, ed il mezzo parzialmente fermentato transiti nei reattori successivi, mentre l'alcol prodotto è progressivamente separato, senza raggiungere mai il valore soglia di inibizione dei lieviti. Con questa strategia, la fermentazione non si interrompe fino all'ultimo reattore, dove tutti gli zuccheri inizialmente presenti risultano convertiti in alcol. La resa fermentativa, dunque, è più elevata di quella conseguibile con il processo *in batch*. Inoltre, i volumi richiesti sono inferiori di quelli necessari per il processo discontinuo. Il principale svantaggio di questo processo è la difficoltà di contenere eventuali fenomeni di contaminazione batterica: infatti, la contaminazione di un reattore può rapidamente espandersi all'intera unità di fermentazione e gli interventi di decontaminazione risultano difficoltosi.

Temperatura	Tempo	Tecnica di pastorizzazione
63 °C (145 °F)	30 minuti	pastorizzazione "Vat"
72 °C (161 °F)	15 secondi	HTST
89 °C (191 °F)	1.0 secondi	HHST
90 °C (194 °F)	0.5 secondi	HHST
94 °C (201 °F)	0.1 secondi	HHST
96 °C (204 °F)	0.05 secondi	HHST
100 °C (212 °F)	0.01 secondi	HHST
138 °C (280 °F)	2.0 secondi	UP

Tabella 4: condizioni per impostare la pastorizzazione dell'estratto zuccherino

4. Recupero dei lieviti. Il riutilizzo dei lieviti al termine della fermentazione è una delle misure per migliorare il bilancio economico dell'impianto, poiché la voce per l'acquisto dei microrganismi è significativa. I lieviti sono separati dal mezzo fermentato mediante centrifugazione. Se i lieviti sono ancora vitali possono essere riutilizzati, in caso contrario hanno un valore nutrizionale per il loro contenuto proteico nella formulazione di integratori alimentari o di mangimi zootecnici.

Unità di distillazione e rettifica

Il passaggio attraverso l'unità di distillazione e rettifica consente di aumentare la concentrazione dell'alcol dai valori del 9-14% v/v, ottenuti al termine della fermentazione, ai valori tipici dell'etanolo azeotropo, 95-96% v/v.

L'unità è organizzata da colonne di distillazione poste in serie (i.e. a multiplo effetto), ciascuna delle quali è costituita da una successione di piatti. A livello di ciascun piatto la miscela di alcol ed acqua evapora e salendo lungo la colonna progressivamente si arricchisce in alcol in virtù della differente temperatura di ebollizione dei due composti.

La tecnologia a multiplo effetto consente di ridurre il consumo termico di questa sezione, tipicamente molto elevato, in quanto la pressione in testa a ciascuna colonna è inferiore al valore atmosferico e, dunque, sono sufficienti temperature più basse affinché le componenti della miscela evaporino e si separino.

Unità di disidratazione

Questa sezione consente di ottenere il bioetanolo anidro (i.e. 99.7-99.8% p/p), compatibile con le specifiche richieste per la sintesi del bio-ETBE e per la miscelazione diretta con la benzina.

La disidratazione si avvale dell'utilizzo di setacci molecolari in zeolite, che sono in grado di trattenere selettivamente le molecole di acqua, mentre l'alcol fluisce, risultando progressivamente arricchito nella miscelazione circolante.

Lo stoccaggio del bioetanolo anidro impone delle misure specifiche (i.e. conservazione in atmosfera controllata priva di aria, generalmente con N_2 o CO_2), per evitare che l'umidità atmosferica condensi diminuendo il titolo di alcol nella miscela.

Le stesse cautele devono essere applicate anche durante le fasi di trasporto e distribuzione.

7.4 Unità di valorizzazione energetica dei sottoprodotti

Bagassa

Le caratteristiche chimiche e fisiche della bagassa rendono questo sottoprodotto dell'estrazione degli zuccheri adatto alla combustione in impianti CHP per la produzione di energia termica ed elettrica (Tabella 5).

Il dimensionamento dell'impianto CHP è correlato alla disponibilità materiale del sottoprodotto e, dunque, alla superficie agricola asservita ed alla resa produttiva in biomassa.

In considerazione delle rese produttive riportate nella Tabella 2 e del PCI della bagassa (Tabella 5), sono stati calcolati i valori di riferimento per il dimensionamento di massima

dell'unità cogenerativa (Tabella 6).
Per quanto attiene ai dettagli tecnici dell'impianto CHP, le principali componenti sono il bruciatore, che deve essere adatto alla combustione di substrati erbacei, e la turbina, che può essere ad esempio una turbina a vapore basata sul ciclo Rankine-Hirn o a gas basata sul ciclo Brayton o un turbogeneratore basato sul ciclo ORC.

La scelta tecnologica dipende soprattutto dalla potenza nominale richiesta. Nella Figura 23 sono riassunte alcune situazioni di riferimento che possono guidare la scelta della tipologia impiantistica in funzione dei valori di potenza nel caso del modello di filiera in esame (0,1-10 MWe).

La principale criticità legata alla combustione della bagassa riguarda il suo alto contenuto in ceneri (3-5% s.s.), che, inoltre, sono caratterizzate da un basso punto di fusione. Ne consegue che il bruciatore deve essere dotato di un adeguato sistema di rimozione delle ceneri e che deve essere richiesta alla casa produttrice l'apposita estensione della garanzia per l'utilizzo di questo biocombustibile. La gestione delle ceneri (e.g. recupero, smaltimento) varia in funzione del quadro normativo del Paese in esame.

Caratterizzazione della bagassa	
Umidità iniziale	30-50%
Zuccheri residui	6-7% s.s.
Cellulosa	16-18% s.s.
Emicellulosa	11-13% s.s.
Lignina	7-9% s.s.
PCI	17-18 MJ/kg s.s. 4,7-5,0 kWh/kg s.s.

Tabella 5: principali caratteristiche della bagassa di sorgo zuccherino, ottenuta come residuo dell'estrazione in mulini a cilindri (sistema TRPF), ai fini della sua valorizzazione energetica⁵³

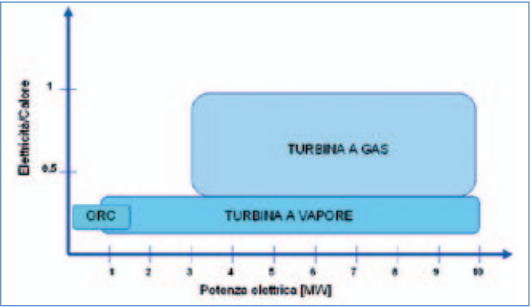


Figura 23: campi di applicazione di alcuni sistemi cogenerativi⁵⁴

Valorizzazione energetica della bagassa			
Tipo di ambiente		Resa	
Tipo MEDITERRANEO Suoli con bassa fertilità Clima secco	Irrigazione	Bagassa	6-20 t/ha s.s.
		Energia	100-340 GJ/ha 28-94 MWh/ha
Tipo TEMPERATO Suoli con fertilità media Clima temperato oceanico	Senza irrigazione	Bagassa	10-12 t/ha s.s.
		Energia	190-200 GJ/ha 53-56 MWh/ha
	Irrigazione (di soccorso)	Bagassa	18-25 t/ha s.s.
		Energia	312-442 GJ/ha 87-123 MWh/ha

Tabella 6: principali valori di riferimento per il dimensionamento di massima dell'unità di valorizzazione energetica della bagassa applicabili in due tipi di ambienti caratteristici dell'Europa meridionale

Borlanda

In considerazione della sua composizione chimica, la borlanda, residuo dell'unità di distillazione e rettifica, è un substrato adatto alla produzione di biogas attraverso la digestione anaerobica (Tabella 7)

Il dimensionamento della sezione di digestione anaerobica è correlato sia alla disponibilità materiale del substrato, e, quindi, alla capacità dell'impianto, sia al HRT.

Per quanto riguarda la disponibilità materiale di borlanda, il fattore di conversione è di 7-8 litri di borlanda per litro di bioetanolo prodotto.

Per quanto attiene, invece, al tempo richiesto per completare la metanogenesi, il valore di HRT dipende dalla composizione dei substrati avviati alla digestione anaerobica: come principio generale la lignina, la cellulosa e le proteine richiedono un tempo di degradazione più lungo dei grassi, dell'amido e degli zuccheri. La biometanazione della borlanda è condotta

in co-digestione con altri substrati, in grado di bilanciarne la composizione, accelerare l'avvio del processo ed, inoltre, stabilizzarne l'andamento: a titolo di esempio le deiezioni zootecniche sono utilizzate come inoculo microbico all'inizio della digestione anaerobica e le biomasse lignocellulosiche sono miscelate alla borlanda per migliorare il rapporto tra carbonio ed azoto, qualora necessario. Alla luce di queste considerazioni, il HRT per la borlanda è indicativamente di 60 giorni.

Il profilo chimico del biogas ottenuto dalla biometanazione è riportato nella Tabella 8. Se il contenuto di metano nel biogas è del 60%, la resa teorica in metano è di 0,395 Nm³/kg COD.

Assumendo i valori caratteristici per le rese in borlanda (i.e. 7,52 l/l di bioetanolo) ed in metano (i.e. 0,395 Nm³/kg COD), per il COD della borlanda (i.e. 80 gO₂/l) e per il PCI del biogas ottenuto (i.e. 21,5 MJ/ Nm³), sono stati calcolati gli indici di riferimento per il dimensionamento di massima dell'unità (Tabella 9).

Per la combustione del biogas si utilizza un impianto CHP, che può essere allestito con un motore a ciclo Diesel o con una microturbina a gas.

Nel caso in cui si applichi il motore a ciclo Diesel, si rendono necessari alcuni interventi per far funzionare il motore secondo il ciclo Otto: in particolare devono essere inseriti un carburatore e le candele. Ad oggi sono già commercializzati dei modelli di motore appositamente predisposti a questo scopo. Il calore rilasciato nel corso

Caratterizzazione della borlanda	
Sostanza secca	6-7%
Sostanze volatili	85-90%
BOD₅	40-50 gO ₂ /l
COD	70-90 gO ₂ /l
Azoto	750-850 mg/l
Fosforo	1,5-2,5 g/l
pH	4,4-4,6

Tabella 7: profilo chimico della borlanda utile ai fini della digestione anaerobica ⁵⁵

Caratterizzazione del biogas	
CH₄	50-70%
CO₂	25-45%
H₂	1-10%
N₂	0,5-3,0%
CO	0,08-0,10
H₂S	0,02-0,20
O₂	tracce
PCI	21-22 MJ/Nm ³ 5,8-6,1 kWh/Nm ³

Tabella 8: composizione chimica del biogas

Valorizzazione energetica della borlanda			
Tipo di ambiente		Resa *	
Tipo MEDITERRANEO Suoli con bassa fertilità Clima secco	Irrigazione	Metano	340-1.030 Nm ³ /ha
		Energia	7,9-23,7 GJ/ha 2,2-6,6 MWh/ha
Tipo TEMPERATO Suoli con fertilità media Clima temperato oceanico	Senza irrigazione	Metano	500-790 Nm ³ /ha
		Energia	11,6-18,4 GJ/ha 3,2-5,1 MWh/ha
	Irrigazione (di soccorso)	Metano	1.070-1.420 Nm ³ /ha
		Energia	24,9-32,7 GJ/ha 6,9-9,1 MWh/ha

* calcolo eseguito con la produzione reale di metano

Tabella 9: principali valori di riferimento per il dimensionamento di massima dell'unità di valorizzazione energetica della borlanda applicabili in due tipi di ambienti caratteristici dell'Europa meridionale

della combustione è recuperato dai fumi e/o dal raffreddamento del motore attraverso uno scambiatore.

Il rendimento della conversione energetica è correlato alla potenza dell'impianto: nell'intervallo di potenza applicato nel modello sviluppato per l'UE (0,1-5,0 MWe), il rendimento elettrico è del 30-42% ed il rendimento termico è del 45-50%. Passando a taglie superiori si assiste ad un significativo incremento del rendimento, soprattutto a carico della conversione elettrica.

Il digestato, residuo della digestione anaerobica, ha buone proprietà fertilizzanti (azoto 800 g/t, principalmente in forma ammoniacale) e, dunque, può essere utilizzato come fertilizzante e/o ammendante in agricoltura per compensare alle asportazioni colturali.

8. IL MODELLO 1 SVILUPPATO PER L'UE: IL SORGO ZUCCHERINO COME UNICA MATERIA PRIMA PROCESSATA NELL'IMPIANTO DECENTRALIZZATO

Il principale vantaggio legato ad alimentare l'impianto unicamente con il sorgo zuccherino è insito nella possibilità di massimizzare il contributo positivo di questa coltura in termini di sostenibilità, in quanto l'intera capacità installata nell'impianto si può pregiare sia di un elevato risparmio nelle emissioni di GHGs del bioetanolo ottenuto, sia dell'utilizzo di una materia prima, la cui produzione richiede bassi *input* agronomici (i.e. acqua, fertilizzanti).

Il principale svantaggio di questa scelta va, invece, ricercato nella dipendenza dell'impianto da un'unica materia prima, in quanto questa situazione riduce significativamente la sicurezza dell'approvvigionamento in caso di annate agrarie cattive.

Per migliorare il livello di dettaglio della spiegazione e la relativa comprensione, il modello 1 è stato contestualizzato, assumendo una capacità produttiva di riferimento di 10.000 t/anno in termini di bioetanolo anidro.

I principali dettagli del modello 1 sono riassunti nella Tabella 10.

Nelle regioni a clima temperato oceanico, caratterizzate da terreni a fertilità media e da precipitazioni dell'ordine di 600-700 mm durante il periodo di sviluppo del sorgo, la superficie agricola da asservire alla filiera è di 3.000-4.800 ettari. Nel caso in cui sia programmata l'irrigazione (anche se di soccorso), la superficie agricola può essere ridotta a 1.700-2.300 ettari, poiché aumenta in quota parte la resa produttiva della coltura. Tuttavia, in questo scenario peggiora il conto economico della filiera e la competizione con altre colture irrigue (*in primis* il mais in questo tipo di ambiente) può deprimere sensibilmente la possibilità di inserire il sorgo nei piani colturali. Ne consegue che l'opportunità di prevedere l'irrigazione è una variabile da tenere in seria considerazione nella valutazione dei terreni da destinare alla filiera e nella relativa analisi della fattibilità economica.

Nelle regioni a clima mediterraneo, invece, la coltivazione del sorgo non può prescindere dall'apporto irriguo per garantire delle rese sostenibili. In questo tipo di ambiente la superficie agricola da asservire alla filiera fa registrare un intervallo molto ampio (2.200-6.600 ettari), poiché i valori di resa possono essere molto diversi in funzione degli *input* agronomici che devono essere applicati ai terreni che generalmente hanno una bassa fertilità.

La definizione del raggio di approvvigionamento richiede un approccio multidisciplinare, poiché devono essere incrociate considerazioni di natura tecnica, logistica ed economica.

In primo luogo, se la competitività del sorgo rispetto alle altre colture è il prerequisito per lo sviluppo della filiera, molto importanti sono anche il peso delle colture tradizionalmente coltivate nell'area in esame e la propensione all'innovazione degli imprenditori agricoli. Alcuni parametri possono essere assunti come indicatori per misurare l'incidenza di questi fattori sull'estensione del raggio di approvvigionamento, a titolo di esempio la diversificazione delle colture nel territorio in esame e la struttura delle aziende agricole. Se la diversificazione è alta, significa che numerose colture sono remunerative e, dunque, è plausibile che l'elevata competizione si traduca in

Capacità 10.000 t/anno (come bioetanolo anidro)		
Dimensionamento della filiera di approvvigionamento	Superficie agricola asservita	<u>Tipo mediterraneo</u> 2.200-6.700 ha
		<u>Tipo temperato</u> 3.000-4.800 ha (senza irrigazione) 1.700-2.300 ha (con irrigazione di soccorso)
	Raggio di approvvigionamento	Dipende dalle caratteristiche specifiche del territorio in esame, ad esempio in termini di diversificazione colturale, struttura delle aziende agricole, limitazioni alla definizione di "filiera corta"
Processamento dell'estratto zuccherino	Dettagli operativi	330 giorni lavorativi all'anno 68.000-69.000 t come s.s. di sorgo zuccherino spremute in 40 giorni Estrazione degli zuccheri, fermentazione, distillazione, rettifica e disidratazione secondo le linee guida
	Unità di concentrazione	<u>Stoccaggio</u> Sciroppo concentrato al 45%, conservabile fino a 2 mesi Sciroppo concentrato all'80%, conservabile fino a 11 mesi <u>Utilizzo</u> Diluizione dello sciroppo concentrato al 18% <u>Gestione delle acque</u> Scarico delle acque di processo residuali dalla concentrazione del succo zuccherino in corpo idrico superficiale nel rispetto delle leggi nazionali e regionali Acquisto dell'acqua per la diluizione dello sciroppo concentrato <u>Consumi termici</u> Autoconsumo dell'energia termica prodotta nell'unità di valorizzazione dei sottoprodotti 0,43 MWe potenza disponibile a livello di questa unità dopo la conclusione del periodo di raccolta
Valorizzazione energetica dei sottoprodotti	Bagassa	<u>Disponibilità</u> 41.850- 42.460 t come s.s., stoccata presso l'impianto, essiccata e bruciata nel corso dell'anno lavorativo 711,4-764,3 TJ/anno 196,69-212,31 GWh/anno
		<u>Impianto CHP</u> 4,20 MWe
		<u>Ceneri</u> 2.040-3.450 t/anno Smaltimento in discarica o recupero, in funzione del quadro normativo nazionale dei diversi Paesi
	Borlanda	<u>Disponibilità</u> Capacità del digestore anaerobico 20.000-22.000 m ³ (HRT 60 giorni) Capacità di stoccaggio del biogas 10.000-14.000 m ³ 14,0-14,7 TJ/anno 3,86-4,06 GWh/anno
		<u>Impianto CHP</u> 0,75 MWe
		<u>Digestato</u> 93.000-95.000 t/anno Utilizzo come fertilizzante e/o ammendante 74-76 t/anno di azoto (principalmente in forma ammoniacale)

Tabella 10: principali dettagli relativi al modello 1 sviluppato per l'UE nel caso la capacità sia di 10.000 t/anno di bioetanolo anidro

una distanza di approvvigionamento piuttosto elevata. Al contrario, la giovane età degli imprenditori agricoli, la presenza di aziende di grandi dimensioni ed un elevato livello di innovazione già implementato nelle pratiche agricole, ossia elementi desumibili complessivamente dalla struttura delle aziende agricole, suggeriscono che il territorio in esame possa fornire una buona disponibilità alla penetrazione del sorgo e che il raggio di approvvigionamento possa essere abbastanza breve.

In secondo luogo, la definizione del bacino di approvvigionamento deve essere assoggettata alla LCA ed all'analisi della logistica, valutando gli impatti energetici ed ambientali in ogni ipotesi esaminata.

Infine, la distanza di approvvigionamento deve essere compatibile con i limiti che talora sono imposti a livello nazionale per la definizione di "filiera corta", in modo da beneficiare degli eventuali regimi di sostegno.

Per quanto attiene alla logistica, la raccolta si avvale di cantieri paralleli, ciascuno dei quali richiede l'impiego di 1 falcia-trincia-caricatrice e di 4-6 trattori muniti di *dumper* (i.e. capacità di 50 m³), in base all'ampiezza del raggio di approvvigionamento.

A valle di queste considerazioni relative all'inserimento della filiera nel territorio in esame, a prescindere dalla superficie agricola asservita e dall'ampiezza del bacino di approvvigionamento, l'impianto è progettato per processare 68.000-69.000 tonnellate all'anno di biomassa trinciata, producendo bioetanolo di prima generazione dall'estratto zuccherino ed energia termica ed elettrica dai sottoprodotti.

L'impianto riceve la biomassa soltanto durante il periodo della raccolta, al massimo, quindi, per 40 giorni, che nelle condizioni climatiche dell'Europa meridionale si collocano tra agosto e settembre. Al contrario le linee produttive funzionano per 330 giorni all'anno con un unico fermo impianto per la manutenzione, programmato indicativamente in luglio.

La strategia scelta per conciliare la breve finestra di raccolta con il periodo lavorativo dell'impianto si fonda sulla spremitura di tutta la biomassa trinciata al momento del conferimento presso l'impianto e sulla concentrazione dell'estratto zuccherino per il suo progressivo processamento a bioetanolo anche nella restante parte dell'anno. Il livello raggiunto nella concentrazione si riflette nella durata dello stoccaggio: una concentrazione finale del 45% consente di conservare lo sciroppo fino a 3 mesi, mentre una concentrazione dell'80% permette di estendere la conservazione fino a 11 mesi. Gli sciroppi sono stoccati in appositi serbatoi allestiti presso lo stabilimento.

Al momento di avviare il processamento a bioetanolo lo sciroppo è diluito al 18%. Solo successivamente l'estratto zuccherino è inoculato con un'aliquota della sospensione madre di lieviti. La fermentazione è condotta *in batch* e ciascun processo è impostato per durare 22 ore.

Per gli altri dettagli del processamento a bioetanolo, si fa riferimento ai contenuti delle linee guida descritte nel capitolo 7.

La gestione delle acque richiede, tuttavia, un approfondimento rispetto a quanto esposto nel capitolo 7. Infatti, dal momento che elevati quantitativi di acqua sono dapprima evaporati e condensati e successivamente sono di nuovo richiesti per diluire gli sciroppi stoccati, possono essere applicati diversi modelli gestionali.

Nel modello 1 sviluppato per l'UE si opta per lo scarico in corpo idrico superficiale dell'acqua condensata nell'unità di concentrazione durante il periodo della rac-

colta (nel rispetto dei limiti imposti dalla normativa nazionale ed eventualmente locale, in termini di COD, nitrati, pH, fosfati, temperatura ed altri parametri chimici e fisici) e per il prelievo di acqua potabile dalla rete idrica nel corso della restante parte dell'anno per la diluizione dello sciroppo stoccato.

Un'alternativa a questo approccio è lo stoccaggio dell'acqua in un bacino appositamente realizzato, in modo da poterla riutilizzare per la diluizione; tuttavia questa opzione è penalizzata dai costi molto elevati per la realizzazione del bacino di stoccaggio.

Per quanto riguarda la valorizzazione energetica dei sottoprodotti, la bagassa è essiccata immediatamente prima della combustione nell'impianto CHP con turbina a vapore da 4,20 MWe ed il biogas ottenuto dalla biometanazione della borlanda è bruciato in un impianto CHP con turbina a gas da 0,75 MWe. L'elettricità ed il calore prodotti dalle unità cogenerative possono essere utilizzati per la copertura dei consumi interni dell'impianto ed il *surplus* può essere ceduto alla rete elettrica e distribuito attraverso una rete di teleriscaldamento, rispettivamente.

Dal momento che l'unità di concentrazione funziona soltanto durante il periodo di raccolta del sorgo zuccherino, un'importante utenza termica viene a mancare per la maggior parte dell'anno lavorativo; di conseguenza, il corrispondente *surplus* energetico può essere convertito in elettricità attraverso una turbina a vapore della potenza di 0,43 MWe, aumentando la produzione complessiva dell'impianto.

8.1 Caso studio: l'applicazione del modello 1 nella Pianura Padana, Italia

Ipotesi di lavoro

La Pianura Padana è una zona vocata per la coltivazione del sorgo zuccherino e, dunque, è stata scelta per la contestualizzazione del caso studio in Italia. L'area in esame più precisamente si colloca nell'Italia Nord Orientale ed è caratterizzata da una consolidata tradizione agricola, incentrata soprattutto sui seminativi ed in particolare sul mais. Alcuni dettagli relativi all'area oggetto del caso studio sono riassunti nella Tabella 11.

L'impianto con capacità di 10.000 t/anno richiede l'asservimento di terreni per 3.800 ettari all'interno di un bacino di approvvigionamento di 15 km di raggio.

In considerazione della diversificazione delle colture e della struttura delle aziende agricole, è stata assunta la seguente distribuzione dei terreni da coltivare a sorgo zuc-

Pianura Padana, Nord Est Italia	
Caratteristiche climatiche	Clima temperato oceanico
Tipo di suolo	Argilloso-limoso, buone profondità e tessitura, buona dotazione in sostanza organica
Precipitazioni durante il periodo vegetativo	600-700 mm
Data della semina	Maggio
Data della raccolta	Settembre
Diversificazione delle colture	Piuttosto bassa, prevalenza del mais
Struttura delle aziende agricole	Frammentazione agraria

Tabella 11: principali caratteristiche dell'area geografica del caso studio

cherino: il 35% dei terreni si colloca entro i primi 5 km dallo stabilimento, il 44% dei terreni si colloca tra i 6 e gli 11 km dall'impianto ed il restante 21% dei terreni ha una distanza dallo stabilimento compresa tra i 12 ed i 15 km. In queste ipotesi si rendono necessari 4 cantieri di raccolta che operano parallelamente, ciascuno con 1 falcia-trincia-caricatrice e 6 trattori muniti di *dumper*; il traffico pesante nell'area in esame derivante da questa filiera durante il periodo di raccolta del sorgo è di 15 trattori all'ora.

Le condizioni climatiche dell'area considerata impongono il ricorso all'alternanza tra varietà di sorgo a ciclo lungo ed a ciclo breve, in modo da estendere la finestra della raccolta fino a 40 giorni; infatti, in questo tipo di clima la semina non può essere precoce a causa delle temperature ancora piuttosto rigide nei mesi di marzo ed aprile.

I dettagli relativi alla fase di produzione agronomica sono riassunti nella Tabella 12.

Il processamento a bioetanolo di prima generazione segue le linee guida del modello sviluppato per l'UE.

L'estrazione è condotta con mulino a martelli caratterizzato da una resa del 93%; ne consegue che la concentrazione in zucchero nell'estratto è del 12,4%, mentre la bagassa presenta un residuo zuccherino quantificato nel 5,4% sulla s.s.. La bagassa al termine dell'estrazione ha una umidità del 31%. L'unità di concentrazione è programmata per portare la maggior parte dell'estratto zuccherino (i.e. 73% del totale) alla concentrazione dell'80% ed il residuo 27% alla concentrazione del 45%. La fermentazione *in batch* sullo sciroppo diluito al 18% assicura un'efficienza di conversione pari al 90% della resa teorica.

Il bioetanolo anidro ottenuto al termine del processamento ha una specifica del 99,7% p/p, compatibile sia con la sintesi del bio-ETBE, sia con la miscelazione diretta con la benzina.

La bagassa è stoccata al tenore di umidità con cui è ottenuta all'uscita del mulino a cilindri (31%) ed è essiccata al 10% immediatamente prima della combustione nell'impianto CHP. È stata ipotizzata una perdita di sostanza secca a carico della bagassa corrispondente al 5% (principalmente a carico degli zuccheri). L'impianto CHP previsto nel caso studio si basa su un bruciatore adatto ai substrati erbacei, su un generatore di vapore e su una turbina a vapore ed è caratterizzato da un rendimento termico del 0,90. A differenza delle altre sezioni dell'impianto, questa unità cogenerativa funziona per 340 giorni all'anno. Il biogas è ottenuto dalla biometanazione della borlanda secondo le linee guida del capitolo 7 ed è combusto in un impianto CHP basato su una microturbina a gas con un'efficienza elettrica del 34%. Nel caso studio è stato assunto che l'elettricità sia ceduta alla rete ed il calore sia usato per la copertura dei consumi interni dell'impianto.

La scelta di cedere l'energia elettrica alla rete è motivata dal regime di sostegno attualmente vigente in Italia, che è molto favorevole allo sfruttamento delle FER e

Fase agronomica *	
Fertilizzazione	100 kg N/ha 60 kg P ₂ O ₅ /ha 60 kg K ₂ O/ha
Irrigazione	No
Resa in biomassa	18,2 t/ha db
Resa in zucchero	6,5 t/ha
Resa in bioetanolo anidro	2,8 t/ha 3,5 m ³ /ha 75,6 GJ/ha
Precedente uso del suolo	Mais
* anno di riferimento: 2010	

Tabella 12: principali dettagli relative alla coltivazione del sorgo zuccherino nel caso

della biomassa in particolare. Per effetto di questa situazione contingente, il conto economico della filiera privilegia la cessione di tutta l'energia elettrica alla rete ed il contestuale acquisto della quota necessaria alla copertura dei consumi interni, rispetto all'autoconsumo.

Il calore recuperato nelle unità cogenerative è in grado di coprire tutte le utenze termiche dell'impianto. Le unità più energivore sono la concentrazione dell'estratto zuccherino (in funzione solo durante il periodo della raccolta), la distillazione e la rettificazione e l'essiccazione della bagassa. Nel caso studio non è presa in considerazione la vendita del calore eccedente i consumi attraverso una rete di teleriscaldamento, poiché ci sono delle difficoltà nell'area geografica in esame a trovare gli utenti.

A parte queste specifiche ipotesi di lavoro, il caso studio applica i contenuti del modello 1.

Analisi economica

Nella Tabella 13 sono riassunte le voci di costo e ricavo incluse nell'analisi economica del caso studio.

Analisi economica			
Costi	Costo di investimento	30 milioni €	
	Costi di gestione	Biomassa 20-35 €/t *	4,94-8,64 milioni €/anno
		O&M	2,69 milioni €/anno
		Altro	1,22 milioni €/anno
Ricavi	Prodotti finali	Prezzo del bioetanolo 400-1.000 €/t *	4,05-10,13 milioni €/anno
		Prezzo dell'elettricità supportato 0,18-0,28 €/kWh *	7,78-12,11 milioni €/anno
* variabile sottoposta all'analisi di sensibilità			

Tabella 13: voci di costi e ricavi incluse nell'analisi economica del caso studio

Nel costo di investimento sono incluse le voci per le realizzazioni edili, gli strumenti e le attrezzature, la manutenzione straordinaria, le spese generali (5%), i costi tecnici di fattibilità e progettazione (5%), le spese impreviste (4%); al contrario non sono state considerate le voci per l'acquisizione dei terreni e per gli eventuali licenze e/o brevetti.

Nei costi di gestione sono conteggiati complessivamente nella voce denominata "Altro" l'acquisto dei materiali di consumo (e.g. prodotti chimici), lo scarico delle acque reflue dalla concentrazione, l'acquisto dell'acqua dalla rete idrica per la diluizione dello sciroppo, lo smaltimento delle ceneri in discarica, la movimentazione della biomassa ed i premi per le coperture assicurative.

Nella Tabella 13 il prezzo della biomassa e le voci di ricavo sono riportati come intervallo, poiché sono soggetti alle analisi di sensibilità.

Il presupposto per l'avvio della filiera secondo il modello sviluppato per l'UE è una remunerazione degli agricoltori adeguata a garantire negli anni la sicurezza dell'approvvigionamento dell'impianto. Ne consegue che la definizione del prezzo di acquisto della biomassa è un passaggio fondamentale e richiede un approccio molto cautelativo. In considerazione del costo colturale del sorgo zuccherino nell'area geografica del caso studio di 16-18 €/t (corrispondente a 1.040-1.170 €/ha, incluso il tra-

sporto della biomassa trinciata alla bocca dell'impianto, percorrendo una distanza media di 10 km), la soglia per la sostenibilità economica per l'azienda agricola è stimata in 30 €/t. Al di sotto di questo valore, infatti, si ritiene che altre colture assicurino una remunerazione migliore agli agricoltori, diventando più competitive e compromettendo, quindi, la sicurezza dell'approvvigionamento dell'impianto. Nell'analisi di sensibilità condotta su questa variabile sono stati comunque considerati anche valori inferiori (fino a 20 €/t), in quanto la valutazione della sostenibilità economica deve comprendere scenari di ampiezza tale da includere anche importanti cambiamenti nelle condizioni del mercato (e.g. crollo del prezzo del bioetanolo, eliminazione o forte ridimensionamento del regime di sostegno a favore delle FER).

Dal momento che il prezzo del bioetanolo varia in funzione delle fluttuazioni del mercato energetico e soprattutto del prezzo del petrolio, in via precauzionale per questa variabile è stato considerato un intervallo piuttosto ampio.

La remunerazione della vendita dell'energia elettrica prodotta dalla biomassa attualmente in Italia gode di due forme di sostegno, valide per 15 anni:

- a. la remunerazione può derivare dalla somma tra i ricavi derivanti dalla cessione alla rete elettrica al prezzo di mercato ed i ricavi derivanti dalla vendita dei Certificati Verdi, il cui numero è calcolato applicando un coefficiente moltiplicativo specifico per ogni FER (i.e. 1,8 per biomassa e biogas);
- b. la remunerazione deriva dall'applicazione di una tariffa omnicomprensiva, il cui valore dipende dalla FER (i.e. 0,28 €/kWh per biomassa e biogas).

Il secondo regime di sostegno risulta preferibile, in quanto si svincola dalle fluttuazioni dei valori del prezzo di mercato dell'elettricità e dei Certificati Verdi e permette una previsione certa dei ricavi per 15 anni. Tuttavia, attualmente in Italia soltanto gli impianti di potenza fino a 1 MWe possono accedere a questa seconda forma di incentivo. Infatti, sebbene la normativa vigente (i.e. decreto legislativo n. 28 del 3 marzo 2011) abbia esteso questa possibilità anche agli impianti di potenza superiore (almeno 5 MWe), ad oggi mancano i decreti attuativi che completano la disciplina in materia (situazione a novembre 2011).

A fronte di queste considerazioni e delle potenze installate nelle unità cogenerative del caso studio (i.e. 4,20 MWe alimentata con la bagassa, 0,75 MWe alimentata con il biogas ottenuto dalla borlanda, 0,43 MWe dal mancato funzionamento dell'unità di concentrazione per la maggior parte dell'anno lavorativo), per il valore della tariffa omnicomprensiva a favore della vendita dell'energia elettrica è stato ritenuto cautelativo un intervallo da 0,18 a 0,28 €/kWh.

La soglia per la sostenibilità economica del modello è stata fissata ad un TIR del 20%, in quanto questo valore garantisce l'accesso al credito e, dunque, la bancabilità dell'iniziativa, essendo molto superiore al tasso di indebitamento generalmente applicato per questi investimenti.

I risultati delle analisi di sensibilità sono riassunti nelle seguenti tabelle. In ciascuna tabella è mantenuto fisso il valore per il prezzo di acquisto della biomassa (i.e. 20 €/t nella Tabella 14, 25 €/t nella Tabella 15, 30 €/t nella Tabella 16, 35 €/t nella Tabella 17), mentre cambiano i valori del TIR al variare delle voci di ricavo in base ai prezzi di mercato: il prezzo del bioetanolo varia lungo le colonne tra 400 e 1.000 €/t, il prezzo dell'elettricità lungo le righe tra 180 e 280 €/MWh. In giallo sono evidenzia-

te le celle che corrispondono alle situazioni economicamente sostenibili; le celle con sfondo più scuro sottolineano i valori di TIR superiori al 30%.

Il requisito di garantire un'adeguata remunerazione agli agricoltori (i.e. 30 €/t) è soddisfatto se il prezzo del bioetanolo è di almeno 900 €/t e l'energia elettrica è ceduta alla rete ad almeno 0,22 €/kWh. Per assicurare la stessa condizione una tariffa onnicomprensiva più bassa (i.e. 0,20 €/kWh) richiede un prezzo del bioetanolo almeno di 1.000 €/t.

Attualmente in Italia questi scenari appaiono verosimili e, dunque, potrebbe essere garantita la sicurezza dell'approvvigionamento.

TIR		Prezzo del bioetanolo [€/t]						
		400	500	600	700	800	900	1.000
Prezzo dell'elettricità [€/MWh]	180	- 6,2%	4,1%	10,5%	15,7%	20,2%	24,5%	28,5%
	200	1,4%	8,7%	14,3%	19,1%	23,4%	27,5%	31,4%
	220	6,7%	12,8%	17,8%	22,3%	26,5%	30,5%	34,4%
	240	11,2%	16,5%	21,2%	25,5%	29,6%	33,5%	37,3%
	260	15,1%	20,0%	24,5%	28,6%	32,6%	36,4%	40,2%
	280	18,8%	23,4%	27,6%	31,7%	35,6%	39,4%	43,1%

Tabella 14: variare del TIR in funzione del prezzo del bioetanolo e del mercato elettrico con un prezzo di acquisto della biomassa di 20 €/t

TIR		Prezzo del bioetanolo [€/t]						
		400	500	600	700	800	900	1.000
Prezzo dell'elettricità [€/MWh]	180	-	-10,7%	2,4%	9,2%	14,6%	19,3%	23,6%
	200	-	- 0,7%	7,4%	13,2%	18,1%	22,5%	26,6%
	220	- 5,3%	5,2%	11,6%	16,8%	21,4%	25,6%	29,7%
	240	2,5%	9,9%	15,4%	20,2%	24,6%	28,7%	32,6%
	260	7,9%	14,0%	19,0%	23,5%	27,7%	31,7%	35,6%
	280	12,4%	17,7%	22,4%	26,7%	30,8%	34,7%	38,6%

Tabella 15: variare del TIR in funzione del prezzo del bioetanolo e del mercato elettrico con un prezzo di acquisto della biomassa di 25 €/t

TIR		Prezzo del bioetanolo [€/t]						
		400	500	600	700	800	900	1.000
Prezzo dell'elettricità [€/MWh]	180	-	-	-	0,5%	7,9%	13,5%	18,3%
	200	-	-	- 3,3%	5,9%	12,0%	17,0%	21,6%
	220	-	-10,1%	3,5%	10,3%	15,7%	20,4%	24,7%
	240	-	0,4%	8,5%	14,3%	19,2%	23,7%	27,8%
	260	- 4,2%	6,3%	12,8%	18,0%	22,6%	26,8%	30,9%
	280	3,7%	11,0%	16,6%	21,4%	25,8%	29,9%	33,9%

Tabella 16: variare del TIR in funzione del prezzo del bioetanolo e del mercato elettrico con un prezzo di acquisto della biomassa di 30 €/t

TIR		Prezzo del bioetanolo [€/t]						
		400	500	600	700	800	900	1.000
Prezzo dell'elettricità [€/MWh]	180	-	-	-	-	- 1,7%	6,5%	12,4%
	200	-	-	-	- 6,6%	4,3%	10,8%	16,0%
	220	-	-	-	1,5%	9,0%	14,6%	19,4%
	240	-	-	- 2,2%	7,0%	13,1%	18,2%	22,7%
	260	-	- 9,3%	4,6%	11,5%	16,9%	21,6%	25,9%
	280	-	1,6%	9,7%	15,5%	20,4%	24,9%	29,1%

Tabella 17: variare del TIR in funzione del prezzo del bioetanolo e del mercato elettrico con un prezzo di acquisto della biomassa di 35 €/t

Risparmio nelle emissioni di GHGs

Fase di coltivazione

Le emissioni derivanti dalla coltivazione del sorgo zuccherino includono tutte le fasi agronomiche della filiera:

1. la resa in biomassa nella Pianura Padana (Nord Est Italia) corrisponde a 65 t/ha (con un contenuto di umidità pari al 72%), corrispondente a 65.000 kg/ha/anno, il cui *output* energetico corrispondente è pari a 316.680 MJ_{sorgo}/ha/anno;
2. il consumo energetico di tale fase è stato calcolato considerando la somma dell'energia primaria della fase agronomica, i carburanti ed i lubrificanti per i macchinari necessari alla coltivazione nel caso studio: tale consumo corrisponde a 5.563 MJ/ha/anno;
3. i fertilizzanti impiegati per la fase di coltivazione sono stati utilizzati nei seguenti quantitativi, realmente impiegati nel caso studio per la coltivazione del sorgo in Pianura Padana: N 100 kg/ha/anno, K₂O 60 kg/ha/anno, P₂O₅ 60 kg/ha/anno. Il quantitativo di erbicida utilizzato è di 2 kg/ha/anno;
4. la borlanda, residuo dell'unità di distillazione e rettificazione, non è direttamente impiegata come fertilizzante per la coltivazione, in quanto è utilizzata nella sezione di digestione anaerobica per la produzione di biogas. Come fertilizzante organico, invece, è utilizzato il digestato derivante da tale processo. Il quantitativo prodotto è pari a 92.705 t/anno da distribuire su 3.800 ha: ciò corrisponde a 24.396 kg/ha/anno;
5. il quantitativo di sementi impiegato nel caso studio è pari a 10 kg/ha/anno;
6. le emissioni di N₂O derivanti dai campi coltivati sono state calcolate impiegando il foglio specifico denominato "N₂O emissions IPCC". La resa in biomassa riportata è di 65.000 kg/ha/anno con umidità del 72%. I terreni impiegati sono considerati arativi anche prima dell'impiego del sorgo zuccherino e, quindi, non vi è cambiamento di uso del suolo. Le emissioni dirette di N₂O dei terreni coltivati ricevono un *input* di azoto pari a 100 kgN/ha/anno di fertilizzante di sintesi e 19,52 kgN/ha/anno di fertilizzante organico, considerando l'applicazione del digestato. Le emissioni indirette di N₂O sono calcolate in automatico ed il valore risultante in emissioni di N₂O da tale sezione corrisponde a 3,06 kgN₂O/ha/anno.

Le emissioni dalla fase di coltivazione corrispondono a 29,32 gCO₂/MJ_{bioetanolo}.

Il trasporto del digestato ai campi per la fertilizzazione organica è incluso nella fase

di coltivazione. Il trasporto è effettuato con camion-cisterna dotati di cannoni ad acqua; la percorrenza media nel caso studio è di 20 km. Il trasporto incide con $0,56 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$.

Le emissioni in GHGs totali per la fase di coltivazione (e_{ec}) corrispondono a $29,9 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$.

Considerando il fattore di allocazione, le emissioni corrispondono a $26,7 \text{ gCO}_2$ per $\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$ come riportato in dettaglio nella Tabella 18.

Fase di coltivazione	kg/ha/anno	MJ _{sorgo} /ha/anno	MJ/ha/anno	gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}
Resa in biomassa	65.000	316.680	-	-
Consumi energetici	-	-	5.563	6,81
N	100	-	-	8,22
K	60	-	-	0,48
P	60	-	-	0,85
Erbicidi	2	-	-	0,31
Digestato	24.396	-	-	0
Semente	10	-	-	0
Emissioni di N ₂ O dai terreni	3,06	-	-	12,66
Trasporto del digestato	-	-	-	0,56
Totale senza allocazione	29,9 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
Totale con allocazione*	26,7 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
*fattore di allocazione 89%				

Tabella 18: emissioni di GHGs dalla fase di coltivazione

Fasi di trasporto e distribuzione

Per la fase di trasporto, la quantità di prodotto in megajoule è calcolata automaticamente e corrisponde a $316.680 \text{ MJ}_{\text{sorgo}}/\text{ha/anno}$. Per il trasporto della biomassa, intesa come s.s., per mezzo di autocarri e/o camion alimentati a gasolio si ipotizza una distanza media pari a 20 km. Il valore parziale delle emissioni per questa fase del trasporto corrisponde a $1,49 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$, ma tale valore deve essere sommato a quello relativo al trasporto del bioetanolo dall'impianto al deposito e poi fino alle stazioni di rifornimento.

Per questa prima parte del trasporto è necessario tenere in considerazione il fattore di allocazione dell'89% e, quindi, le emissioni sono quantificate in $1,33 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$.

Per il trasporto del bioetanolo prodotto dall'impianto al deposito e dal deposito alle stazioni di rifornimento sono state applicate le seguenti assunzioni:

1. i camion impiegati per il trasporto del bioetanolo percorrono una distanza media di 300 km dall'impianto dalle varie destinazioni in Europa;
2. il consumo energetico del deposito ha lo stesso valore di quello riportato per gli impianti che impiegano la canna da zucchero per produrre il bioetanolo.

Il valore parziale risultante è di $1,31 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$. L'allocazione in questa fase è totalmente a carico del bioetanolo (100%).

Per le stazioni di rifornimento si assumono gli stessi valori riportati per gli impianti che processano la canna da zucchero. Il valore corrispondente in emissioni GHGs è di $0,44 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$. L'allocazione in questa fase è totalmente a carico del bioetanolo (100%).

Per il trasporto (e_{id}) e la distribuzione il valore complessivo finale è pari a 3,08 $\text{gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$ (Tabella 19).

Fasi di trasporto e distribuzione	km	Camion alimentato a gasolio	MJ/ MJ _{bioetanolo}	gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}
Trasporto della biomassa raccolta*	20	Camion per trasporto biomassa	-	1,49
Trasporto del bioetanolo dall'impianto	300	Camion per trasporto liquidi	-	0,99
Consumo energetico del deposito	-	-	0,00252	0,32
Stazione di rifornimento	-	-	0,0034	0,44
Totale senza allocazione	3,24 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
Total con allocazione*	3,08 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
*fattore di allocazione 89 %				

Tabella 19: emissioni di GHGs devianti dalle fasi di trasporto e distribuzione

Fase di processamento

Sulla base delle assunzioni applicate al caso studio sono prodotti 0,226 $\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}/\text{MJ}_{\text{sorgo}}$.

Ai fini del calcolo delle emissioni GHGs del caso studio si è ipotizzato che il quantitativo totale dell'elettricità generata (i.e. dalla combustione della bagassa, del biogas e dalla sezione di concentrazione dal succo) sia ripartito tra l'energia elettrica derivante dai sottoprodotti (biogas e sezione di concentrazione), che è allocata tra bioetanolo e sottoprodotti in funzione dei corrispondenti fattori di allocazione (89% bioetanolo, 11% sottoprodotti), e l'energia elettrica derivante dall'impianto CHP alimentato con la bagassa, attribuita totalmente al bioetanolo (fattore di allocazione: 100%). Il surplus di elettricità prodotto dall'impianto è ceduto in rete, mentre una parte è re-impiegata per la produzione del bioetanolo stesso: tale valore corrisponde a 0,108 $\text{MJ}/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$.

Poiché l'elettricità è prodotta in largo eccesso rispetto alle necessità dell'impianto, nella fase di produzione non si può considerare che vi sia realmente una richiesta elettrica, ma piuttosto un *output* elettrico ridotto. L'*output* di elettricità derivante dalla produzione di vapore della caldaia, poi convertito grazie alla turbina, è considerato come prodotto della combustione della bagassa. Di conseguenza, anche la richiesta di elettricità per il funzionamento dell'impianto stesso è considerata come *output* dalla combustione della bagassa: ciò spiega il fatto che, in pratica, questa non è una domanda ma un *output* elettrico ridotto. Ai fini del calcolo ciò non fa alcuna differenza, in quanto ciò che risulta è l'*output* elettrico netto, che corrisponde, in definitiva, al quantitativo ceduto in rete.

Nel caso studio considerato, la produzione totale di elettricità (*output*) è di 43.240 MWh (155.664 GJ). Sottraendo il quantitativo relativo ai sottoprodotti (i.e. 8.996 MWh), l'elettricità prodotta solo nell'impianto CHP alimentato con la bagassa è pari a 34.244 MWh (123.278 GJ), corrispondenti a -0,454 $\text{MJ}/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$ su base annuale. Sottraendo i consumi elettrici dell'impianto, il valore ottenuto è pari a -0,346 $\text{MJ}/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$; questo è considerato il surplus di elettricità ed il credito è calcolato

seguendo le indicazioni della Direttiva RED Allegato V, C.16.

L'energia termica, come già menzionato in precedenza, è completamente riutilizzata nell'impianto per fabbisogni interni. Nella sezione relativa ai prodotti chimici utilizzati nell'impianto (i.e. sostanze chimiche usate nel processo produttivo e lubrificanti per i macchinari), i valori sono analoghi a quelli del bioetanolo prodotto dalla canna da zucchero.

Le emissioni dal processamento (e_p) corrispondono a $-1,12 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$. I dettagli sono riassunti nella Tabella 20.

Fase di processamento	MJ _{bioetanolo} /MJ _{sorgo}	MJ/MJ _{sorgo}	MJ _{bioetanolo} /ha/year	MJ/MJ _{bioetanolo}	gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}
Resa in bioetanolo	0,226	-	71.570	-	-
Sottoprodotti	-	0,027		-	-
Elettricità dall'impianto di cogenerazione (CHP)	-	-	-	0,108	-
Vapore dall'impianto CHP	-	-		1,66	-
Generazione elettrica totale	-	-	-	-0,454**	-
Elettricità dalla combustione bagassa (turbina a vapore*)	-	-	-	-0,346**	-1,98
Prodotti chimici	-	-	-	0,00132 kg/MJ _{bioetanolo}	0,85
Totale senza allocazione	-1,12 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}				
Totale con allocazione***	-1,00 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}				
* surplus elettrico, il credito è calcolato seguendo le indicazioni della RED Allegato V, C.16					
** output elettrico, quindi il valore è negativo					
*** fattore di allocazione 89 %					

Tabella 20: emissioni di GHGs dalla fase di processamento

Cambio di uso del suolo e gestione agricola

È stato assunto che non vi sia cambio di destinazione d'uso del suolo, in quanto si ipotizza la coltivazione del sorgo in terreni dove comunemente si coltiva il mais. La sostituzione del mais con il sorgo appare particolarmente fattibile a livello di azienda agricola, poiché i macchinari agricoli e le esigenze edafiche delle due colture sono simili (i.e. LUC pari a 0).

Al fine del calcolo del risparmio delle emissioni di GHGs non sono stati considerati l'impiego di tecniche agricole virtuose ai fini della cattura della CO₂ ed il reintegro e lo stoccaggio geologico del carbonio (i.e. e_{sca} , e_{ccs} ed e_{ccr} pari a 0).

Il risparmio nelle emissioni di GHGs nel caso studio

Il valore finale delle emissioni di GHGs per megajoule di bioetanolo ottenuto dal sorgo zuccherino corrisponde a $32,00 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$. Il valore di riferimento per il combustibile fossile sostituito (i.e. benzina) ha un valore di emissioni pari a $83,8 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{benzina}}$. Il valore allocato per il bioetanolo da sorgo corrisponde a $28,8 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$.

La riduzione in emissioni GHGs che risulta dal calcolo previsto nella RED corrisponde al 66% ed è conforme all'obiettivo previsto a partire dal 2018.

Questo valore risulta comparabile ai valori relativi al bioetanolo ottenuto dalla

canna da zucchero (i.e. valore standard 71%) e dal frumento nell'ipotesi di utilizzare la paglia in un impianto CHP (i.e. valore standard 69%).

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO: METODOLOGIA PER IL CALCOLO DEL RISPARMIO NELLE EMISSIONI DI GHGs

Un aspetto importante del modello sviluppato per l'UE è la quantificazione della sua sostenibilità, in termini di emissioni di GHGs derivanti dalla produzione del bioetanolo dal sorgo zuccherino.

La LCA di questa filiera e le emissioni di GHGs per megajoule di bioetanolo prodotto permettono di ottenere il valore in percentuale del risparmio nelle emissioni di GHGs legato all'uso del bioetanolo prodotto dal sorgo zuccherino in sostituzione della benzina, come richiesto per il rispetto delle indicazioni della RED (e.g. requisito di sostenibilità: attualmente 35%, dal 2017 50%, dal 2018 60%).

Il calcolo è stato eseguito per ciascuno dei casi studio esposti nel presente manuale, applicando la metodologia riportata nell'Allegato V, parte C della RED. Pertanto, i valori ottenuti per il modello sviluppato per l'UE nei diversi casi studio possono essere confrontati direttamente con quelli standard riportati nell'Allegato V, parte A della RED.

Per agevolare il calcolo è stato impiegato lo strumento "BioGrace greenhouse gas calculation tool" (www.biograce.net), predisposto appositamente per contestualizzare ed armonizzare i calcoli in base alle esigenze specifiche degli utenti.

Nello strumento BioGrace sono stati modificati i fogli predisposti per alcune filiere espressamente menzionate nella RED: il foglio relativo al bioetanolo ottenuto dalla canna da zucchero, il foglio relativo al bioetanolo ottenuto dal mais ed il foglio relativo al bioetanolo ottenuto dal frumento quando la paglia è bruciata in un impianto CHP. Integrando i dati di queste tre filiere con le informazioni relative alla coltivazione del sorgo zuccherino e per la valorizzazione dei sottoprodotti, è stato ottenuto un valore finale per ciascuno dei casi studio.

Il sorgo zuccherino è processato con un approccio analogo a quello della canna da zucchero: la biomassa trinciata è trasportata all'impianto ed è immediatamente sottoposta all'estrazione degli zuccheri, l'estratto zuccherino è processato a bioetanolo e la bagassa essiccata è bruciata nell'impianto CHP. Di conseguenza, come foglio di base è utilizzato quello del bioetanolo dalla canna da zucchero.

Dal momento che, a differenza della canna da zucchero, il sorgo è un seminativo, per i dati di coltivazione (e.g. fertilizzanti, periodo di semina e raccolta, consumi energetici dei macchinari agricoli) è stato applicato il foglio relativo al bioetanolo ottenuto dal mais.

Infine, il foglio del bioetanolo dal frumento è stato applicato per alcuni aspetti attinenti alla combustione dei sottoprodotti nell'impianto CHP.

Un elemento centrale nel calcolo delle emissioni di GHGs è la definizione dei fattori di allocazione per il bioetanolo e per gli altri sottoprodotti del processo.

L'elettricità prodotta dalla combustione della bagassa è considerata nel calcolo delle emissioni con il seguente approccio: una parte è re-impiegata nella produzione del bioetanolo e, pertanto, non è inclusa nel calcolo, mentre l'eccedenza è conteggiata nelle emissioni del processamento in accordo con le indicazioni della RED.

L'energia elettrica derivante dalla combustione del biogas, ottenuto dalla digestione anaerobica della borlanda, e dalla turbina sita presso l'unità di concentrazione è ceduta alla rete ed è considerata un sottoprodotto della filiera.

Sulla base di queste premesse, l'allocazione delle emissioni di GHGs a carico del bioetanolo è pari all'89%, mentre il resto è allocato al sottoprodotto.

Lo strumento impiegato è strutturato in modo da ottenere i valori delle emissioni di GHGs derivanti dalle fasi di coltivazione (e_{ec}), trasporto e distribuzione (e_{td}), processamento (e_p), dalla LUC (e_l), dalla migliore gestione agronomica se prevista (e_{sco}), dalla cattura del biossido di carbonio (e_{ccr}) o dallo stoccaggio geologico del carbonio (e_{ccs}) ed il conseguente risparmio espresso in percentuale, rispetto all'utilizzo del sostituto fossile (i.e. benzina).

8.2 Caso studio: l'applicazione del modello 1 nell'area industriale di Salonico, Grecia

Ipotesi di lavoro

La regione di Salonico è una zona vocata per la coltivazione del sorgo zuccherino e, dunque, è stata scelta per la contestualizzazione del caso studio in Grecia. Alcuni dettagli relativi all'area oggetto del caso studio sono riassunti nella Tabella 21.

Area Industriale di Salonico, Grecia	
Caratteristiche climatiche	Clima mediterraneo
Tipo di suolo	Sciolti argillosi, buona profondità e tessitura, buon contenuto in sostanza organica
Precipitazioni nel periodo di crescita⁵⁶	33,5 mm
Semina	Maggio
Raccolta	Settembre
Diversificazione culturale	Bassa, prevalenza di riso
Struttura delle aziende agricole	Frammentazione agraria

Tabella 21: principali caratteristiche dell'area geografica considerata nel caso studio

Le rese in biomassa, intesa come s.s., ed in zuccheri sono in accordo con i risultati dell'Istituto Tecnologico di Salonico, che ha condotto una sperimentazione pilota in condizioni analoghe in una regione della Grecia settentrionale. I valori sono presentati in dettaglio nella Tabella 22. Tra le quattro varietà di sorgo zuccherino testate nei due anni di sperimentazione, la varietà "Uria" ha mostrato le rese teoriche maggiori in bioetanolo.

Varietà	Biomassa fresca [t/ha]	Biomassa s.s. [t/ha]	Succo zuccherino [t/ha]	Gradi Brix [%]	Zuccheri totali [t/ha]	Bioetanolo teorico [l/ha]	Bioetanolo teorico [t/ha]
Uria	97,3	33,5	34,4	14,4	3,86	7.620	6

Tabella 22: rese in biomassa fresca, s.s., succo zuccherino e zuccheri totali e resa teorica in bioetanolo della varietà "Uria" coltivata in condizioni di salinità del suolo pari a 3,2 dSm-1 e con irrigazione pari a 210 mm

I terreni agricoli considerati nel caso studio coprono una superficie di 1.660 ettari ed il raggio di rifornimento della materia prima è di circa 20 km. I campi sono localizzati vicino all'Area Industriale di Salonico dove potrebbe essere posizionato l'impianto di processamento. I membri della Cooperativa Agricola di Halastra possiedono una superficie agricola pari a 6.000 ettari: in questo bacino potrebbero essere individuati i terreni da asservire alla filiera.

In questo scenario ed in accordo alle linee guida per il modello sviluppato per l'UE, la raccolta della biomassa richiede 6 cantieri di raccolta che operano in parallelo: ognuno di questi impiega 1 falcia-trincia-caricatrice e 4 trattori.

In queste condizioni climatiche la raccolta può durare fino a 40 giorni, se varietà a ciclo breve ed a ciclo lungo sono coltivate nello stesso periodo in diversi terreni. I principali dettagli della fase agronomica sono riportati nella Tabella 23.

Fertilizzazione: due giorni prima della semina sono applicati 130 kgN/ha, come ammonio solfato $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, 50 kgP/ha come fosfato di calcio $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ e 65 kgK/ha come potassio solfato (K_2SO_4) .



Figura 24: localizzazione dell'impianto a bioetanolo, dei terreni coltivati con il sorgo zuccherino e della raffineria (fonte: REACM)

Fertilizzazione	130 kgN/ha 50 kgP/ha 65 kgK/ha
Irrigazione	210 mm (supplemento di 142-261 mm di pioggia)
Contenuto di umidità	65,6%
Resa in bioetanolo anidro	6 t/ha 7,6 m³/ha 164,8 GJ/ha
Produzione di bioetanolo	10.000 t/anno 12.649 m³/anno
Biomassa fresca processata	161.518 t/anno
Biomassa come s.s. processata	55.610 t/anno
Superficie agricola interessata	1.660 ha

Tabella 23: caratteristiche agronomiche relative alla coltivazione del sorgo zuccherino e rese in bioetanolo del caso studio

Biomassa: si ipotizza una produzione di 10.000 tonnellate (12.649.200 litri) di bioetanolo all'anno impiegando solo il sorgo zuccherino come materia prima. L'efficienza produttiva della biomassa è stimata in 97,3 t/ha, la superficie agricola interessata è pari a 1.660 ha e l'efficienza di conversione in bioetanolo è stimata in 6 t/ha o 7,6 m³/ha. Per produrre 10.000 t di bioetanolo sono necessarie 161.518 t di biomassa fresca. Relativamente ai costi, non ci sono dati disponibili sul prezzo del sorgo zuccherino come materia prima per la produzione di bioetanolo in Grecia, poiché esistono solamente prove culturali pilota e ad oggi non esiste una produzione regolare. I costi della fase agricola sono stimati in 16-18 €/t di biomassa fresca, mentre i profitti netti finali per gli agricoltori sono stimati in 12-14 €/t di biomassa fresca.

Resa in bioetanolo anidro: per il calcolo della produzione teorica di bioetanolo dalla biomassa fresca di sorgo zuccherino, sono state modificate le equazioni riportate da Sakellariou-Makrantonaki *et al.* (2007)⁵⁷ e Zhao *et al.* (2009)⁵⁸ come segue: resa totale in bioetanolo [l/ha] = contenuto in zuccheri totale [%] x biomassa fresca [t/ha] x 6,5 (fattore di conversione dagli zuccheri al bioetanolo) x 0,85 (efficienza del processo di produzione del bioetanolo dagli zuccheri) x (1,00/0,79) (peso specifico del bioetanolo in g/ml).

Il processamento è effettuato in accordo con le linee guida riportate nel capitolo 7. Relativamente allo sfruttamento dei sottoprodotti, l'elettricità è ceduta in rete ed il calore è utilizzato per l'autoconsumo all'interno dell'impianto stesso.

Il fattore più importante per lo sviluppo della filiera di produzione del bioetanolo da sorgo zuccherino è la localizzazione ottimale dell'impianto. In Grecia, i siti possibili per la sua costruzione possono infatti essere diversi, ed una strategia volta a trovare la soluzione più consona risulta necessaria, comparando diversi siti per alcune caratteristiche essenziali.

Prerequisiti minimi per la scelta del sito

La scelta dei possibili siti dove localizzare l'impianto per la produzione del bioetanolo dovrebbe essere indirizzata dai seguenti requisiti:

- disponibilità di risorse umane
- costo per l'acquisto del terreno
- facilità a reperire la materia prima
- condizioni ambientali minime necessarie
- disponibilità di mezzi di trasporto
- prossimità ai mercati
- disponibilità di materiali ausiliari e servizi di pubblica utilità
- accettazione da parte della comunità locale
- adeguate infrastrutture finanziarie, amministrative e sociali
- servizi e mezzi speciali forniti dalla legge di sviluppo n. 3908/2011.

Il punto di partenza per una prima selezione dei possibili siti è la localizzazione della materia prima, in quanto l'impianto dovrebbe essere localizzato vicino ai terreni coltivati a sorgo zuccherino.

Un secondo prerequisito è l'esistenza di un parco industriale nella zona. I parchi industriali forniscono vantaggi specifici alle imprese insediate come ad esempio infrastrutture integrate, attività industriali organizzate, infrastrutture per il rifornimento di acqua ed energia, reti di comunicazione (telefono, internet), impianti per il trattamento dei rifiuti, reti stradali. Inoltre, l'installazione di un impianto all'interno di un parco industriale fornisce dei vantaggi sia da un punto di vista tecnico, che relativamente al *business* per futuri investitori:

- termini di concessione
- rete sviluppata di infrastrutture tecniche
- servizi a valore aggiunto (gas naturale, rete a banda larga, stazione antincendio)
- accesso alla rete di trasporto
- installazione semplificata con minore burocrazia
- sussidio preferenziale attraverso la legge di sviluppo.

Parco Industriale di Salonிக்கo Vipathe S.A.

Il Parco Industriale di Salonிக்கo Vipathe S.A. è situato nella zona nord-orientale della città (18 km) presso l'area di Sindos e soddisfa i prerequisiti sopra menzionati. Il Parco Industriale occupa una superficie totale di 395 ettari, con 12 grandi isolati attraversati da strade e zone ad uso comune; approssimativamente 187 ettari di grandi edifici sono attualmente disponibili. Veicoli per uso privato o altri mezzi pesanti possono passare attraverso il Parco per mezzo della rete stradale che è in fase di costruzione nel parco. Inoltre, per facilitare le aziende che risiedono nel Parco, esiste una piattaforma ferroviaria che collega il Parco con le linee dirette a Salonிக்கo, Atene ed ai centri urbani del nord e del nord-est della Grecia, della Bulgaria e della Repubblica Ex-Jugoslava di Macedonia.



Figura 25: Parco Industriale di Salonிக்கo Vipathe S.A., ideale per la localizzazione potenziale dell'impianto a bioetanolo
 (fonte: <http://www.vipathe.gr/en/index.asp>)

Caratteristiche del Parco Industriale di Salonிக்கo Vipathe S.A.

1. Disponibilità di risorse umane

La regione di Salonிக்கo ha una popolazione di 1.104.460 abitanti ⁵⁹. Il tasso di

disoccupazione nella Macedonia Centrale è del 18,8 %⁶⁰.

2. Costo del sito

Il costo per l'acquisto dei terreni corrisponde a 160 €/m² ⁶¹.

3. Facilità nel rifornimento delle materie prime

I terreni coltivabili nella regione di Salonicco in totale corrispondono a circa 412.747 ettari ⁶².

4. Condizioni ambientali minime necessarie

La temperatura media di Salonicco è di 5,2 °C in gennaio e di 26,6 °C in luglio. La media delle precipitazioni per gli stessi mesi corrisponde a 36,8 mm e 23,9 mm, rispettivamente.

5. Disponibilità di mezzi di trasporto

Il Parco Industriale di Salonicco è situato vicino all'autostrada Atene-Salonicco, alla Strada Egnatia ed è prossimo alla raffineria "HELLENIC PETROLEUM S.A". Anche la ferrovia, l'aeroporto, il porto e la linea degli autobus sono vicini all'area interessata.

6. Prossimità ai mercati

Il Parco Industriale è situato presso il secondo più grande nucleo di attività commerciali della Grecia, cioè la città di Salonicco, ed è supportato dal porto della città.

7. Disponibilità di materiali ausiliari e servizi di pubblica utilità

Il Parco Industriale è fornito di acquedotto e fognatura, impianto di trattamento dei rifiuti, laboratorio per il controllo dell'inquinamento. Offre, inoltre, reti telefoniche ed elettriche, comunicazione a banda larga, servizio antincendio e connessione alla rete del gas naturale.

8. Strutture finanziarie, amministrative e sociali adeguate

Il Parco Industriale possiede un dipartimento amministrativo e gestionale, mentre la città di Salonicco offre tutti i servizi amministrativi, economici e sociali necessari.

9. Servizi e mezzi speciali forniti dalla legge di sviluppo n. 3908/2011

Per l'Area Industriale di Salonicco, la legge di sviluppo fornisce sussidi al 35%, sussidi in *leasing* o finanziamenti per l'impiego e le assunzioni.

Analisi economica

I principali costi di produzione del bioetanolo dal sorgo zuccherino sono in accordo al modello 1 e sono riassunti nella Tabella 24.

I costi di investimento sono stimati in 30 milioni di euro, includendo edifici, attrezzature, manutenzione straordinaria, spese generali (5%), costi tecnici (5%), spese non previste (4%); l'acquisto dei terreni, eventuali licenze e brevetti non sono inclusi. I costi operativi includono l'acquisto dei reagenti chimici, la gestione delle acque, lo smaltimento delle ceneri, il trasporto della biomassa, i costi assicurativi ed altre categorie di costo.

Biomassa	~160.000 t/anno x 30 €/t = 4.800.000 €/anno
Costi di investimento	30 milioni €
• Costi operativi	1,220 milioni €/anno
• O&M	2,69 milioni €/anno
Altro	1,22 milioni €/anno

Tabella 24: costi principali dell'analisi economica del caso studio

In merito alle entrate derivanti dalla vendita del bioetanolo, il prezzo del biocarburante dipende dal mercato dell'energia, specialmente in relazione alla quotazione del petrolio. I valori sono riportati come medie nella Tabella 25.

Ricavi	Prodotti finali	Prezzo del bioetanolo 400-1.000 €/t	4,0-10,0 milioni €/anno
		Prezzo dell'elettricità 0,15-0,20 €/kWh	7,78-12,11 milioni €/anno

Tabella 25: principali ricavi inclusi nell'analisi economica del caso studio

Il reddito derivante dalla vendita dell'elettricità prodotta, segue gli incentivi previsti in Grecia nel Conto Energia⁽¹⁾, che sono compresi tra 0,15-0,20 €/KWh; per la biomassa tali incentivi sono garantiti per 20 anni:

- 200 €/MWh per una potenza installata inferiore ad 1 MW
- 175 €/MWh per una potenza installata da 1 a 5 MW
- 150 €/MWh per una potenza installata superiore a 5 MW.

La manodopera necessaria all'impianto è stata stimata in 14 addetti che lavorano per ogni ora di funzionamento (Tabella 26).

Giorni di funzionamento dell'impianto all'anno	330 giorni	
Produzione giornaliera di bioetanolo	Q = 30,7 t/giorno	
Metodo di calcolo	L=K/Q ^{-0.76}	
Processi	K	L=ore lavorative per tonnellata di prodotto
1. Spremitura	10	1,384
2. Estrazione	17	2,352
3. Fermentazione	23	3,182
4. Distillazione	10	1,384
5. Disidratazione	10	1,384
6. Gestione dei sottoprodotti	10	1,384
Ore totali del personale per tonnellata di prodotto	11,07 h/t giorno	
Ore lavorative del personale al giorno	340 h/giorno	
K=costante corrispondente al valore di "23" per processi condotti in modo discontinuo, "17" per processi con bassa manutenzione e "10" per processi automatici in continuo		

Tabella 26: ore del personale impiegato nell'impianto al giorno

Risparmio nelle emissioni GHGs

Anche il processo produttivo per ottenere il bioetanolo di prima generazione del sorgo zuccherino, come qualsiasi altro processo industriale, si trova ad affrontare una grande sfida, che è quella della tutela ambientale non solo durante la fase di costruzione dell'impianto e durante la produzione, ma anche in tutte le fasi opera-

⁽¹⁾ I produttori di energia da fonti rinnovabili vengono pagati con una tariffa a tasso fisso per ogni unità di elettricità ceduta in rete e generalmente le compagnie che gestiscono ed acquistano l'energia per la distribuzione sono obbligate ad acquistare l'elettricità fornita dai produttori della loro area di servizio per periodo di tempo molto lungo.

tive. Pertanto, uno dei maggiori obiettivi dell'impianto è la riduzione delle emissioni di GHGs per tutto il ciclo di vita del prodotto.

FASE DI COLTIVAZIONE

Le emissioni derivanti dalla coltivazione del sorgo zuccherino includono tutte le fasi agronomiche della filiera:

1. la resa in biomassa nella zona ovest del distretto regionale di Salonicco nel nord della Grecia corrisponde a 97,3 t/ha di biomassa umidità pari al 65,6%, corrispondenti a 97.300 kg/ha/anno, il cui *output* energetico è di 582.399 MJ_{sorgo}/ha/anno;
2. il consumo energetico di tale fase è stato calcolato, considerando la somma dell'energia primaria della fase agronomica, i carburanti ed i lubrificanti per i macchinari necessari alla coltivazione nel caso studio specifico: tale consumo energetico corrisponde a 5.563 MJ/ha/anno;
3. i fertilizzanti impiegati nel caso studio in Grecia sono stati utilizzati nei seguenti quantitativi: azoto 130 kgN/ha/anno, potassio 50 kgK₂O/ha/anno, fosforo 65 kgP₂O₅/ha/anno. Il quantitativo di erbicida utilizzato è stato di 2 kg/ha/anno;
4. la borlanda derivante dalle unità di distillazione e rettifica non è direttamente impiegata come fertilizzante per la coltivazione, bensì è utilizzata nella sezione di digestione anaerobica per la produzione di biogas. Il digestato derivante da tale processo è, invece, impiegato come fertilizzante organico nella coltivazione del sorgo zuccherino. Il quantitativo prodotto è pari a 60.621,5 t/anno da distribuire su 1.660 ettari: ciò corrisponde a 36.519 kg/ha/anno;
5. il quantitativo di sementi impiegato nel caso studio è pari a 10 kg/ha/anno;
6. le emissioni di N₂O derivanti dai campi coltivati sono state calcolate impiegando il foglio "N₂O emissions IPCC". La resa in biomassa riportata è di 97.300 kg/ha/anno come biomassa umida (umidità del 65,6%). I terreni impiegati sono considerati arativi anche prima dell'impiego del sorgo zuccherino, quindi la destinazione d'uso del suolo è da arativa ad arativa. Le emissioni dirette di N₂O dei terreni coltivati ricevono un *input* di azoto pari a 130 kgN/ha/anno di fertilizzante di sintesi. Le emissioni indirette di N₂O sono calcolate in automatico ed il valore risultante in emissioni di N₂O da tale sezione corrisponde a 3,51 kgN₂O/ha/anno.

Le emissioni derivanti dalla fase di coltivazione corrispondono a 15,09 gCO₂/MJ_{bioetanol}.

Il digestato è impiegato per la fertilizzazione organica dei terreni coltivati, ed il quantitativo risultante in emissioni di GHGs per il trasporto di tale fertilizzante è pari a 0,37gCO₂/MJ_{bioetanol} che si sommano al precedente valore.

Considerando l'allocazione, le emissioni di GHGs corrispondono a 13,75 gCO₂ per MJ_{bioetanol} come riportato nella Tabella 27.

Fasi di trasporto e distribuzione

Per la fase di trasporto, la quantità di prodotto è calcolata automaticamente e corrisponde a 582.399 MJ_{sorgo}/ha/anno. Per il trasporto della biomassa, intesa come s.s., per mezzo di autocarri/camion alimentati a gasolio, si ipotizza la percorrenza di una distanza media pari a 20 km. Il valore parziale delle emissioni per questa fase del

Fase di coltivazione	kg/ha/anno	MJ _{sorgo} /ha/anno	MJ/ha/anno	gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}
Resa in biomassa fresca	97.300	582.399	-	-
Consumi energetici	-	-	5.563	3,02
N	130	-	-	4,74
K	50	-	-	0,23
P	65	-	-	0,52
Erbicidi/pesticidi	2	-	-	0,14
Digestato	36.519	-	-	0
Sementi	10	-	-	0
Emissioni di N ₂ O dai terreni	3,51	-	-	6,44
Trasporto del digestato	-	-	-	0,37
Totale senza allocazione	15.46 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
Totale con allocazione*	13.75 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
*fattore di allocazione 89%				

Tabella 27: emissioni di GHGs dalla fase di coltivazione

trasporto corrisponde a 1,46 gCO₂/MJ_{bioetanolo}, ma il valore deve essere sommato a quello relativo al trasporto del bioetanolo dall'impianto al deposito e poi fino alle stazioni di rifornimento. Per questa prima parte del trasporto è necessario considerare il fattore di allocazione dell'89% e, quindi, le emissioni sono pari a 0,88 gCO₂/MJ_{bioetanolo}. Per il trasporto (e_{id}) il valore finale è di 1,77 gCO₂/MJ_{bioetanolo} (Tabella 28).

Fasi di trasporto e distribuzione	km	Camion alimentato a gasolio	MJ/MJ _{bioetanolo}	gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}
Trasporto della biomassa raccolta	20	Camion per trasporto biomassa secca	-	0,88
Trasporto del bioetanolo dall'impianto	9	Camion per trasporto liquidi	-	0,35
Consumo energetico del deposito	-	-	0,00252	0,32
Stazione di rifornimento	-	-	0,0034	0,44
Totale senza allocazione	1,99 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
Total con allocazione*	1,77 gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}			
*fattore di allocazione 89 %				

Tabella 28: emissioni di GHGs dalle fasi di trasporto e distribuzione

Fase di processamento

Basandosi sui dati del caso studio sono prodotti 0,277 MJ_{bioetanolo}/MJ_{sorgo}.

Nel modello sviluppato l'elettricità prodotta in largo eccesso negli impianti CHP è ceduta alla rete elettrica, mentre l'elettricità assorbita dall'impianto per la produzione del bioetanolo e prelevata dalla rete corrisponde a 0,108 MJ/MJ_{bioetanolo}.

Poiché l'elettricità è prodotta in largo eccesso rispetto alle necessità dell'impianto,

nella fase di produzione non si può considerare che vi sia realmente una richiesta elettrica ma piuttosto un *output* elettrico ridotto. L'*output* di elettricità derivante dalla produzione di vapore della caldaia, poi convertito grazie alla turbina, è considerato come prodotto della combustione della bagassa. Di conseguenza, anche la richiesta di elettricità per il funzionamento dell'impianto stesso è considerata come *output* dalla combustione della bagassa: ciò spiega il fatto che in pratica questa non è una domanda ma un *output* elettrico ridotto. Ai fini del calcolo ciò non fa differenza, perché ciò che risulta è l'*output* elettrico netto che corrisponde al quantitativo ceduto in rete.

Nel caso studio considerato, la produzione totale di elettricità (*output*) è di 43.240 MWh (155.664 GJ) ottenuti dalla combustione della bagassa, del biogas e dalla sezione di concentrazione del succo. Sottraendo il quantitativo relativo ai sottoprodotti (8.996 MWh), l'elettricità prodotta solo nell'impianto CHP alimentato con la bagassa è pari a 34.244 MWh (123.278 GJ), corrispondenti a -0,454 MJ/MJ_{bioetanolo} su base annuale. Sottraendo i consumi elettrici dell'impianto, il valore ottenuto è pari a -0,346 MJ/MJ_{bioetanolo}; questo è considerato il *surplus* di elettricità ed il credito è calcolato seguendo le indicazioni della RED Allegato V, C.16.

L'energia termica, come già menzionato in precedenza, è completamente riutilizzata nell'impianto per fabbisogni interni. Nella sezione relativa ai prodotti chimici utilizzati nell'impianto, i valori sono analoghi a quelli del bioetanolo prodotto dalla canna da zucchero.

Le emissioni di GHGs derivanti dal processamento (ep) corrispondono a -1,12 gCO₂/MJ_{bioetanolo}. I dettagli sono riassunti nella Tabella 29.

Cambio di uso del suolo e gestione agricola

Il cambio di destinazione d'uso del suolo, le tecniche agricole migliorate, i sistemi di cattura della CO₂, il reintegro e lo stoccaggio geologico del carbonio non sono stati tenuti in considerazione in tale calcolo.

Fase di processamento	MJ _{bioetanolo} /MJ _{sorgo}	MJ/MJ _{sorgo}	MJ _{bioetanolo} /ha/anno	MJ/MJ _{bioetanolo}	gCO ₂ /MJ _{bioetanolo}
Resa in bioetanolo	0,277	-	161.324	-	-
Sottoprodotti	-	0,027		-	-
Elettricità dall'impianto di cogenerazione (CHP)	-	-	-	0,108	-
Vapore dall'impianto CHP	-	-		1,660	-
Generazione elettrica totale	-	-	-	-0,454**	-
Elettricità dalla combustione bagassa (turbina a vapore*)	-	-	-	-0,346**	-1,98
Prodotti chimici	-	-	-	0,00132 kg/MJ _{bioetanolo}	0,85
Totale senza allocazione	-1,12 gCO₂/MJ_{bioetanolo}				
Totale con allocazione***	-1,00 gCO₂/MJ_{bioetanolo}				

* *surplus* elettrico, il credito è calcolato seguendo le indicazioni della RED Allegato V, C.16

** *output* elettrico, quindi il valore è negativo

***fattore di allocazione 89 %

Tabella 29: emissioni di GHGs dalla fase di processamento

Il risparmio nelle emissioni di GHGs nel caso studio

Il valore finale delle emissioni di gas serra per megajoule di bioetanolo ottenuto dal sorgo zuccherino corrisponde a $14,66 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$. I risultati allocati corrispondono a $13,04 \text{ gCO}_2/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$.

La riduzione nelle emissioni di GHGs del bioetanolo ottenuto dal sorgo rispetto al sostituto fossile (i.e. benzina) corrisponde all'82,5 %.

8.3 Caso studio: l'applicazione del modello 1 in Andalusia, Spagna

Ipotesi di lavoro

Il modello 1 è stato contestualizzato al caso studio nella regione di Jédula (Cádiz) nel sud della Spagna (Andalusia), poiché il Ministero spagnolo dell'industria, del turismo e del commercio, in conformità alle indicazioni europee, ha appena reso pubblico un documento sulla "Valutazione del bilancio delle emissioni di GHGs dalla produzione di biocarburanti", in cui è valutata la produzione di bioetanolo dal sorgo zuccherino in Andalusia ⁶³.

La situazione specifica della regione geografica considerata è riassunta nella Tabella 30.

Jédula (Cadiz), Spagna meridionale	
Caratteristiche climatiche	Clima mediterraneo temperato
Precipitazioni nel periodo di crescita	600-800 mm
Semina	Maggio
Raccolta	Settembre
Diversificazione colturale	Barbabietola da zucchero
Struttura delle aziende agricole	Frammentazione agraria

Tabella 30: principali caratteristiche dell'area geografica considerata nel caso studio

I terreni necessari al rifornimento di biomassa per l'impianto, riferiti al caso studio della Spagna, occupano una superficie di 2.147 ettari ed il raggio di rifornimento della filiera, date le caratteristiche specifiche della regione, è fissato in 15 km. La produzione di biomassa corrisponde a 31 t/ha come s.s. e la percentuale di zuccheri per tonnellata di biomassa è pari al 38%.

In questa zona si producono approssimativamente 214.750 tonnellate di sorgo zuccherino come wb, contenenti il 10% di zuccheri. Il quantitativo di zuccheri necessario a produrre 12.500 m³ di bioetanolo è pari a 21.475 tonnellate. Con questi dati, il quantitativo di bagassa impiegata nell'unità cogenerativa è pari a 77.310 tonnellate all'anno con una percentuale di umidità del 10%.

Tenendo in considerazione la diversificazione colturale e la struttura delle aziende agricole nella regione considerata, la localizzazione dei terreni coltivabili è ipotiz-

zata come segue: 35% dei campi entro 5 km dall'impianto, 44% dei campi da 6 a 11 km dall'impianto, 21% dei campi tra 12 e 15 km dall'impianto. In questo scenario la raccolta della biomassa necessita di 4 cantieri paralleli: in ognuno di questi lavorano 1 falcia-trincia-caricatrice e 6 trattori con carro; ne consegue che il traffico orario durante i 40 giorni di raccolta prevede 15 trattori in continuo movimento.

Dato il clima della regione, la durata del periodo di raccolta può arrivare a 40 giorni, se sono coltivate varietà a ciclo breve ed a ciclo lungo nello stesso periodo in diversi terreni.

I principali dettagli della fase agronomica sono riportati nella Tabella 31.

Sezione agronomica *	
Fertilizzazione	31 kgN/ha 273 kgUrea (46% N)/ha 60 kgP ₂ O ₅ /ha 31 kgK ₂ O/ha
Irrigazione	Si (4.478,5 m ³ /ha)
Resa in biomassa	31 t/ha come s.s.
Resa in zuccheri	6-12 t/ha
Resa in bioetanolo anidro	2,8 – 5,6 t/ha 3,5 – 7,0 m ³ /ha 84 - 168 GJ/ha
Utilizzo precedente dei terreni	Barbabietola da zucchero
* anno di riferimento: 2010	

Tabella 31: principali dettagli della coltivazione del sorgo zuccherino nel caso studio

La produzione di bioetanolo di prima generazione segue le linee guida riportate nel capitolo 7. Per l'estrazione è impiegato il processo di diffusione continua, caratterizzato da un'efficienza del 97%; di conseguenza la concentrazione degli zuccheri è del 12% nel succo e del 5% sulla s.s. nella bagassa, che ha un'umidità residua variabile tra il 31% ed il 50%.

Per quanto riguarda l'unità di concentrazione, il rifornimento continuo di materiale nei reattori è pianificato, concentrando all'80% la maggior parte del succo zuccherino (54,5% del quantitativo totale) ed al 45% solo il 27,3% del quantitativo totale; una parte di succo estratto (18,2%) è impiegato non concentrato o ad una concentrazione ridotta (15-18%). La fermentazione del succo zuccherino è condotta con un processo *in batch* e l'efficienza della fermentazione alcolica è del 90% rispetto alla resa teorica.

Il bioetanolo anidro ottenuto ha una purezza del 99,7% p/p e può essere impiegato per la sintesi del bio-ETBE o per la miscelazione diretta con la benzina.

In relazione allo sfruttamento dei sottoprodotti, la bagassa umida è stoccata e quindi essiccata ad un'umidità del 10-20% immediatamente prima della combustione nell'impianto di cogenerazione. Durante lo stoccaggio si stima una perdita in peso pari al 5%, principalmente a carico degli zuccheri. L'impianto di cogenerazione è costituito da un bruciatore per la combustione della biomassa, un generatore ed una turbina a vapore; la sua efficienza termica è 0,90 e l'efficienza elettrica 0,29. A differenza delle altre unità, l'impianto CHP alimentato con la bagassa

lavora per 360 giorni l'anno. Il biogas ottenuto dalla borlanda è impiegato in una micro-turbina a gas con efficienza elettrica del 34%.

In questo caso studio, l'elettricità è ceduta in rete ed il calore prodotto è impiegato per l'auto-consumo nell'impianto stesso.

In Spagna, gli incentivi per la generazione elettrica da FER, e specificamente dalla biomassa, hanno un valore di 16,81 c€/kWh quando l'impianto di cogenerazione ha più di 2 MW di potenza installati, se la bagassa è considerata una coltura energetica, mentre di 11,38 c€/kWh, se la bagassa è considerata una biomassa di scarto da impianti industriali. Siccome il quantitativo di bagassa prodotta è pari a 77.310 tonnellate all'anno, la potenza installata può arrivare a 10 MWe.

Il calore recuperato è in grado di coprire completamente i consumi termici dell'impianto. Le unità che presentano le richieste termiche più elevate sono la concentrazione del succo zuccherino (solo durante il periodo di raccolta), la distillazione e la rettifica, l'essiccazione della bagassa. In questo caso studio non è considerata la vendita dell'energia termica attraverso una rete di teleriscaldamento, in quanto risulta difficile trovare degli utenti entro una distanza ragionevole dall'impianto.

Analisi economica

I principali costi e ricavi considerati nell'analisi economica sono riassunti nella Tabella 32.

Analisi economica			
Costi	Costi di investimento	30 milioni di €	
	Costi operativi	Biomassa 29-34 €/t (come s.s. con il 38% di zuccheri nei culmi)	6,23-7,30 milioni di €/anno
		O&M	2,9 milioni di €/anno
		Altro	1,22 milioni di €/anno
Ricavi	Prodotti finali	Prezzo del bioetanolo 450-800 €/m ³	5,63-10,00 milioni di €/anno
		Prezzo per elettricità prodotta dalla biomassa 16,81 – 11,38 c€/kWh (10 MWe installati con una produzione di 86.400 MWh/anno, 360 giorni, 24 h/giorno)	14,52 – 9,83 milioni di €/anno

Tabella 32: principali costi e ricavi inclusi nell'analisi economica del caso studio

I costi di investimento includono le opere edili, le strumentazioni, la manutenzione straordinaria, le spese generali (5%), i costi tecnici (5%), le spese impreviste (4%); l'acquisto dei terreni ed eventuali licenze e brevetti non sono inclusi.

I costi operativi per l'acquisto dei prodotti chimici, la gestione delle acque (i.e. scarico delle acque reflue dall'unità di concentrazione, acquisto di acqua dalla rete idrica per la diluizione dello sciroppo), lo smaltimento delle ceneri, la movimentazione della biomassa ed i costi assicurativi sono inclusi nella voce "Altro".

Il prezzo della biomassa ed i valori delle entrate sono riportati come intervallo.

Un'adeguata remunerazione degli agricoltori che forniscono la biomassa è il pre-requisito per uno sviluppo ottimale della filiera; di conseguenza, quantificare il prezzo della biomassa richiede un approccio cautelativo. Assumendo che nell'area

considerata i costi agronomici siano pari a 16-18 €/t di biomassa fresca (corrispondente a 1.040-1.170 €/ha incluso il trasporto alla bocca dell'impianto con una distanza media di 10 km) il valore-soglia per l'acquisto della biomassa è stimato in 30 €/t. Ciò è dovuto al fatto che in periodi di pessime condizioni climatiche o di instabilità del mercato altre colture possono diventare più competitive del sorgo zuccherino e di conseguenza la sicurezza nel rifornimento può diventare critica. A questo si aggiunge che il prezzo della biomassa può variare anche in relazione alla concentrazione di zucchero nei culmi: se è maggiore è plausibile che la quotazione della biomassa possa essere superiore.

Il prezzo del bioetanolo dipende dal mercato internazionale dell'energia e dei biocarburanti, in particolare considerando il prezzo del bioetanolo proveniente dal Brasile, dagli Stati Uniti o dall'India. Tenendo conto del prezzo del bioetanolo importato e della relativa tassazione, nonché del costo del trasporto in Europa, il prezzo finale deve avere un valore massimo di 0,80-0,85 €/l. D'altro canto, il prezzo minimo del bioetanolo può essere fissato a 0,45 €/l. Questo valore può essere valutato con i dati dei costi produttivi in Brasile, che sono di circa 0,30 €/l.

Visti i costi del processo produttivo, l'iniziativa si sostiene solo massimizzando la valorizzazione della bagassa attraverso la generazione elettrica.

Come indicato nella Tabella 32, i costi variano nell'intervallo 10,14-11,21 milioni € all'anno, i ricavi tra i 15,46 ed i 24,52 milioni €/anno.

Se il costo di investimento totale è fissato in 30 milioni di euro, il tempo di ritorno dell'investimento può variare tra i 2,5 anni nel migliore dei casi ed i 7,5 anni nel caso peggiore.

Risparmio nelle emissioni GHGs

Fase di coltivazione

La valutazione del risparmio nelle emissioni di GHGs è stata effettuata considerando l'area cerealicola di Jédula (Cádiz) in Andalusia, Spagna, dove la resa in sorgo zuccherino è di 31 t/ha espressa come s.s..

Nella Figura 26 è riportata la resa produttiva in Andalusia.

La produzione di sorgo zuccherino in Andalusia dà buoni risultati solamente in regime irriguo. Gli apporti irrigui possono variare tra 4,0 e 4,3 m³/ha. Se l'efficienza nell'uso dell'acqua per questa coltura è di 0,16-0,27 m³/kg su s.s., il quantitativo totale di acqua necessario alla coltura per arrivare ad una produzione di 31 t/ha è di 4,96-8,37 m³/ha, che corrisponde alla somma dell'irrigazione e delle precipitazioni.

In relazione a quanto menzionato, è stato effettuato il calcolo delle emissioni di GHGs e dei consumi energetici, ottenendo il valore del risparmio nelle emissioni dovuto all'uso del bioetanolo ottenuto dal sorgo zuccherino in sostituzione della benzina.

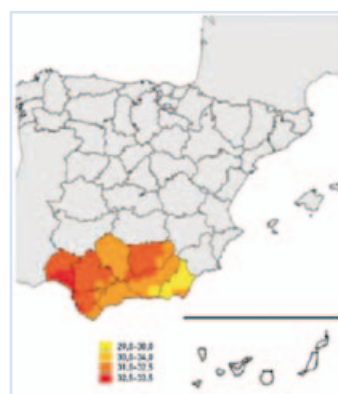


Figura 26: rese in sorgo zuccherino in Andalusia (esprese in t/ha come s.s.) (fonte: IDAE 2011, pagina 28)

Coltura	Produzione di fertilizzanti	Carburante	Produzione della coltura	Energia elettrica	Semina	Totale
Sorgo zuccherino in regime irriguo in Andalusia	49,59	17,53	2,80	0,03	0,13	70,08

Tabella 33: consumi energetici della fase agronomica (valori espressi in MJ_{energia fossile}/MJ_{bioetanolo})⁶⁴

Coltura	Produzione di fertilizzanti	Carburante	Produzione della coltura	Energia elettrica	N ₂ O	Semina	Totale
Sorgo zuccherino in regime irriguo in Andalusia	5,70	1,20	0,10	1,81	5,65	0,03	14

Tabella 34: emissioni di GHGs della fase agronomica (valori espressi in gCO_{2eq}/MJ_{bioetanolo})⁶⁵

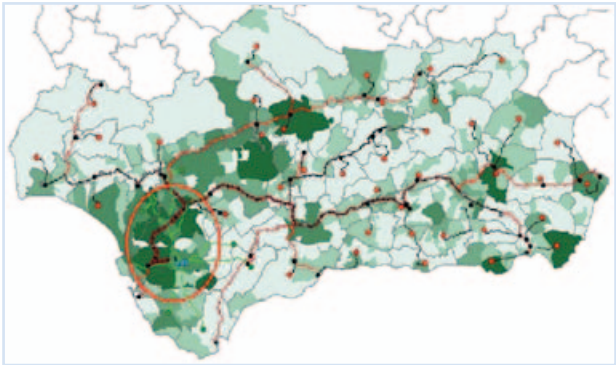


Figura 27: area considerata nel caso studio (fonte: IDEA 2011 a pagina 39)

	Consumo di energia fossile [MJf/MJ]	Emissioni GHG [gCO _{2eq} /MJ]
Sorgo zuccherino in regime irriguo in Andalusia	0,014	1,9

Tabella 35: consumi energetici ed emissioni di GHG dovuti al trasporto della materia prima nel caso studio⁶⁶

Fasi di trasporto e distribuzione

Il calcolo dei costi e dei consumi relativi al trasporto della materia prima è stato effettuato considerando la tipologia di strade percorse e la distanza tra i terreni coltivati e l'impianto di produzione del bioetanolo.

La Figura 27 mostra il posizionamento dell'impianto di produzione del bioetanolo e l'area in cui si trovano i terreni coltivati a sorgo zuccherino.

Nella Tabella 35 sono riportati i consumi energetici e le emissioni di GHGs calcolati per il caso studio in Spagna.

Fase di processamento

Per quanto riguarda la fase di processamento, la valutazione è stata effettuata considerando il processo produttivo del caso studio. Gli *input* e gli *output* del processo produttivo sono riportati nella Tabella 36. Queste informazioni permettono di eseguire il calcolo relativo alle emissioni di GHGs ed il bilancio energetico del processo di produzione del bioetanolo.

Considerando l'impiego della bagassa per produrre l'energia necessaria al processo, le emissioni di GHGs sono indicate nella Tabella 37.

Risparmio nelle emissioni di GHGs nel caso studio

A seguito di un'attenta valutazione di tutti i dati riferiti alla produzione di bioetanolo dal sorgo zuccherino a Jédula, i risultati più importanti sono stati ritenuti quelli relativi al risparmio nelle emissioni di GHGs grazie all'uso della bagassa nel processo di combustione, che permette di produrre energia elettrica da cedere in rete. Tale aspetto risulta di grande importanza ed assicura la sostenibilità della produzione di bioetanolo da tale coltura.

I risultati sono riportati in dettaglio nella Tabella 39 e nella Tabella 40. Il risparmio in emissioni di GHGs di questo caso studio corrisponde al 79%.

Bioetanolo anidro	1 kg
Potenza	0,74 kWh
Bagassa (eccesso)	0,32 kg
Borlanda	13,20 kg
Acido solforico	0,04 kg
Ammonio solfato	0,01 kg
Di-ammonio fosfato	0,01 kg
Culmi di sorgo zuccherino	17,18 kg

Tabella 36: consumi energetici e materie prime nella produzione di bioetanolo da sorgo zuccherino⁶⁷

Materia prima	0,4
Consumo energetico	0
Energia elettrica	0
Energia termica	0
e_p	0,4
e_{ee}	0
e_{ccr}	0

Tabella 37: emissioni di GHGs nel processo di produzione del bioetanolo dal sorgo zuccherino (valori espressi in $gCO_{2eq}/MJ_{bioetanolo}$)⁶⁸

Materia prima	0,1
Consumo energetico	0
Energia elettrica	0
Energia termica	0
Totale	0,1

Tabella 38: bilancio energetico del processo di produzione del bioetanolo dal sorgo zuccherino (valori espressi in $MJ_{energia\ fossile}/M_{bioetanolo}$)⁶⁹

Coltura	Consumo energetico dalle fasi agronomiche	Consumo energetico dalle fasi di trasporto	Consumo energetico dalla fase di produzione di bioetanolo	Totale [MJ/MJ]	Risparmio emissioni GHGs [%]
Sorgo zuccherino in regime irriguo in Andalusia	0,07	0,021	0,01	0,10	92

Tabella 39: consumi energetici fossili della produzione di bioetanolo in Spagna (Jédula)
 (espressi in $\text{MJ}_{\text{energia fossile}}/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$)⁷⁰

Coltura	Emissioni dalle fasi agronomiche e_{ec}	Emissioni dalle fasi di trasporto e_p	Emissioni dalla fase di produzione di bioetanolo e_{ee}	Emissioni credito per produzione energetica e_{ee}	Cattura della CO_2 e_{ccr}	Totale [$\text{gCO}_{2eq}/\text{MJ}$]	Risparmio emissioni [%]
Sorgo zuccherino in regime irriguo in Andalusia	14,3	2,3	0,4	-	-	17,2	79

Tabella 40: emissioni di GHGs nella produzione di bioetanolo in Spagna (Jédula)
 (esprese in $\text{gCO}_{2eq}/\text{MJ}_{\text{bioetanolo}}$)⁷¹

9. IL MODELLO 2 SVILUPPATO PER L'UE: IL SORGO ZUCCHERINO E LA BARBABIETOLA DA ZUCCHERO COME MATERIE PRIME PROCES- SATE ALTERNATIVAMENTE NELL'IMPIANTO DECENTRALIZZATO

Il principale vantaggio del modello 2 è di offrire una finestra più ampia del modello 1 per il processamento di biomassa fresca, permettendo di ridurre l'incidenza dell'unità di concentrazione: per un periodo dell'anno è disponibile il sorgo zuccherino, per un altro periodo la barbabietola da zucchero e si ricorre al processamento dell'estratto zuccherino concentrato e stoccato solo nei mesi rimanenti.

Uno svantaggio del modello 2 è legato al limite intrinseco di questo approccio, ossia alla necessità di coltivare in una stessa area in diversi periodi dell'anno due colture alcoligene, il cui processamento sia simile. Questa condizione non sempre può essere soddisfatta nell'area in cui si intende sviluppare la filiera.

9.1 Caso studio: l'applicazione del modello 2 in Andalusia, Spagna

Il caso studio è contestualizzato al territorio di Jédula (Andalusia, Spagna), dove la raccolta del sorgo zuccherino e della barbabietola da zucchero si collocano in periodi diversi dell'anno.

Il periodo di raccolta della barbabietola da zucchero in Andalusia va dall'inizio di giugno alla fine di luglio e le barbabietole possono essere conservate fino ad un mese senza perdere più del 3-4% degli zuccheri accumulati.

Il periodo di raccolta del sorgo zuccherino nella stessa area si colloca tra settembre e novembre, se si alternano varietà precoci e tardive.

Ne consegue che l'impianto può processare materia prima fresca in totale per sei mesi: la barbabietola da zucchero da giugno ad agosto, il sorgo zuccherino da settembre a novembre.

Se il fermo impianto è programmato per maggio, il processamento dello sciroppo concentrato si limita al periodo compreso tra dicembre ed aprile, ossia per 5 mesi, invece degli 11 del modello 1.

Ipotesi di lavoro

Per la descrizione dell'area geografica del caso studio valgono le informazioni riportate nella Tabella 30, mentre per la fase di produzione agronomica del sorgo zuccherino si fa riferimento alla Tabella 31.

Per quanto attiene alla barbabietola da zucchero, la resa produttiva in regime irriguo può variare tra le 80 e le 120 t/ha. La percentuale in zuccheri rientra nell'intervallo tra il 13% ed il 16%, espressi sulla biomassa fresca. Assumendo un valore medio in zuccheri del 14%, la resa in bioetanolo è compresa tra 6.600 e 10.000 l/ha. Nelle ipotesi che la capacità dell'impianto sia di 12.500 m³/anno (i.e. 10.000 t/anno) e che la barbabietola lo alimenti per 3 mesi all'anno (i.e. tra giugno-agosto, per una produzione di 3.500 m³/anno), sono richiesti 350-525 ettari coltivati a barbabietola.

Per quanto attiene agli aspetti logistici, i macchinari per la coltivazione e la raccolta differiscono sostanzialmente per le due colture, mentre il trasporto non presenta differenze significative.

Una discrepanza importante nel sistema logistico delle due colture deriva, invece, dal tempo che può intercorrere tra la raccolta ed il processamento: la biomassa trinciata del sorgo, infatti, va rapidamente incontro alla perdita degli zuccheri ed all'avvio di fermentazioni incontrollate (i.e. dopo sole 7-8 ore dalla raccolta), mentre le barbabietole possono essere stoccate in campo o presso l'impianto per un mese ed eventualmente la raccolta può essere posticipata fino al momento del processamento, poiché gli zuccheri non vanno incontro a degradazione.

Nell'impianto di produzione del bioetanolo le attrezzature devono avvalersi di soluzioni idonee al processamento sia della barbabietola da zucchero, sia del sorgo zuccherino. Tuttavia, le principali differenze nella lavorazione dei due substrati si concentrano nella prima sezione dell'impianto, ossia in quella preposta alla preparazione della biomassa per l'estrazione degli zuccheri. Invece, il profilo zuccherino dell'estratto ottenuto dalle due colture è simile e, dunque, le due linee di processamento possono coincidere senza alcuna difficoltà.

I principali elementi da apportare alla linea per il processamento anche della barbabietola sono l'unità di lavaggio, finalizzata all'eliminazione dei residui grossolani della raccolta (e.g. fango, sassi), e quella di sminuzzamento delle barbabietole in sezioni molto fini.

Per l'estrazione degli zuccheri, il ricorso al diffusore in continuo permette di processare con lo stesso dispositivo entrambi i substrati.

Per le restanti unità, il modello 2 si basa sulle linee guida descritte nel capitolo 7.

Analisi economica

Per l'analisi economica si fa riferimento ai dati riportati per il modello 1.

Risparmio nelle emissioni di GHGs

Il calcolo del risparmio di emissioni di GHGs è stato effettuato considerando due scenari alternativi. Nel primo si ipotizza di impiegare il gas naturale come fonte primaria, quando manca la produzione di bagassa, ossia quando è processata la barbabietola da zucchero. Nel secondo si prevede di utilizzare la bagassa del sorgo, appositamente stoccata presso l'impianto, in un impianto CHP per l'intero anno lavorativo.

Il risparmio nelle emissioni di GHGs è stimato come valore medio tra i due contributi della barbabietola da zucchero e del sorgo zuccherino.

Le emissioni evitate relative al bioetanolo ottenuto dalla barbabietola da zucchero (i.e. 57%) sono state rapportate al contributo di questa coltura all'alimentazione totale dell'impianto (i.e. 27,3% della produzione di bioetanolo).

Per il sorgo zuccherino, è stato assunto che sia valido il risparmio nelle emissioni GHGs del modello 1 (i.e. 79%) e che questa coltura alimenti l'impianto per il 72,7% della sua capacità produttiva.

Il risparmio nelle emissioni di GHGs, ottenuto come media dei due contributi, è del 73% nello scenario in cui durante il processamento della barbabietola la fonte primaria sia il gas naturale, ed è dell'80% nello scenario in cui la bagassa alimenti l'impianto CHP nell'intero anno lavorativo.

Production of Ethanol from Sugarbeet (steam from NG boiler)									
Overview Results									
All results in $g\ CO_{2,eq} / MJ_{ethanol}$	Non-allocated results	Allocation factor	Allocated results	Total	Actual/Default	Default values RED Annex V.D	Allocation factors	Emission reduction	
Cultivation e_{cu}				7,2	A	12	Ethanol plant to 71,3% ethanol to Sugar beet pulp	Fossil fuel reference (petrol)	
Cultivation of sugarbeet	10,07	71,3%	7,18			11,54	28,7%	83,8 $g\ CO_{2,eq} / MJ$	
Processing e_p				26,3	A	26		GHG emission reduction	
Ethanol plant	36,82	71,3%	26,26			26,42		57%	
Transport e_{tr}				2,9	A	2			
Transport of sugarbeet	1,85	71,3%	1,32			0,84			
Transport of ethanol	1,10	100%	1,10			1,10			
Filling station	0,44	100%	0,44			0,44			
Land use change e_l	0,0	71,3%	0,0	0,0		0			
$e_{cu} + e_{tr} + e_{luc}$	0,0	100%	0,0	0,0		0			
Totals	50,3			36,3		40			

Figura 28: emissioni di GHGs relative alla produzione di bioetanolo ottenuto dalla barbabietola da zucchero impiegando gas naturale come combustibile (fonte: www.biograce.eu)

Production of Ethanol from Sugarbeet (steam from biomass boiler)									
Overview Results									
All results in $g\ CO_{2,eq} / MJ_{ethanol}$	Non-allocated results	Allocation factor	Allocated results	Total	Actual/Default	Default values RED Annex V.D	Allocation factors	Emission reduction	
Cultivation e_{cu}				7,2	A	12	Ethanol plant to 71,5% ethanol to Sugar beet pulp	Fossil fuel reference (petrol)	
Cultivation of sugarbeet	10,07	71,3%	7,18			11,54	28,7%	83,8 $g\ CO_{2,eq} / MJ$	
Processing e_p				4,5	A	26		GHG emission reduction	
Ethanol plant	6,32	71,3%	4,51			26,42		83%	
Transport e_{tr}				2,9	A	2			
Transport of sugarbeet	1,85	71,3%	1,32			0,84			
Transport of ethanol	1,10	100%	1,10			1,10			
Filling station	0,44	100%	0,44			0,44			
Land use change e_l	0,0	71,3%	0,0	0,0		0			
$e_{cu} + e_{tr} + e_{luc}$	0,0	100%	0,0	0,0		0			
Totals	19,8			14,5		40			

Figura 29: emissioni di GHGs relative alla produzione di bioetanolo ottenuto da barbabietola da zucchero usando la bagassa di sorgo come combustibile (www.biograce.eu)

10. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E FONTI

- 1 Almodares A., and Hadi M.R. (2009) "Production of bioethanol from sweet sorghum: A review". African Journal of Agricultural Research Vol. 4 (9) September, 2009: 772 - 780
- 2 Curt M.D., Fernández, J., Martínez M. (1995) "Productivity and water use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv Keller in relation to water regime". Biomass and Bioenergy 8(6):401-409
- 3 Curt M.D., Fernandez J., Martinez M. (1998) "Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in central Spain". Biomass and Bioenergy 14(2): 168-178
- 4 Fernández J., Curt M.D., Martínez M., Olalla L., González J. (1996) "Perspectivas del cultivo de sorgo azucarero para bioetanol en España en base a resultados varietales en ensayos multilocales". ITEA 17(extra): 73-81
- 5 Fernández J. and Curt M.D. (2005) "New energy crops for bioethanol production in the Mediterranean region". International Sugar Journal, 107(1283): 622-628
- 6 Köppen S., Reinhardt G., Gärtner S. (2009) "Assessment of energy and greenhouse gas inventories of sweet sorghum for first and second generation bioethanol". FAO 2009
- 7 Guiying L., Weibin G., Hicks A., Chapman K.R. (2010) "A training manual for sweet sorghum". Chapter 4. Genetics and Breeding. Food and Agriculture Organisation of United Nations
- 8 Dillon S.L., Shapter F.M., Henry R.J., Cordeiro G., Izquierdo L., Slade L. (2007) "Domestication to crop improvement: genetic resources for *Sorghum* and *Saccharum* (Andropogoneae)". Annals of Botany 100: 975-989
- 9 Guiying L., Weibin G., Hicks A., Chapman K.R. (2010) "A training manual for sweet sorghum". Chapter 4. Genetics and Breeding. Food and Agriculture Organisation of United Nations
- 10 Petrini C., Belletti A., Salamini F. (1993) "Breeding and growing sweet sorghum for fuel". Chapter 1. Morphology and Reproduction. Elsevier Science Publishers BN
- 11 Price H.J., Dillon S.L., Hodnett G., Rooney W.L., Ross L., Johnston S. (2005) "Genome evolution in the genus *Sorghum* (Poaceae)". Annals of Botany 95: 219-227
- 12 Sánchez-Monje E. (2001) "*Sorghum bicolor* (L.) Moench". Sánchez-Monje E.: Plantas de interés agrícola. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: 1132-1134

- 13 Smith, C.W., Frederiksen, R.A. (Eds.) (2000) "Sorghum. Origin, history, technology and production". Wiley Series in Crop Science. ISBN 0471242373: 840
- 14 Belletti A., Petrini C., Minguzzi A., Landini V., Piazza C., Salamini F., 1991 "Yield potential and adaptability to Italian conditios of sweet sorghum as biomass crop for energy production". *Maydica* 36: 283-291
- 15 Berenji J. and Dahlberg J., 2004 "Perspectives of sorghum in Europe". *J. Agronomy & Crop Science* 190: 332-338
- 16 Curt M.D., Fernández J., Martínez M., 1995 "Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv Keller in relation to water regime". *Biomass and Bioenergy* 14(2): 168-178
- 17 Petrini C., Belletti A., Salamini F., 1993 "Breeding and growing sweet sorghum for fuel". Chapter 1. Morphology and Reproduction. Elsevier Science Publishers BN
- 18 Price H.J., Dillon S.L., Hodnett G., Rooney W.L., Ross L., Johnston S., 2005 "Genome evolution in the genus *Sorghum* (Poaceae)". *Annals of Botany* 95: 219-227
- 19 Sánchez-Monje E., 2001 "Sorghum bicolor (L.) Moench". In: Sánchez-Monje E.: *Plantas de interés agrícola*, p. 1132-1134. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
- 20 Smith, C.W. and Frederiksen R.A. (Eds.), 2000 "Sorghum. Origin, history, technology and production". Wiley Series in Crop Science. ISBN 0471242373. 840
- 21 Guiying L., Weibin G., Hicks A., Chapman K.R. (2010) "A training manual for sweet sorghum". Chapter 4. Genetics and Breeding. Food and Agriculture Organisation of United Nations
- 22 Janssen R., Rutz D., Branconnier S., Reddy B., Rao S., Schaffert R., Parella R., Zaccharias A., Rettenmaier N., Reinhardt G., Monti A., Amaducci S., Marocco A., Snijman W., Terblanche H., Zavala-Garcia F. (2010) "Sweet sorghum - An alternative energy crop". *Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exposition, Lyon, France*: 200-206
- 23 Petrini C., Belletti A., Salamini F. (1993) "Breeding and growing sweet sorghum for fuel". Chapter 1. Morphology and Reproduction. Elsevier Science Publishers BN
- 24 Price H.J., Dillon S.L., Hodnett G., Rooney W.L., Ross L., Johnston S. (2005) "Genome evolution in the genus *Sorghum* (Poaceae)". *Annals of Botany* 95: 219-227
- 25 A.A.V.V. (1943) "L'Alcole". *Prospettive Autarchiche – Quaderni, Anno IV, n°11*

- 26 Losavio, N., Ventrella, D., Vonella, A.V. (1999) "Water requirements - water and radiation use efficiency. Parameters in order to evaluate the introduction of new crops in the Mediterranean environment [Hibiscus cannabinus L. - Sorghum bicolor (L.) Moench. - Helianthus tuberosum L. - Basilicata]" (Istituto Sperimentale Agronomico, Bari, Italy)
- 27 Patanè C., Copani V., Cosentino S. (1997) "Yield potential evaluation of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) genotypes in the Mediterranean environment". Proceedings of the 1st International Sweet Sorghum Conference, Beijing, China, 14-19 September 1997: 444-455
- 28 Dolciotti I., Mambelli S., Grandi S., Venturi G. (1998) "Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fibre production". Industrial Crops and Products, 7, 2-3: 265-272
- 29 Bortolazzo E., Ligabue M., Davolio R., Ruozi F. (2010) "Il sorgo: una pianta di sicuro interesse". I supplementi di Agricoltura, n° 41: 17-20.
- 30 Reggiani R., Amaducci S. (2010) "Le prove agronomiche di raccolta e di stoccaggio del sorgo da biomassa". Proceedings of the Final Conference of "Progetto Bioetanolo di seconda generazione I risultati di un biennio di sperimentazione", Parma, Italy, 28th September 2010
- 31 Amaducci S., Monti A., Venturi G. (2004) "Non structural carbohydrates and fibre components in sweet and fibre sorghum as affected by low and normal input techniques". Industrial Crops and Products, 20, 1: 111-118
- 32 Assirelli A. (2010) "Processo di disidratazione del sorgo in campo". Proceedings of the Technical Seminars EIMA Energy, Bologna, Italy, 11th Novembre 2010
- 33 Braconnier S., Trouche G., Gutjhard S., Luquet D., Reddy B., Rao S., Schaert R., Parella R., Zacharias A., Rettenmaier N., Reinhardt G., Monti A., Zegada-Lizarrazu W., Amaducci S., Marocco A., Snijman W., Terblanche H., Zavala-Garcia F., Janssen R., Rutz D. (2011) "Definition of new sorghum ideotypes to meet the increasing demand of bioenergy". Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exposition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011
- 34 Di Candilo M., Ceotto E., Del Gatto A., Mangoni L., Pieri S., Dirozzi M. (2010) "Valutazione delle caratteristiche produttive ed energetico-qualitative di varietà di sorgo da fibra e da zucchero in ambienti del centro-nord Italia". Dal Seme n°3: 47-56.
- 35 Pin M., Picco D., Migliardi D., Tomasinsig E. (2009) "Il sorgo zuccherino come coltura per la produzione decentralizzata di bioetanolo". Dal Seme, Anno IV, giugno 2009: 54-59
- 36 Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri L., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and

biogas production from a high water-use efficient energy crop". Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912.

- 37 <http://web.etaflorence.it/51.0.html?&L=1>
- 38 Dalianis C., Alexopoulou E., Dercas N., Sooter C. (1996) "Effect of plant density on growth, productivity and sugar yields of sweet sorghum in Greece". Biomass for Energy and Environment, Proceedings on the 9th European Bioenergy Conference, Vol. 1, Copenhagen, Denmark, June 1996
- 39 Dalianis C., Sooter C.A., Christou M. (1994) "Sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) biomass productivity, sugar yields and ethanol potential in Greece". Proceedings of the 8th European Biomass Conference "Biomass for Energy Environment Agriculture and Industry", Vienna, Austria, October 1994
- 40 Dalianis C. (1996) "Adaption, productivity and agronomic aspects of sweet sorghum under EU conditions". Proceedings of the 1st European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, France, April 1996: 15-25
- 41 Dercas N., Panoutsou C., Dalianis C., Sooter C. (1995) "Sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) response to four irrigation and two nitrogen fertilization rates". Centre for Renewable Energy Sources, Pikermi, Greece
- 42 Dercas N., Panoutsou C., Dalianis K. (1995) "Radiation use efficiency, water and nitrogen effects on sweet sorghum productivity". Chartier et al. editors, Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industrial. Proceedings 8th EU Biomass Conference, Oxford, UK
- 43 Kavadakis G., Dercas N., Nikolaou A. (2000) "Evaluation of productivity, water and radiation use efficiency of two sweet sorghum varieties under Greek conditions". Proceedings of the 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, Sevilla, Spain, June 2000
- 44 Dercas N., Panoutsou C., Dalinianis C. (1996) "Water and nitrogen effects on sweet sorghum growth and productivity". Biomass for Energy and Environment, Proceedings on the 9th European Bioenergy Conference, Vol. 1, Copenhagen, Denmark, June 1996
- 45 Curt M.D., Sanz M., Esteban B., Sánchez G., Barreiro M., Fernández J. (2011) "Assessment of commercial varieties of sorghum as short cycle crops for biomass and sugars production". In: Faulstich M., Ossenbrink H., Dallemand J.F., Baxter D., Grassi A. and Helm P (Ed.), Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exposition. Berlin (Germany) 6-11 July 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 157-163
- 46 Curt M.D., Fernández J., Olalla L., González A. (1996) "Summary of 5 years varietal experimentation on sweet sorghum in Spain". Proceedings of the 1st

European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, France, 1-3 April 1996

- 47 Olalla L., Muriel J.L., Ruiz J.C., Navarro E., Mira A. (1983) "Sorgo dulce: aportación al estudio de su cultivo para producción de azúcares y/o alcohol en Andalucía (España)". *Anales INIA, Ser. Agr.* 23
- 48 Braconnier S., Trouche G., Gutjhard S., Luquet D., Reddy B., Rao S., Schaert R., Parella R., Zacharias A., Rettenmaier N., Reinhardt G., Monti A., Zegada-Lizarazu W., Amaducci S., Marocco A., Snijman W., Terblanche H., Zavala-Garcia F., Janssen R., Rutz D. (2011) "Definition of new sorghum ideotypes to meet the increasing demand of bioenergy". *Proceedings of 19th European Biomass Conference and Exposition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011*
- 49 Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri L., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water use efficiency energy crop". *Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exposition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912*
- 50 Pin M., Picco D., Vecchiet A., Macchia E. (2011) "Sweet sorghum to produce in Italy sustainable ethanol, electricity and heat in decentralised small-medium biorefinery". *Proceedings of the 19th International Symposium of Alcohol Fuels, Verona, Italy, 10-14 October 2011 (in printing)*
- 51 Pin M., Picco D., Migliardi D, Tomasinsig E. (2010) "Bioetanolo da sorgo, un'opportunità di reddito", *Supplemento a L'Informatore Agrario, 6/2010: 26-31*
- 52 Gnansounou E., Dauriat A., Wyman C.E. (2005) "Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China". *Biore-source Technology* 96: 985-1002
- 53 Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri L., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water-use efficient energy crop". *Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912*
- 54 A.A.V.V. (2006) "Energia dalle biomasse. Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali", *Progetto Novimpresa*
- 55 Picco D., Pin M., Vecchiet A., Balducchi R., Di Natale G., Piscioneri L., Fornasier F., Mondini C., Tomat E. (2011) "Sweet sorghum: integrated bioethanol and biogas production from a high water-use efficient energy crop". *Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 6-10 June 2011, ISBN 978-88-89407-55-7: 1905-1912*
- 56 http://cirrus.meteo.noa.gr/forecast/deltio_noa042003.pdf

- 57 Sakellariou-Makradonaki M., Papalexis D., Nakos N., Kalavrouziotis I.K. (2007) "Effects of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum on a dry year in central Greece". *Agric. Water Manage*, 90: 181-189.
- 58 Zhao Y.L., Dolat A., Steinberger Y., Wang X., Osman A., Xie G.H. (2009) "Biomass yield changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuels". *Field Crop Res*, 111: 55-64
- 59 http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_01_F_GR.pdf
- 60 http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/A0101/PressReleases/A0101_SJO01_DT_QQ_02_2011_01_F_GR.pdf
- 61 [http://www.etvavipe.gr/\(6813443974285511\)/Documents/Table_New_Values.pdf](http://www.etvavipe.gr/(6813443974285511)/Documents/Table_New_Values.pdf)
- 62 Greek Payment Agency (O.P.E.K.E.P.E.). A private legal entity operating for the public interest, supervised by the Minister of Rural Development and Food.
- 63 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 544
- 64 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 66
- 65 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 70
- 66 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 82
- 67 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020." Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 43
- 68 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Biocarburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 77

- 69 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Bio-carburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 76
- 70 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Bio-carburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 83
- 71 IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011) "Evaluación del Balance de Gases de Efecto Invernadero en la Producción de Bio-carburantes. Estudio Técnico PER 2011-2020". Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España: 85

NOTE

A series of horizontal dotted lines for taking notes.

Handwriting practice lines consisting of 20 sets of three horizontal dotted lines.

Handwriting practice lines consisting of multiple sets of three horizontal dotted lines on a white background.

Handwriting practice lines consisting of 20 sets of three horizontal dotted lines.

Stampato nel mese di Novembre 2011
da Poligrafiche San Marco - Cormons (Gorizia) - Italia
Per conto di CETA



Nel presente manuale tecnico sono espone le linee guida funzionali ad avviare nell'UE una filiera per utilizzare il sorgo zuccherino a scopi energetici (i.e. bioetanolo, energia elettrica, energia termica).

Le linee guida sono contestualizzate in alcuni casi studio in Italia, Grecia e Spagna, in modo da completare la trattazione del modello di filiera anche con le analisi economiche ed ambientali e fornire uno strumento utile all'impostazione di studi di fattibilità.

Questo manuale tecnico è specificatamente indirizzato agli attori della filiera del bioetanolo, quali ad esempio gli agricoltori, le associazioni agricole, i processisti, i rappresentanti delle PMI e delle ditte sementiere.



Agricultural co-operative
of Halastra