

# ENERGIA DA COLTURE DEDICATE: ASPETTI AMBIENTALI ED AGRONOMICI

Gianpietro Venturi\* e Andrea Monti\*

\*Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali,  
Università degli Studi di Bologna, Viale Fanin 44, 40127 Bologna.  
Tel. +39 051 2096652; Fax +39 051 2096241; e-mail: [gventuri@agrsci.unibo.it](mailto:gventuri@agrsci.unibo.it); [amonti@agrsci.unibo.it](mailto:amonti@agrsci.unibo.it)

## SOMMARIO

I paesi aderenti all'accordo di Kyoto sono impegnati a ridurre di almeno il 5% (su base 1990) le emissioni di gas serra entro il periodo 2008-2012. Ogni Paese è tenuto a presentare un Programma Nazionale di Allocazioni dove illustra la quantità di emissioni annuali previste fino al 2010 e le modalità con cui intende diminuirle in base alle quote fissate. Per l'Italia, se si mantiene il trend attuale, entro il 2010 le emissioni aumenteranno di quasi il 18% (su base 1990), mentre secondo protocollo dovrebbero diminuire del 6.5%. La considerazione più logica è che in tempi relativamente brevi sia riorganizzato il sistema che da solo è responsabile di oltre il 50% delle emissioni: il settore energetico. Fra le misure previste, vi è l'incremento dell'uso di fonti rinnovabili che apre nuove importanti prospettive per il mercato dell'energia. Fra di esse, le biomasse, e più in particolare le colture dedicate, giocheranno un ruolo marginale in termini di contributo energetico, ma assolutamente rilevante in chiave ambientale. Di seguito verranno illustrati gli aspetti più significativi dell'inserimento delle colture da energia nei futuri scenari nazionali ed europei.

## ASPETTI GENERALI

A livello mondiale, la produzione annua di energia si aggira attorno a 400 EJ [1]. Di questa, circa tre quarti deriva dall'utilizzo di risorse non rinnovabili, mentre fra le fonti rinnovabili, le biomasse coprono circa il 14%, l'idroelettrico il 6% e il nucleare il 5%. Se si considerano i soli Paesi industrializzati, che nel loro complesso utilizzano oltre il 65% dell'energia totale, i combustibili fossili occupano addirittura l'85%, mentre le biomasse solo il 3% [2].

L'utilizzo di combustibili fossili genera un'emissione annua di CO<sub>2</sub> in atmosfera pari a 5.5±0.5 Pg, a cui vanno aggiunti 1.6±1.0 Pg derivanti da deforestazione e cementificazione [3]. Di questi, 2.0±0.8 Pg di CO<sub>2</sub> sono assorbiti dagli oceani, mentre un'analoga quantità (2.1±0.8 Pg) è fissata dalla biomassa terrestre [4]. Il bilancio annuo fra emissioni ed assorbimenti di CO<sub>2</sub> è quindi positivo e pari a circa 1.5 Pg. Ne consegue che, dalla rivoluzione industriale ad oggi, la concentrazione di anidride carbonica atmosferica è aumentata di oltre il 20% [5]; proiezioni del World Energy Council stimano inoltre un incremento del 72% della concentrazione di CO<sub>2</sub> al 2025 (base 1990).

Gli effetti sull'ambiente dell'aumento di CO<sub>2</sub> atmosferica si sono rivelati negativi e in genere catastrofici; basti pensare al riscaldamento del pianeta, al restringimento dei ghiacci polari, all'innalzamento medio del livello dei mari da 10 a 20 cm e infine, allo sbilanciamento degli eventi piovosi fra emisferi nord e sud che ha generato frequenti eventi alluvionali nelle zone asiatiche ed africane [6].

La necessità di ricorrere a provvedimenti immediati è stata recepita nel 1997 in occasione della sessione plenaria a Kyoto, ove è stata ratificata una convenzione mondiale mirata a ridurre del 5.2% (su base 1990) le principali emissioni dei gas responsabili dell'effetto serra (CO<sub>2</sub> in primis). L'UE ha

ratificato il Protocollo in maniera congiunta ponendo come obiettivo la riduzione dell'8% (335 Mt di CO<sub>2</sub> su valori base del 1990); la quota fissata dall'Italia, pari al 6.5% (legge n. 120 del 1 giugno 2002), sembra, allo stato attuale, assai difficile da conseguire visto l'aumento delle emissioni del 6.6% registrato dal 1990 al 2000. E' quindi più che mai necessario che qualsiasi piano di riconversione energetica venga attuato in maniera rigida e in tempi brevi, tenendo conto degli aspetti ambientali.

I piani energetici a livello internazionale e nazionale mirano ad incrementare l'efficienza energetica e l'uso di fonti rinnovabili. Il Libro Bianco dell'EU [7] prevede che le fonti energetiche rinnovabili passino dal 3.5% del 2002 al 12% del 2010 per un totale di 10.6 EJ; di questi, poco più della metà dovrebbero provenire da biomasse (5.7 EJ). Queste ultime comprendono tutte le sostanze accomunate da una matrice organica derivante, direttamente o indirettamente, dal processo di fotosintesi clorofilliana. Includono perciò, la frazione organica dei rifiuti solidi urbani, residui forestali e agricoli, scarti dell'industria, soprattutto del legno e agroalimentare e infine, colture dedicate (erbacee ed arboree), ossia appositamente coltivate per destinazione energetica. Nell'ambito del piano energetico europeo, queste ultime dovrebbero fornire, entro il 2010, poco meno di 2 EJ, vale a dire circa il 2% degli attuali consumi di energia della EU (88 EJ). Al soddisfacimento del fabbisogno energetico, l'apporto delle colture dedicate è quindi quantitativamente modesto, ma di rilievo per l'ecobilancio e per una politica di assetto del territorio comprendente sistemi agricoli più sostenibili. Si consideri che nell'EU, per raggiungere i suddetti obiettivi, sarà necessario destinare da 7 a 8 milioni di ettari a colture dedicate, con impatti ambientali notevoli sugli equilibri territoriali.

Tali obiettivi non sono utopistici perché, sebbene finora

alcune attese siano state deluse, l'apporto energetico da biomasse negli ultimi anni ha mostrato un trend positivo non trascurabile. In particolare, dal 1990 al 1999, la produzione di calore è passata da 1500 a 1800 PJ (+2% all'anno), quella di energia elettrica da 54 a 166 PJ (+9% all'anno), quella del biodiesel da 80 a 780 kt e infine, quella di bioetanolo, da 48 a 216 kt [8]. In aggiunta, una direttiva comunitaria del 2003, pone l'obiettivo, entro il 2005, di incrementare al 5.75% la quota di biodiesel nella miscela diesel-gasolio. La direttiva prevede anche l'opportunità di aggiustare le accise nell'ottica di una maggiore convenienza all'uso dei combustibili da biomasse. Ad oggi, sei Stati membri, fra cui l'Italia, hanno aderito a questa iniziativa, che secondo le previsioni dovrebbe garantire al 2010 un incremento d'uso del biodiesel di 700 PJ.

## ASPETTI AMBIENTALI DELLE COLTURE DEDICATE

Rispetto alle colture tradizionali, quelle dedicate possono essere effettuate adottando tecniche estensive, con modesto impiego di mezzi tecnici (es. fertilizzanti, erbicidi, antiparassitari ecc.) e rapporti molto vantaggiosi fra output ed input energetici.

L'efficienza fotosintetica e la capacità di conversione della radiazione solare (anche oltre 3 g per MJ) delle colture da biomassa risultano in genere molto elevate, consentendo produzioni fino a 20-25 tonnellate di biomassa secca per ettaro per anno. Tali colture hanno inoltre evidenti effetti di contenimento di erosione, lisciviazione dei nitrati e capacità di accumulo di CO<sub>2</sub>. E' bene ricordare come la trasformazione energetica delle biomasse contribuisca poco o nulla all'incremento di CO<sub>2</sub> atmosferica, essendo la quota di CO<sub>2</sub> immessa circa pari a quella organicata dalla coltura durante il ciclo. L'emissione di CO<sub>2</sub> per unità di energia in una coltura perenne da biomassa è risultata 1.9 kg (C) GJ<sup>-1</sup>; tali valori sono nettamente inferiori a quelli di carbone, 24.7 kg (C) per GJ<sup>-1</sup>, petrolio, 22.3 kg (C) GJ<sup>-1</sup> e gas naturale, 13.8 kg (C) GJ<sup>-1</sup> [9].

Va tenuto conto, inoltre, che una parte considerevole di carbonio assimilato (40-60%) è destinata all'accrescimento dell'apparato radicale e quindi viene sottratta all'atmosfera in maniera durevole. L'effetto *carbon sink* costituisce un grande vantaggio delle colture da biomassa non solo nei confronti dei combustibili fossili, ma anche rispetto a colture tradizionali. E' stato osservato infatti come la massa radicale nei primi 30 cm di suolo di una coltura perenne da biomassa (*Panicum virgatum*) possa superare le 8 t ha<sup>-1</sup>, vale a dire circa 5 volte maggiore rispetto a quella del mais [10]. Per la stessa coltura, è stato rilevato un incremento di 2 g kg<sup>-1</sup> di carbonio dopo soli 3 anni di coltivazione [11]; a 5 anni dall'impianto, circa il 25% di carbonio organico presente nel terreno proveniva dal panico [12]. Inoltre, rispetto a colture tradizionali, quali mais e frumento, il panico fu trovato accumulare la maggior quantità di carbonio fra 30 e 90 cm di profondità [13,14], con conseguenti minori perdite per mineralizzazione e respirazione. Va tenuto conto inoltre delle minori perdite di respirazione del suolo coperto da colture perenni che, contrariamente alle annuali, non necessitano di arature ripetute. In Italia si è evidenziato come, posti uguali a cento i valori di un avvicendamento erbaceo convenzionale girasole-frumento, quelli di un sistema a colture dedicate da biomassa, risulterebbero: 38-49% l'erosione, 40-65% l'impiego di concimi N-P, 8-21% l'uso di fitofarmaci, 300-540% il carbonio fissato dalla biomassa e infine 150-175% l'apporto di sostanza organica [15].

Altro aspetto da ricordare è l'impatto sociale dell'inserimento di tali colture. E' stato calcolato infatti che nella UE possa essere generato un nuovo posto di lavoro ogni 540 t di biomassa secca ottenute da colture dedicate. Considerando 7 milioni di ettari ipotizzati entro il 2010 e rese medie di 15 t ha<sup>-1</sup> di biomassa secca, ciò si tradurrebbe in quasi 200 mila nuovi posti di lavoro.

Infine, la competitività economica delle colture da biomassa su quelle tradizionali sembra destinata ad aumentare in seguito al disaccoppiamento dei contributi e allo specifico premio supplementare di 45 €/per ettaro previsto per le colture a destinazione energetica. La competitività delle colture da energia nei confronti dei combustibili fossili rimane tuttavia ancora bassa. A grandi linee il costo di un GJ da colture arboree perenni in Europa varia da 3 a 6 € mentre quello da petrolio importato varia da 1 a 2 € [16].

## DESTINAZIONE D'USO DELLE COLTURE DEDICATE

Le principali applicazioni delle colture dedicate sono (Fig. 1): carboidrati (da cui ricavare bioetanolo o il suo derivato ETBE); olio (da cui ricavare, previa esterificazione, biodiesel); sostanza secca (da cui ottenere energia attraverso processi di combustione, pirolisi, gassificazione ecc.).

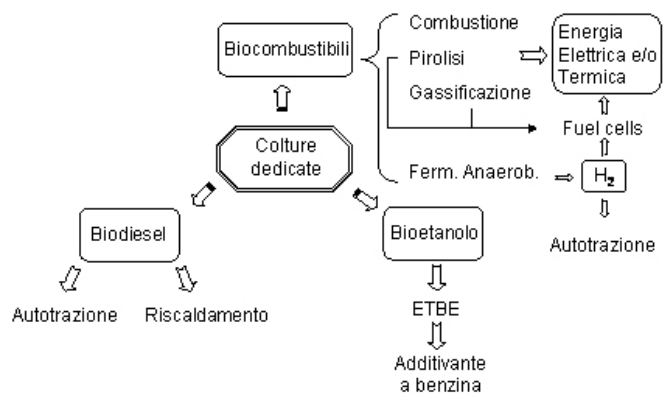


Figura 1. Principali impieghi delle colture da biomassa a destinazione energetica.

Efficienza ed economicità dei suddetti processi è illustrata in Tabella 1.

L'etanolo o meglio il bioetanolo viene ottenuto per via fermentativa a partire da residui agricoli e forestali, eccedenze agricole o colture dedicate quali ad esempio sorgo zuccherino, topinambur, barbabietola e canna da zucchero, frumento, mais, sorgo da granella, ma anche da colture ligno-cellulosiche. Quest'ultima opzione è solo in fase iniziale, ma si ritiene possa convenientemente affiancarsi alle fonti tradizionali in tempi relativamente brevi. Le indicazioni provenienti dall'USA, ma anche dal Nord Europa, sembrano promettenti.

Il bioetanolo può essere utilizzato come ETBE nel settore automobilistico quale additivo alle benzine (in miscela al 5% circa), come antidetonante in sostituzione al piombo tetraetile. Sembra invece molto improbabile che in Europa possa costituire un'alternativa alla benzina come invece successo in Brasile (bioetanolo da canna da zucchero) o in qualche stato USA (da mais e sorgo).

**Tabella 1.** Efficienza ed economicità dei principali processi di produzione energetica da biocombustibili. Il prezzo della biomassa è assunto pari a 2 €GJ<sup>-1</sup> (da Faaij, 2005 modificato).

Tipo di processo	Efficienza del sistema <sup>1</sup> (%)	Costo d'investimento (€/per kWh di capacità)	Costo di produzione (€/per GJ di biocombustibile)
Idrogeno da gassificazione delle biomasse	60	480	9-12
Metanolo da gassificazione di biomasse	55	690	10-15
Etanolo da idrolisi e fermentazione di biomasse	46	350	12-17
Etanolo da colture di bietola e cereali	43	550	12-18
Biodiesel da colza, estrazione + esterificazione <sup>2</sup>	45	600	25-40

<sup>1</sup> Calcolata sulla base del potere calorifico superiore

<sup>2</sup> si assume che il surplus di paglia venga utilizzato per la produzione di energia nel processo.

Nel continente americano vengono previste per la filiera grandi possibilità di sviluppo soprattutto in virtù dei favorevoli aspetti ambientali attribuiti sia alla fase produttiva che a quella di utilizzo. Anche i confronti economici sembrerebbero mostrare prospettive favorevoli rispetto ai carburanti di origine fossile. Non secondarie, sono infine le possibilità dell'etanolo di far parte della filiera idrogeno.

Nell'EU la produzione di bioetanolo, secondo stime della commissione [8], sono aumentate di oltre il 400% dal 1993 al 2001. In Italia, la filiera non è ancora riuscita a decollare anche se attualmente sembrano aprirsi nuove prospettive, tanto che il 23 febbraio u.s., è stato firmato un accordo volontario di filiera volto a rendere perseguibile la produzione annua di un milione di ettolitri di bioetanolo. L'accordo, che usufruisce della parziale defiscalizzazione di etanolo ed ETBE (finanziaria 2005), ha l'obiettivo di rendere stabile nel Paese la coltivazione di specie alcoligene e i rapporti di questa produzione con gli anelli industriali della catena, i distillatori e le società petrolifere.

Il biodiesel è un prodotto rinnovabile ed altamente biodegradabile ottenuto dalla transesterificazione dell'olio di estrazione, con sostituzione del glicerolo con metanolo. L'impiego del biodiesel è sostenuto dalla direttiva della Comunità Europea 93/12/CE del 2003, che fra l'altro prevede la possibilità di modificare le accise per renderne più conveniente l'uso. Attualmente e fino al 2010, in Italia, la produzione di biodiesel è esente da accise per un contingente di 200 mila tonnellate annue (legge n. 311, finanziaria 2005).

Le specie oleaginose più utilizzate sono colza e, in minor misura, girasole e soia. L'utilizzazione del biodiesel è per autotrazione (in genere miscelato al 5-30% con gasolio) o per riscaldamento, miscelato o in forma pura senza la necessità di apportare modifiche agli impianti esistenti. La sua valenza ambientale è notevole essendo privo di zolfo ed avendo un'emissione di monossido di carbonio e idrocarburi incombusti inferiore del 25-35%. L'uso del biodiesel consente inoltre la riduzione fino al 70% della fumosità dei motori e degli impianti. Includendo anche i sottoprodotti, i rapporti energetici del biodiesel (output/input) sono risultati convenienti, variando da 2.9 a 3.3 [17]. Il costo energetico è stato calcolato pari a 0.31 unità fossili per ogni unità energetica di biodiesel [18].

Nel bilancio del carbonio, le emissioni di CO<sub>2</sub> sono risultate decisamente vantaggiose se comparate a quelle di un equivalente combustibile fossile (-78%) [18].

I processi di conversione termochimica utilizzano biomasse a basso contenuto di umidità (<30%) con rapporti C/N superiori a 30. Le specie più adatte sono le arboree (appositamente coltivate o residui) e le erbacee ligno-cellulosiche quali miscanto, arundo, panico, sorgo da fibra ecc.

Fra i processi di conversione, la combustione sembrerebbe quello di più immediata applicazione; quando la produzione finale è energia elettrica i rendimenti sono tuttavia ancora molto scarsi (intorno al 20%); aumentano notevolmente (~70%) quando invece il processo è indirizzato alla cogenerazione, ossia produzione congiunta di elettricità e calore.

Pirolisi e gassificazione sono considerati processi con ottime prospettive nel medio-lungo periodo. Attualmente i maggiori problemi legati alla pirolisi riguardano la qualità dei prodotti, non ancora su livelli adeguati alle applicazioni in turbine a gas o motori diesel. I problemi della gassificazione sono invece legati principalmente al basso potere calorifico ed alla modesta qualità chimica del gas (presenza di metalli pesanti, polveri ecc.).

## SCelta DELLE SPECIE

Come detto, possono essere raggruppate in base al tipo di destinazione energetica; di seguito verranno considerate le colture da etanolo, biodiesel ed energia termochimica.

### Colture da etanolo

Attualmente, le principali colture da etanolo sono barbabietola da zucchero, cereali e sorgo zuccherino, vale a dire colture ad elevata produzione di carboidrati fermentescibili. Per queste colture la filiera è già percorribile poiché sono ben note le tecniche di produzione sia nella fase agricola che in quella industriale. E' comunque necessario migliorare l'efficienza del sistema in funzione di specifiche situazioni. Per il sorgo zuccherino, sul quale si erano concentrate molte speranze, è richiesto un maggiore impegno della ricerca, in particolare per l'ottenimento di genotipi specifici e l'ottimizzazione di fitotecnica e logistica. Un'opportunità che sembra realizzabile a medio termine è l'utilizzazione di biomasse ligno-cellulosiche. I tempi sono legati soprattutto all'economicità del processo di idrolisi acida od enzimatica dei carboidrati strutturali. Qualora

venissero individuati processi economici di estrazione, si stima che il costo dell'etanolo possa ridursi a 6-7 €GJ<sup>-1</sup> (considerando un costo della biomassa di 2-3 €GJ<sup>-1</sup>) diventando così nettamente più competitivo rispetto ai valori attuali (12-17 €GJ<sup>-1</sup>). Il bilancio economico potrebbe essere molto più favorevole qualora venissero inglobati i costi ambientali, tenendo conto che ad ogni tonnellata di bioetanolo utilizzato corrisponde un risparmio netto di circa due tonnellate di CO<sub>2</sub> emessa.

### Colture da Biodiesel

Anche per il biodiesel la filiera è già in atto. La specie utilizzata è principalmente colza; tecnicamente sono proponibili anche girasole e soia. Per tutte le specie l'input energetico della fase agricola varia dal 70% al 90% del totale con differenze enormi in funzione delle fitotecniche adottate. Di conseguenza, i bilanci energetici (rapporti o differenze fra output e input) sono molto variabili e possono risultare in taluni casi negativi come riscontrato in esperienze italiane [19] e straniere [20].

La produzione di biodiesel in Europa è prevalentemente concentrata in Germania (715 mila t) e secondariamente in Francia (357 mila t) ed Italia (260 mila t). Dal 1993 al 2001 la produzione europea di biodiesel è aumentata di oltre il 900% [8], costituendo oltre l'80% della produzione europea di biocombustibili (EU-15) [21]. Nel 2004, la produzione EU-15 ha superato le 1.750.000 tonnellate, con un incremento del 26% rispetto al 2002.

In Italia, la coltura prevalente è il girasole con produzioni medie di circa 1 t ha<sup>-1</sup> di olio. L'utilizzo del biodiesel è per autotrazione (70%) e per riscaldamento (30%).

Relativamente agli aspetti ambientali, la sostituzione del gasolio con biodiesel offre enormi vantaggi in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> e contenimento dell'effetto serra [22].

### Colture per conversione termochimica

Le colture per conversione termochimica possono essere raggruppate in due grandi categorie: i) arboree a ciclo breve (Short Rotation Coppice, di seguito indicate come SRC); ii) erbacee, annuali o poliennali.

Le SRC, principalmente rappresentate da pioppo e secondariamente salice, robinia ed eucalipto, vengono impiantate ad elevata densità (10-20 mila piante per ettaro) e ceduate con cicli annuali o biennali. Le produzioni annue di sostanza secca variano da 10 a 20 t ha<sup>-1</sup> con bilanci energetici molto favorevoli (Tab. 2). I costi di produzione sono risultati abbastanza ridotti (50-55 €t<sup>-1</sup>), benché ancora scarsamente competitivi [23].

Le specie erbacee dedicate possono essere annuali o poliennali (Tab. 2). Fra le prime, la scelta è ormai limitata ad alcuni genotipi di sorgo da fibra e zuccherino le cui produzioni annue possono superare le 25 t ha<sup>-1</sup>. Altre specie annuali quali canapa e kenaf, inizialmente proposte anche per destinazione energetica, si sono rivelate scarsamente inclini ad elevate produzioni di sostanza secca e quindi poco indicate alla trasformazione termochimica. Altre ancora, quali ad esempio mais da biomassa, richiedono ulteriori verifiche al fine di valutarne le reali potenzialità.

Fra le specie erbacee poliennali, quelle attualmente più promettenti sono: *Arundo donax*, *Miscanthus sinensis* x *Giganteus*, *Panicum virgatum*, *Phalaris arundinacea* e *Cynara cardunculus*. Quest'ultima, più adatta agli areali del sud, sembrerebbe meno indicata a questo tipo di

destinazione, sia per produttività che per qualità del materiale.

Le principali caratteristiche delle più promettenti colture erbacee ed arboree dedicate alla conversione termochimica vengono riportate in tabella 2.

Tutte le specie sono contraddistinte da rapporti energetici e produzioni di energia netta altamente positivi, con prezzi per GJ intorno a 3-4 €. In generale gli input energetici variano dall'1% al 2% del potere calorifico; tuttavia, se si considerano distanze molto elevate (internazionali), le spese logistiche determinano un incremento di circa 1 €GJ<sup>-1</sup> [16].

I bilanci riportati in tabella 2 sono altamente convenienti anche se limitati alla fase di produzione agricola e quindi non comprensivi delle spese energetiche di trasporto, eventuale trasformazione del prodotto e processi finali di conversione termochimica.

### CONCLUSIONI

Nel breve periodo, l'apporto energetico dei biocombustibili sarà prevedibilmente modesto, ma di rilevante impatto ambientale e sociale. Stando alle attuali tecniche di trasformazione e potenzialità produttive delle colture è prevedibile che entro il 2010, nell'EU, vengano investiti a biomasse energetiche da 7 a 8 milioni di ettari con impatto considerevole sull'assetto del territorio.

Rispetto ai combustibili fossili, le colture energetiche consentono di ridurre notevolmente le emissioni di anidride carbonica e gas serra. Tali colture si sono mostrate inoltre di grande efficacia nell'immagazzinare carbonio nel terreno anche in confronto a specie tradizionali a destinazione alimentare.

La ricerca scientifica ha compiuto, negli ultimi anni, enormi passi in avanti nei riguardi della scelta delle specie e conoscenza delle più sostenibili tecniche di coltivazione. L'inserimento negli avvicendamenti delle colture dedicate è tuttavia ancora incerto poiché legato alla scarsa competitività dei biocombustibili in confronto ai combustibili fossili. E' quindi più che mai impellente una politica dei prezzi volta al sostegno di tali colture, giustificata dai benefici ambientali e sociali e dalla necessità di rispettare gli accordi internazionali sull'abbattimento delle emissioni.

**Tabella 2.** Principali colture erbacee ed arboree ritenute più idonee ai processi di trasformazione termochimica. Fonte: ricerche condotte dal Dip. di Scienze e Tecnologie Agroambientali (DiSTA) dell'Università di Bologna e bibliografia. I dati sono in genere riferiti a prove parcellari e pertanto verosimilmente sovrastimati rispetto a quelli ottenibili da coltivazioni estensive e meccanizzate.

Specie	Sostanza secca (t ha <sup>-1</sup> )	PCI (GJ t <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	Output (GJ ha <sup>-1</sup> )	Output/Input <sup>3</sup>	Energia netta (output – input)
<i>Erbacee Annuali</i>					
Sorgo da Fibra	20-30	16.7-16.9	334-507	13-39	309-494
Sorgo zuccherino	15-25	16.7-16.9	250-422	10-32	225-409
Kenaf	10-20	15.5-16.3	155-326	6-25	130-313
Canapa	8-15	16.0-18.0	128-270	5-20	103-257
Mais	8-15	16.5-16.8	132-252	5-19	119-227
<i>Erbacee Poliennali</i>					
Miscanthus	15-30	17.6-17.7	264-531	12-66	242-523
Arundo	15-35	16.5-17.4	247-609	11-76	225-601
Cynara	10-15	15.5-16.8	155-252	7-32	133-244
Panicum	10-25	17.0-17.4	170-435	8-54	148-427
Phalaris	10-20	16.8-17.2	168-344	8-43	146-366
Phragmites	10-15	16.5-17.0	165-255	8-32	143-247
Bamboo	10-30	16.3-16.8	163-504	7-63	141-496
Pennisetum	10-25	16.2-17.1	162-427	7-53	140-419
Vetiveria	10-12	16.5-17.2	165-206	8-26	143-198
<i>Arboree (SRC)<sup>2</sup></i>					
Pioppo	9-20	17.8-19.3	160-386	10-35	144-375
Salice	10-15	17.8-18.4	178-276	11-25	162-265
Robinia	10-13	17.8	178-231	11-21	162-220
Eucalipto	5-15	16.8-20.5	84-307	5-28	68-296

<sup>1</sup> Potere calorifico inferiore: è la quantità di calore prodotta dalla totale combustione di un materiale al netto del calore assorbito dall'acqua nel passaggio di stato a vapore. I valori sono stati ottenuti dalla letteratura utilizzando i database: Phyllis, Biobib, Hort Purdue and Bioenergy.

<sup>2</sup> Taglio annuale

<sup>3</sup> Gli inputs considerati variano da 13 a 25 e da 8 a 22 GJ ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, rispettivamente per le colture annuali e poliennali [19]; 11-16 GJ ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> per le SRC [23]

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- World Energy, www.worldenergy.org, 2005.
- M.A. Hoogwijk, Biom. Bioen., vol. 25, pp. 119-133, 2003.
- D.S. Schimel, Global Change Biol., vol. 1, pp. 77-91, 1995.
- W.H. Schlesinger, Vegetatio, vol. 104, pp. 295-305, 1993.
- J.T. Houghton, G.L. Jenkins and J.J. Ephramus, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch>, 2005.
- Libro Bianco, Commissione della Comunità Europea, pp. 51, 1997.
- Commissione della Comunità Europea, 2001/0266 (COD), Brussels, November 2001.
- A.F. Turhollow and R.D. Perlack, Biom. Bioen., vol. 1, pp. 129-135, 1991.
- D.J. Parrish, D.D. Wolf and W.L. Daniels, Five year report Oak Ridge National Laboratory, 1997.
- W.R. Ocumpaugh, M.A. Sanderson, M.A. Hussey, J.C. Read, C.R. Tischler and R.L. Reed, Final report Oak Ridge National Laboratory, 1997.
- C.T. Garten and S.D. Wüllschleger, J. Environ. Qual., vol. 29, pp. 645-653, 2000.
- A.B. Frank, J.D. Berdahl, J.D. Hanson, M.A. Liebig, H.A. Johnson, Crop Sci., vol. 4, pp. 1391-1396, 2004.
- M.A. Liebig, H.A. Johnsons, J.D. Hanson, A.B. Frank, Biom. Bioen. vol. 28, pp. 347-354, 2005.
- E. Bonari, Biomasse ligno-cellulosiche da colture dedicate, Relazioni Tavoli di Filiera, Pisa 2004.
- A.P.C. Faaij, Energy Policy, in press., 2005.
- K. Scharmer and G. Gosse, Proc. 2nd European Motor Biofuels Forum, Graz, Austria, pp. 317-328, 1996.
- J. Sheehan, V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski, and H. Shapouri, NREL/SR-580-24089 Golden, Colorado: National Renewable Laboratory), 1998.
- P. Venturi and G. Venturi, Biom. Bioen., vol. 25, pp. 235-255, 2003.
- M. Kaltschmitt, G. A. Reinhardt, E. Stelzert, IER, 1996.
- ENEA, Rapporto Energia e Ambiente, pp. 462, 2004.
- S. Bona, G. Mosca, T. Vameralli, Ren. Energy, vol. 16, pp. 1053-1056, 1999.
- E. Bonari and G. Venturi, atti del convegno Chimica Verde, Fortezza da Basso, Firenze, 2004.