

## Le colture da biomassa per energia: il loro contributo alla sostenibilità agricola, energetica ed ambientale

Salvatore L. Cosentino, Venera Copani, Danilo Scordia, Giorgio Testa e Giuseppina L. Chiarenza  
*Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari, Università di Catania*

Ricezione: 8 aprile 2014; Accettazione: 17 maggio 2014

### Contribution of the energy crops to the agricultural, energetic and environmental sustainability

**Abstract.** This review describes the renewable energies trends and developments in the world, in Europe and in Italy. The text highlights the role of the biomass use in the EU, following the commitments undertaken after the Kyoto Protocol with the Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council, known as 20-20-20. In the frame of agro-energy chains and biomass characteristics, the most suitable bioconversion processes and biofuel development (first, second and third generation) are taken into account. In the review, the role of 'first generation' energy crops, borrowed from the food industry, such as sugar cane and oil palm in tropical countries, maize, rapeseed, soybean in temperate zones are considered. The text also depicts the exceptions raised on the convenience of using these crops for the production of energy (low biomass and energetic yields, high input requirement, environmental and ethical issues) and new orientations looking for an ideotype of biomass crop, no-food, of lignocellulosic raw material, suitable for cultivation in the so-called marginal lands. Lignocellulosic crops suitable for cultivation in Italy, identified among those already widely spread (giant reed and *Saccharum spontaneum*), or coming from other environments (*Miscanthus* spp.), also formerly grown for other purposes (switchgrass, cardoon, *Brassica carinata*, woody crops), are depicted in terms of agronomical, environmental and energy issues, also in relation to the main agro-energy chain: biodiesel, bioethanol, heat and electricity. Comparison among biomass species lead to the conclusion that there are strong differences in terms of energy efficiency and environmental impact.

**Key words:** world energy demand, renewable energy, first generation crops, lignocellulosic crops, energy efficiency, Life Cycle Assessment.

### Le energie da fonti rinnovabili

Le fonti di energia che derivano quasi tutte dall'energia radiante del sole e in grado di rigenerarsi, almeno nell'arco di tempo delle attività umane, vengono definite rinnovabili e quindi inesauribili, a differenza di quelle fossili che vengono considerate esauribili. Per alcune fonti di energia rinnovabile, tuttavia, l'inesauribilità è condizionata a un ritmo di utilizzazione che sia almeno uguale o inferiore a quello di produzione (ad es. le foreste). Le risorse rinnovabili generano energia di tipo termico, chimico, meccanico, elettrico.

L'interesse per le energie da fonti rinnovabili è cresciuto nella seconda metà del secolo scorso a causa delle crisi petrolifere (del 1973, 1979, 2003), dell'aumento del prezzo del petrolio e delle conseguenze ambientali legate al suo sfruttamento.

Un impulso forte, le fonti di energie rinnovabili, lo hanno ricevuto dopo la stipula del "Protocollo di Kyoto", l'accordo internazionale promosso dall'ONU e sottoscritto il 7 dicembre 1997 da oltre 160 Paesi partecipanti alla terza sessione della Conferenza delle Parti della convenzione sui cambiamenti climatici (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC). Oggetto principale del protocollo era la riduzione a livello internazionale delle emissioni di gas serra, ritenuti i maggiori responsabili del riscaldamento dell'atmosfera. I Paesi firmatari si impegnarono a ridurre entro il 2012 le emissioni di gas climalteranti [anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), ossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ), esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ), idrofluorocarburi (HFCs), perfluorocarburi (PFCs)] del 5,2% rispetto ai livelli del 1990, con azioni volte a migliorare l'efficienza energetica, correggere le imperfezioni di mercato attraverso incentivi fiscali e sussidi, promuovere l'agricoltura sostenibile, ridurre le emissioni nel settore dei trasporti. Il trattato è entrato in vigore nel 2005, ma gli obiettivi fissati, in alcuni significativi casi non sono stati rispettati, per cui nel 2012, nel corso dei negoziati sul clima tenutisi

---

\* cosentin@unict.it

a Doha (Qatar) l'accordo è stato prolungato fino al 2020, con un nuovo traguardo: ridurre le emissioni del 20% rispetto ai livelli del 1990. Tuttavia, oltre l'80% dei Paesi partecipanti (tra cui Canada, Russia, Cina, Brasile, India) hanno rifiutato di firmare accordi vincolanti, mentre l'Unione Europea li ha sottoscritti.

La legislazione italiana (D.Lgs. 28/2011, art. 2) individua come energie da fonti rinnovabili "l'energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, l'idraulica, la biomassa, i gas di discarica, i gas residuati dai processi di depurazione e il biogas"; per biomassa intende "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani".

Fra le fonti di energie rinnovabili, le biomasse derivate dalle colture dedicate, dagli scarti agricoli e agro-industriali rappresentano una delle soluzioni più interessanti nel breve e medio periodo per diverse ragioni:

- possibilità di produrre energia a corto raggio e con investimenti relativamente modesti;
- costituire un'alternativa alle colture tradizionali non in grado di reggere la concorrenza di un mercato ormai globalizzato;
- immagazzinare quantità rilevanti di carbonio nel suolo;
- possibilità di recupero di terre marginali e abbandonate offrendo nuove opportunità di mercato al mondo agricolo senza entrare in conflitto con le produzioni alimentari.

L'agricoltura potrebbe quindi svolgere un ruolo di rilievo sia come fornitore di energia che di salvaguardia ambientale. La produzione e distribuzione di energia da biomasse agricole, agro-industriali e forestali presenta, tuttavia, una complessità di gran lunga maggiore rispetto alle altre fonti di energia rinnovabile dal momento che la sua disponibilità è discontinua e dispersa nel territorio.

### Fabbisogno di energia - il contributo delle fonti rinnovabili nel Mondo, in Europa, in Italia

Si stima che il fabbisogno mondiale di energia crescerà nel 2035 di circa il 35% rispetto al fabbisogno attuale (Popp *et al.*, 2014). Nel 2008 le fonti rinnovabili rappresentavano il 13% dell'energia consumata, che in massima parte (10 punti, pari al 77%) era costituita dalla biomassa legnosa (fig. 1). Attualmente, secondo l'International Energy Agency, il contributo delle rinnovabili al fabbisogno globale è pari al 19% circa (IEA, 2013) (fig. 2). L'energia rinnovabile è quindi ancora una risorsa marginale, ma cresce in misura significativa. La sfida è soprattutto quella di trovare soluzioni alternative ai carburanti fossili liquidi per il settore dei trasporti.

Il fabbisogno di energia dell'Unione Europea nel 2011 è stato pari a 1698 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti petrolio) (www.Enea.it). Per soddisfare questa richiesta la UE è costretta a importare annualmente oltre il 50% dell'energia consumata; la sua dipendenza nei riguardi dei carburanti liquidi è poi molto più alta, pari all'80% (Directorate General for Energy, 2011). Il rapporto EUROSTAT del 2012 fa rilevare che rispetto al totale dell'energia consumata la quota delle rinnovabili è sensibilmente cresciuta

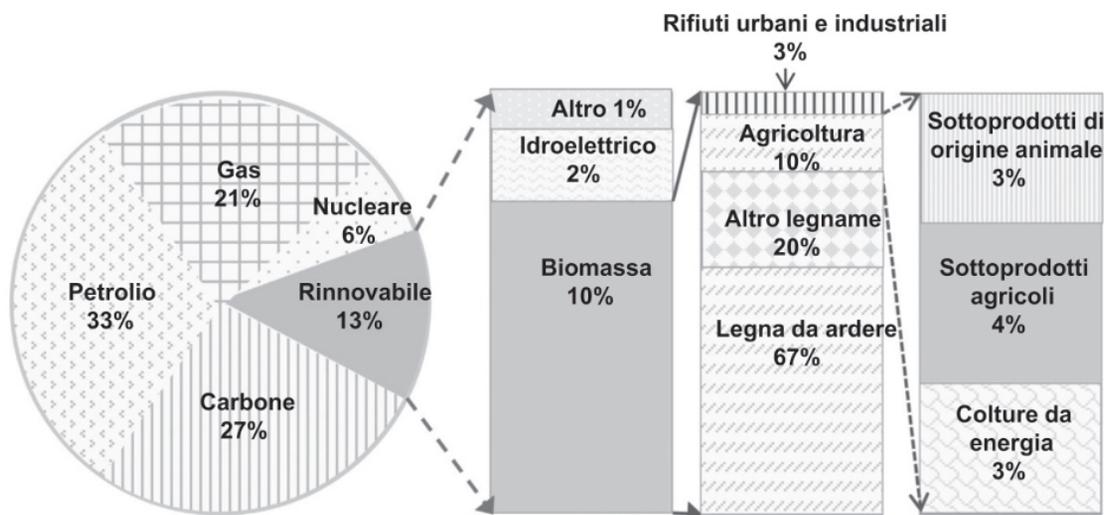


Fig. 1 - Domanda mondiale di energia primaria da combustibili nel 2008 (Adattato da Popp *et al.*, 2014).  
 Fig. 1 - World primary Energy demand by fuel in 2008 (Adapted from Popp *et al.*, 2014).

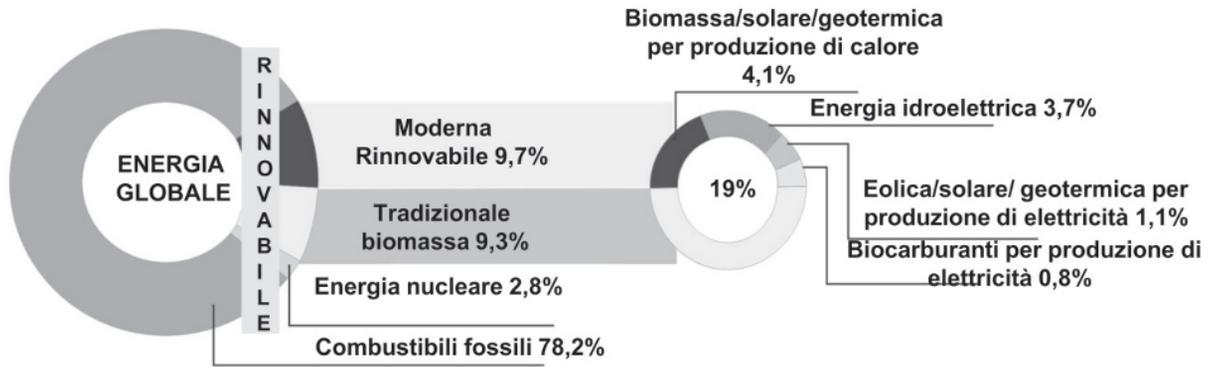


Fig. 2 - Stima della quota di energia rinnovabile rispetto al consumo di energia finale globale nel 2011 (Adattato da Popp *et al.*, 2014).  
 Fig. 2 - Estimated renewable energy share of global final energy consumption in 2011 (Adapted from Popp *et al.*, 2014).

rispetto al 2008, raggiungendo, nella media dei paesi dell'Europa a 27, il 14,1%. L'obiettivo verso cui stanno convergendo tutti gli sforzi è quello del 2020. Per quella data i 27 Paesi dell'UE dovranno aver raggiunto il traguardo del 20% di energia da fonti rinnovabili.

L'Italia dipende dalle importazioni di energia per oltre l'80% del suo fabbisogno (www.enea.it). La dipendenza del nostro Paese dal petrolio è una delle più alte del mondo, tuttavia, il ricorso alle fonti rinnovabili ha subito una forte accelerazione negli ultimi anni, passando dal 5,7% del 2004 al 13,5 del 2012 che ci pone circa a metà della graduatoria europea (fig. 3). L'ulteriore sforzo sarà quello di portare questa quota al 17% entro il 2020.

L'UE nel suo complesso è la principale area geografica e politica che ha sviluppato politiche energetiche volte all'incremento delle rinnovabili (Popp *et al.*, 2014). La Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 ha fissato per

ciascuno Stato membro la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia entro il 2020, a sua volta coerente con l'obiettivo globale "20-20-20" che la Comunità si è data nel 2008 (COM/2008/772). Con riferimento al settore dei trasporti, la quota di energia da fonti rinnovabili dovrà essere pari almeno al 10% del consumo finale di energia.

Il 3 marzo 2011 con il decreto legislativo n. 28 "Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE" l'Italia ha recepito la direttiva CE n. 28/2009. Il suddetto decreto definisce gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico, necessari per il raggiungimento degli obiettivi entro il 2020.

Il Ministero per lo sviluppo economico nel 2010 ha varato il Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia (PAN, 2010) che fissa in 23

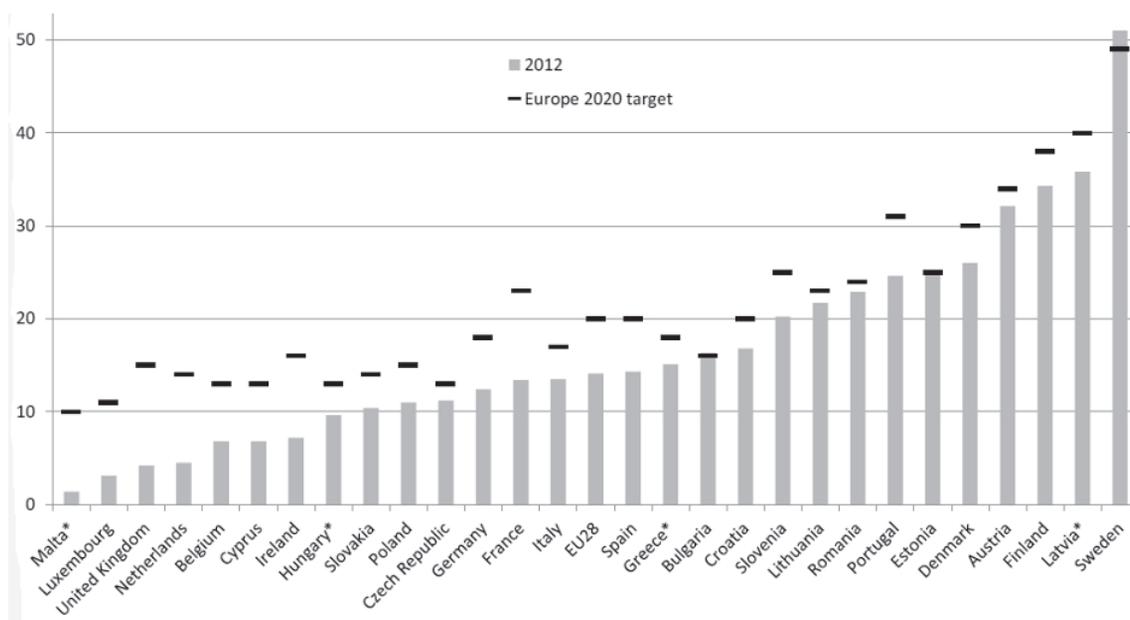


Fig. 3 - Quota di energia da fonti rinnovabili utilizzata nel 2012 nella UE (istogrammi) e obiettivo al 2020 (segmenti orizzontali) (in % del consumo finale lordo di energia) (Eurostat, 2014). Gli asterischi accanto ai nomi di alcuni Paesi indicano valori stimati  
 Fig. 3 - Share of energy from renewable sources per Member State (in % of gross final energy consumption) (Eurostat, 2014).

Mtep la quota di energia rinnovabile, pari al 17% del nostro consumo energetico al 2020 (tab. 1). Il 6 luglio 2012 il Ministro per lo Sviluppo Economico, di concerto con il Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha promulgato il decreto di "Attuazione dell'art. 24 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, recante incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti a fonti rinnovabili diversi dai fotovoltaici" che definisce il nuovo sistema di incentivi per la produzione di energia da fonti rinnovabili elettriche non fotovoltaiche (idroelettrico, geotermico, eolico, biomasse, biogas). Il D.Lgs. 5 dicembre 2013 ha previsto inoltre uno specifico piano di incentivazioni per la produzione di biometano da impianti di cogenerazione e per l'immissione nella rete del gas naturale.

### Le filiere agro-energetiche

L'energia contenuta nella biomassa deriva dal processo fotosintetico che trasforma acqua e CO<sub>2</sub> in molecole organiche. La biomassa è energia accumulata sotto forma di cellulosa, emicellulosa, lignina, sostanze di riserva zuccherine, amidacee, oleaginose, proteine, grassi, ecc.

Per ottenere un sistema efficiente di produzione di energia dalle biomasse occorre ottimizzare i diversi fattori ed organizzarli in modo coerente nelle varie fasi della filiera, dalla produzione di biomassa fino alla trasformazione finale in energia (Castelli, 2011).

Tab. 1 - Quadro sintetico degli obblighi dell'Italia in materia di quota di energia rinnovabile rispetto al totale dell'energia consumata nel 2020 sulla base della direttiva CE 28/2009 (Piano di Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili dell'Italia – PAN, 30 giugno 2010).

Tab. 1 - Synthetic picture of Italy's obligations in respect of renewable energy sharing in the total energy consumed in 2020, according to the EC Directive 28/2009 (National Action Plan for Renewable Energy in Italy - PAN, 30 June 2010).

Definizione	Sigla	Obiettivo PAN (Piano Azione Nazionale)
Consumo atteso totale di energia, adeguato al 2020 (Ktep)	CFL (Consumo energia finale lordo)	133,04 Mtep
Quantitativo atteso di energia da fonti rinnovabili corrispondente all'obiettivo 2020 (Ktep)	FER (Fonti di energia rinnovabile)	22,62 Mtep
Obiettivo di energia FER rispetto al consumo finale lordo di energia nel 2020 (%)	FER/CFL	17%

[http://www.ebb-eu.org/legis/ActionPlanDirective2009\\_28/national\\_renewable\\_energy\\_action\\_plan\\_italy\\_it.pdf](http://www.ebb-eu.org/legis/ActionPlanDirective2009_28/national_renewable_energy_action_plan_italy_it.pdf)

Le combinazioni fra tipo di biomassa utilizzata, tecnologia, vettore energetico (biomassa trasformata in combustibile) sono sintetizzate in figura 4. In base alla biomassa utilizzata ed al vettore energetico ottenuto si possono definire le filiere:

- filiera dei combustibili solidi;
- filiera dei biocarburanti;
- filiera del biogas.

In base alla distanza tra il luogo di produzione della biomassa e quello di utilizzazione, le filiere sono distinte in: corte (a livello aziendale o di raggruppamento di aziende in un raggio massimo di approvvigionamento della biomassa di 70 km) o lunghe (con approvvigionamento anche all'estero).

Un nuovo approccio nello sviluppo delle filiere energetiche è la bioraffineria, che integra più processi produttivi legati alla biomassa. Secondo il concetto di bioraffineria, la biomassa è innanzitutto fonte di prodotti chimici ad alto valore aggiunto: biomateriali, prodotti destinati all'alimentazione umana, animale, ecc., e solo i residui finali sono utilizzati per la produzione di energia.

### I processi di conversione della biomassa

Se la biomassa contiene molto carbonio (C), poco azoto (N) e poca acqua, essa è adatta alla combustione per la produzione di calore o elettricità (conversione termochimica). Se, viceversa, contiene molto azoto (N) ed è molto umida (> 30%), può essere sottoposta a processi che trasformano le molecole organiche in metano o etanolo ed anidride carbonica (conversione biochimica). Infine, combustibili liquidi adatti a essere utilizzati nei motori a benzina o diesel possono essere ottenuti per fermentazione delle componenti zuccherine/amidacee (conversione microbiologica) o per spremitura e transesterificazione dell'olio di semi (conversione fisico-chimica).

I processi di conversione termochimica sono basati sull'azione del calore che permette le reazioni necessarie a trasformare la materia in energia; sono utilizzabili, come detto, per i prodotti ed i residui lignocellulosici e legnosi in cui il rapporto C/N abbia valori superiori a 30 ed il contenuto di umidità non superi il 30%. La conversione della biomassa in calore avviene quando un combustibile (la biomassa) e un comburente (l'ossigeno) vengono a contatto con un innesco (fonte di calore) che genera una reazione di ossidazione. Le biomasse più adatte a subire processi di conversione termochimica sono il legno e tutti i suoi derivati (segatura, trucioli, ecc.), i più comuni scarti agricoli di tipo lignocellulosico (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi, ecc.) e scarti

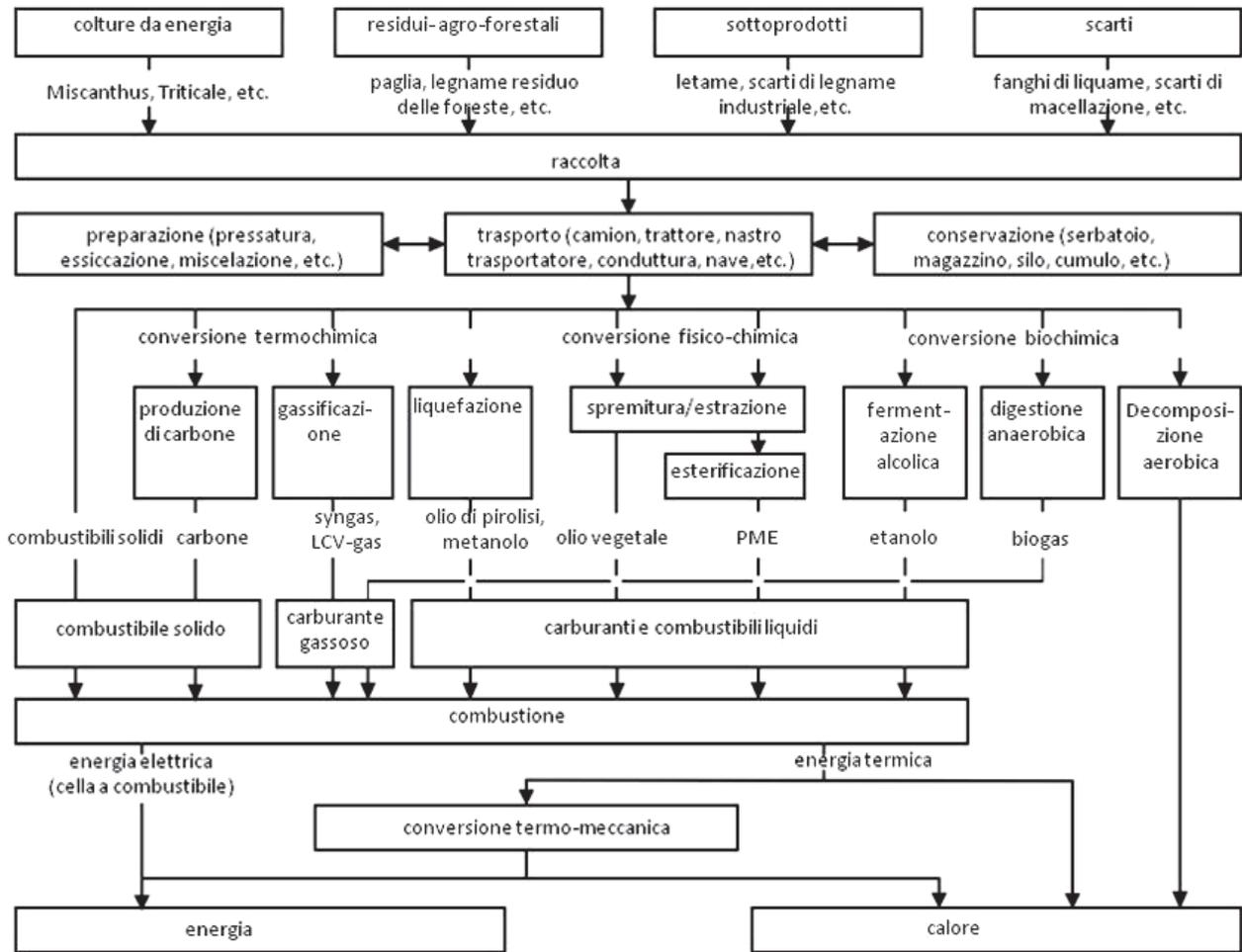


Fig. 4 - Produzione di calore, energia e carburanti dalla biomassa (Adattata da Kaltschmitt *et al.*, 2003).  
Fig. 4 - Heat, energy and fuel production from biomass (Adapted from Kaltschmitt *et al.*, 2003).

di lavorazione (lolla, pula, gusci, noccioli, ecc.).

Dalla combustione della biomassa si può generare sia energia elettrica che termica (produzione separata); nelle soluzioni più avanzate una singola unità produttiva genera una produzione combinata di energia elettrica e termica (cogenerazione); quest'ultima, immessa in una rete, può essere distribuita agli utenti finali (teleriscaldamento). Il vantaggio del sistema di cogenerazione è quello di aumentare notevolmente il rendimento del processo di combustione (fino all'80%). La trigenerazione è una particolare forma di cogenerazione che permette di produrre energia elettrica, termica e frigorifera.

In base al quantitativo di aria utilizzata per sostenere la trasformazione energetica, sono presenti diverse tipologie di processo (Fiala e Bacenetti, 2011): esotermiche come la combustione (con apporto d'aria in eccesso rispetto al valore stechiometrico di ossidazione completa), endotermiche come la gassificazione (con apporto d'aria in difetto rispetto al valore stechiometrico di ossidazione completa) e la pirolisi (in assenza d'aria).

I processi di conversione biochimica permettono di ricavare energia grazie al contributo di enzimi, funghi e microrganismi che proliferano a spese della biomassa sotto particolari condizioni. Sono impiegati per quelle biomasse in cui il rapporto C/N è inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta superiore al 30%. I prodotti della conversione biochimica sono i biocarburanti: biogas, biodiesel e bioetanolo.

#### Biocarburanti

Il D.Lgs. 28/2011 (art. 2, lettera i), definisce i biocarburanti tutti quei carburanti liquidi o gassosi per i trasporti, ricavati dalla biomassa, differenziandoli dai bioliquidi (art. 2, lettera h) che sono invece dei combustibili liquidi per scopi energetici diversi dal trasporto, compresi l'elettricità, il riscaldamento ed il raffreddamento.

Sulla base della fonte di biomassa e del processo di conversione i biocarburanti sono distinti in:

- biocarburanti di prima generazione;
- biocarburanti di seconda generazione;
- biocarburanti di terza generazione.

### Biocarburanti di I generazione

I biocarburanti di prima generazione sono il bioetanolo e il biodiesel, derivano, spesso, da una biomassa alimentare. I principali processi di conversione della biomassa per la produzione di biocarburanti di prima generazione sono riportati nella figura 5.

Il bioetanolo è un alcol a catena corta ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ); generalmente è prodotto dalla fermentazione degli zuccheri C6 (principalmente glucosio) usando ceppi di lievito classici come il *Saccharomyces cerevisiae*. Le specie vegetali largamente impiegate a questo scopo sono la canna da zucchero, della quale si utilizza il saccarosio contenuto nel culmo (modello brasiliano) ed il mais per l'amido contenuto nella cariosside, previa trasformazione in glucosio per mezzo di enzimi noti come "α-amilasi" (modello americano). Altre materie prime utilizzate ma in misura molto minore sono l'orzo, il frumento, la patata, la barbabietola da zucchero, il sorgo zuccherino. In campo energetico, il bioetanolo può essere usato tal quale come componente delle benzine in percentuali variabili (E10, E15, E85) o per la preparazione dell'ETBE (Etil TerButil Etere), un derivato altoottanico, alternativo all'MTBE (Metil TerButil Etere), che addizionato alla benzina ne aumenta il potere antidetonante (in sostituzione del piombo tetraetile la cui utilizzazione è stata bandita nei Paesi della UE a partire dal 2000).

Il biodiesel è un prodotto naturale utilizzabile come carburante per l'autotrazione e come combustibile per il riscaldamento; deve rispettare quanto previsto nel D.lgs. 31 marzo 2011 n. 55, in attuazione della direttiva comunitaria 2009/30/CE. Il processo di produzione del biodiesel si basa sull'estrazione di oli da specie oleaginose (palma da olio, colza, soia, *Jatropha*, ecc.) e conversione di questi in biodiesel attraverso la rottura dei legami che collegano gli acidi grassi a catena lunga al glicerolo e sostituzione di quest'ultimo con metanolo; il processo è chiamato di "transesterifica-

zione". Il biodiesel è considerato un ottimo sostituto del gasolio. Oltre agli oli vegetali possono essere utilizzate materie prime come oli usati e grassi animali il cui recupero è stato disciplinato dal D.Lgs. 22 del 5 febbraio 1997.

Il biogas viene prodotto per fermentazione (assenza di ossigeno), ad opera di batteri, di sostanze organiche complesse (contenenti lipidi, protidi, glucidi), derivate dal settore zootecnico (reflui soprattutto) a cui vengono aggiunte sostanze di origine vegetale, come gli scarti dell'industria agro-alimentare, ma anche colture dedicate come mais, sorgo, sulla, erba medica, ecc. Il biogas è costituito per circa il 50÷70% da metano e per la restante parte da  $\text{CO}_2$  ed altri componenti. Grazie alle politiche di incentivazione, le imprese agricole produttrici, hanno convertito il biogas in energia elettrica che è stata ceduta alla rete. I sottoprodotti del processo biochimico sono ottimi ammendanti e concimi, perché ricchi in sostanza organica indecomposta (lignina) ed elementi minerali (micro e macroelementi).

### Biocarburanti di II generazione

I biocarburanti di seconda generazione sono prodotti a partire da una vasta gamma di materie prime, in particolare, ma non esclusivamente, da biomassa lignocellulosica. Il costo di questa biomassa è significativamente inferiore rispetto a quello dell'olio vegetale, dell'amido del mais o del saccarosio della canna da zucchero.

Il processo di conversione per la produzione di biocarburanti di seconda generazione può seguire due approcci differenti: quello termico e quello biologico. Uno schema semplificato per la produzione di bioetanolo e sottoprodotti è illustrato in figura 6.

L'approccio "termico" comprende trattamenti specifici in cui la biomassa è riscaldata con una quantità minima di agente ossidante, se presente. Questo processo converte termicamente la biomassa in tre frazio-

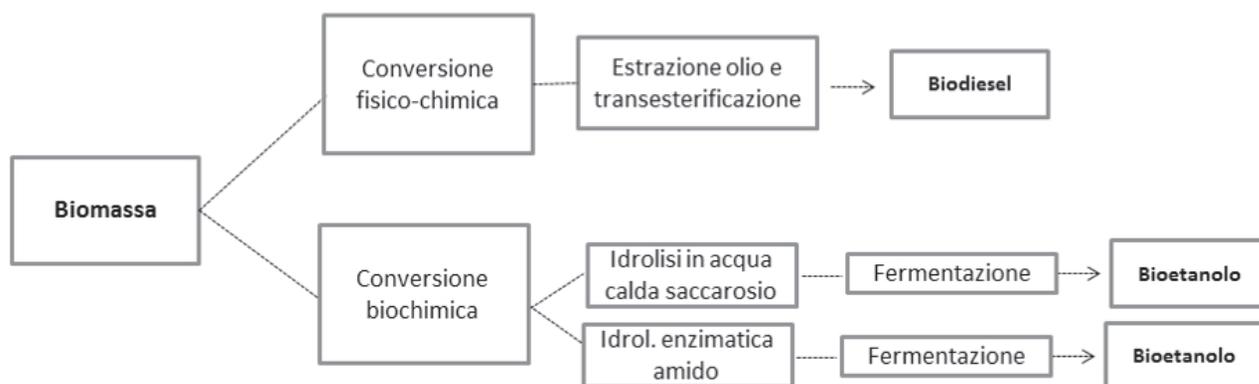


Fig. 5 - Principali processi di conversione della biomassa per la produzione di biocarburanti di prima generazione.

Fig. 5 - Main conversion biomass processes for first generation biofuel production.

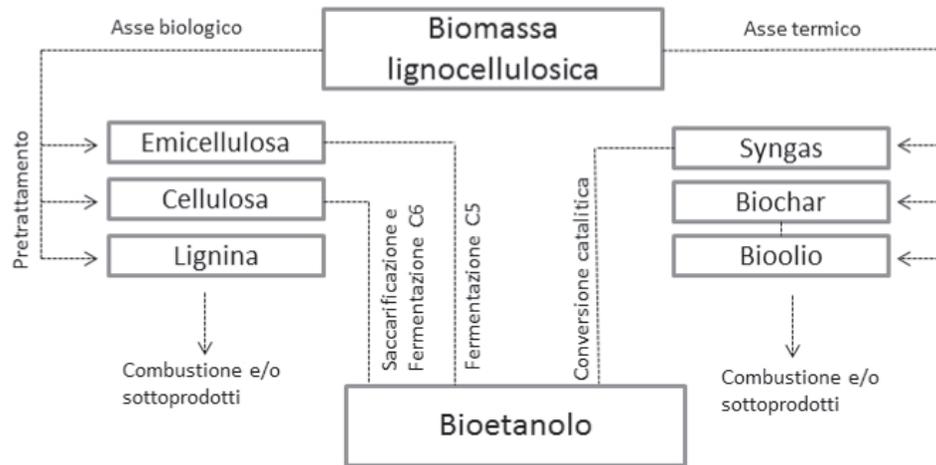


Fig. 6 - Schema semplificato di produzione di bioetanolo di seconda generazione e sottoprodotti attraverso il processo termico o biologico.  
 Fig. 6 - Simplified flow chart for second generation bioethanol and by-products through thermic or biologic process.

ni: una solida conosciuta come biochar, una liquida comunemente chiamata olio pirolitico o bio olio, e un gas noto come syngas. In caso di trasformazione a basse temperature (250-350 °C), in assenza di ossigeno, la biomassa subisce un processo di torrefazione e il principale prodotto di conversione è il biochar. A temperature superiori (550-750 °C), anche in assenza di ossigeno, il processo è noto come pirolisi e il prodotto principale è il bio olio. A temperature maggiori (da 750 a 1.200 °C) e con limitati input di ossigeno, avviene la gassificazione che produce principalmente syngas con biochar e bio olio come sottoprodotti.

L'approccio "biologico" è il processo maggiormente studiato nel mondo, che porta alla produzione di bioetanolo di seconda generazione. Questo processo comprende principalmente tre fasi: un pre-trattamento, una successiva idrolisi enzimatica seguita a sua volta da una fermentazione alcolica. Idrolisi enzimatica e fermentazione alcolica possono essere combinati dando luogo alla simultanea saccarificazione e fermentazione.

Con il pretrattamento in acido diluito l'emicellulosa viene raccolta in una frazione liquida contenente zuccheri a 5 e 6 atomi di carbonio (xiloso, arabinoso, glucosio, galattosio, mannosio), i quali possono essere direttamente fermentati ad opera di lieviti come *Pichia stipitis* che metabolizzano alcuni di questi composti carboniosi (Jeffries *et al.*, 2007; Jeffries, 2008). La fermentazione degli zuccheri emicellulosici ad etanolo è stata ampiamente studiata da Scordia *et al.* (2010; 2011; 2012; 2013a; 2013b) che hanno utilizzato biomassa lignocellulosica di *Saccharum spontaneum*, *Arundo donax* e *Miscanthus × giganteus*. In molti casi, una fase di detossificazione chimica, fisica o biologica, per ridurre le concentrazioni di composti inibitori, è di primaria importanza per il successo della fase di fermentazione dell'idrolizzato emicellu-

losico (Palmqvist e Hahn-Hägerdal, 2000a; 2000b). La restante frazione, rappresentata da un composto solido, contiene cellulosa e lignina. La lignina funge da barriera agli attacchi enzimatici della cellulosa e quindi una sua separazione o destrutturazione è anche prerogativa essenziale di un buon pretrattamento. La cellulosa, composta esclusivamente da polimeri del glucosio può essere idrolizzata in ambiente acido o in maniera più efficace, attraverso idrolisi enzimatica (Scordia *et al.*, 2010; 2011; 2013a; 2013b).

Molti microrganismi hanno attività cellulolitica, ma tuttavia, solo i ceppi di *Trichoderma* e *Aspergillus* sono stati ampiamente studiati per tali scopi (Saha, 2004).

Il glucosio ottenuto dall'idrolisi della cellulosa viene fermentato ad etanolo da lieviti o batteri. La saccarificazione simultanea della cellulosa in glucosio e la fermentazione del glucosio in etanolo (SSF) migliora la cinetica e l'economia della conversione della biomassa (Philippidis *et al.*, 1993).

La lignina, il secondo più abbondante polimero naturale (dopo la cellulosa) compone per il 25-35% (peso secco) la biomassa lignocellulosica (Lavoie *et al.*, 2011). La macromolecola che rimane dopo l'idrolisi della cellulosa o dopo la SSF è biologicamente difficile da degradare, ma è altamente energetica ed è stata utilizzata per la cogenerazione (Dickinson *et al.*, 1998) o la combustione (Dayton e Frederick, 1996) da parte dell'industria della cellulosa e della carta.

Sebbene possano essere utilizzati come combustibile o come fonte di idrogeno in un processo di bioraffineria, i monomeri aromatici della lignina potrebbero anche costituire una fonte molto abbondante di composti chimici ad alto valore aggiunto, che potrebbero essere utilizzati nell'industria della plastica o degli adesivi. Di conseguenza, l'uso della biomassa lignocellulosica per produrre tali composti porterebbe ad un nuovo

mercato, quello dei bioadesivi e delle bioplastiche di seconda generazione. Recentemente è stato riportato che è possibile convertire il 10-20% della lignina in composti ad alto valore aggiunto, quali guaiacolo, pirocatechina e fenolo (Beauchet *et al.*, 2012).

### Biocarburanti di III generazione

I biocarburanti di terza generazione possono essere prodotti da microalghe. Le alghe sono tra le forme viventi più antiche presenti sulla terra, la loro semplice struttura è ordinata, nelle forme autotrofe, all'assorbimento di CO<sub>2</sub> e sali minerali che vengono convertiti in zuccheri, proteine e lipidi, potenziali carburanti, ma anche in alimenti e co-prodotti (prodotti farmaceutici e nutraceutici, additivi per mangimi animali, bioplastiche, ecc.) (Brennan e Owende, 2010). Le quantità e i ritmi di produzione di tali composti sono elevati e rendono efficienti questi processi. Le microalghe, infatti, se poste in condizione ottimali possono raddoppiare la loro biomassa in 24 ore (Brennan e Owende, 2010). Le alghe sono organismi autotrofi, possono vivere in acqua dolce o salata, ma anche su substrati potenzialmente inquinanti come i liquami (Chisti, 2007). Esistono più di 2.100 generi di microalghe (Wu *et al.*, 2007) e 27.000 specie di alghe che popolano i più svariati ambienti nel mondo (Ozkurt, 2009). Le alghe non competono per l'uso del suolo con le colture alimentari né con quelle dedicate per energia. Le specie sulle quali si è indirizzata la ricerca sono soprattutto quelle che accumulano elevate quantità di lipidi: *Chlamydomonas reinhardtii*, *Dunaliella salina*, varie specie di *Chlorella* tra cui *Botryococcus braunii*. Chisti (2007) ritiene che la produzione di biodiesel da microalghe è economicamente competitiva, contrariamente a quanto avviene per le colture convenzionali. La maggiore efficienza sarebbe determinata dal ritmo elevato di crescita della biomass-

sa che può contenere lipidi fino all'80% del suo peso secco. Molti sono tuttavia i problemi ancora non risolti (selezione di ceppi efficienti, sistemi di raccolta, substrati di allevamento). Nella figura 7 sono schematizzati i processi di conversione termochimica e biochimica della biomassa microalgale.

### **Le colture da biomassa per energia nel mondo e in Italia**

#### *Le specie di 'prima generazione'*

In linea teorica qualsiasi pianta può essere utilizzata come coltura energetica. In una prima fase la ricerca si è rivolta verso le colture alimentari, le più note da un punto di vista agronomico (la tecnica colturale non differisce da quella utilizzata per l'uso convenzionale) e già migliorate geneticamente.

Le prime colture impiegate sono state quelle da zucchero per la produzione di bioetanolo: canna da zucchero nei paesi a clima tropicale (Brasile), barbabietola da zucchero nei paesi a clima temperato. Per la produzione di biodiesel sono state impiegate la palma da olio [*Elaeis guineensis* Jacq. ed *Elaeis oleifera* (Kunth) Cortès] nei paesi tropicali, la colza (*Brassica napus* L. var. *oleifera* D.C.) e il girasole (*Helianthus annuus* L.) nei paesi a clima temperato. In seguito, soprattutto negli Stati Uniti, si è puntato sull'uso dell'amido contenuto nella granella del mais (*Zea mays* L.) per la produzione di bioetanolo e sull'olio di soia per la produzione di biodiesel. La soia (*Glycine max* (L.) Merr) si è rapidamente diffusa anche nel Sud America (Brasile ed Argentina) grazie all'impiego di varietà transgeniche resistenti al glyphosate (Roundup Ready® Soybeans). Nel 2012 la produzione mondiale di bioetanolo è stata di 85 miliardi di litri. I Paesi maggiori produttori sono stati gli Stati Uniti con 51 miliardi di litri (dal mais) e il Brasile con 21 miliardi

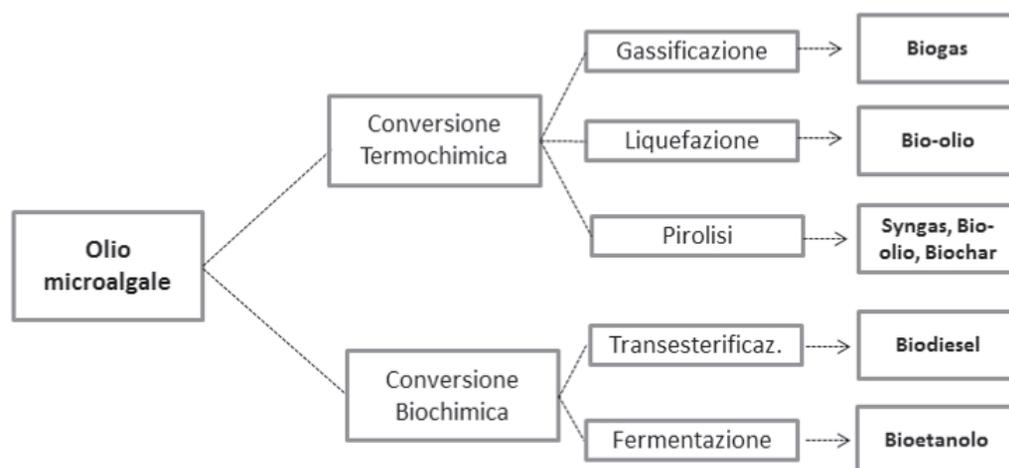


Fig. 7 - Principali processi di conversione termochimica e biochimica della biomassa microalgale.  
Fig. 7 - Main thermochemical and biochemical conversion processes from microalgae biomass.

di litri (dalla canna da zucchero). L'Europa ha contribuito con una quota ben più modesta, 4,3 miliardi di litri, ricavata dall'amido della granella dei cereali vernini (Popp *et al.*, 2014). La produzione mondiale di biodiesel, sempre nel 2012, è stata pari a 18 milioni di tonnellate, il 44% (7,9 milioni di tonnellate) è stato ottenuto in Europa dalla colza (Popp *et al.*, 2014) (fig. 8). Sempre in Europa, apporti significativi sono venuti dal biogas (da reflui zootecnici e materiale vegetale vario) (Don *et al.*, 2011). I Paesi maggiori produttori sono stati la Germania e la Francia (fig. 9).

I dubbi sull'efficienza

A parte il caso dell'etanolo prodotto dalla canna da zucchero, molte eccezioni sono state sollevate circa

l'effettiva possibilità di utilizzare queste colture per la produzione di energia a causa di:

- alti costi di produzione e bassa resa energetica, che ha costretto gli Stati ad intervenire con sistemi diretti ed indiretti di aiuti affinché i costi dei biocarburanti potessero competere con quelli dei carburanti fossili;
- competizione con la destinazione alimentare, che ha posto all'attenzione dell'opinione pubblica quesiti di natura etica (McMichael, 2010; Mol, 2010; Ribeiro, 2013). Il dibattito si è acceso tra il 2007 e il 2008 a causa di repentini innalzamenti dei prezzi di frumento e mais. Sebbene le cause della lievitazione dei prezzi delle suddette derrate non fossero in realtà riconducibili alla conversio-

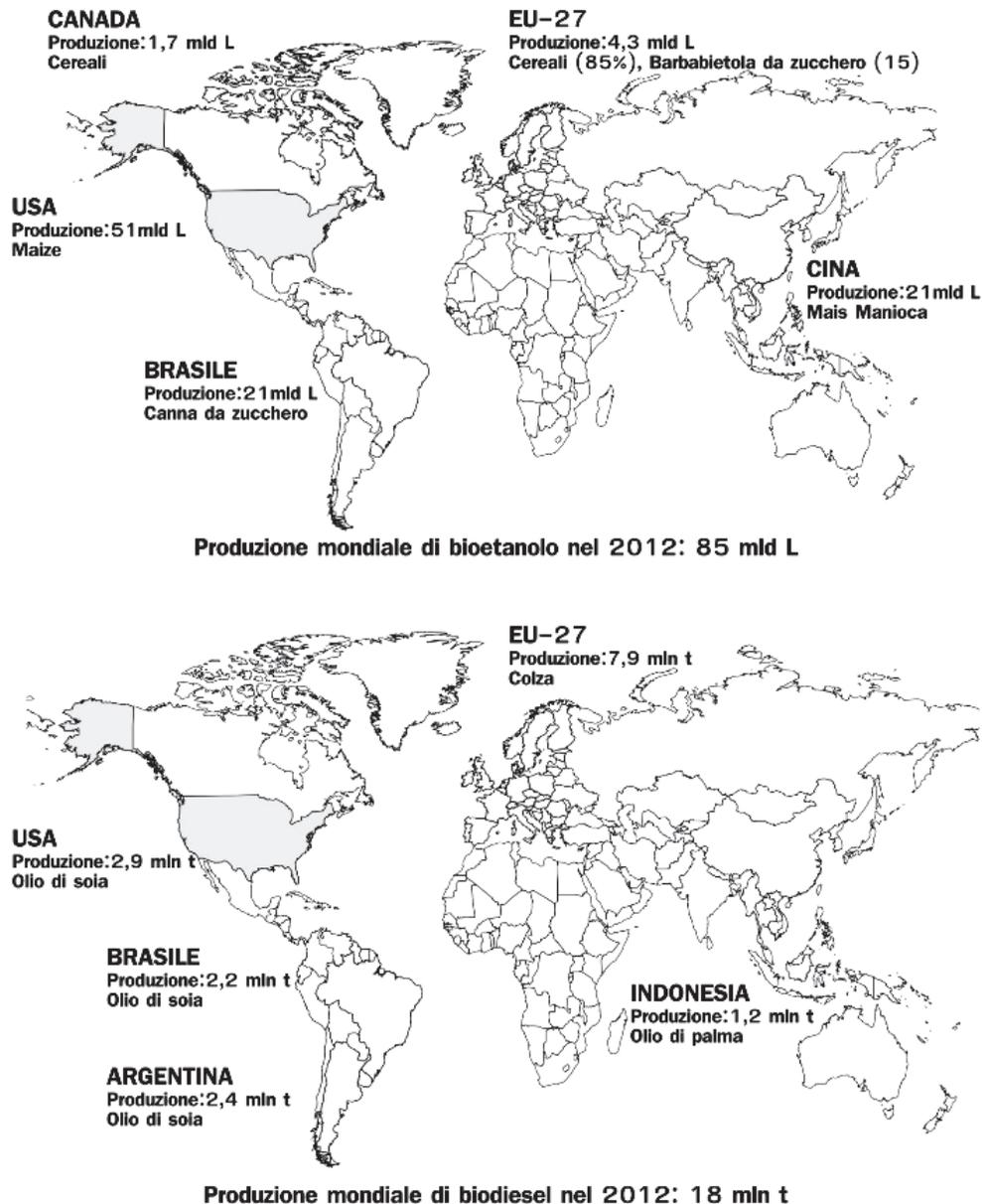


Fig. 8 - Produzione mondiale di bioetanolo (in alto) e biodiesel (in basso) nel 2012 (Adattata da Popp *et al.*, 2014).  
 Fig. 8 - World production of bioethanol (upper) and biodiesel (down) in 2012 (Adapted from Popp *et al.*, 2014).

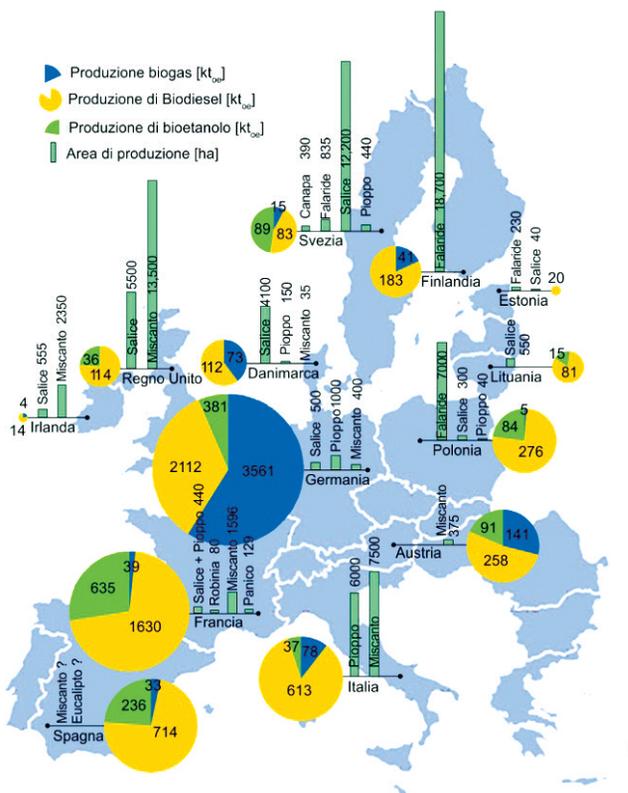


Fig. 9 - Colture energetiche in Europa nel 2011: area di produzione (ha) di specie dedicate e relativa energia ricavata (ktoe) da colture energetiche tradizionali (Adattata da Don *et al.*, 2011).  
 Fig. 9 - Energy crops in Europe in 2011: production area (ha) of dedicated energy crops and energy production (ktoe) of conventional energy crops (Adapted from Don *et al.*, 2011).

ne in biocarburanti (Sims *et al.*, 2010), furono espressi seri dubbi sulla opportunità e ‘moralità’ di una tale strategia;

- diffusione delle colture nei Paesi in via di sviluppo, dove l’aumento della popolazione spinge verso una maggiore domanda di colture alimentari.

### I rischi per l’ambiente

La diffusione delle colture per fini energetici, soprattutto nei paesi in via di sviluppo, ha imposto ulteriori riflessioni legate al possibile uso, diretto e indiretto, del terreno naturale che contiene elevate quantità di carbonio sotto forma di sostanza organica. La messa a coltura di questi terreni comporterebbe il degrado della sostanza organica e il rilascio di nuova anidride carbonica (Nuffield Council on Bioethics, 2011; Gamborg *et al.*, 2012).

La coltivazione su un terreno naturale (i.e. mai coltivato) di colture da energia, determina un cambio diretto di destinazione del suolo. La coltivazione su un terreno agrario, in precedenza utilizzato per colture alimentari, di colture da energia, può comportare la necessità di ricollocare altrove la coltura alimentare

determinando un effetto indiretto di cambio d’uso del suolo. Questo fenomeno, indicato come ‘variazione indiretta della destinazione d’uso del suolo’ (Indirect Land Use Change - iLUC) è stato esposto in un interessante lavoro di Searchinger *et al.* (2008) che ha evidenziato gli effetti negativi dell’iLUC a seguito della produzione di biocarburanti. Sulla base di ciò, la Commissione Europea è stata incaricata dal Consiglio e dal Parlamento Europeo a presentare una proposta legislativa che consideri l’impatto del iLUC sulle emissioni di gas a effetto serra dei biocarburanti (European Commission, 2012a; 2012b; 2012c). La questione, tuttavia, rimane molto dibattuta e non ha trovato ancora la sua espressione legislativa finale nel Parlamento Europeo.

La quantità di suolo necessario alla produzione di biocarburanti ha sollevato dubbi per il fatto che questa politica avrebbe un grande impatto sul settore agricolo a fronte di un piccolo impatto sul settore energetico (FAO, 2008). Pearce (2006) prevede che per raggiungere l’obiettivo di coprire il 10% del fabbisogno energetico del settore dei trasporti della UE con biocombustibili bisognerebbe destinare a colture da energia circa il 70% della superficie agricola.

Questi dati hanno prodotto forti perplessità nella Unione Europea per l’impatto che tali strategie avrebbero nei Paesi in via di sviluppo, dove esiste il rischio concreto che terreni naturali vengano posti in coltura.

### *La coltivazione in ‘terre marginali’*

La proposta che ne è scaturita è stata quella che le colture da energia possano e debbano essere più correttamente coltivate su ‘aree marginali’ (marginal land) in modo da assicurare che l’uso della terra sia sostenibile (Reijnders, 2009; International Energy Agency, 2010).

Nel 2009 il Governo Inglese ha affermato nel ‘Renewable Energy Strategy’ che “L’uso di terre marginali ridurrà il rischio della competizione con l’esistente produzione alimentare e contribuirà ad assicurare che qualunque cambio d’uso della terra associato ad esso non abbia un impatto significativo sulla conservazione dei gas serra o non comporti alcun altro impatto ambientale significativamente pericoloso” (HM Government, 2009).

L’idea di individuare il “terreno marginale” in aree dove la coltivazione è attualmente senza profitto per portarlo verso un uso produttivo di energia è molto accattivante. L’energia potrebbe essere prodotta localmente, con pochi input, non competere con la produzione di alimenti e dare all’agricoltore un guadagno aggiuntivo (Schubert *et al.*, 2008). Tuttavia, resta aperta la questione su cosa si debba intendere per aree

marginali (The Gaia Foundation *et al.*, 2008). Il concetto di area marginale, infatti, è definito con accezioni di tipo diverso in funzione del punto di vista, sia esso agronomico (pH, contenuto di sali, assenza di acqua, presenza di scheletro, pendenza, etc.), economico (lontananza dai mercati, assenza della domanda, costo degli input, costo della manodopera, come il sussidio a chi coltiva su suolo marginale sia messo in pratica ecc.), sociale (assenza di insediamenti umani, non accettabilità della produzione delle biomasse, ecc.).

#### *Un nuovo ideotipo*

Contestualmente si è aperto il dibattito su quali caratteristiche dovesse avere una coltura da destinare alla produzione di energia e da adattare a terreni marginali. Cosentino *et al.* (2007a) hanno proposto che un tale ideotipo dovrebbe possedere le seguenti caratteristiche:

- elevate rese prossime a quelle potenziali per ciascuna regione;
- elevata efficienza di uso della radiazione solare in relazione all'ambiente (temperatura, fotoperiodo, disponibilità idrica);
- con caratteristiche specifiche in relazione all'ambiente di coltivazione;
- resistente a stress biotici;
- resistente a stress abiotici (idrico, da alte a basse temperature, salino);
- in grado di utilizzare efficacemente le risorse naturali disponibili;
- con caratteristiche qualitative adatte all'uso specifico (biogas, biodiesel, etanolo di I generazione, etanolo di II generazione da cellulosa, da Biomassa a liquido (BTL), bioidrogeno);
- bilanci energetici e ambientali favorevoli.

Alla definizione dell'ideotipo dovrebbe corrispondere la messa a punto di un dettagliato archivio di informazioni in grado di supportare le decisioni e le scelte (Cosentino *et al.*, 2007a):

- caratterizzazione agro-ecologica dei comprensori da destinare a colture da energia;
- individuazione e caratterizzazione delle specie di potenziale interesse (specie di nuova introduzione, locali, resistenti a stress biotici e abiotici);
- programmi di miglioramento genetico e di selezione delle colture tradizionali per la nuova destinazione d'uso: riduzione del contenuto di N, P, S e di microelementi (ceneri);
- messa a punto di una appropriata tecnica agronomica per una produzione sostenibile (coltivazione a "bassi input");
- logistica: raccolta, pre-trasformazione in relazione alla tipologia di prodotto, stoccaggio della bio-

massa in rapporto al contenuto di umidità, ecc.;

- sviluppo di "bioraffinerie" (Biorefinery);
- valutazione dell'impatto ambientale e sociale;
- sviluppo di modelli di simulazione e decisionali.

#### **Le colture da biomassa per energia**

L'effetto combinato di questo complesso dibattito ha determinato un cambio di rotta. L'interesse si è progressivamente spostato verso la biomassa lignocellulosica, la più diffusa al mondo, ricavabile da sottoprodotti dell'industria agro-alimentare, scarti agricoli (materiale di potatura), residui forestali e colture dedicate. Nel caso delle colture dedicate si porrà naturalmente ancora una volta il dilemma sulla competizione per l'uso della terra con le colture alimentari e da fibra, ma in questo caso la resa energetica ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) appare notevolmente maggiore rispetto a quella delle colture di prima generazione. Le colture lignocellulosiche, inoltre, a fronte di rese elevate (output) richiedono nel complesso bassi livelli di input, determinando quindi alti rendimenti energetici. Positivo il bilancio del carbonio organico nel suolo e quello sulla riduzione dei gas serra. Contestualmente, significativi studi e investimenti sono stati effettuati per convertire in etanolo una biomassa solida costituita in misura più o meno rilevante di cellulosa, emicellulosa e lignina, ma restano da superare alcune barriere tecniche (Sims *et al.*, 2010).

Le nuove colture energetiche di 'seconda generazione' sono state individuate tra quelle impiegate tradizionalmente per la produzione di legno da opera (pioppo, robinia, salice, eucalipto) o di foraggio (Sorgo zuccherino, *Panicum virgatum*, *Phalaris arundinacea*, *Pennisetum purpureum*, ecc.), altre sono state trovate nella flora spontanea delle diverse regioni e da oltre 20 anni sono oggetto di approfondite ricerche (canna comune, *Saccharum spontaneum*, *Miscanthus*), ma quelle di possibile utilizzazione sono molto più numerose (Mangan *et al.*, 2011). Sono state proposte anche specie orticole poco utilizzate (cardo) e specie oleaginose poco note (*Brassica carinata*). In Europa i dati più recenti indicano che questa progressiva inversione di tendenza verso colture e materiali lignocellulosici è già iniziata (fig. 9).

#### *Le colture lignocellulosiche*

##### Canna comune (*Arundo donax* L.)

La canna comune (fig. 10) è una specie perenne, rizomatosa, a ciclo fotosintetico C3, famiglia *Poaceae*. Si caratterizza per uno sviluppo notevole, superiore a quello di quasi tutte le altre specie della famiglia. Proviene dall'Asia, è presente allo stato



Fig. 10 - Canna comune (*Arundo donax* L.) (Foto DISPA).  
Fig. 10 - Giant reed (*Arundo donax* L.) (Photo DISPA).

spontaneo in tutto il bacino del Mediterraneo. La sua presenza in quest'area è così remota da essere considerata elemento tipico del paesaggio rurale. Attualmente la canna comune è proposta come materia prima nella filiera bio-termo-elettrica per la produzione di calore ed elettricità (Cosentino *et al.*, 2012b; Lewandowski *et al.*, 2003), ma può essere impiegata anche per la produzione di bioetanolo di seconda generazione (Scordia *et al.*, 2011, 2012, 2013b).

I fusti aerei (culmi) possono raggiungere l'altezza di 600 cm e un diametro alla base di 2-4 cm; sono lisci, cavi, con un numero di nodi da poco più di 10 fino a oltre 30, ed altrettante foglie a lamina piana, lunga 30-70 cm. L'infiorescenza è un panicolo terminale lungo fino a 70 cm che compare alla fine dell'estate. Il rizoma cresce nel suolo ad una profondità di circa 30-40 cm. È costituito da rami del diametro di 2-4 cm che portano all'apice gemme già differenziate, prossime a sviluppare nuovi culmi (gemme principali e secondarie) ed anche gemme destinate a prolungare il rizoma (gemme di prolungamento) (Onofry, 1940). Dal rizoma si originano le radici fibrose che penetrano nel suolo per oltre 150 cm (Cosentino *et al.*, dati non pubblicati; Monti e Zatta, 2009).

La canna comune è specie tipica di ambienti temperati (Lewandowski *et al.*, 2003), tollera un'ampia gamma di condizioni climatiche, sub-tropicali, tropicali e temperato-calde. Preferisce gli ambienti umidi e le rive dei corsi d'acqua ma si adatta a condizioni di piovosità annuale intorno a 400 mm; può sopravvivere a periodi di siccità o eccesso d'acqua. Generalmente non sopravvive in aree caratterizzate da temperature basse regolari o prolungate, come quelle tipiche dell'Europa continentale. Cresce in suoli con pH da 5,0 a 8,7 (Duke, 1975, 1979), tollera la salinità

(Cosentino *et al.*, 2013). La durata economica di un canneto supera i 15-20 anni. L'epoca più adatta per l'impianto è la primavera.

La canna comune è sterile per cui la propagazione può avvenire solo per via agamica (Balogh *et al.*, 2012; Mariani *et al.*, 2010); si possono utilizzare porzioni di rizoma, talee di culmo (fig. 11), piante micropropagate (Copani *et al.*, 2013). Dato il notevole costo di approvvigionamento dei rizomi è possibile utilizzare porzioni di poche centinaia di grammi, dal momento che è stata dimostrata l'ottima capacità di insediamento (Cosentino *et al.*, 2010). L'investimento unitario maggiormente praticato è quello di un tratto per metro quadrato. La talea di culmo si è dimostrata potenzialmente altrettanto utilizzabile (Copani *et al.*, 2013) ma richiede, al momento dell'impianto, l'irrigazione (Copani *et al.*, 2011). Il ricorso alle piante micropropagate non presenta difficoltà, se non quelle del costo elevato delle piantine e della necessità dell'irrigazione nella fase di insediamento della coltura.

La produzione di biomassa varia nel tempo in relazione all'andamento termo-pluviometrico e all'età del canneto. La resa cresce dal primo al terzo anno (Cosentino *et al.*, 2010), si mantiene costante per un certo numero di anni per poi decrescere (Angelini *et al.*, 2009).

Nell'Italia Centrale, prove di medio e lungo periodo hanno fatto rilevare produzioni medie di biomassa secca intorno a 37 t ha<sup>-1</sup> s.s. e 20 t ha<sup>-1</sup> s.s. anno<sup>-1</sup> rispettivamente in suoli fertili e marginali (sabbiosi) (Nassi o Di Nasso 2013a, 2013b). Nelle regioni meridionali nel medio periodo la resa si attesta intorno a 20 t ha<sup>-1</sup> (Cosentino *et al.*, 2010); in condizioni di soddisfacente disponibilità idrica e nutritiva si possono raggiungere al terzo anno produzioni di oltre 40 t ha<sup>-1</sup>; dal quarto anno anche in questi ambienti la produzio-



Fig. 11 - Rizoma originato da un germoglio del nodo (Foto DISPA).  
Fig. 11 - Rhizome from a node sprouting (Photo DISPA).

ne comincia a ridursi, al quinto è inferiore a quella massima di poco meno del 30% (Mantineo *et al.*, 2009) (tab. 2). A 14 anni dal trapianto (1997-2011), a Catania, nell'ambito di una collezione di 39 genotipi, in assenza di input agronomici a partire dal terzo anno, la produzione media rilevata è stata pari al 30% (9,5 t ha<sup>-1</sup> s.s.) di quella massima raggiunta il terzo anno (31,4 t ha<sup>-1</sup> s.s.) (Cosentino *et al.*, Progetto BIO-SEA, dati non pubblicati).

Le ricerche realizzate nel sud Italia dimostrano che l'irrigazione e la concimazione azotata incrementano la produzione di biomassa, che risulta quasi doppia (25,3 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> dal secondo al quarto anno) rispetto a quella della tesi non concimata né irrigata (N0I0) (12,4 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> nello stesso arco di tempo) (Mantineo *et al.*, 2009). La canna comune risulta più efficiente del miscanto nell'uso dell'acqua (WUE, IWUE) e del cardo per l'uso dell'azoto (NUE) (Mantineo *et al.*, 2009). La raccolta delle canne si esegue alla fine dell'inverno quando i valori di umidità scendono al minimo (40-50%) come pure quelli delle ceneri, con ripercussioni positive sul rendimento energetico (Zegada-Lizarazu *et al.*, 2010). Il periodo utile

Tab. 2 - Biomassa secca prodotta dalla canna comune (t ha<sup>-1</sup>) in relazione alla disponibilità di azoto e di acqua in un quinquennio di prove (Adattata da Mantineo *et al.*, 2009).

Tab. 2 - Giant reed dry biomass yield (t ha<sup>-1</sup>) in relation to soil water availability and nitrogen fertilization in a five-year research (Adapted from Mantineo *et al.*, 2009).

Trattamenti	I <sub>25</sub> *	I <sub>75</sub> *	Media
Primo anno (2002-2003)			
N <sub>50</sub> *	4,5	8,0	6,3 a
N <sub>100</sub> *	4,1	7,8	6,0 a
Media	4,3 b	7,9 a	6,1
Secondo anno (2003-2004)			
N <sub>50</sub>	22,2	32,5	27,4 b
N <sub>100</sub>	28,5	41,3	34,9 a
Media	25,4 b	36,9 a	31,1
Terzo anno (2004-2005)			
N <sub>50</sub>	31,3	40,5	35,9 b
N <sub>100</sub>	40,2	43,0	41,6 a
Media	35,8 b	41,8 a	38,8
Quarto anno (2005-2006)			
N <sub>50</sub>	34,7	35,2	35,0 a
N <sub>100</sub>	34,2	35,6	34,9 a
Media	34,5 a	35,4 a	34,9
Quinto anno (2006-2007)			
N <sub>50</sub>	24,1	24,9	24,5 a
N <sub>100</sub>	30,8	28,0	29,4 a
Media	27,5 a	26,5 a	27,0

N50= 50 kg ha<sup>-1</sup> di azoto; N100= 100 kg ha<sup>-1</sup> di azoto; I25= restituzione 25% ETm; I75= restituzione 75% ETm

va dalla fine di novembre alla fine di febbraio. La raccolta meccanica può presentare alcune difficoltà legate alla dimensione delle canne e alla resistenza al taglio. Sia il CRA-ING che l'Università di Bologna lavorano da tempo alla messa a punto di macchine dedicate. I sistemi a confronto sono a cantieri separati (tagli-sfiabratura e imballatura) o a cantieri riuniti.

Il potere calorifico (MJ kg<sup>-1</sup>) della biomassa determinato sulla base dell'energia delle sue componenti (glucidi, lipidi, protidi) permette di ricavare la resa energetica (differenza tra il contenuto energetico complessivo della biomassa prodotta e l'ammontare dell'energia ausiliaria immessa nel sistema colturale) e il rendimento energetico (rapporto tra il contenuto energetico complessivo della biomassa prodotta e l'ammontare dell'energia ausiliaria immessa nel sistema colturale). Il contenuto energetico della biomassa di canna comune è stato stimato tra 14,6 MJ kg<sup>-1</sup> e 18,0 MJ kg<sup>-1</sup>. La resa energetica è risultata pari a 280 GJ ha<sup>-1</sup> in una coltura di primo anno (Angelini *et al.*, 2005), ma raggiunge valori di 592 GJ ha<sup>-1</sup> a partire dal secondo anno (Venturi e Venturi, 2003). Il rendimento energetico è risultato pari a 7,4 nella coltura di secondo anno (Cosentino, dati non pubblicati) e di 77 nella fase di massima produzione (Angelini *et al.*, 2005) (tab. 3).

#### Miscanto (*Miscanthus* spp.)

Al genere *Miscanthus*, famiglia *Poaceae*, ciclo fotosintetico C4, appartengono alcune specie interessanti per la produzione di biomassa, *M. sinensis* Anderss, *M. sacchariflorus* (Maxim.) Hack, *M. floridulus* (Labill.) Warb., oltre al più noto ibrido *Miscanthus* × *giganteus* Greef e Deuter (fig. 12). Si tratta di specie perenni, rizomatose, con un'elevata capacità di sopravvivenza, superiore a 20 anni



Fig. 12 - Miscanto (*Miscanthus* × *giganteus* Greef & Deuter) (Foto DISPA).

Fig. 12 - *Miscanthus* (*Miscanthus* × *giganteus* Greef & Deuter) (Photo DISPA).

Tab. 3 - Indici energetici di alcune colture per energia studiate in ambienti italiani (valori ripresi in parte da un precedente lavoro di Cosentino *et al.*, 2007b).Tab. 3 - Energy indices of some bioenergy crops studied in Italian environment (From previous paper of Cosentino *et al.*, 2007b).

Specie	Output (GJ ha <sup>-1</sup> )	Input (GJ ha <sup>-1</sup> )	Potere calorifico (MJ kg <sup>-1</sup> )	Resa energetica netta (GJ ha <sup>-1</sup> ) (O-I)*	Efficienza energetica (O/I)*	Bibliografia
<i>Biocombustibili solidi</i>						
Canna comune	294,6 ♪ - 473 ♪	14,9 ♪ - 10,5 ♪	18	280 ♪ - 463 ♪	20,5 ♪ - 77 ♪	Angelini <i>et al.</i> , 2005b
	650	15,5	17,7	637	53	Angelini <i>et al.</i> , 2009
	285,8 ♠ - 531,1 ♥	39,2 ♠ - 72,4 ♥		345 (II anno)	7,36 (II anno)	Cosentino <i>et al.</i> , 2007b
	240-600	34 - 22 <sup>1)</sup>	14,6	118 - 592	11 - 75	Venturi e Venturi, 2003
<i>Miscanthus</i>	479	12,5	17,1	467	39	Angelini <i>et al.</i> , 2009
	179,1 ♠ - 351,6 ♥	39,2 ♠ - 72,4 ♥	17,6 - 17,7	198,7 (II anno)	4,5 (II anno)	Cosentino <i>et al.</i> , 2007b
	260-530	34-22 <sup>1)</sup>	16,4	238 - 522	5 - 20	Venturi e Venturi, 2003
				4,8 - 425,9 <sup>1)</sup>	1,1 - 21,6 <sup>1)</sup>	Mantineo <i>et al.</i> , 2009
Cardo	193,3	11,4	16,5	181,9	16,9	Angelini <i>et al.</i> , 2009
	179,1 ♠ - 351,6 ♥	28,9 ♠ - 48 ♥	15,5 - 16,8	312	9,43 ♪	Cosentino <i>et al.</i> , 2007b
		8 - 22	14,1 - 15	133 - 344	7 - 31	Venturi e Venturi, 2003
		13,2	15,9	180		Nassi o Di Nasso <i>et al.</i> , 2006
Sorgo da fibra	270 ♠ - 524 ♥	31,4 - 71,1	16,7 - 16,8	238 ♠ - 453 ♥	6,8 - 8,5	Cosentino <i>et al.</i> , 2002
				245 - 300	16,5 - 20	Monti e Venturi, 2003
	334 - 507	13 - 25	16,7-16,9	309 - 494	13 - 39	Venturi e Venturi, 2003
			14,1			Di Candilo <i>et al.</i> , 2005 c
Panico	174 - 435		17,4	152 - 427	8 - 54	Venturi e Venturi, 2003
Pioppo		14,2 per anno			13	Balsari e Airoidi, 2002
	182,7 (T1)	10,8		171,9	19,3	Nassi o Di Nasso, 2010
	255,1 (T2)	6,5		248,7	40,4	Nassi o Di Nasso, 2010
	303,9 (T3)	5,2		298,7	60,8	Nassi o Di Nasso, 2010
<i>Biocombustibili liquidi</i>						
Sorgo zuccherino	337 ♠ - 423 ♥(z)	31,4 - 71,1	16,7 - 16,8	295 ♠ - 365 ♥(z)	6-11,7 (z)	Cosentino <i>et al.</i> , 2002
	132,5 ♠ - 140,6 ♥	13,8 ♠ - 19,1 ♥		118,7 ♠ - 121,5 ♥	7,4 ♠ - 9,6 ♥	Monti e Venturi, 2003
<i>Brassica carinata</i>	38,2 ♠ - 31,8 - 48,7 ♥	23,5- 24,2 ♠ - 29,4- 36,6 ♥			1,6 ♥ - 1,2 ♠	Cardone <i>et al.</i> , 2003
	93	14,7		95,7 <sup>2)</sup>	9,97 <sup>3)</sup>	Anastasi <i>et al.</i> , 2011

\* O= output; I= input

z = sorgo zuccherino; f=sorgo da fibra, ♠ biologico; ♥ convenzionale; ♠ bassi input; ♥ alti input; ♪ I anno; ♪ II-VI anno

<sup>1)</sup> il primo valore si riferisce all'anno di impianto, il secondo al terzo anno; <sup>2)</sup> media di tre ambienti e quattro genotipi; <sup>3)</sup> media dei genotipi con la più alta resa nei tre ambienti di prova.

T1 = taglio annuale; T2 = taglio biennale; T3 = taglio triennale

(Lewandowski *et al.*, 2003). Sono originarie delle regioni tropicali e sub-tropicali dell'Asia, dal Giappone alla Thailandia e delle aree temperate della Nuova Guinea, dove costituiscono le popolazioni di piante erbacee più diffuse. L'ibrido *Miscanthus × giganteus* è stato il primo genotipo introdotto in Europa a scopo ornamentale. In ambito europeo le prime prove sperimentali rivolte a valutare le caratteristiche per la produzione di energia furono avviate nel 1983 nell'ambito del programma di ricerca europeo JOULE. Come per la canna comune l'interesse per

*Miscanthus* spp. è legato alla produttività elevata associata alla modesta richiesta di input colturali, resistenza alle più comuni fitopatie, adattabilità a condizioni ambientali molto diverse, elevata capacità di accumulare carbonio nel suolo. In Europa può essere coltivato in tutti gli ambienti ad eccezione di quelli freddi nemorali (Svezia, Norvegia, Finlandia); nel Mediterraneo meridionale richiede l'irrigazione sia nella fase di insediamento che durante lo sviluppo della coltura (Cosentino *et al.*, 2007a). Negli ambienti europei dove è stato coltivato le condizioni termiche

medie annuali variavano tra 7,5 °C e 17,5 °C, la piovosità tra 500 e 1.000 mm (Scurlock, 1999).

Il miscanto costituisce cespi fitti di culmi sottili alti fino a 400 cm. A differenza di quelli della canna comune, alla fine della stagione di crescita seccano. Il rizoma è anch'esso costituito di sottili rami ognuno dei quali presenta ben evidenti nodi ed internodi. All'altezza dei nodi sono presenti le gemme. I rami portano al loro apice gemme appuntite e ben sviluppate che generano i culmi.

L'impianto allo stato attuale si realizza mediante rizomi. Il trapianto avviene generalmente in primavera, quando la temperatura dell'aria supera i 10-12 °C (Clifton-Brown, 1997). La densità utilizzata è di 1-2 rizomi m<sup>2</sup>. La dimensione del tratto di rizoma può variare da 20 g a 100 g (Scurlock, 1999); prove effettuate in Sicilia dimostrano che tratti con peso fresco inferiore a 10 g (circa 3 g di s.s.) sono in grado di insediarsi perfettamente, ma i tratti di maggiori dimensioni danno vita a un numero più elevato di culmi, più alti e di peso unitario maggiore con ripercussioni positive sullo sviluppo del cespo negli anni successivi (Cosentino *et al.*, 2012a). Le piante micropropagate sono considerate ancora troppo costose rispetto al rizoma e più sensibili a condizioni ambientali subottimali. La raccolta della biomassa si esegue annualmente tra novembre e febbraio, quando la traslocazione dei fotosintetati verso il rizoma è conclusa e l'umidità dei culmi, ormai secchi, è inferiore al 30%.

La produzione di biomassa raggiunge il suo apice e si stabilizza dopo 3-5 anni dall'insediamento. Nel nord e centro Europa la resa varia tra 10 e 25 t ha<sup>-1</sup> (Clifton-Brown, 2000; Zegada-Lizarazu *et al.*, 2010). Nell'Europa meridionale grazie ai valori più elevati della temperatura e della radiazione solare, può produrre fino a 30 t ha<sup>-1</sup> di biomassa secca con l'ausilio dell'irrigazione (Cosentino *et al.*, 2007b), senza la quale la sua sopravvivenza potrebbe essere compromessa. Il deficit idrico causa il disseccamento delle foglie in *M. × giganteus* e *M. sacchariflorus* ma non in *M. sinensis* che mette in atto, invece, una strategia di risparmio idrico (riduzione della conduttanza stomatica) che consente di mantenere attiva la superficie fogliare (Clifton-Brown e Lewandowsky, 2000).

In tre diversi ambienti italiani (Udine, Bologna e Catania), all'interno del programma di ricerca triennale TISEN promosso dal MiPAAF, le produzioni massime raggiunte il terzo anno in condizioni idriche non limitanti sono state di 24,4 t ha<sup>-1</sup> s.s., 28,6 t ha<sup>-1</sup> s.s. e 30,6 t ha<sup>-1</sup> s.s., nei tre ambienti nell'ordine (Cosentino *et al.*, 2005). A partire dal quanto anno la produzione ha cominciato a decrescere. A Catania al quinto anno

la produzione massima è stata di 25,5 t ha<sup>-1</sup> s.s. (Mantineo *et al.*, 2009).

Una prova di lungo periodo (12 anni) realizzata nell'Italia Centrale da Angelini *et al.* (2009) confrontando la produttività e la resa energetica di miscanto e canna comune in condizioni di disponibilità idrica naturale intorno a 300 mm (miscanto) e 400 mm (*Arundo*), con piogge nel corso dell'estate non inferiori a 50 mm, falda idrica non profonda e disponibilità annuale di macronutrienti, ha accertato che le rese massime (superiori a 40 t ha<sup>-1</sup> s.s.) si raggiungono per entrambe le colture il secondo anno. La resa del miscanto declina rapidamente ma mantiene una produttività intorno a 30 t ha<sup>-1</sup> dal secondo al settimo anno, quindi scende ulteriormente e progressivamente; al 12° anno la resa è inferiore a 20 t ha<sup>-1</sup>. La resa media dell'intero periodo è stata pari a 28,7 t ha<sup>-1</sup> s.s. per il miscanto contro 37,7 t ha<sup>-1</sup> s.s. della canna comune.

In generale, nelle prove realizzate in Italia, la produttività del miscanto è risultata costantemente inferiore a quella della canna comune (tra il 24 e il 37%), questo dato trova una giustificazione nelle ricerche di Monti e Zatta (2009) che hanno analizzato la distribuzione e la biomassa del sistema radicale di alcune specie perenni e annuali da energia nel profilo da 0 a 1,2 m. È emerso che il 90% della biomassa radicale del miscanto si sviluppa nei primi 35 cm di suolo, contrariamente a quanto è stato rilevato per la canna comune ed il panico che approfondiscono le radici fino alla massima profondità rilevata.

La risposta alla disponibilità di fertilizzanti non sempre è chiara. Questo dato si giustifica con la caratteristica delle specie rizomatose che a fine ciclo traslocano i nutrienti verso il rizoma per poi mobilitarli nella stagione successiva e renderli disponibili per un nuovo ciclo di sviluppo. Ne discende che nel breve periodo, specie in condizioni di buona fertilità del suolo, la risposta alla concimazione azotata potrebbe risultare scarsa. In ambiente mediterraneo Cosentino *et al.* (2007b) hanno rilevato che l'utilizzazione dell'azoto, in ogni caso, dipende dalla disponibilità idrica e dall'età del cespo. In generale, dosi crescenti di azoto da 0 a 120 unità migliorano l'efficienza d'uso della radiazione solare.

Negli ultimi anni l'attività di ricerca sulla selezione di genotipi *Miscanthus* più adatti alle condizioni ambientali dell'Europa continentale e meridionale. Ricercatori americani e inglesi (Institute of Biological, Environmental and Rural Sciences (Aberystwyth University - Wales - UK) hanno selezionato diverse linee nell'ambito delle specie *M. floridulus*, *M. sinensis*, *M. condensatus*, *M. sacchariflorus*. La valutazione di questi nuovi genotipi è stata effet-

tuata anche negli ambienti caldo-aridi (Catania, 2009-2012) in condizioni non limitanti di disponibilità idrica nei primi due anni, senza irrigazione nel terzo. Come appare nella figura 13 la produzione media dei genotipi di *M. floridulus* e *M. condensatus* nei due anni successivi a quelli di insediamento varia tra 20 t ha<sup>-1</sup> a 36 t ha<sup>-1</sup> s.s. contro produzioni che non superano le 12 t ha<sup>-1</sup> degli altri genotipi, compreso il testimone *Miscanthus* × *giganteus* e alcune varietà già note (Goliath) (Scalici, 2014).

Altrettanto interessanti le prospettive che si aprono con la possibilità di passare alla propagazione gamica, fatto che si è dimostrato possibile negli ambienti meridionali d'Italia dove alcuni genotipi hanno portato a termine la maturazione del seme.

Per il Miscanto sono stati indicati valori del potere calorifico variabili tra 16,4 MJ kg<sup>-1</sup> e 17,7 MJ kg<sup>-1</sup>, una resa energetica variabile da 4,8 nell'anno di impianto, fino ad un massimo di 564 GJ ha<sup>-1</sup> ottenuto con la dose massima di azoto di 200 kg ha<sup>-1</sup> e l'irrigazione (Ercoli *et al.*, 1999) ed un rendimento energetico compreso tra 1,1 del primo anno e 21,1 (tab. 3).

#### Panico (*Panicum virgatum* L.)

Il Panico, famiglia *Poaceae*, è una pianta erbacea perenne a ciclo C4, rizomatosa, originaria del Nord America dove cresce spontanea a tutte le latitudini (dal Canada al Messico). La sua diffusione in ambienti alquanto diversi tra loro è stata favorita dal fatto che la specie si è evoluta in una molteplicità di ecotipi adattati alle condizioni locali (Adler *et al.*, 2006). Questa biodiversità si manifesta in una molteplicità di forme che occorre ben conoscere per procedere alla

diffusione della specie in altri ambienti. La pianta adulta misura da 60 a 200 cm. Come per le altre specie erbacee perenni, si sottolinea che il panico può essere coltivato in terreni marginali e soggetti al pericolo dell'erosione idrica, richiede bassi input colturali. Si caratterizza per un'elevata efficienza d'uso dell'acqua, grazie ad un apparato radicale profondo (Monti e Zatta, 2009; Zegada-Lizarazu *et al.*, 2010), che lo rendono adatto alla coltivazione anche in regioni caldo aride. I benefici sono legati al rilascio nel suolo di elevate quantità di sostanza organica (*carbon storage*), dal momento che, annualmente, rinnova il suo apparato radicale e la biomassa aerea.

A differenza di *Arundo* e miscanto può essere propagato per seme. Il ciclo colturale varia, in relazione al genotipo, da 3 a 6 mesi. Le piante sono caratterizzate da un'elevata capacità di accostamento. La semina si esegue in primavera. Data la ridotta dimensione del seme (mediamente 1 g/1.000 semi) la semina è superficiale (1-3 cm); la ridotta energia germinativa rende spesso necessario l'irrigazione (Parrish e Fike, 2005). La produzione di sostanza secca varia in relazione agli ambienti, i valori indicati in letteratura oscillano tra 6 t ha<sup>-1</sup> (in terreni poco fertili del nord Europa) fino a 25 t ha<sup>-1</sup> nei suoli fertili del sud Europa (Scarcella e Mastroilli, 2011). La produzione massima si raggiunge al 3°- 4° anno, la persistenza è stimata in circa 10 anni (McLaughlin *et al.*, 1999). McLaughlin *et al.* (2005) alla fine di una ricerca durata 10 anni che ha interessato tutto il territorio degli Stati Uniti hanno fornito un contributo decisivo alla individuazione dei genotipi più adatti per le specifiche condizioni ambientali, per definire le pratiche coltura-

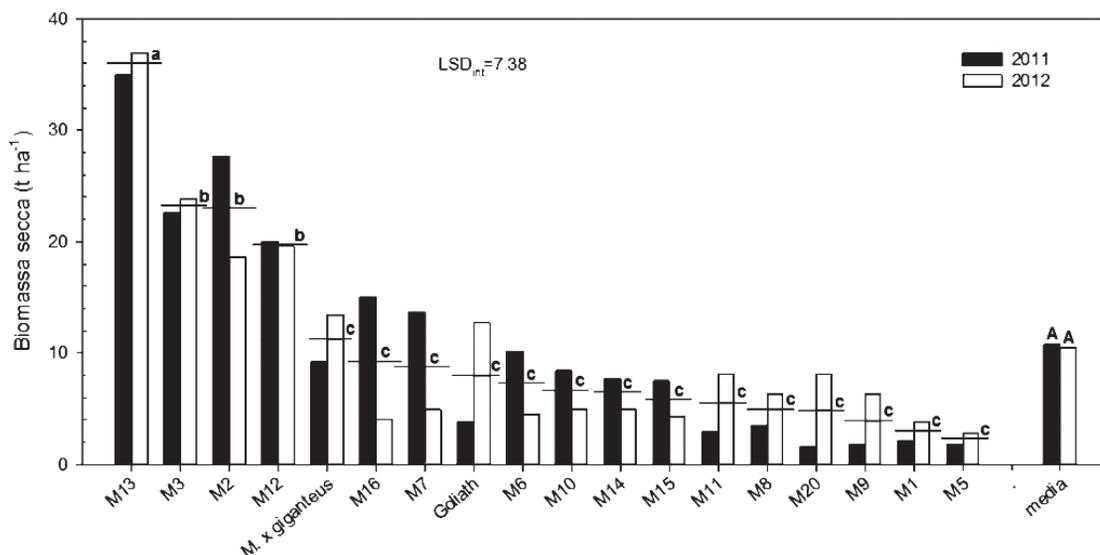


Fig. 13 - Produzione di biomassa nel biennio 2011-2012 dei genotipi di Miscanto allo studio. (*M. floridulus*: M2, M3, M11, M12; *M. sinensis*: M5, Goliath, M20; *M. condensatus*: M13; *M. sacchariflorus*: M9, M1, M6, M7, M8, M10, M14, M15, M16).

Fig. 13 - Biomass production of *Miscanthus* genotypes in a two-year trial. (*M. floridulus*: M2, M3, M11, M12; *M. sinensis*: M5, Goliath, M20; *M. condensatus*: M13; *M. sacchariflorus*: M9, M1, M6, M7, M8, M10, M14, M15, M16).



Fig. 14 - *Saccharum spontaneum* L. spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hackel in condizioni di pieno soddisfacimento idrico (a sinistra) e non irrigato (a destra) (Foto DISPA).

Fig. 14 - *Saccharum spontaneum* L. spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hackel in fully irrigated (left) and rainfed (right) conditions (Photo DISPA).

li più efficaci al fine di ottenere rese elevate e rendere sostenibile la coltivazione nei vari contesti. Prove realizzate in diversi ambienti degli Stati Uniti riportano produzioni massime intorno a 17 t ha<sup>-1</sup> s.s. (Wright e Turhollow, 2007). A Bologna prove di pieno campo hanno fatto rilevare produzioni medie non superiori a 15 t ha<sup>-1</sup> s.s. (Monti *et al.*, 2008). Ulteriori ricerche hanno comunque evidenziato perdite di biomassa nella fase di raccolta (almeno il 30%) (Monti *et al.* 2001), per cui le produzioni con raccolta meccanizzata non superano normalmente le 10 t ha<sup>-1</sup> s.s.

In generale le produzioni risultano inferiori rispetto a quelle di canna comune, sorgo, e miscanto nell'Europa meridionale e del miscanto in nord Europa (Parrish *et al.*, 2012), ma rispetto alle specie citate, la convenienza deriverebbe dal complesso della valutazione agronomica, economica e ambientale: si propaga per seme, richiede investimenti ridotti in termini di macchine agricole e mezzi di produzione (Parrish *et al.*, 2012), per molte categorie di impatto ambientale derivante dalla sua coltivazione risulta più vantaggioso rispetto alle più importanti erbacee perenni (Monti *et al.*, 2009; Fazio e Monti, 2011).

Il potere calorifico del panico si aggira intorno a 17,4 MJ kg<sup>-1</sup>, la sua resa energetica è compresa tra 152 e 427 GJ ha<sup>-1</sup>. Per l'efficienza energetica Venturi e Venturi (2003) riportano un ampio campo di variabilità, compreso tra 8 e 54 (tab. 3).

#### Canna d'Egitto [*Saccharum spontaneum* (L.) spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hack.]

Tra le specie spontanee della flora mediterranea, oltre alla canna comune, una in particolare è stata ritenuta idonea per la produzione di bioenergia: *Saccharum spontaneum* (L.) spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hack. o canna d'Egitto. Si tratta di una pianta perenne, rizomatosa, a ciclo C4 (progetto OPTIMA, dati non pubblicati), con culmi eretti (200-400 cm), robusti, pieni ed internodi solidi, molto simile nell'aspetto al miscanto (figg. 14 e 15). È originaria di



Fig. 15 - Tratto di rizoma di *Saccharum spontaneum* L. spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hackel (Foto DISPA).

Fig. 15 - Rhizome cutting of *Saccharum spontaneum* L. spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hackel (Photo DISPA)

ambienti caldo-aridi, predilige quindi inverni miti ed estati calde tipiche dell'areale mediterraneo. È classificata come pianta xerofita, mesofita o idrofita, dal momento che può adattarsi a condizioni ambientali alquanto diverse. È caratterizzata da rapido insediamento ed accrescimento, elevata copertura del suolo ed elevata capacità di esplorazione degli strati di suolo più profondi. Quest'ultimo carattere consente appunto la sua sopravvivenza a prolungati periodi di siccità. Si propaga per tratti di rizoma del peso variabile tra 100 e 300 g. Il trapianto si effettua in primavera alla densità di 1-2 rizomi m<sup>2</sup>. La raccolta della biomassa avviene durante l'inverno. Negli ambienti caldo-aridi mediterranei, in suoli profondi e senza apporti idrici oltre quelli naturali (in media 500 mm anno<sup>-1</sup>) *Saccharum spontaneum* è stato in grado di fornire produzioni vicine alle 20 t ha<sup>-1</sup> di biomassa secca già a partire dal secondo anno di coltivazione (Cosentino *et al.*, 2012c) e maggiori di 30 t ha<sup>-1</sup> al terzo anno (progetto OPTIMA, dati non pubblicati) (fig. 16). È emerso, inoltre, che la restituzione del 50% dell'evapotraspirazione migliora significativamente la produttività della specie e non determina differenze significative rispetto alla restituzione del 100% dell'evapotraspirazione (Cosentino *et al.*, 2012d). Gli studi sulla bioconversione energetica hanno evidenziato l'elevato contenuto in polisaccaridi strutturali con buona attitudine alla fermentazione per la produzione di bioetanolo di seconda generazione. La resa in etanolo è in linea con quella di miscanto e canna comune (Scordia *et al.*, 2014) e superiore a quella di cardo o panico (tab. 4).

#### Cardo (*Cynara cardunculus* L. var. *altilis* DC.)

Il cardo (fig. 17), come altre specie del genere *Cynara* (il cardo selvatico, *C. cardunculus* L. var. *sylvestris* Lamk e il carciofo, *C. cardunculus* L. var.

*scolymus* (L.) Fiori) è una pianta erbacea perenne e vivace, famiglia *Asteraceae*, sottofamiglia *Tubuliflorae*, tribù *Cynareae*, ciclo foto sintetico C3. È originario del bacino del Mediterraneo, perfettamente adattato alle condizioni caldo-aride di questo ambiente. In Italia il cardo è tradizionalmente impiegato come ortaggio di cui si utilizzano i germogli e le foglie immature (cardo gobbo). Recentemente è stato proposto come coltura da biomassa per gli ambienti del sud Europa caratterizzati da elevata aridità estiva, per la produzione di carburanti solidi (filiera bio-termo

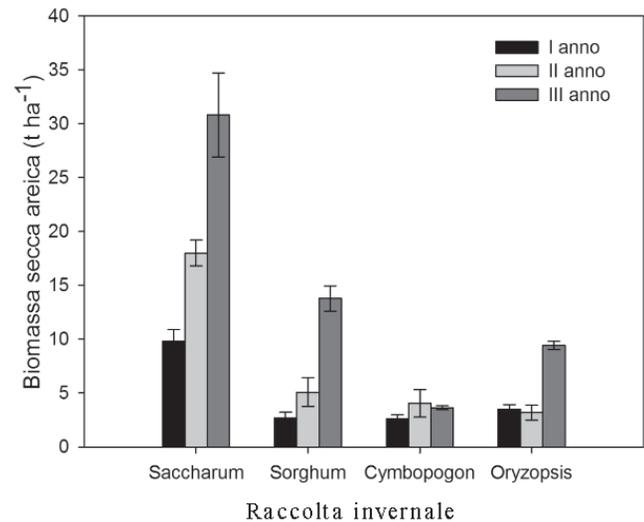


Fig. 16 - Produzione di biomassa secca areica di alcune specie graminacee spontanee nell'ambiente caldo arido mediterraneo [*Saccharum spontaneum* L. spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hackel; *Sorghum halepense* L. Pers; *Hyparrhenia hirta* (L.) Stapf (sin. *Cymbopogon hirtus*); *Oryzopsis miliacea* (L.) Asch. & Schweinf] (Cosentino *et al.*, 2012c; progetto OPTIMA).

Fig. 16 - Aboveground dry biomass yield of some grass species widespread in semi-arid Mediterranean environment [*Saccharum spontaneum* L. spp. *aegyptiacum* (Willd.) Hackel; *Sorghum halepense* L. Pers; *Hyparrhenia hirta* (L.) Stapf (sin. *Cymbopogon hirtus*); *Oryzopsis miliacea* (L.) Asch. & Schweinf] (Cosentino *et al.*, 2012c; OPTIMA project).

Tab. 4 - Principale contenuto in polisaccaridi di colture studiate per la produzione di bioetanolo di prima e seconda generazione.

Tab. 4 - Main polysaccharides content of some studied crops for first and second generation bioethanol production.

Coltura	Amido/ saccarosio (% peso/peso)	Glucani (% peso/peso)	Xilani (% peso/peso)	Resa teorica in etanolo (kg t <sup>-1</sup> )	Bibliografia
<i>Bioetanolo di I generazione</i>					
Frumento duro	65-75	-	-	235-288	Carvalho <i>et al.</i> , 2006
Barbabetola da zucchero	16	-	-	74-84	Venturi e Venturi, 2003
Mais	60-70	-	-	381-475	Carvalho <i>et al.</i> , 2006
Sorgo zuccherino	16	-	-	75-90	Venturi e Venturi, 2003
<i>Bioetanolo di II generazione</i>					
<i>Arundo</i>	-	34,6	20,4	329,2	Scordia <i>et al.</i> , 2012;2013b
<i>Miscanthus</i>	-	41,0	19,9	361,8	Scordia <i>et al.</i> , 2013a
<i>Saccharum</i>	-	36,8	21,5	350,8	Scordia <i>et al.</i> , 2010
Cardo	-	33,8	14,7	276,7	Ballesteros <i>et al.</i> , 2008
Panico	-	32,0	17,9	284,6	Xu <i>et al.</i> , 2010



Fig. 17 - Cardo (*Cynara cardunculus* L. var. *altilis* D.C.)  
(Foto DISPA).

Fig. 17 - Cardoon (*Cynara cardunculus* L. var. *altilis* D.C.)  
(Photo DISPA).

elettrica) e liquidi (carburanti di seconda generazione e biodiesel dall'olio contenuto negli acheni) come pure per altri usi industriali (Gominho *et al.*, 2001).

Il cardo è una pianta di dimensioni ragguardevoli, può raggiungere un'altezza di 3 metri e 1,5 m di diametro (Fernández *et al.*, 2006). La capacità di sopravvivere ai lunghi periodi di deficit idrico estivo è legata a meccanismi ben noti di *drought escape* (sfuggenza all'aridità) (Fernández *et al.*, 2006; Kamenetsky, 2009) che si traducono nel disseccamento completo della parte aerea della pianta al sopraggiungere dell'estate; il rizoma, invece, resta vitale. Il ciclo biologico del cardo è ordinariamente vernino-primaverile. La semina degli acheni si effettua preferibilmente in autunno quando la temperatura dell'aria supera i 15 °C (Fernández *et al.*, 2006), con temperature inferiori la germinazione potrebbe essere compromessa. Se l'impianto della coltura avviene in primavera, l'irrigazione diventa un intervento ordinario. Negli anni successivi il 'risveglio' della pianta avviene sempre in autunno dopo l'avvento delle piogge, passa l'inverno allo stadio di rosetta, in primavera sviluppa un robusto scapo florale e un numero elevato di capolini, quindi, dopo la maturazione degli acheni, in piena estate, la parte epigea dissecca.

Questi cicli si ripetono per più anni, assicurando al cardo una sopravvivenza che secondo Fernández e Curt (2005) supera i 15 anni. Anche le ricerche di Angelini *et al.* (2009) in Toscana confermano questa longevità. Secondo Gherbin *et al.* (2001), per contro, negli ambienti della Basilicata, caratterizzati da una

piovosità media inferiore a quella Toscana, la produzione si riduce drasticamente nell'arco di un quinquennio; questo dato è confermato anche nelle ricerche realizzate in Sicilia (Mantineo *et al.*, 2009).

In Italia le cultivar più diffuse sono 'Bianco avorio', 'Gobbo di Nizza', 'Bianco pieno migliorato', 'Pieno inerme' e 'Gigante di Romagna' (Mauromicale e Mauro, 2011). I suddetti autori ritengono che specifici programmi di costituzione varietale, potrebbero migliorare notevolmente l'uniformità, la produzione di biomassa, di acheni e il contenuto in acidi grassi di questi ultimi. A tale proposito alcuni incroci effettuati in Sicilia tra carciofo, cardo e cardo selvatico fanno ben sperare sulla possibilità di creare nuovi genotipi con produttività più elevata in termini di biomassa lignocellulosica e seme; particolarmente interessante il genotipo ottenuto dall'incrocio di carciofo e cardo selvatico (Ierna e Mauromicale, 2010). La maggiore produzione deriva dal più elevato numero di fusti per pianta (Ierna *et al.*, 2012).

Il cardo, pur adattandosi a un ampio *range* di caratteristiche pedologiche, estrinseca al massimo le sue potenzialità in terreni di medio impasto, profondi, privi di scheletro, con pH prossimo alla neutralità e con buona capacità di ritenuta idrica. La pianta soffre i ristagni idrici, tuttavia mostra buona tolleranza alle variazioni di pH e alla salinità (Mauromicale e Mauro, 2011). Il fabbisogno idrico è stimato in circa 400-500 mm che negli areali mediterranei può essere soddisfatto dalle piogge.

La produzione di biomassa può variare in rapporto al genotipo, al regime termo-pluviometrico al livello di input colturali; risulta più bassa nell'anno di impianto, per poi crescere e stabilizzarsi negli anni successivi. Fernández *et al.* (2006) stimano che con una piovosità di 500 mm la produzione del cardo può variare tra 10 e 20 t ha<sup>-1</sup> s.s.. Negli ambienti dell'Italia meridionale le produzioni medie raggiungono valori di oltre 24 t ha<sup>-1</sup> di sostanza secca soprattutto nelle pianure costiere, grazie al più favorevole decorso termometrico durante il periodo autunno-vernino (Mauromicale e Mauro, 2011). Una prova della durata di 10 anni nella Spagna centrale, senza interventi irrigui, ha prodotto in media 14 t ha<sup>-1</sup> s.s. con valori minimi (3,4 t ha<sup>-1</sup>) e massimi (25 t ha<sup>-1</sup>) in corrispondenza di 280 mm e 765 mm di pioggia rispettivamente (Fernández *et al.*, 2006). Angelini *et al.* (2009) in una ricerca della durata di undici anni hanno rilevato una produzione stabile dal secondo al quinto anno (nella media dei due genotipi allo studio circa 20 t ha<sup>-1</sup> s.s.) che si è successivamente attestata intorno a 10 t ha<sup>-1</sup> s.s.

Alla raccolta, la biomassa presenta un contenuto medio di umidità compreso tra il 15 e il 20%; le foglie

rappresentano mediamente il 40-50%, i fusti il 10-30%, i capolini il 25-30%. Gli acheni rappresentano l'8-10% della biomassa totale e la resa di questi oscilla tra 1,5 e 2,5 t ha<sup>-1</sup> di sostanza secca (Mauromicale e Mauro, 2011).

Il potere calorifico del cardo risulta più basso rispetto ad *Arundo* e miscanto, tra 14,1 e 16,8 MJ kg<sup>-1</sup>. La resa energetica oscilla tra 119 e 365 GJ ha<sup>-1</sup> e il rendimento energetico risulta compreso tra 7 e 31 in relazione a fattori colturali diversi (tab. 3).

#### *Le colture legnose a ciclo breve (Short Rotation Coppice)*

Gli impianti di arboricoltura dedicati alla produzione di energia sono i cedui a breve rotazione, meglio noti come *Short Rotation Coppice* (SRC). Sono coltivazioni di specie forestali a rapido accrescimento (pioppi, salici, robinia, eucalipto, ecc.), con impianto di durata variabile tra 10 e 20 anni, con un sesto variamente fitto (oltre 6.000 piante ha<sup>-1</sup>), ceduate e raccolte ad intervalli regolari di 2 o più anni rispetto alle più tradizionali utilizzazioni per legno da opera. La ricerca effettuata in Italia ha evidenziato le buone caratteristiche qualitative della biomassa di queste specie per la conversione termochimica. Più in generale sono considerate interessanti per la resa elevata, l'ottima qualità per la combustione, il basso costo della biomassa (Kauter *et al.*, 2003).

Le specie più idonee sono il pioppo (*Populus alba*, *P. nigra*, *P. deltoides*, *P. × euramericana*) già utilizzato nella Pianura Padana per la tradizionale arboricoltura da legno, il salice (*Salix alba* L.) anch'esso adatto soprattutto agli ambienti settentrionali, l'eucalipto (*Eucalyptus globosus* subsp. *bicostata* Kirp, *E. camaldulensis* Dehnh.) per le regioni del Centro-Sud, e la robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) nelle condizioni marginali delle aree collinari interne del Sud come del Nord (Bonari, 2001). La resa in biomassa dipende dalla specie/clone, densità d'impianto, clima, età e pratiche colturali.

Attualmente il pioppo, famiglia *Salicaceae*, è la specie per la quale si dispone di maggiori informazioni per quanto riguarda genotipi e tecnica colturale. Negli ultimi 10 anni progressi sono stati compiuti sia nella selezione di cloni adatti ai cedui a turno breve, a crescita elevata, resistenza alle principali avversità, che hanno portato la produttività media intorno a 12-15 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> con punte di 25 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> negli ambienti e nelle condizioni più idonee e densità d'impianto tra 6.700 e 10.000 piante per ettaro (Facciotto e Bergante, 2011).

Il CRA-FLP (ex Istituto sperimentale per la piopicoltura) come pure istituzioni private, negli ultimi

anni hanno avviato programmi di selezione di nuovi cloni a duplice attitudine (industriale ed energetico). I criteri di selezione sono stati oltre che la resistenza ad alcune fitopatie, l'elevata produzione di materiale lignocellulosico in tempi brevi (2-5 anni), la capacità di ricaccio dopo ripetute ceduzioni. Le selezioni recenti sono state realizzate con le specie *P. alba* e *P. × canadensis* (Facciotto e Bergante, 2011).

La robinia, famiglia *Fabaceae*, è la terza latifolia più utilizzata al mondo (intorno a un milione di ettari) (Rosso *et al.*, 2011) grazie alla sua versatilità (legno da opera, pianta mellifera, ornamentale). Più recentemente è stata valutata anche per gli impieghi energetici. È una specie originaria dell'America settentrionale e naturalizzata in Europa già nel XVII secolo dove è giunta grazie al naturalista-farmacista Jean Robin. In Italia è diffusa a quote variabili da 0 a 1.000 metri s.l.m.. È considerata invasiva a causa della facile propagazione per seme e alla forte capacità pollonifera. È specie rustica con buona capacità di adattamento a condizioni pedoclimatiche difficili, suoli poveri, deficit idrico. È specie azotofissatrice. Ha portamento arboreo (altezza fino a 25-30 metri) o arbustivo. La selezione di tipi da legno è stata realizzata soprattutto in Ungheria. Questi, utilizzati in turni brevi (5 anni) per la produzione di biomassa hanno fatto registrare produzioni superiori a quelle della specie tipica (Rosso *et al.*, 2011). Le ricerche del CRA-FLP di Casale Monferrato hanno rilevato che negli allevamenti a ceduo breve, con sesto d'impianto di 8.000 e 12.000 piante ha<sup>-1</sup>, la produzione del primo turno (primo biennio) è stata di 11,5 e 12,5 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> di s.s. rispettivamente; quella del secondo turno di 12,5 e 9,1 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> di s.s. rispettivamente (Facciotto *et al.*, 2007). Dunque le densità elevate risultano non adatte a questa specie a causa della competizione per la luce che si genera tra i ricacci. In prove di lungo periodo sempre del CRA-FLP (quattro cicli di produzione, 9 anni) la produzione media annua è risultata pari a 12,6 t ha<sup>-1</sup>.

Gli eucalipti prediligono temperature medie annue tra 12 e 18 °C, la richiesta di acqua è di circa 700 mm annui attinta dalle riserve del suolo. La ricerca svolta in Italia negli anni '90 ha individuato le specie più interessanti per il nostro Paese, che ha portato alla selezione di 15 nuovi cloni da parte del CRA-PLF di Roma. Altre specie oltre quelle prima citate sono considerate adatte alla coltivazione: *E. Gunnii*, *E. gomphocephala*, *E. maidenii*, *E. occidentalis*, *E. × trabuttii*, *E. vicinali*. Le densità d'impianto adottate nei sistemi colturali radi e fitti sono rispettivamente 1.600 e 5.500 piante ha<sup>-1</sup>. Con i migliori cloni sono state raggiunte produzioni di biomassa secca di 22-27 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> (Mughini *et al.*, 2011).

I momenti critici per gli impianti di arboricoltura sono quelli dell'insediamento (i primi due anni) durante i quali bisogna assicurare il controllo delle infestanti, la disponibilità idrica e di elementi nutritivi. Sebbene parte della biomassa venga restituita al suolo con le foglie e le radici morte, i tagli frequenti potrebbero impoverire il suolo di elementi nutritivi, specialmente se si tratta di suoli poveri come quelli tendenzialmente sabbiosi, per cui è necessario provvedere periodicamente alla restituzione con i residui colturali o le concimazioni. La raccolta della biomassa si effettua durante il periodo invernale, quando la traslocazione verso le radici dei nutrienti e dei carboidrati si è completata. La raccolta della biomassa può avvenire secondo due differenti metodologie, utilizzando una vasta gamma di macchine in commercio: raccolta e cippatura in un unico passaggio (falciatrici-caricatrici agricole equipaggiate con testate da biomassa che raccolgono e cippano le piante scaricando il prodotto sui rimorchi delle trattrici agricole) o abbattimento e cippatura in due fasi distinte (con macchine abbattitrici che eseguono il taglio e cippatrici equipaggiate con testata pick-up per la raccolta e la cippatura delle piante in andane) (Pari e Civitarese, 2011).

Per il pioppo Nassi o Di Nasso *et al.* (2010) hanno stimato nell'arco di 12 anni rese energetiche medie annue comprese tra 171,9 GJ ha<sup>-1</sup> e 298,7 GJ ha<sup>-1</sup> in relazione al taglio annuale o triennale e una corrispondente efficienza energetica media annua compresa tra 19,3 e 60,8 (tab. 3).

#### *Colture da zuccheri per bioetanolo* Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)

Il sorgo è una *Poacea* a ciclo annuale, originaria del Sudan, a ciclo fotosintetico C4, particolarmente efficiente nell'intercettare e convertire la radiazione luminosa, specie negli ambienti caratterizzati da elevate temperature ed intensità luminosa come quelli mediterranei, mentre non si adatta alle latitudini elevate (Cosentino *et al.*, 2012b). Altre caratteristiche interessanti di questa specie sono la rapidità di crescita, la resistenza alla siccità, la grande adattabilità a condizioni pedoclimatiche diverse, la facilità di coltivazione.

L'elevata plasticità genotipica e fenotipica ne consente la coltivazione per la produzione di foraggio, granella, per l'estrazione di zucchero e prodotti derivati (alcool), polpa di cellulosa, per la fabbricazione di carta e, soprattutto in passato, anche per la produzione industriale ed artigianale di scope per uso domestico. Negli ultimi anni l'attenzione si è focalizzata sulla produzione di biomassa per energia (bioetanolo di prima e seconda generazione, biocombustibili

per la produzione di elettricità). I tipi più interessanti a questo scopo sono quelli a sviluppo elevato che accumulano biomassa lignocelulosica nella pianta, zuccheri semplici nel culmo (sorgi zuccherini) o caratterizzati da culmi particolarmente ricchi di fibra (sorgi da fibra). Dal punto di vista morfologico e dell'accumulo di sostanza secca, tra sorgo da fibra e sorgo zuccherino non ci sono differenze sostanziali, esiste però nei due tipi una diversa destinazione del carbonio organico durante la fotosintesi; nel tipo da fibra prevale la produzione di carboidrati strutturali, in particolare cellulosa; nel tipo da zucchero, almeno il 30% di tutta la sostanza secca accumulata è costituito da zuccheri semplici come saccarosio, glucosio e fruttosio (Gosse, 1996).

I culmi possono raggiungere altezze variabili da 2 a 5 metri e un diametro alla base fino a 5 cm. Le foglie sono caratterizzate da un numero elevato di stomi di ridotte dimensioni che insieme alla presenza di uno strato di cutina molto sviluppato conferiscono al sorgo la capacità di traspirare poco e quindi di resistere a condizioni di deficit idrici prolungati (arido resistenza). Il sistema radicale profondo favorisce l'utilizzo delle risorse idriche del suolo, migliorando l'efficienza d'uso dell'acqua e degli elementi nutritivi (Monti e Zatta, 2009).

Il ciclo colturale è primaverile estivo, la sua durata varia da poco meno di 100 giorni a oltre 150 giorni. I genotipi attualmente in commercio provengono soprattutto dal Nord-Europa e dagli Stati Uniti, hanno un ciclo medio-tardivo, con raccolta nella seconda metà di settembre. In ambiente mediterraneo la coltivazione del sorgo non può prescindere dall'irrigazione. Il fabbisogno idrico dipende dalla durata del ciclo. Ai fini del risparmio idrico sono più indicati i genotipi con una durata del ciclo non superiore a 110 giorni (medio-precoci). Prove realizzate in Sicilia (dati non pubblicati) hanno dimostrato che il maggiore risparmio idrico si realizza con genotipi precoci (100 giorni) seminati nell'estate inoltrata (luglio) che possono avvantaggiarsi delle piogge autunnali.

La coltivazione è annuale, si avvale di una gamma elevata di varietà ed ibridi che negli ultimi anni sono stati selezionati a fini energetici. L'impianto della coltura avviene per seme. Le sue esigenze idriche sono, come detto, ridotte grazie ai bassi coefficienti di evapotraspirazione e le esigenze nutritive (azoto) inferiori circa del 40% rispetto alle altre specie da etanolo (barbabietola da zucchero, mais). I risultati delle numerosissime ricerche italiane indicano rese in biomassa secca tra 16 e 38 t ha<sup>-1</sup> (nel nord), tra 18 e 28 t ha<sup>-1</sup> (nel centro), tra 14 e 45 t ha<sup>-1</sup> (nel sud) (Cosentino *et al.*, 2007a).

Per il sorgo da fibra sono riportati valori del potere calorifico compresi tra 14,1 MJ kg<sup>-1</sup> (Di Candilo *et al.*, 2005a e b) e 16,9 MJ kg<sup>-1</sup> (Cosentino *et al.*, 2002; Venturi e Venturi, 2003). La resa energetica del sorgo da fibra varia tra 238 GJ ha<sup>-1</sup> (Cosentino *et al.*, 2002) e 494 GJ ha<sup>-1</sup> (Venturi e Venturi, 2003) e quella del sorgo zuccherino tra 118 GJ ha<sup>-1</sup> (Monti e Venturi, 2003) e 409 GJ ha<sup>-1</sup> (Venturi e Venturi, 2003). Per il sorgo da fibra vengono indicati valori di efficienza energetica compresi tra 6,8 (Cosentino *et al.*, 2002) e 39 (Venturi e Venturi, 2003); valori lievemente più elevati si registrano per il sorgo zuccherino, con un campo di variabilità compreso tra 6 e 32 secondo gli stessi autori (tab. 3).

#### *Colture da olio per biodiesel*

##### *Brassica carinata* A. Braun

*Brassica carinata* (fig. 18) è una oleaginosa erbacea a ciclo annuale, famiglia *Cruciferae*. La specie è meno diffusa della colza (*Brassica napus* var. *oleifera* D.C.) perché coltivata quasi esclusivamente negli ambienti caratterizzati da clima caldo-arido. Essa, infatti, è originaria degli altipiani etiopici. È studiata dagli anni '90 nell'ambito di ricerche promosse dal MIPAAF sulle specie oleaginose. L'interesse per questa specie è cresciuto anche in relazione alla particolare composizione acidica del suo olio di estrazione, ricco di acido erucico e linolenico che lo renderebbero particolarmente indicato per usi industriali (Appelqvist, 1971; Sonntag, 1991). L'elevato contenuto di metaboliti secondari (glucosinolati) presenti nelle farine di estrazione potrebbe consentirne una ulteriore utilizzazione industriale per la produzione di "bio-polimeri" (Gimsing e Kirkegaard, 2009). I gluco-

sinolati, inoltre, sono ritenuti responsabili di effetti antifungini e antibatterici, allelopatici, inibitori lo sviluppo di nematodi (*Meloidogyne incognita*). Sono stati documentati, inoltre, effetti agronomici positivi della precessione culturale realizzata con brassicacee sulle caratteristiche fisiche (struttura, sofficità) e chimiche (rilascio di elementi nutritivi) del suolo e sulla produzione della coltura in successione (Kirkegaard *et al.*, 1994; 2008)

Sono state valutate a questo scopo varietà e linee di *Brassica napus* HEAR (*High Erucic Acid Rapeseed*), di *B. carinata*, *B. juncea*, *B. rapa*, *Sinapis alba*, *Crambe abyssinica*. La sperimentazione condotta in Italia ha messo in evidenza soddisfacenti livelli produttivi soprattutto di *Brassica carinata* specie caratterizzata da precocità di fioritura, resistenza alla deiscenza delle silique, all'allettamento, resistenza alle principali avversità biotiche, allo stress idrico, che si sono tradotti nella maggiore stabilità produttiva rispetto alla colza (Cardone *et al.*, 2003; Copani *et al.*, 2007). Il contenuto di olio nei semi e di acido erucico nell'olio è risultato quasi sempre inferiore nella *carinata* rispetto alla *napus*, ma la resa in olio non si è discostata da quella della colza.

La concimazione azotata rappresenta la voce di spesa più rilevante che può essere abbattuta adottando precessioni culturali con leguminose. La tecnica culturale risulta perfettamente compatibile con il parco macchine disponibile presso le aziende cerealicole.

*B. carinata* è una specie erbacea a ciclo annuale. L'apparato radicale è di tipo fittonante con scarse ramificazioni, ma profondo, in grado di esplorare meglio di *B. napus* il suolo e attingere meglio l'acqua. La pianta può arrivare a superare l'altezza di 2 m.



Fig. 18 - Una prova sperimentale di *Brassica carinata* nella provincia di Enna (Foto DISPA).  
Fig. 18 - *Brassica carinata* experimental field in the Enna province (Photo DISPA).

Il contenuto di olio dei semi supera quasi sempre il 40%. Gli acidi grassi maggiormente presenti nella frazione lipidica dell'olio sono l'erucico (dal 35 al 48%), il linoleico (dal 15 al 19%), l'oleico dal 10-15% ed il linolenico dal 9-15%. Il contenuto proteico medio è pari al 17% (Anastasi *et al.*, 2011).

Il ciclo biologico di *B. carinata* è autunno-primaverile. La durata media del ciclo colturale è di circa 170 giorni, con oscillazioni in relazione al genotipo, alle condizioni ambientali e all'epoca di semina, che possono variare da un minimo di 130 giorni ad un massimo di 200 giorni (Copani *et al.*, 2009; 2011). *B. carinata* non richiede la vernalizzazione (il passaggio attraverso un periodo di freddo che assicuri l'induzione fiorale).

La coltura predilige gli ambienti caldo-aridi più che quelli di tipo continentale. Le ricerche effettuate in Sicilia indicano che nella pianura costiera le produzioni di *B. carinata* ed il contenuto medio di olio superano quelle di *B. napus*.

Precipitazioni annue di 450 mm con punte intorno a 600 mm, tipiche degli ambienti meridionali dell'Italia appaiono idonee a soddisfare le esigenze della coltura.

In Italia la ricerca si è avvalsa di genotipi selezionati dall'Università di Pisa in collaborazione con CRA-CIN di Bologna e commercializzate da Cerealtoscana (ora Triumph Italia): CT 180, CT 204, CT 207, ISCI 7, ISCI 20. Questi genotipi saggiati in diversi ambienti, sono apparsi differenti per la durata del ciclo, per la produttività e il contenuto di acidi grassi. Nelle prove realizzate in Sicilia CT 180 è stata la più precoce, completando il ciclo biologico in 185 (pianura) e 210 giorni (collina); CT 207 la più tardiva con un ritardo di circa 10-15 giorni rispetto alla precedente (Anastasi *et al.*, 2011; Copani *et al.*, 2009).

La produzione di seme può variare in maniera significativa, in relazione ad alcune scelte di ordine agronomico (epoca di semina, genotipo) e ai fattori meteorologici. Nelle prove effettuate in Sicilia tra il 2007 e il 2009 la produzione areica media di seme è stata di quasi 2 t ha<sup>-1</sup>, sia a Catania (pianura) che a Enna (collina). Più a sud a Ispica (RG), ISCI 7 ha raggiunto 3 t ha<sup>-1</sup>. Nella stessa prova il migliore risultato in termini di biomassa residua è stato ottenuto a Ispica con quasi 7 t ha<sup>-1</sup>. In generale, gli ambienti di pianura, caratterizzati da un andamento termico con valori delle temperature massime e minime più elevati rispetto alla collina, hanno favorito l'accumulo dell'olio. A Catania e Ispica (pianura), infatti, il contenuto di olio nei semi è stato pari al 39,5% e 41,0% rispettivamente, valori significativamente più elevati di quello di Enna (collina) (34,1%). Il valore massimo è

stato ottenuto a Ispica (CT 204, 44,5%), il più basso a Enna (CT 204, 29,0%). La resa in olio più elevata è stata ottenuta a Ispica (1,1 t ha<sup>-1</sup>).

La letteratura relativa alla qualità dell'olio ai fini della utilizzazione per biodiesel ha messo in evidenza la formazione di un basso livello di particolato rispetto all'omologo derivato dal petrolio (diesel) nel corso della combustione, ma un più alto livello di emissioni di NOx. Le emissioni che accompagnano la combustione presentano più bassi valori di SOOT (particelle carboniose derivanti dalla incompleta combustione dell'olio) e una più alta frazione di particolato solubile che rende le emissioni meno pericolose (Cardone *et al.*, 2003). Ramos *et al.* (2009) hanno fatto rilevare, inoltre, come l'elevato contenuto di acidi grassi polinsaturi (più elevati in *B. carinata* che in *B. napus*) rendano questo olio meno adatto alla produzione di biodiesel così come specificato nelle norme standard europee (UNE-EN 14214:2003. *Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines*).

In prove condotte a Catania e Ispica (RG) su *B. carinata* (Anastasi *et al.*, 2011) è stato rilevato un contenuto medio di energia della biomassa prodotta pari a 93 GJ ha<sup>-1</sup>, con variazioni comprese tra 18 GJ ha<sup>-1</sup> (seme) e 13 GJ ha<sup>-1</sup> (biomassa residua) a Catania (ISCI 7) e 74 GJ ha<sup>-1</sup> (seme) e 111 GJ ha<sup>-1</sup> (biomassa residua) a Ispica con lo stesso genotipo. La resa energetica è variata tra 16,7 GJ ha<sup>-1</sup> (ISCI 7) e 135,2 GJ ha<sup>-1</sup> (CT 180) a Catania; tra 47,8 GJ ha<sup>-1</sup> (CT 207) e 74,2 (CT 180) a Enna; tra 129,1 GJ ha<sup>-1</sup> (CT 207) e 171,2 GJ ha<sup>-1</sup> (ISCI 7) a Ispica. L'efficienza energetica più elevata è stata raggiunta con i genotipi che hanno fatto rilevare la resa più alta: 10,2 (CT 180, Catania), 7,1 (CT 204, Enna), 12,6 (ISCI 7, Ispica).

## Aspetti ambientali

### CO<sub>2</sub> risparmiata

Il punto di forza attribuito alla bioenergia è che essa consente di non utilizzare i carburanti fossili, ha un bilancio della CO<sub>2</sub> pari a zero (nella fase di combustione del biocarburante è emessa la stessa che è stata accumulata durante il processo fotosintetico), migliora il bilancio del carbonio nel suolo (accumulo di sostanza organica) (Popp *et al.*, 2014), riduce in certi casi la quantità di inquinanti che la combustione riversa nell'atmosfera (particolato).

Il risparmio in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> verso l'atmosfera può essere considerato, probabilmente, il più significativo per l'attenzione riservata al contenimento delle emissioni della CO<sub>2</sub> a seguito del "protocollo di Kyoto" e delle direttive nazionali ed europee. I biocombustibili liquidi permettono un risparmio

nelle emissioni di CO<sub>2</sub> di gran lunga inferiore a quello dei biocombustibili solidi. La produzione di biodiesel da olio di colza ed energia termica dai co-prodotti consente un risparmio di CO<sub>2</sub> variabile tra 15,8 e 7,5 t CO<sub>2</sub> equivalenti ha<sup>-1</sup> (Cosentino *et al.*, 2007a), rispettivamente per la produzione ottenuta al Nord, con un itinerario tecnico ad alti livelli di input e al Sud. La produzione di bioetanolo dal sorgo zuccherino e la bagassa utilizzata per la produzione di elettricità comporta un risparmio più consistente, compreso fra 14,4 e 27,4 t di CO<sub>2</sub> equiv. ha<sup>-1</sup>, nell'ordine negli ambienti meridionali e centro-settentrionali (Cosentino *et al.*, 2005b). Nel caso della produzione di biodiesel, nonostante la fase industriale non determini elevate emissioni di CO<sub>2</sub>, tuttavia la produzione è sostanzialmente contenuta (2-3 t ha<sup>-1</sup>), nel caso del bioetanolo; per contro, a un'elevata produzione di biomassa del sorgo zuccherino, fa riscontro una fase industriale ad elevata produzione di CO<sub>2</sub>.

Come mostrato in tabella 5, ben più cospicua risulta l'entità della CO<sub>2</sub> conservata per ettaro e per anno della filiera biocombustibili solidi, quando questa venga utilizzata per la produzione di elettricità e calore attraverso la combustione diretta. La canna comune consente un risparmio medio di 37,7 t ha<sup>-1</sup> per anno CO<sub>2</sub>; segue il sorgo da fibra (25,1 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> per anno), cardo (19,1 CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> per anno) e miscanto (17,5 CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> per anno) (Cosentino *et al.*, 2005b).

#### Life Cycle Assessment

Il reale contributo energetico e ambientale dei biocarburanti dipende dal tipo di materia prima impiegata e dal processo al quale viene sottoposta. Per rendere confrontabili i dati relativi alle sostanze che entrano in gioco nei processi di produzione di energia è necessa-

Tab. 5 - CO<sub>2</sub> saved e bilancio della CO<sub>2</sub>.  
Tab. 5 - CO<sub>2</sub> "saved" and CO<sub>2</sub> balance.

Biocombustibili	CO <sub>2</sub> saved (t CO <sub>2</sub> equiv. ha <sup>-1</sup> )	Bilancio della CO <sub>2</sub> (t ha <sup>-1</sup> )
Biomasse		
Canna comune	37,7	31,1 - 46,3
Miscanto	17,5	11,2 - 29,4
Cardo	19,1	31,6 - 41,7
Sorgo da fibra	25,1	
Biodiesel		
Colza	15,8 - 7,5	2,55
Girasole		2,73
Bioetanolo		
Sorgo zuccherino	14,4 - 27,4	18,9 - 33,0

CO<sub>2</sub> saved = CO<sub>2</sub> emessa fossile - CO<sub>2</sub> emessa biocombustibile (Cosentino *et al.*, 2005b)

Bilancio CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub> sottratta - CO<sub>2</sub> emessa (Bona, 2001)

rio standardizzare e uniformare le procedure di analisi del ciclo di vita della biomassa. Per fare ciò bisogna prendere in considerazione tutti i fattori e i processi che intervengono e determinano il prodotto finale e gli impatti (positivi e negativi) che ogni segmento del processo produce dal momento della nascita del potenziale prodotto (il seme o la talea messa in campo) alla morte (la combustione del biocarburante). La procedura più nota e più completa per analizzare tutto il percorso di vita della biomassa è nota come 'Analisi del ciclo di vita' o LCA (dall'inglese *Life Cycle Assessment*).

L'analisi del ciclo di vita è uno strumento diagnostico di natura metodologica (ISO 14040:2006) capace di rilevare e studiare gli impatti sull'ambiente di tutta la catena di produzione-consumo di prodotti, beni e servizi messi a disposizione da qualsiasi attività produttiva. La LCA prende in esame la catena completa di produzione di un determinato bene, cioè il suo ciclo di vita "dalla culla alla tomba".

La procedura di applicazione della LCA prevede quattro fasi:

- definizione degli obiettivi e del campo di applicazione (I);
- inventario energetico ed ambientale (LCI, *Life Cycle Inventory*) (II);
- valutazione di impatto ambientale (LCIA, *Life Cycle Inventory Assessment*) (III);
- interpretazione dei risultati ed interventi (IV).

Le categorie di impatto più utilizzate in questo tipo di analisi sono:

- consumo di risorse abiotiche (non rinnovabili);
- effetto serra;
- formazione di ozono fotochimico;
- ozono stratosferico;
- acidificazione dell'atmosfera;
- eutrofizzazione delle acque;
- ecotossicità e tossicità per l'uomo.

Nell'ambito del progetto TISEN "Tecniche innovative sostenibili per colture energetiche e no-food" del MIPAF, è stata applicata la LCA per studiare gli effetti ambientali della produzione di bio-energia derivante da numerose colture da biomassa annuali (colza, sorgo zuccherino e da fibra) e poliennali (*Arundo*, miscanto e cardo), coltivate con differenti livelli di input agronomici in tre ambienti italiani (Udine, Bologna e Catania) (Cosentino *et al.*, 2005b). I confronti sono stati effettuati tra le categorie di biomasse ed i corrispettivi combustibili fossili per la generazione di energia termica (sorgo da fibra, *Arundo*, miscanto e cardo), di Etil-ter-butil etere (ETBE) (sorgo zuccherino) e di metil estere da olio di semi di colza (RME) per il trasporto autoveicolare. In

quest'ultimo caso è stato considerato anche l'uso della biomassa e dei pannelli fotovoltaici per la produzione di energia termica.

Nelle figure 19 e 20 è riportato il confronto nell'ambito delle filiere allo studio, tra il biocombustibile e il suo corrispondente fossile. Questo è stato calcolato come differenza tra i valori di ciascuna categoria d'impatto per le due fonti energetiche. Al fine di rendere omogenei, e pertanto confrontabili, i risultati sono stati normalizzati ed espressi in numero di abitanti per 100 TJ di energia termica per la filiera riscaldamento e in energia meccanica per la filiera biodiesel ed ETBE.

Filiera produzione di energia termica

La filiera 'produzione di energia termica' risulta a favore dei biocombustibili per due categorie d'impatto: l'energia fossile (risorse abiotiche) e i gas serra risparmiati (fig. 19). La quantità di energia risparmiata è prossima a 900 abitanti equivalenti per 100 TJ consumati, equivale cioè alla quantità di energia che quel numero di abitanti utilizzerebbe nel corso di un anno. Per l'effetto serra il vantaggio dei biocombustibili equivale a valori medi per le diverse situazioni allo studio di 730 abitanti per 100 TJ. Tutte le altre categorie di impatto sono sfavorevoli ai biocombusti-

bili, soprattutto l'esaurimento dell'ozono atmosferico con valori compresi tra 558 abitanti per 100 TJ (*Arundo*) e 816 abitanti per 100 TJ (miscanto).

*RME (Rapeseed Methyl Ester) vs Diesel*

Dall'analisi dei risultati appare che a favore del RME sono il risparmio energetico, in media 1.600 abitanti per 100 TJ, e la riduzione dell'effetto serra, in media 450 abitanti 100 TJ (fig. 20). La tossicità umana e la formazione di ozono fotochimico risultano quasi irrilevanti, mentre un forte impatto è dato dall'esaurimento dell'ozono stratosferico (11.000 abitanti per 100 TJ), dalla eutrofizzazione e dall'acidificazione.

*ETBE vs MTBE*

I vantaggi relativi alla filiera ETBE riguardano il consumo delle risorse abiotiche, l'effetto serra e l'esaurimento dell'ozono fotochimico, mentre a favore del MTBE vi è la formazione di ozono stratosferico, l'acidificazione, l'eutrofizzazione e la tossicità umana (fig. 20). Per la prima delle voci favorevoli ai biocombustibili i valori ottenuti superano nei tre ambienti di prova i 2.300 abitanti equivalenti per 100 TJ. Sul fronte dei combustibili fossili, per contro, si rileva un forte impatto sull'esaurimento dell'ozono stratosferico (tra 2.700 e 3.000 abitanti equivalenti per 100 TJ).

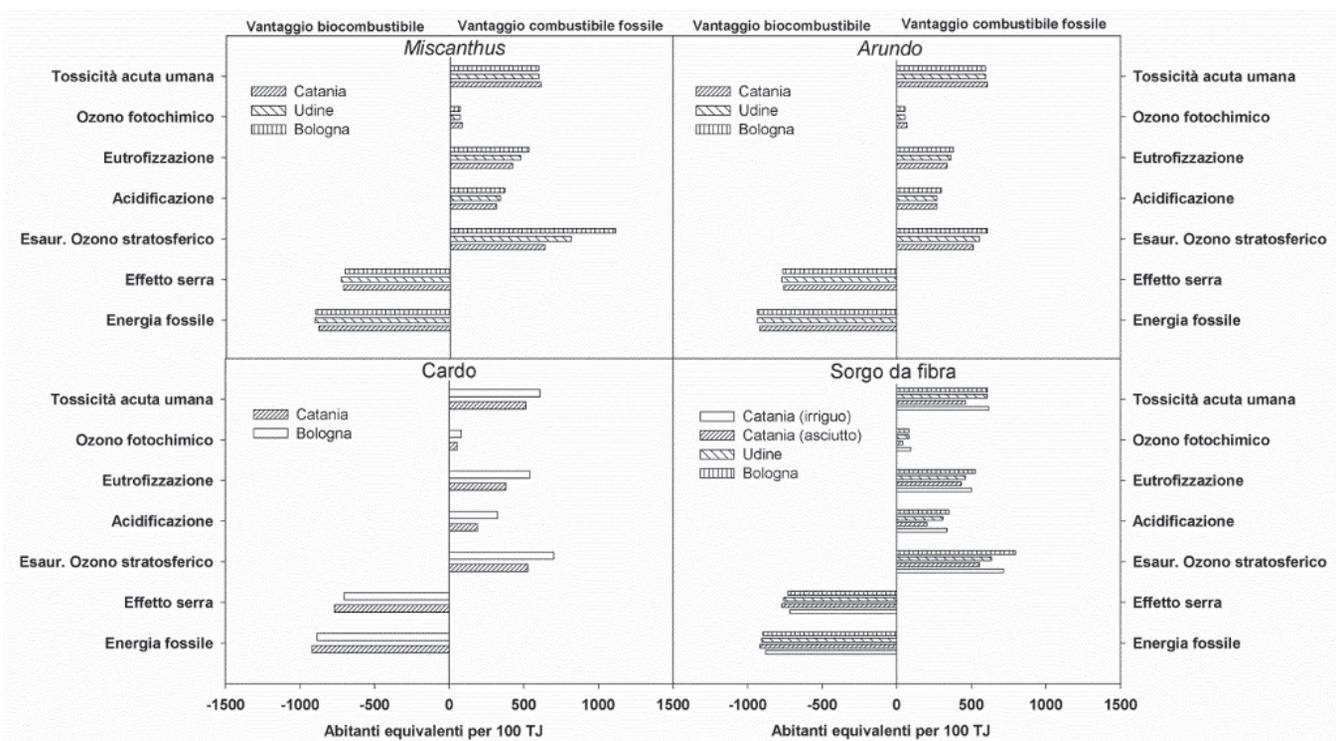


Fig. 19 - Confronto tra gli impatti normalizzati del bio-combustibile prodotto da *Miscanthus*, *Arundo*, cardo e sorgo da fibra e il suo corrispondente fossile nell'ambito della filiera riscaldamento.

Fig. 19 - Comparison between normalized impact of biofuel produced by *Miscanthus*, *Arundo*, *cardo* and *fiber sorghum* and the corresponding fossil fuel in the heat chain.

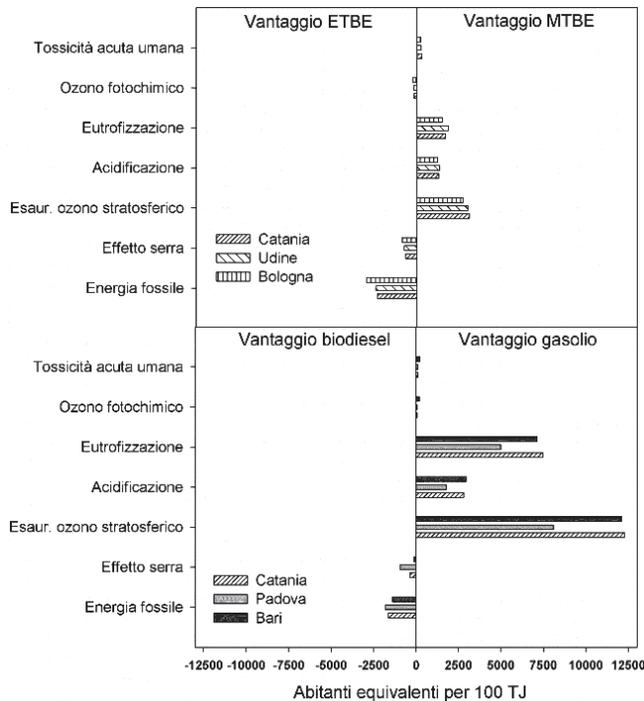


Fig. 20 - Confronto tra gli impatti normalizzati del bio-combustibile e il suo corrispondente fossile nell'ambito della filiera ETBE (sorgo zuccherino - in alto) e del biodiesel (colza - in basso).

Fig. 20 - Comparison between normalized impact of biofuel and the corresponding fossil fuel in the ETBE chain (sweet sorghum - up) and biodiesel chain (rapeseed - down).

In generale, quindi, i vantaggi che i biocombustibili assicurano derivano dalla riduzione del consumo delle risorse abiotiche e dell'effetto serra; questi, oltre a consentire la salvaguardia dell'agroecosistema, permettono la diversificazione strategica delle fonti energetiche ed in particolare di quelle rinnovabili. Appare evidente, comunque, che vi è una serie di categorie d'impatto che sono a favore del combustibile fossile (acidificazione dell'atmosfera, eutrofizzazione delle acque, esaurimento dell'ozono atmosferico), da attribuire essenzialmente alla fase agricola (impiego di macchine e attrezzi, uso di concimi minerali). Il fatto che l'impiego di ridotti input agronomici determini una riduzione dell'incidenza della fase agricola spiega l'importanza delle strategie agronomiche tese a ridurre gli input colturali e/o a privilegiare le colture meno esigenti.

Gli impatti di altre categorie (ecotossicità, tossicità umana, ozono fotochimico) in generale non si discostano dagli impatti che si originano dai corrispettivi combustibili fossili. In ogni caso, vanno attentamente analizzati per valutare quale sia il loro reale significato e quale sia il peso da attribuire in funzione del loro potenziale. Per alcune di queste categorie di impatto (tossicità umana, ecotossicità), non è ancora chiaro il significato da attribuire ai loro effetti in termini di importanza sugli equilibri degli ecosistemi e sulla salute umana, dal momento che queste ricerche risul-

tano ancora oggetto di indagini da parte degli studiosi con risultati spesso fra loro contrastanti (Brentrup *et al.*, 2004).

## Conclusioni

Il crescente interesse per la produzione di energia da fonti rinnovabili, sollecitato dal 'Protocollo di Kyoto', ha determinato, nel mondo, una nuova attenzione verso la produzione di energia dalle biomasse. L'orizzonte 20-20-20 dell'Unione Europea ha stimolato la ricerca di fonti biologiche sia per la produzione di calore ed elettricità, ma soprattutto per la produzione di biocarburanti liquidi e gassosi. In questo contesto le colture alimentari hanno rappresentato la fonte principale.

Sollecitazioni di natura etica ed ambientale hanno spinto la ricerca verso un nuovo concetto di 'agroecosistema', specifico per queste produzioni, che comprende nuove specie e nuovi ambienti di coltivazione. Le ricerche più recenti hanno permesso di individuare e selezionare 'nuove' specie corrispondenti all'ideotipo di coltura da energia, che possa essere coltivata su terreni marginali.

Questi risultati possono rappresentare, per il nostro Paese, una reale opportunità che va inserita in un progetto più ampio di multifunzionalità dell'agricoltura che abbia per riferimenti la sostenibilità economica, ambientale e sociale.

Dalla rassegna degli aspetti agronomici, energetici ed ambientali delle colture da biomassa per energia per l'ambiente italiano e delle nuove prospettive che si aprono in vista dell'introduzione di nuove tecnologie capaci di ottenere biocarburanti anche da colture lignocellulosiche, emerge un quadro variegato in relazione ai contesti territoriali ed ambientali in cui si opera.

In una prospettiva di più lungo periodo la filiera lignocellulosica appare assai promettente grazie all'elevata produttività delle colture poliennali (SRC, canna comune, miscanto, cardo, *Saccharum* e panico) che presentano indici energetici ed ambientali più favorevoli rispetto a quelle dell'ambito agro-alimentare, ma la loro coltivazione richiede ancora approfondimenti e studi.

Le principali prospettive che la ricerca si pone riguardano, nel breve periodo, il miglioramento delle attuali filiere (tecniche colturali a "bassi input", logistica della raccolta e dello stoccaggio della biomassa, trasformazione in ambito aziendale per l'attuazione della filiera corta). Nel medio periodo i vantaggi possono derivare dalla selezione e propagazione di genotipi di specie di elevata capacità produttiva, dall'indi-

viduazione e caratterizzazione di nuove specie per questo scopo e dalla definizione di disciplinari di coltivazione a bassi “input” in relazione all’ideotipo di pianta-coltura da energia, dalla diffusione delle tecnologie per l’ottenimento dei prodotti energetici e co-prodotti ad alto valore aggiunto in un’ottica di sviluppo di bioraffinerie.

## Riassunto

La relazione passa in rassegna, nell’ambito delle filiere agroenergetiche e delle caratteristiche della biomassa, i processi di conversione più adatti e l’evoluzione dei carburanti stessi (di prima, seconda e terza generazione). Richiama il ruolo svolto dalle colture energetiche di ‘prima generazione’, descrive le eccezioni sollevate sull’opportunità di utilizzare queste colture per la produzione di energia (basse rese colturali ed energetiche, alti input, questioni ambientali ed etiche) e i nuovi indirizzi verso la ricerca di un ideotipo di coltura da biomassa, non alimentare, a prevalente contenuto lignocellulosico, idoneo per la coltivazione in terre marginali. Il confronto tra le specie fa rilevare forti differenze in termini di efficienza energetica e di impatto sull’ambiente.

**Parole chiave:** fabbisogno energetico mondiale, energia rinnovabile, colture di ‘prima generazione’, ideotipo, colture lignocellulosiche, rendimenti energetici, *Lyfe Cycle Assessment*.

Lavoro supportato dal progetto OPTIMA (*Optimization of perennial grasses for biomass production*), finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del VII Programma Quadro (Grant Agreement n. 289642) e coordinato dal DISPA (Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari) dell’Università degli Studi di Catania.

## Bibliografia

- ANASTASI U., COPANI V., COSENTINO S.L., 2011. *Brassicaceae da olio per biodiesel in Sicilia*. In: Luigi Pari (a cura di) “Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia”. Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura– CRA, edizione fuori commercio, 391-413.
- ANGELINI G.L., CECCARINI L., BONARI E., 2005a. *Biomass yield and energy balance of giant reed (Arundo donax L.) cropped in central Italy as related to different management practices*. European J. Agronomy, 22:375-389.
- ANGELINI G.L., CECCARINI L., NASSI O DI NASSO N., BONARI E., 2005b. *Long term evaluation of biomass production of Giant reed (Arundo donax L.) to different fertilization input, plant density and harvest time in a Mediterranean environment*. Proceedings of the 14th European Biomass, Paris, France, 141-144.
- ANGELINI L.G., CECCARINI L., NASSI O DI NASSO N., BONARI E., 2009. *Comparison of Arundo donax L. and Miscanthus x giganteus in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance*. Biomass and Bioenergy, 33: 635–643.
- APPELQVIST L.A., 1971. *Lipids in cruciferae: VIII. The fatty acid composition of seeds of some wild or partially domesticated species*. J.O.A.C.S., 48: 740-744.
- BALLESTEROS I., BALLESTEROS M., MANZANARES P., NEGRO M.J., OLIVA M., SÁEZ F., 2008. *Dilute sulfuric acid pretreatment of cardoon for ethanol production*. Biochemical Engineering Journal, 42: 84-91.
- BALOGH E., JOHN M., HERR J.R., CZAKÓ M., MÁRTON L., 2012. *Defective development of male and female gametophytes in Arundo donax L. (Poaceae)*. Biomass and Bioenergy, 45: 265-269.
- BALSARI P., AIROLDI G., 2002. *Valutazione energetica ed economica di una coltivazione di pioppo per la produzione di biomassa*. Riv. Agron., 36:163-169.
- BEAUCHET R., MONTEIL-RIVERA F., AND LAVOIE J.M., 2012. *Conversion of lignin to aromatic-based chemicals (L-chems) and biofuels (L-fuels)*. Bioresour. Technol., 121:328–334.
- BONARI E., 2001. *Potenzialità e problematiche agronomiche della silvicoltura a breve rotazione come coltura da energia negli ambienti mediterranei*. Riv. Agron., 35:188-199.
- BRENNAN L., OWENDE P., 2010. *Biofuels from microalgae. A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(2):557-577.
- BRENTRUP F., KÜSTERS J., KUHLMANN H., LAMMEL J. 2004. *Environmental impact assessment of agricultural production systems using life cycle assessment methodology I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production*. European Journal of Agronomy, 20, 247-264.
- CARDONE M., MAZZONCINI M., MENINI S., ROCCO V., SENATORE A., REGGIANI M., VITOLO S., 2003. *Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization*. Biomass and Bioenergy, 25:623-636.
- CASTELLI S., 2011. *Ruolo delle biomasse e filiere energetiche*. In: Silvana Castelli (a cura di) “Biomasse ed energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione”. Santarcangelo di Romagna, Maggioli, 21-32.
- CHISTI Y., 2007. *Biodiesel from microalgae*. Biotechnology Advances, 25: 294-306.
- CLIFTON-BROWN J.C., JONES M.B., 1997. *The thermal response of leaf extension rate in genotypes of the C4-grass Miscanthus: an important factor in determining the potential productivity of different genotypes*. Journal of Experimental Botany; 48 (313): 1573-1581.
- CLIFTON-BROWN J.C., LEWANDOWSKI I., 2000. *Water Use Efficiency and Biomass Partitioning of Three Different Miscanthus Genotypes with Limited and Unlimited Water Supply*. Annals of Botany, 86 (1): 191-200.
- COPANI V., COSENTINO S.L., MANTINEO M., TESTA G., COSENTINO A., 2007. *High erucic acid genotypes for oil crops biorefinery in the South of Italy*. On: 15th European Biomass Conference & Exhibition, 7-11 May 2007, Berlin, Germany, 795-798.
- COPANI V., COSENTINO S.L., SORTINO O., TERRANOVA G., MANTINEO M., VIRGILLITO S., 2009. *Agronomic and energetic performance of Brassica carinata A. Braun in Southern Italy*. Biomass Conference In: 17th European Biomass Conference and Exhibition. From Research to Industry and Markets. Hamburg, Germany, 29 June- 3 July 2009, 166-169.
- COPANI V., COSENTINO S.L., GUARNACCIA P., SCALICI G., 2011. *Influence of propagation system on Arundo donax L. yield in the first two years of cultivation*. In: 19th Biomass Conference and Exhibition from Research to Industry and Markets. Berlin, Germany, 3-10 June 2011.
- COPANI V., COSENTINO S.L., TESTA G., SCORDIA D., 2013. *Agamic propagation of giant reed (Arundo donax L.) in semi-arid*

- Mediterranean environment*. Italian Journal of Agronomy, 8: 18-24.
- COSENTINO S., COPANI V., MANTINEO M., FOTI S., 2002. *Risposta di una coltura di sorgo (Sorghum Bicolor L. Moench) a diversi livelli di energia ausiliaria*. Riv. di Agron., 36:357-365.
- COSENTINO S., FOTI S., VENTURI G., GIOVANARDI R., COPANI V., MANTINEO M., D'AGOSTA G., BEZZI G., TASSAN MAZZOCCO G., 2005 a. *Colture erbacee annuali e poliennali da biomassa per energia di possibile coltivazione in Italia*. Agroindustria, 4 (1): 35-48.
- COSENTINO S.L., FOTI S., D'AGOSTA G.M., MANTINEO M., COPANI V., 2005 b. *Confronto tra gli impatti ambientali di biocombustibili e di combustibili fossili per mezzo della "Life Cycle Assessment" (LCA)*. Agroindustria, 4: 1:109-128.
- COSENTINO S.L., COPANI V., PATANÈ C., MANTINEO M., D'AGOSTA G.M., 2007 a. *Le colture da biomassa per energia per gli ambienti italiani: Attualità e prospettive*. I Georgofili. Quaderni, 2007-II, 1-48.
- COSENTINO S., PATANÈ C., SANZONE E., COPANI V., FOTI S., 2007 b. *Effects of soil water content and nitrogen supply on the productivity of Miscanthus x giganteus Greef et Deu*. In: a Mediterranean environment. Industrial Crops and Products, 25: 75-88.
- COSENTINO S.L., COPANI V., SCALICI G., SCANDURRA S., 2010. *La produttività del canneto (Arundo donax L.) in relazione alla tecnica di impianto*. XXXIX Convegno Società Italiana di Agronomia, Roma, 20-22 settembre 2010, 87-88.
- COSENTINO S.L., COPANI V., SCALICI G., 2012a. *Establishment of Miscanthus rhizomes in Mediterranean environment*. 2th European Biomass Conference and Exhibition. Milan, Italy, 18-22 June 2012.
- COSENTINO S.L., TESTA G., SCORDIA D., ALEXOPOULOU E., 2012b. *Future yield assessment of bioenergy crops in relation to climate change and technological development in Europe*. Italian Journal of Agronomy, 7(22): 154-166.
- COSENTINO S.L., COPANI V., TESTA G., SIDELLA S., PATANÈ G., SCORDIA D., 2013. *Giant Reed Screening to Salinity Levels*. In: 21st European Biomass Conference and Exhibition, 3-7 June, Copenhagen, Denmark, 140-146.
- DAYTON, D.C., FREDERICK W.J.J.R., 1996. *Direct observation of alkali vapor release during biomass combustion and gasification. 2. Black liquor combustion at 1100°C*. Energy Fuels, 10: 284-292.
- DI CANDILO M., CESARETTI C., RANALLI P., DIOZZI M., PASINI P., 2005a. *Colture da biomassa nel bolognese: produzione e conversione energetica*. Agroindustria, 4(1): 27-34.
- DI CANDILO M., RANALLI P., CESARETTI C., PASINI P., 2005b. *Biomass production and energy trasformation trial in Po Valley*. Proceedings of the 14th European Biomass Conference, 17-21 October 2005. Paris, 363-366.
- DICKINSON J.A., VERRILL C.L., KITTO J.B., 1998. *Development and evaluation of a low-temperature gasification process for chemical recovery from kraft black liquor*. Presented June 4, 1998 at the International Chemical Recovery Conference, Tampa, Florida, U.S.A.
- DIRECTORATE GENERAL FOR ENERGY, 2011. *Key Figures*. Market observatory for energy. European Commission.
- DIRECTORATE GENERAL FOR ENERGY – EUROPEAN COMMISSION, 2011. *Key figures* ([http://ec.europa.eu/energy/observatory/countries/doc/key\\_figures.pdf](http://ec.europa.eu/energy/observatory/countries/doc/key_figures.pdf)).
- DON A., OSBORNE B., HASTINGS A., SKIBA U., CARTER M.S., DREWER J., FLESSA H., FREIBAUER A., HYVÖNEN N., JONES M.B., LANIGAN G.J., MANDER Ö., MONTI A., DJOMO S.N., VALENTINE J., WALTER K., ZEGADALIZARAZU W., ZENONE T., 2011. *Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon*. GCB Bioenergy (2012), 4: 372-391.
- DUKE J.A., 1975. *Ethnobotanical observations on the Cuna Indians*. Econ. Bot., 29:278-293.
- DUKE J.A., 1979. *Ecosystematic data on economic plants*. Quart. J. Crude Drug Res., 17 (3-4):91-110.
- ENEA - [http://www.enea.it/it/enea\\_informa/le-parole-dellenergia/fonti-rinnovabili-scenari-e-politiche/tabelle#tab2](http://www.enea.it/it/enea_informa/le-parole-dellenergia/fonti-rinnovabili-scenari-e-politiche/tabelle#tab2).
- ERCOLI L., MARIOTTI M., MASONI A., BONARI E., 1999. *Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of Miscanthus*. Field Crop Research, 63:3-11.
- EUROPEAN COMMISSION, 2012a. *Assessing the land use change consequences of European biofuel policies*. Final Report October 2011 David Laborde (IFPRI) ATCLASS Consortium Specific Contract No SI2. 580403 implementing Framework Contract No TRADE/07/A2.
- EUROPEAN COMMISSION, , 2012b. *Accompanying the document Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council COM (2012) 595 final*.
- EUROPEAN COMMISSION, , 2012c. *Proposal for a directive of the European parliament and of the council amending Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources {SWD(2012) 343 final} {SWD(2012) 344 final}*.
- EUROSTAT, 2014. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- FACCIOTTO G., BERGANTE S., MUGHINI G., GRAS M.A., NERVO G., 2007. *Tecnica e modelli culturali per cedui a breve rotazione*. L'Informatore agrario, 63(40): 38-42.
- FACCIOTTO G., BERGANTE S. 2011. *Selezione di cloni di pioppo per la destinazione da biomassa*. In: Luigi Pari (a cura di). "Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia". Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura CRA, edizione fuori commercio, 31-44.
- FAO, 2008. *The State of Food and Agriculture- Biofuels Prospects, Risk and Opportunities*. FAO, Rome.
- FAZIO S., MONTI A., 2011. *Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops*. Biomass Bioenergy, 35: 4868-4878.
- FERNÁNDEZ J., CURT M.D., 2005. *State of the art of Cynara cardunculus L. as energy crop*. Proceedings of the 14th European Biomass Conference, 14-21 October, Paris, 22-27.
- FERNÁNDEZ J., CURT M.D., AGUADO P.L., 2006. *Industrial applications of Cynara cardunculus L. for energy and other uses*. Industrial Crops and Products, 24(3), 222-229.
- FIALA M., BACENETTI J., 2011. *L'impiego dei combustibili solidi*. In: Silvana Castelli (a cura di) "Biomasse ed energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione". Maggioli Editore, 457-545.
- GAMBORG C., MILLAR K., SHORTALL O., SANDOE P., 2012. *Bioenergy and land use: framing the ethical debate*. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 25 (6): 909-925.
- GHERBIN P., MONTELEONE M., TARANTINO E., 2001. *Five year evaluation on Cardoon (Cynara cardunculus L. var. altilis) biomass production in a Mediterranean Environment*. Italian Journal of Agronomy, 5:11-19.
- GIMSING A.L., KIRKEGAARD J.A., 2009. *Glucosinolates and biofumigation: fate of glucosinolates and their hydrolysis products in soil*. Phytochem Rev., 8:299-310.
- GOMINHO J., FERNÁNDEZ J., PEREIRA H., 2001. *C. cardunculus L. A new fibre crop for pulp and paper production*. Industrial Crops and Products, 13: 1-10.
- GOSSE G., 1996. *Overview on the different "filières" for industrial utilization of sorghum*. Proc. First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse (F), 1-3 April 1996, 4-5.
- HM GOVERNMENT, 2009. *The UK Renewable Energy Strategy*. Incentive, London.
- IEA, 2010. *Sustainable production of second-generation biofuels*,

- Renewable Energy.
- IEA, 2013. *The Renewable Energy, 2013. Medium-term market Report. A growing role for renewables in the energy mix.* International Energy Agency, Paris.
- IERNA A., MAURO R.P., MAUROMICALE G., 2012. *Biomass, grain and energy yield in Cynara cardunculus L. as affected by fertilization, genotype and harvest time.* Biomass and Bioenergy, 36: 404-410.
- IERNA A., MAUROMICALE G., 2010. *Cynara cardunculus L. genotypes as a crop for Energy purposes in a Mediterranean environment.* Biomass and Bioenergy, 34: 754-760.
- JEFFRIES T.W., GRIGORIEV I.V., GRIMWOOD J., LAPLAZA J.M., AERTS A., SALAMOV A., SCHMUTZ J., LINDQUIST E., PARAMVIR D., SHAPIRO H., JIN Y.S., PASSOTH V., RICHARDSON P.M., 2007. *Genome sequence of the lignocellulosic bioconverting and xylose-fermenting yeast Pichia stipitis.* Nature Biotechnology; 25:319-326.
- JEFFRIES T.W., 2008. *Engineering the Pichia stipitis Genome for Fermentation of Hemicellulose Hydrolysates.* Bionenergy, ASM Press, Washington D.C., chapter 3:37-47.
- KAMENETSKY R., 2009. *Patterns of dormancy in herbaceous perennial plants: environmental and internal regulation.* Crop Science, 49 (6): 2400-2404.
- KAUTER D., LEWANDOWSKI I., CLAUPEIN W., 2003. *Quantity and quality of harvestable biomass from Populus short rotation coppice for solid fuel use - a review of the physiological basis and management influences.* Biomass and Bioenergy, 24: 411-427.
- KIRKEGAARD. J.A., GARDNER, P.A., ANGUS, J.F., KOETZ, E., 1994. *Effect of Brassica break crops on the growth and yield of wheat.* Aust. J.Agric. Res., 45: 529-545.
- KIRKEGAARD. J.A., CHRISTEN. O., KRUPINSKY. J., LAVZELL. D., 2008. *Break crop benefits in temperate wheat production.* Field Crop Research, 107: 185-195.
- LAVOIE J.M., BEAUCHET R., BERBERI V., CHORNET M., 2011. *Biorefining lignocellulosic biomass via the feedstock impregnation rapid and sequential steam treatment.* In: Biofuel's Engineering Process Technology. M. Bernardes, ed. Intech publishing, Croatia, 685-714.
- MANGAN M.E., SHEAFFER C., WYSE D.L., EHLKLE N.J., REICH P., 2011. *Native perennial grassland species for bioenergy: establishment and biomass productivity.* Agronomy Journal, 103(2): 509-519.
- MANTINEO M., D'AGOSTA G.M., COPANI V., PATANÈ C., COSENTINO S.L., 2009. *Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment.* Field Crops Research, 114: 204-213.
- MARIANI C., CABRINI R., DANIN A., PIFFANELLI P., FRICANO A., GOMARASCA S., DICANDILO M., GRASSI F., SOAVE C., 2010. *Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (Arundo donax L.): a promising weedy energy crop.* Annals of Applied Biology, 157: 191-202.
- MAURO R.P., MAUROMICALE G., 2011. *La coltivazione del cardo domestico (Cynara cardunculus L. var. altilis DC.).* In: Luigi Pari (a cura di) "Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia". Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura CRA, edizione fuori commercio, 649-657.
- MCLAUGHLIN S.B., BOUTON J.H., BRANSBY D.I., CONGER B.V., OCUMPAUGH W.R., PARRISH D.J., TALIAFERRO C.M., VOGEL K.P., WULLSCHLEGER S.D., 1999. *Developing switchgrass as a bioenergy crop.* In: Janick J, editor. Proceedings of the fourth national new crops symposium. Alexandria, VA: ASHS Press; 282-299.
- MCLAUGHLIN S.B., KSZOS L.A., 2005. *Development of switchgrass (Panicum virgatum) as a bioenergy feedstock in the United States.* Biomass and Bioenergy 28: 515-535.
- MCMICHAEL P., 2010. *Agrofuels in the food regime.* Journal of Peasant Studies, 37 (4): 609-629.
- MOL A.P.J., 2010. *Environmental authorities and biofuel controversies.* Environmental Politics, 19(1): 61-79. (ST-Environmental authorities and biofuel).
- MONTI A., VENTURI P., ELBERSEN H.W., 2001. *Evaluation of the establishment of lowland and upland switchgrass [Panicum virgatum (L.)] varieties under different tillage and seedbed conditions in northern Italy.* Soil Till. Res., 63:75-83
- MONTI A., VENTURI G., 2003. *Comparison of the energy performance of fibre sorghum, sweet sorghum and wheat monocultures in Northern Italy.* European Journal of Agronomy, 19:35-43.
- MONTI A., BEZZI G., PRITONI G., VENTURI G., 2008. *Long term productivity of lowland and upland switchgrass cytotypes as affected by cutting frequency.* Bioresource Technology, 99: 7425-7432.
- MONTI A., FAZIO S, VENTURI G., 2009. *Cradle-to-farm gate life cycle assessment in perennial energy crops.* Europ J Agron., 31: 77-84.
- MONTI A., ZATTA A., 2009. *Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy.* Agriculture, Ecosystems and Environment, 132: 252-259.
- MUGHINI G., ROSSO L., BERGANTE S., 2011. *Selezione di cloni di eucalitto per la destinazione da biomassa.* In: Luigi Pari (a cura di). "Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia". Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura. CRA, edizione fuori commercio, 45-52.
- NASSI O DI NASSO N., GUIDI W., RAGAGLINI G., TOZZINI C., BONARI E., 2010. *Biomass production and energy balance of a 12-year old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles.* Global Change Biol. Bioenerg., 2: 89-97.
- NASSI O DI NASSO N., RONCUCCI N., BONARI E., 2013 a. *Seasonal Dynamics of Aboveground and Belowground Biomass and Nutrient Accumulation and Remobilization in Giant Reed (Arundo donax L.): A Three-Year Study on Marginal Land.* Bioenergy Res., 6: 725-736.
- NASSI O DI NASSO N., RONCUCCI N., BONARI E., 2013 b. *Giant reed (Arundo donax L.) as energy crop in Central Italy: a review.* Italian Journal of Agronomy., 8: 10-17.
- NUFFIELD COUNCIL ON BIOETHICS, 2011. *Biofuels: Ethical Issues.* London.
- ONOFRY A., 1940. *La canna comune (Arundo donax L.).* Cremonese libraio editore, Roma.
- PALMQVIST E., HAHN-HÄGERDAL B., 2000a. *Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification.* Bioresource Technology, 74: 17-24.
- PALMQVIST E., HAHN-HÄGERDAL B., 2000b. *Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition.* Bioresource Technology, 74: 25-33.
- PARI L., CIVITARESE V., 2011. *Il trapianto meccanico del pioppeto per produzione di biomassa, strategie finalizzate alla riduzione dei costi di produzione.* In: Luigi Pari (a cura di) "Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia". Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura CRA, edizione fuori commercio, 153-164.
- PARRISH D.J., FIKE J.H., 2005. *The biology and agronomy of switchgrass for biofuels.* Critical Reviews in Plant Sciences, 24:423-459.
- PARRISH D.J., CASLER M.D., MONTI A., 2012. *The Evolution of Switchgrass as an Energy Crop.* Green Energy and Tech., 94: 1-28.
- PEARCE, F. 2006. *Fuels Gold.* New Scientist, 36-41.
- PHILIPPIDIS G.P., SMITH T.K., WYMAN C.E., 1993. *Study of the enzymatic hydrolysis of cellulose for production of fuel ethanol by the simultaneous saccharification and fermentation process.* Biotechnol. Bioeng, 41(9): 846-853.
- POPP J., LAKNER Z., HARANGI-RÁKOS M., FÁRI M., 2014. *The*

- effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32: 559-578.
- RAMOS M.J., FERNÁNDEZ C.M., CASAS A., RODRÍGUEZ L., PÉREZ Á., 2009. *Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties*. *Bioresource Technology*, 100: 261-268.
- REINDERS L., 2009. *Acute view transport biofuels: can they help limiting climate change without an upward impact on food prices?* *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 4(1): 75-78.
- RIBEIRO B.E., 2013. *Beyond commonplace biofuels: social aspects of ethanol*. *Energy Policy*, 57: 355-362.
- ROSSO L., BERGANTE S., GRAS M.A., 2011. *Selezione di cloni di Robinia pseudoacacia L. per la produzione da biomassa*. In: Luigi Pari (a cura di) "Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia". Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura CRA, edizione fuori commercio, 53-61.
- SAHA B.C., 2004. *Production, purification, and properties of endoglucanase from a newly isolated strain of Mucor circinelloides*. *Process Biochem*, 39:1871-1876.
- Scalici G., 2014. *Physiological and productive responses of Miscanthus genotypes to different climatic constraints in Mediterranean environment*. Tesi di Dottorato Internazionale in Produttività delle Piante Coltivate in Ambiente Mediterraneo - XXVI Ciclo 2010-2013. Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie e Alimentari, Università degli Studi di Catania.
- SCARCELLA M., MASTRORILLI M. 2011. *Panico (Panicum virgatum L.)*. In: Luigi Pari (a cura di) "Lo sviluppo delle colture energetiche in Italia". Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura CRA, edizione fuori commercio, 751-759.
- SCHUBERT R., SCHELLNHUBER H.J., BUCHMANN N., EPINEY A., GRIESHAMMER R., KULESSA M., MESSNER D., 2008. *Future Bioenergy and Sustainable Land Use*, London. In: [http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2008/wbgu\\_jg2008\\_en.pdf](http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2008/wbgu_jg2008_en.pdf).
- SCORDIA D., COSENTINO S.L., JEFFRIES T.W., 2010. *Second generation bioethanol production from Saccharum spontaneum L. ssp. aegyptiacum (Willd.) Hack*. *Bioresource Technology*, 101(14): 5358-5365.
- SCORDIA D., COSENTINO S.L., LEE J.W., JEFFRIES T.W., 2011. *Dilute oxalic acid pretreatment for biorefining giant reed (Arundo donax L.)*. *Biomass and Bioenergy*, 35:3018-3024.
- SCORDIA D., COSENTINO S.L., LEE J.W., JEFFRIES T.W., 2012. *Bioconversion of giant reed (Arundo donax L.) hemicellulose hydrolysate to ethanol by Scheffersomyces stipitidis CBS6054*. *Biomass Bioenergy*, 39: 296-305.
- SCORDIA D., COSENTINO S.L., JEFFRIES T.W., 2013a. *Effectiveness of dilute oxalic acid pretreatment of Miscanthus x giganteus biomass for ethanol production*. *Biomass and Bioenergy*, 59: 540-548.
- SCORDIA D., COSENTINO S.L., JEFFRIES T.W., 2013b. *Enzymatic hydrolysis, simultaneous saccharification and ethanol fermentation of oxalic acid pretreated giant reed (Arundo donax L.)*. *Industrial Crops and Products*, 49:392-399.
- SCORDIA D., TESTA G., COSENTINO S.L., 2014. *Perennial grasses as lignocellulosic feedstock for second-generation bioethanol production in Mediterranean environment*. *Italian Journal of Agronomy*, 9(581): 84-92.
- SCURLOCK J.M.O., 1999. *Miscanthus: a Review of European Experience with a Novel Energy Crop*. U.S. Department of Energy - Environmental Sciences Division, Publication No. 4845.
- SEARCHINGER T., HEIMLICH R., HOUGHTON R.A., 2008. *Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change*. *Science*, 319: 1238-1240.
- SIMS R.E.H., MABEE W., SADDLER J.N., TAYLOR M., 2010. *An overview of second generation biofuel technologies*. *Bioresource Technology*, 101: 1570-1580.
- SONNTAG N.O.V., 1991. *Erucic, behenic: feedstocks of the 21st Century*. *INFORM 2*: 449-463.
- SPENCER D.F., KSANDER G.G., 2006. *Estimating Arundo donax ramet recruitment using degree-day based equations*. *Aquatic botany*, 85: 282-288.
- THE GAIA FOUNDATION. *Biofuelwatch, the African Biodiversity Network, Salva la Selva, Watch Indonesia, EcoNexus, 2008. Agrofuels and the Myth of Marginal Lands*. Science (New York, N.Y) vol.319, London.
- VENTURI P., VENTURI G., 2003. *Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems*. *Biomass and Bioenergy*, 25: 235-255.
- WRIGHT L., TUROHLLLOW A., 2007. *Switchgrass selection as a "model" bioenergy crop: A history of the process*. *Biomass and Bioenergy*, 34: 851-868.
- WU C., Z. X., ZHOU F., CAO H., 2007. *The Analysis of Biomass Energy Use Technology development*. *Chinese Renewable Energy*, 29: 35-41.
- XU J., CHENG J.J., SHARMA-SHIVAPPA R.R., BURNS J.C., 2010. *Lime pretreatment of switchgrass at mild temperatures for ethanol production*. *Bioresource Technol.*, 101: 2900-2903.
- ZEGADA-LIZARAZU W., ELBERSEN H.W., COSENTINO S.L., ZATTA A., ALEXOPOULOU E., MONTI A., 2010. *Agronomic aspects of future energy crops in Europe*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4: 674-691.