



Le microalghe nel settore dei biocombustibili. Sviluppo e sostenibilità

Gli attuali sistemi energetici non solo esercitano pressioni sulle risorse ormai in via di esaurimento ma comportano anche un incremento delle emissioni di gas climalteranti.

Dopo lo sviluppo dei biocarburanti di prima e seconda generazione, crescente attenzione è ora rivolta verso le tecnologie di terza generazione, che utilizzano le microalghe (caratterizzate da un elevato contenuto lipidico, una alta resa in olio e in biodiesel, un contenuto uso del suolo) come materie prime.

Trattasi di tecnologie sviluppate solo in impianti pilota (in vasche o fotobioreattori), con elevati costi di investimento, ma si prevede che nel medio-lungo termine, con la produzione congiunta di altri co-prodotti (prodotti farmaceutici e nutraceutici, additivi per mangimi animali, bioplastiche ecc.) e l'integrazione con altri processi (quali il recupero dei gas di scarico e il trattamento delle acque reflue), la produzione di biodiesel da microalghe, oltre che sostenibile, potrebbe diventare una soluzione economicamente percorribile

■ Vera Amicarelli, Annarita Paiano, Leonarda Lobefaro

Development and sustainability in the biofuels sector

Today energy systems not only put pressure on natural energy resources which are nearly running down but also they involve an increase in the greenhouse gas emissions. After the development of the 1st and 2nd generation technologies for biofuels production, the attention is now shifting to the 3rd generation ones, which use microalgae as feedstocks (since their main features are the high oil content, the high oil and biodiesel yield, the low land area needed). These technologies have been developed only in pilot plants (ponds or photobioreactors), with high capital expenditures. In the medium-long term with the joint production of several profitable co-products (pharmaceutical and nutraceutical products, animal feed supplements, bioplastics, etc.) and the link with other processes (such as the waste gas recovery and the wastewater treatment), it is expected that, the production of biodiesel from microalgae, as well as sustainable, it may become an economically viable option

■ Vera Amicarelli, Annarita Paiano, Leonarda Lobefaro

Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Dipartimento di Studi Aziendali e Giusprivatistici, I Facoltà di Economia

Come largamente riconosciuto, gli attuali sistemi energetici comportano non solo pressioni sulle risorse ormai in via di esaurimento ma anche un incremento delle emissioni di gas climalteranti, in particolare CO₂.

Si prevede che lo sviluppo di economie emergenti, come quella indiana e cinese, porterà ad una crescita del consumo mondiale di energia con il conseguente incremento degli impatti ambientali (aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, acidificazione delle acque, perdita della biodiversità ecc.).

È stato stimato che il superamento del limite di 450 ppm (parti per milione) per quanto riguarda la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera significherebbe oltrepassare il punto di non ritorno dell'inquinamento globale e i cambiamenti ambientali sarebbero irreversibili. È crescente quindi la convinzione di dover ridurre l'impiego dei combustibili fossili prima ancora dell'esaurimento dei giacimenti (Hansen J. et al. 2008; Rockström J. et al. 2009). Se si considera che la combustione dei carburanti fossili comporta il rilascio in atmosfera di circa il 60%, pari a circa 18 miliardi di t nel 2009, delle emissioni totali di CO₂ e che il loro contributo al soddisfacimento della domanda di energia è più dell'80% (circa 10 Gtep nel 2009), è evidente la necessità di adottare modelli energetici con un minor consumo di combustibili fossili o modelli economici a bassa emissione di carbonio (EIA 2011; IEA 2011; ITF 2010). Gli strumenti per consentire il soddisfacimento della crescente domanda di energia e allo stesso tempo una mitigazione dei cambiamenti climatici sono: il risparmio energetico, il miglioramento dell'efficienza energetica, la cattura e l'immagazzinamento della CO₂ e l'impiego di fonti energetiche rinnovabili.

In particolare la promozione e lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili consentono di migliorare la sicurezza degli approvvigionamenti e la stabilità economica, riducendo le emissioni di gas climalteranti. Tra i diversi settori energetici, la produzione di carburanti presenta delle criticità a causa dell'elevata dipendenza dalle fonti fossili; sarebbe quindi opportuno realizzare almeno una parziale sostituzione dei combustibili fossili con i biocombustibili. Dopo lo sviluppo di biocarburanti di prima e seconda generazione l'attenzione è ora rivolta verso le tecnologie di terza generazione che utilizzano le microalghe come materie prime (Amin S. 2009; Chisti Y. 2007; Lagioia G. et al. 2011; Mata TM. et al. 2010).

Le microalghe sono microrganismi presenti in tutti gli ecosistemi della terra, in grado di adattarsi a diverse condizioni ambientali. Grazie alla presenza di clorofilla, esse assorbono la luce del sole e assimilano la CO₂

dall'aria e i nutrienti dagli habitat acquatici per poi produrre lipidi, proteine e carboidrati. Dalla successiva trasformazione di queste molecole è possibile ottenere diversi prodotti che trovano diversa collocazione sul mercato: biocarburanti (bioetanolo, biodiesel, bioolio), prodotti farmaceutici, alimenti e mangimi. Bisogna comunque sottolineare che attualmente la produzione di microalghe per fini energetici avviene in impianti pilota (in vasche da 10 m fino ad impianti da 2 ha), mentre la produzione di alghe da destinare ai settori di nicchia (alimenti salutistici e dietetici, prodotti farmaceutici, cosmetici) è pari a una decina di migliaia di tonnellate annue (Lagioia G. et al. 2011; Nigam PS., Singh A. 2010; Thurmond W. 2011).

Nel presente lavoro, dopo un esame di quelle che sono le principali tecnologie di crescita e raccolta delle microalghe e di trasformazione dell'olio estratto in biodiesel, si è elaborato un bilancio di massa relativo alla produzione di biodiesel dalle alghe. Si è infine analizzato l'attuale mercato delle alghe e dei co-prodotti ottenuti dalla loro trasformazione.

La produzione di biodiesel dalle microalghe Il processo produttivo

Il termine *alghe* comprende le macroalghe (alghe marine) e un vasto e diversificato gruppo di microrganismi conosciuti come microalghe. Poiché la resa in olio delle macroalghe è attualmente meno vantaggiosa, in questo studio si farà riferimento alle microalghe. Questi microrganismi fotosintetici, grazie alla loro semplice struttura, sono in grado di crescere rapidamente e vivere in diverse condizioni ambientali, sia acquatiche che sub-areali. Esistono più di 50.000 specie di microalghe, raggruppabili in procariote (*Cyanobacteria*), eucariote (*Chlorophyta*) e diatomee (*Bacillariopyta*), caratterizzate da un contenuto lipidico che varia dal 20 al 70% e in determinate condizioni alcune specie possono raggiungere anche il 90% (tabella 1).

Per quanto riguarda la resa in olio, le microalghe mostrano valori più elevati rispetto ad altre colture oleaginose (circa 59.000-137.000 L/ha, a seconda del contenuto lipidico). Dalla tabella 2, che mette a confronto le efficienze di produzione e di uso del suolo per il biodiesel prodotto dalle microalghe e da altre colture oleaginose, risulta infatti evidente che le microalghe sono le più vantaggiose sia in termini di rendimento in olio che per l'elevata produttività in biodiesel (da 52.000 a 120.000 kg di biodiesel/ha) e allo stesso tempo richiedono una minore estensione di suolo (anche 49-132 volte minore di quella richiesta dalla coltivazione del colza e della soia). In riferimento a tali rese al-

Microalga	Contenuto lipidico (% s.s.)
Ankistrodesmus sp.	24-31
B. braunii	25-75
Botryococcus braunii	25-75
Chaetoceros calcitrans	16-40
Chaetoceros muelleri	33
Chlorella	18-57
Dunaliella sp.	17-67
Ellipsoidion	27
Isochrysis sp.	25-33
Monallanthus salina	22
Nannochloris sp.	20-56
Nannochloropsis sp.	12-68
Neochloris oleabundans	29-65
Nitzschia sp.	16-47
Pavlova lutheri	35
Pavlova salina	31
Phaeodactylum tricornutum	18-57
Prymnesium parvum	22-38
Scenedesmus dimorphus	16-40
Scenedesmus obliquus	11-55
Schizochytrium sp.	50-77
Skeletonema	13-51
Spirulina	4-9
Stichococcus	33

TABELLA 1 Contenuto lipidico per specie microalgale
 Fonti: elaborazione propria dati Ahmad AL. 2011; Bruton T. et al. 2009; Chisti Y. 2007; Demirbas A, Demirbas MF. 2011; Mata TM. et al. 2010; Singh J., Gu S. 2010

gali, si è ipotizzato di destinare una superficie analoga a quella attualmente dedicata in Italia alle colture oleaginose (colza, soia e girasole) per la produzione di biodiesel, complessivamente pari a 20.000 ettari, alla coltivazione di microalghe (Dever J, Baldi S. 2011). Sarebbe quindi possibile ricavare 1,04 milioni di tonnellate (Mt), 1,72 Mt e 2,42 Mt di biodiesel utilizzando specie rispettivamente a basso, medio e alto contenuto lipidico. Ad esempio, considerando una specie microalgale con un contenuto lipidico del 20% (come la *Chlorella vulgaris*), a parità di superficie, da un totale di biomassa pari a 3,9 Mt si potrebbero produrre 0,7 Mt di biodiesel, vale a dire il 54% del consumo nazionale registrato nell'anno 2010 (1,3 Mt). Inoltre dalla biomassa residuale (oltre 3,1 Mt) potrebbero rendersi disponibili le frazioni zuccherine e proteiche per la produzione di altri prodotti energetici (etanolo e biogas) o merci ad alto valore aggiunto (farmaci, mangimi ecc.). Va inoltre evidenziato che per la coltivazione delle microalghe sarebbe possibile utilizzare terreni marginali, non sottraendo quindi suolo agricolo, come avviene per la produzione di biocombustibili da colture tradizionali.

Tutti gli esistenti processi di produzione del biodiesel da microalghe comprendono una unità di produzione per la coltivazione della biomassa, una fase di separazione delle cellule dai substrati di coltivazione e una di estrazione dei lipidi; le successive fasi, invece, sono simili a quelle utilizzate per produrre biodiesel da altre materie prime.

Per la coltivazione delle alghe elementi vitali per la crescita sono la luce, l'acqua, l'anidride carbonica e alcuni nutrienti come azoto (N), fosforo (P) e potassio (K); anche

Materia prima	Contenuto lipidico (% olio/s.s.)	Rendimento in olio (L olio/ha)	Suolo utilizzato (m ² /kg biodiesel)	Resa in biodiesel (kg biodiesel/ha)
Mais	4	172	66	152
Soia	18	446-636	18	562
Jatropha	28	741-1.892	15	656
Camelina	42	915	12	809
Colza	41	974	12	946
Girasole	40	1.070	11	1.156
Olio di palma	36	5.366-5.950	2	4.747
Microalghe (basso contenuto in olio)	30	58.700	0,2	51.927
Microalghe (medio contenuto in olio)	50	97.800	0,1	86.515
Microalghe (elevato contenuto in olio)	70	136.900	0,1	121.104

TABELLA 2 Confronto tra le microalghe e le altre colture oleaginose per la produzione di biodiesel
 Fonti: elaborazione propria dati Chisti Y. 2007; Demirbas A, Demirbas MF. 2011; Lagjoia G. et al. 2011; Mata TM. et al. 2010

la silice e il ferro, ed altri elementi in traccia, sono importanti in quanto la loro carenza può limitarne lo sviluppo. È inoltre necessario raggiungere il giusto equilibrio tra i diversi parametri, quali l'ossigeno, la CO₂, il pH, l'intensità della luce, la rimozione dei prodotti e sottoprodotti. In presenza di condizioni climatiche favorevoli e nutrienti a sufficienza, le microalghe di solito raddoppiano la propria biomassa in 24 h (3,5 h nella fase di crescita esponenziale), per cui hanno un ciclo di raccolta molto breve (1-10 giorni) (Chisti Y. 2007; Lagioia G. et al. 2011; Mata TM. et al. 2010; Nigam PS., Singh A. 2010; Pfromm PH. et al. 2011; Thurmond W. 2011).

La crescita delle alghe è influenzata da diversi fattori (tabella 3):

- abiotici (luce, temperatura, concentrazione dei nutrienti, ossigeno, anidride carbonica, pH, salinità, presenza di sostanze chimiche tossiche);
- biotici (patogeni come batteri, funghi e virus, competizione con altre alghe);
- operativi (profondità, frequenza della raccolta, aggiunta di bicarbonato).

In termini economici, la produzione di biomassa algale è generalmente più onerosa rispetto alla coltivazione delle altre colture oleaginose.

Specie di alghe	Influenza il tipo di prodotto che si vuole produrre; per la produzione del biodiesel si preferiscono le alghe con un più elevato contenuto in olio e un più veloce tasso di crescita.
Aerazione e CO ₂	Le alghe necessitano di aerazione per fissare la CO ₂ e crescere; si potrebbe utilizzare una fonte secondaria di CO ₂ , come i gas di scarico delle centrali elettriche.
Nutrienti	La composizione del suolo e/o dell'acqua influenza il tasso di crescita delle alghe; l'impiego di acque reflue, con elevata concentrazione di azoto, stimolerebbe la crescita delle alghe.
Luce	Di solito per la fotosintesi si impiega la luce solare; sono però in corso di sperimentazione alcuni impianti, più costosi, che impiegano fonti luminose artificiali per la crescita al buio.
Livello pH	La crescita ottimale delle alghe necessita un pH tra 7 e 9, valore che può essere influenzato dalla quantità di CO ₂ e dei nutrienti.
Miscelazione	Affinché tutte le cellule delle alghe siano ugualmente esposte alla luce e per evitare la sedimentazione è necessaria la loro miscelazione.
Temperatura	Alcune specie di alghe richiedono temperature miti durante la crescita (20-30 °C).

TABELLA 3 I principali fattori che influenzano la crescita delle alghe

Fonti: elaborazione propria dati Chisti Y. 2007; Lagioia G. et al. 2011; Thurmond W. 2011

A seconda delle specie di microalghe, delle condizioni ambientali e della disponibilità di nutrienti, le microalghe possono essere coltivate in sistemi aperti (vasche) o chiusi (fotobioreattori). Le vasche possono essere di tipo *raceway*, circolari con braccio rotante ed inclinate. Quelle *raceway* sono costituite da un canale a circuito chiuso di ricircolo profondo circa 0,3 m (di solito costruito in cemento e rivestito di plastica bianca) e una ruota a pale per la miscelazione e la circolazione.

I sistemi aperti sono meno costosi da costruire, hanno una durata più lunga e una maggiore capacità produttiva rispetto ai sistemi chiusi, anche se occupano una superficie maggiore. Rispetto ai sistemi chiusi, però, le vasche presentano un maggior fabbisogno di energia (per omogeneizzare i nutrienti) e di acqua (almeno 150 L/m²); inoltre sono più suscettibili alle condizioni ambientali (uno dei fattori limitanti è la variabilità della temperatura dell'acqua, dell'evaporazione e dell'illuminazione) e alla contaminazione da parte di altre microalghe indesiderate, lieviti, funghi, muffe e batteri (Amin S. 2009; Chisti Y. 2007; Mata TM. et al. 2010; Schenk PM. et al. 2008; Thurmond W. 2011). Attualmente il 98% della produzione mondiale di alghe (circa 10.000 t nel 2010) è prodotta con le vasche (Thurmond W. 2011).

I fotobioreattori possono essere piatti o tubolari, orizzontali, verticali, inclinati o a spirale. Un fotobioreattore tubolare è costituito da una serie di tubi dritti e trasparenti, di plastica o vetro, del diametro non superiore a 0,1 m e della lunghezza inferiore agli 80 m, nei quali viene catturata la luce solare. Per consentire il maggior immagazzinamento di energia solare, solitamente i tubi sono disposti parallelamente uno all'altro con orientamento nord-sud e la superficie sotto il collettore è rivestita di plastica bianca per aumentare la riflettanza. I fotobioreattori consentono di avere un miglior controllo delle condizioni e dei parametri di crescita della coltura (pH, temperatura, ossigeno, CO₂), minori perdite di anidride carbonica, una maggiore densità delle microalghe e produttività volumetrica oltre ad una riduzione della contaminazione da parte di altri microrganismi. Le principali limitazioni riguardano invece il surriscaldamento, l'accumulo di ossigeno¹, gli elevati costi di costruzione e funzionamento dell'impianto. I costi di investimento per i fotobioreattori, infatti, sono maggiori delle vasche, soprattutto se si utilizzano i tubi in policarbonato (circa 5-12 milioni \$/ha per i fotobioreattori con tubi in polipropilene e 12-25 milioni \$/ha per i fotobioreattori con tubi in policarbonato contro i 0,5-2,5 milioni \$/ha per le vasche) (Amin S. 2009; Chisti Y. 2007; Mata TM. et al. 2010; Schenk PM. et al. 2008; Thurmond W. 2011).

La comparazione dei due sistemi di coltura (tabella 4) non è semplice in quanto ci sono diversi parametri da considerare. In genere si valutano la produttività volumetrica (produttività per unità di volume del reattore), la produttività areale (produttività per unità di superficie occupata dal reattore) e la resa in olio. I sistemi chiusi sono migliori delle vasche per la produttività volumetrica (8-13 volte maggiore). Inoltre la biomassa raccolta con i fotobioreattori costa meno di quella recuperata nelle vasche in quanto raggiunge una concentrazione maggiore di circa 16-30 volte (Chisti Y. 2007; Mata TM. et al. 2010). Ciononostante i costi totali di produzione e di gestione sono minori per le vasche (Thurmond W. 2011).

La raccolta delle alghe, che consiste nella rimozione di grandi quantità di acqua per aumentare la concentra-

zione della biomassa, può essere condotta in diversi modi (processi fisici, chimici, biologici) a seconda della dimensione delle alghe. I principali metodi di raccolta sono la sedimentazione, la centrifugazione, la filtrazione e l'ultra-filtrazione, a volte accompagnata da una fase di flocculazione (con allume e cloruro ferrico) e/o flottazione (Amin S. 2009; Chisti Y. 2007; Mata TM. et al. 2010; Thurmond W. 2011). La sedimentazione è di solito la prima fase della raccolta e utilizza la gravità per separare le alghe dall'acqua. La filtrazione è utilizzata per le microalghe più grandi, come la *Coelastrum proboscideum* e la *S. platensis*, ma non è adatta per le microalghe di piccole dimensioni come la *Scenedesmus*, la *Dunaliella* o la *Chlorella*, per le quali si utilizza la micro-filtrazione a membrana o l'ultra filtrazione (più costosa per la sostituzione delle membrane e il

	Impianto con vasche raceway	Impianto con fotobioreattori
Produzione annua di biomassa (kg)	100.000	100.000
Produttività volumetrica (kg/m ³ /g)	~ 0,12	> 1,5
Produttività areale (kg/m ² /g)	0,035	0,048
Concentrazione della biomassa nel brodo di coltura (kg/m ³)	0,14	4
Superficie necessaria (ha)	> 0,75	> 0,55
Resa in olio (L/ha)	99.400* / 42.600°	136.900 * / 58.700 °
Consumo annuo di CO ₂ (kg)	183.333	183.333
Tipologia di sistema	vasca: 978 m ² (12 m x 82 m) 0,30 m profondità	unità: 132 tubi paralleli, ciascuno di 80 m di lunghezza x 0,06 m di diametro
Numero di unità	8	6
Rapporto area/volume	Basso	Alto
Densità della popolazione algale	Bassa	Alta
Produttività	Bassa	Maggiore
Concentrazione della biomassa	Minore	Maggiore
Rischio di contaminazione	Alto	Ridotto
Controllo della contaminazione	Difficile	Facile
Controllo delle specie	Difficile	Facile
Controllo del processo	Difficile	Facile
Controllo della temperatura	Difficile	Più uniforme
Efficienza di utilizzazione della luce	Scarsa	Elevata
Perdita di acqua	Molto alta	Bassa
Perdita CO ₂	Alta	Bassa
Pulizia degli impianti	Non richiesta	Richiesta
Investimenti	0,5-2,5 x 10 ⁶ \$/ha	5-12 x 10 ⁶ \$/ha se tubi in polipropilene 12-25 x 10 ⁶ \$/ha se tubi in policarbonato
Costi operativi	Bassi	Elevati

* per biomassa con contenuto in olio del 70% - ° per biomassa con contenuto in olio del 30%

TABELLA 4 Confronto tra vasche raceway e fotobioreattori

Fonte: elaborazione propria dati Chisti Y. 2007; Mata TM. et al. 2010; Thurmond W. 2011; Weyer KM. et al. 2010

Proprietà	Biodiesel da alghe	Biodiesel da soia	Biodiesel da colza	Biodiesel da girasole	Diesel
Densità (kg/L)	0,864	0,884	0,882	0,860	0,838
Viscosità (mm ² /s, cSt a 40 °C)	5,2	4	4,83	4,6	1,9-4,1
Flash point (°C)	115	131/178	155/180	183	75
Punto di solidificazione (°C)	-12	-4	-10,8	-7	-50/+10
Punto di intorbidamento (°C)	2	1	-4/-2	1	-17
Numero di cetano	52	45/51	53/56	49	40-55
PCI (MJ/kg)	41	37,8	37,2	38,9	42

TABELLA 5 Caratteristiche merceologiche del biodiesel prodotto da microalghe e da altre colture oleaginose e del diesel fossile
 Fonti: elaborazione propria dati Amin S. 2009; Canakci M., Sanli H. 2008; Cencič V. et al. 2007; Dinh LTT. et al. 2009; Fukuda H. et al. 2001; Yamane K. et al. 2001

pompaggio). La centrifugazione consente di *concentrare* rapidamente ogni tipo di microrganismo e, nonostante gli elevati costi operativi (0,6 \$/L) e il consumo energetico (3 kWh/L), è la tecnologia più utilizzata; il principale problema è però l'efficienza a causa della bassa concentrazione (1-4 g/L) (Lagioia G. et al. 2011; Mata TM. et al. 2010; Schenk PM. et al. 2008; Thurmond W. 2011). Dopo la deidratazione della biomassa pro-

dotta segue la rottura delle cellule con metodi meccanici (frantumazione, omogeneizzazione, ultrasuoni) o non (solventi organici, shock osmotici, reazioni acide-basiche o enzimatiche) per l'*estrazione* dell'olio. Anche questi metodi differiscono per l'efficienza e i costi. Gli ultrasuoni o le microne, attualmente allo studio, potrebbero incrementare l'efficienza di estrazione dell'olio e il rendimento del 50-500% (Mata TM. et al.

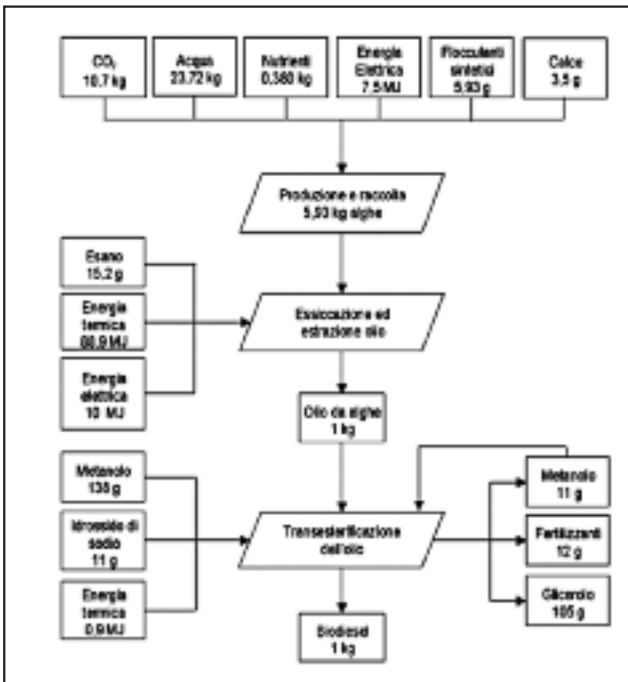


FIGURA 1 Bilancio di Materia e di Energia del ciclo di produzione di 1 kg di biodiesel da alghe
 Fonte: elaborazione propria dati Lardon L. et al. 2009; Tickell J. et al. 2003

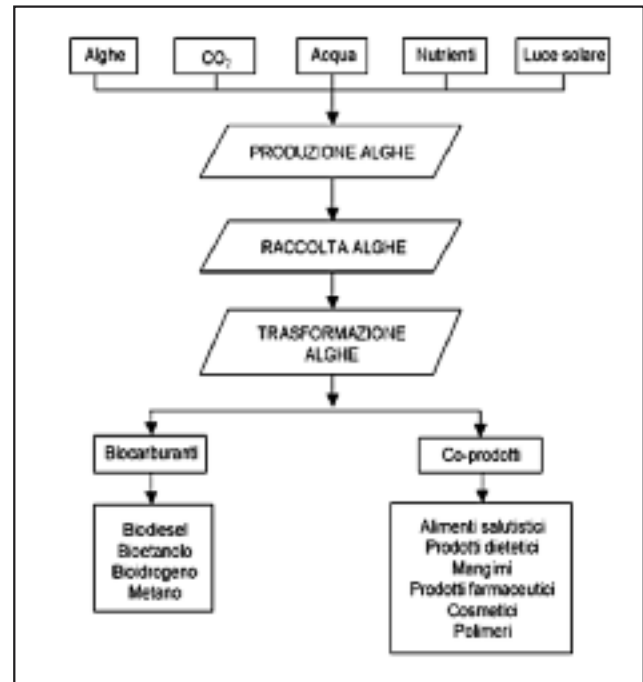


FIGURA 2 Processo integrato di trasformazione della biomassa algale
 Fonte: elaborazione propria

2010; Thurmond W. 2011). L'olio estratto dalle microalghe è diverso dagli altri oli vegetali (tabella 5) in quanto abbastanza ricco di acidi grassi polinsaturi, con 4 o più doppi legami, che sono suscettibili di ossidazione durante l'immagazzinamento; ciò ne rende necessaria una parziale idrogenazione catalitica prima della conversione in biodiesel (Chisti Y. 2007; Dinh LTT. et al. 2009; Mata TM. et al. 2010).

Con la transesterificazione i trigliceridi sono convertiti prima in digliceridi e monogliceridi e poi in esteri (biodiesel) e glicerolo (sottoprodotto) con l'impiego di un reagente (metanolo) e un catalizzatore (NaOH) (Mata TM. et al. 2010). Nella figura 1 è riportato un primo bilancio materiale ed energetico per la produzione di 1 kg di biodiesel da alghe. Il completamento del *flowchart* è tutt'ora in corso e sarà oggetto di ulteriori ricerche e studi.

Oltre all'olio, le microalghe contengono carboidrati (8-64% s.s.) e proteine (6-71% s.s.) per cui possono essere impiegate come materie prime per la produzione congiunta di altre merci (co-prodotti) (figura 2) da destinare a diversi mercati: da quelli farmaceutici e nutraceutici di elevato valore (mercati di nicchia) ai mercati degli additivi per i mangimi animali, delle bioplastiche e della generazione elettrica (prodotti di medio-alto valore) ai più grandi mercati degli oli vegetali da impiegare per la produzione di biodiesel. Vi sono anche diversi impieghi delle alghe nel campo della sanità (costituiscono materie prime per la produzione di farmaci per la cura di diverse patologie, quali colesterolo, osteoporosi, stress, cancro, invecchiamento delle cellule) (Chisti Y. 2007; Lagioia G. et al. 2011; Mata TM. et al. 2010; Thurmond W. 2011).

Aspetti economici

La produzione di biodiesel dalle alghe non è ancora competitiva con i carburanti tradizionali. In media la produzione di 1 kg di microalghe costa circa 2,95 \$ o 3,80 \$², a seconda che si utilizzino i fotobioreattori o le vasche *raceway* e assumendo che la CO₂ sia disponibile a costo zero (De Marco et al. 2006). Si prevede però che, grazie alle economie di scala, con una capacità annua di 10.000 t il costo di produzione si ridurrebbe rispettivamente a 0,47 \$/kg e 0,60 \$/kg. Sono tuttavia necessari miglioramenti tecnologici, soprattutto nella fase di raccolta della biomassa, che incide per il 20-30% sul costo totale di produzione delle microalghe (Chisti Y. 2007; Demirbas A., Demirbas MF. 2011). I costi di produzione del biodiesel da alghe, in un impianto pilota, sono stimati pari a 2,4-4,5 \$/L per le vasche e

5,2-10 \$/L per i fotobioreattori, ma nel lungo termine si prevede una loro riduzione (0,4 \$/L) in seguito ad una produzione su scala commerciale (Thurmond W. 2011). Ulteriori fattori che possono contribuire a rendere i costi del biodiesel da alghe più competitivi sono lo sviluppo di bioraffinerie, l'ingegneria genetica e i miglioramenti tecnologici.

Una bioraffineria può produrre simultaneamente biodiesel dagli oli e mangimi, biogas, energia elettrica dalla biomassa che residua dal processo produttivo. Inoltre bisogna considerare che, come già ricordato, oltre agli oli, la biomassa algale contiene significative quantità di proteine, carboidrati e altri nutrienti che possono essere impiegati per produrre diversi prodotti che, collocati su mercati diversi, costituiscono altre fonti di reddito.

La valorizzazione di questi co-prodotti di medio-alto valore economico (da diverse centinaia a qualche migliaia di \$/kg) consentirebbe di ridurre notevolmente il costo di produzione del biodiesel. Si prevede che nel 2015 i prodotti ricavati dalle microalghe potrebbero avere un mercato potenziale a livello mondiale dell'ordine di 25-50 miliardi di \$, dominato dalla produzione di biodiesel (50%), dall'assorbimento della CO₂ e dalla produzione di integratori alimentari (Alabi AO. et al. 2009).

L'ingegneria genetica può contribuire alla riduzione dei costi attraverso l'incremento dell'efficienza fotosintetica e quindi del rendimento della biomassa, il miglioramento del tasso di crescita della stessa, del contenuto in olio e della tolleranza alla temperatura, l'eliminazione della suscettibilità alla foto-ossidazione che danneggia le cellule (Chisti Y. 2007; Nigam PS., Singh A. 2010). Infine la produzione di biodiesel da microalghe può essere più sostenibile dal punto di vista ambientale e conveniente dal punto di vista economico se è combinata ad altri processi come il recupero dei gas di scarico e il trattamento delle acque reflue. I gas di scarico derivanti dagli impianti di generazione elettrica stimati, sono responsabili per più del 35% (più di 10 miliardi di t nel 2010) delle emissioni totali di CO₂ generate dai processi di produzione dell'energia. Tuttavia, contenendo fino al 15% di CO₂, rappresentano una fonte economica di anidride carbonica per la coltivazione delle microalghe, in particolare di quelle che ne tollerano elevati livelli (*Chlorococcum littorale* ecc.) (Amin S. 2009; Dinh LTT. et al. 2009; EC., 2007; Mata TM. et al. 2010; Nigam PS., Schenk PM. et al. 2008; Singh A. 2010). In media per produrre 1 t di microalghe sono necessarie circa 180 t di CO₂ (Chisti Y. 2007; Lagioia G. et al. 2011). Le alghe

Materia prima	Emissioni di CO ₂ (gCO ₂ eq/MJ)	Impiego di acqua (g/m ² /g)	Superficie necessaria per soddisfare la domanda mondiale di petrolio (10 ⁶ ha)
Jatropha	56,7	3.000	2.600
Alga	3	16	50-400
Olio di palma	138,7	5.500	820
Colza	78,1	1.370	4.100
Soia	90,7	530	10.900

TABELLA 6 Emissioni di gas climalteranti, impieghi di acqua e terra, costi totali di produzione del biodiesel da diverse materie prime

Fonte: elaborazione propria dati Dinh LTT. et al. 2009; Smith VH. et al. 2009

possono essere utilizzate anche per il trattamento delle acque reflue, in particolare per la rimozione di azoto e fosforo dagli effluenti, con la conseguente riduzione dell'impiego di acqua dolce e dell'eutrofizzazione dell'ambiente marino. Le alghe a questo scopo maggiormente utilizzate sono lo *C. vulgaris*, la *Chlorella*, la *Spirulina* (Amin S. 2009; Chisti Y. 2007; Dinh LTT. et al. 2009; Mata TM. et al. 2010). Sulla base dei dati attualmente disponibili, relativi ad impianti pilota, risulta che, rispetto alle altre colture oleaginose impiegate per la produzione di biodiesel, la coltivazione delle alghe appare quindi più vantaggiosa in termini di impatto ambientale (tabella 6), in quanto comporta minori emissioni di CO₂ in atmosfera, un minor impiego di acqua e l'occupazione di una superficie inferiore; tuttavia i costi di produzione del biodiesel da microalghe (2,4-4,5 \$/L per le vasche e 5,2-10 \$/L per i fotobioreattori) non sono ancora competitivi con quelli del diesel fossile (1 \$/L).

Conclusioni

I biocarburanti rappresentano una delle possibili opzioni per consentire il soddisfacimento della crescente domanda di energia in un modello di sviluppo economico sostenibile. Tuttavia la loro produzione allo stato attuale non è riuscita a soddisfare tutti i requisiti necessari (facilità, economicità, eco compatibilità, eticità) per renderli realmente concorrenziali con i carburanti fossili. Infatti la ricerca e le innovazioni in questo campo non si fermano, tanto è vero che si sperimentano tecnologie di terza generazione dopo che la prima e la seconda hanno mostrato tutti i loro limiti. In particolare

quelli di prima generazione, basati sulla trasformazione di colture alimentari, rispetto a tutto il ciclo di vita non sono efficienti dal punto di vista energetico (l'input di energia è frequentemente maggiore del valore energetico dei biocombustibili prodotti), non presentano un saldo positivo della CO₂ (CO₂ fissata durante la fase agricola rapportata alla CO₂ emessa) e sono fortemente in competizione con il settore alimentare in termini di quantità di derrate agricole e suoli sottratti alla produzione di alimenti. I biocombustibili di seconda generazione, prodotti da residui e scarti agroalimentari, attenuano il conflitto con il settore alimentare sebbene siano ancora caratterizzati da elevati costi di investimento.

Altra opzione percorribile nel medio e lungo termine è rappresentata dalla terza generazione basata sull'utilizzo delle microalghe. Queste infatti, come mostrano i risultati del presente lavoro, sono caratterizzate da un elevato contenuto in olio e da alti rendimenti in biodiesel e non entrano in competizione con la produzione alimentare, né con i suoli agricoli e le fonti di acqua dolce; anzi, la coltivazione delle alghe nelle zone aride o desertiche potrebbe contribuire allo sviluppo socio-economico di queste aree. Inoltre, come già ricordato, le alghe possono essere impiegate come materie prime per la produzione di diverse merci (omega-3, carotenoidi e altri prodotti bio-chimici) ad elevato valore economico, il cui scarto (l'olio estratto) è materia prima per l'industria del biodiesel attualmente in crisi a causa della scarsa disponibilità di materie prime. Il costo ancora elevato del biodiesel da alghe potrebbe essere sostanzialmente ridotto se si organizzasse una produzione integrata di merci diverse (figura 2) da destinare sia al mercato dei biocombustibili che ad altri mercati emergenti.

Alla fine di quest'analisi appare evidente che nel campo dei biocombustibili di terza generazione l'innovazione presenta ancora un largo margine di azione. In particolare è necessario concentrarsi sull'identificazione e/o sul miglioramento genetico delle specie con maggior contenuto lipidico e con tasso di crescita più elevato allo scopo di effettuare la raccolta giornaliera piuttosto che più volte a settimana. È necessario, inoltre, migliorare anche i costi e l'efficienza della produzione delle alghe per rendere la produzione di biodiesel di terza generazione sempre più conveniente per le aziende e quindi disponibile nei mercati dei carburanti. Va da sé comunque che un forte contributo all'attenuazione dei problemi ambientali associati alla produzione e uso di energia può derivare dalle azioni di risparmio energetico.

- Bibliografia**
- [1] Ahmad A.L., Mat Yasin N.H., Derek C.J.C., Lim J.K., "Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 584-93, 2011.
 - [2] Alabi A.O., Tampier M., Bibeau, E., "Microalgae technologies & processes for biofuels/bioenergy production in British Columbia: current technology, suitability and barriers to implementation. Final report to the British Columbia Innovation Council", *Seed Science*, 2009.
 - [3] Amin S., "Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae", *Energy Conversion and Management*, 50, 1834-40, 2009.
 - [4] Bruton T., Lyons H., Lerat Y., Stanley M., Rasmussen M.B., "A review of the potential of marine algae as a source of biofuel in Ireland", SEI (Sustainable Energy Ireland), 2009.
 - [5] Canakci M., Sanli H., "Biodiesel production from various feedstock and their effects on the fuel properties", *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 35, 431-41, 2008.
 - [6] Cenci V., et al., "I biocarburanti. Le filiere produttive, le tecnologie, i vantaggi ambientali e le prospettive di diffusione", Area Science Park, Trieste, 2007.
 - [7] Chisti Y., "Biodiesel from microalgae", *Biotechnology Advances*, 25, 294-306, 2007.
 - [8] De Marco O., Paiano A., Gallucci T., "La CO₂ da gas-serra a risorsa", *Ambiente Risorse Salute*, 107, 13-18, 2006.
 - [9] Demirbas A., Demirbas M.F., "Importance of algae oil as a source of biodiesel", *Energy Conversion and Management*, 52, 163-70, 2011.
 - [10] Dever J., Baldi S., "GAIN Report Number IT1160", USDA Foreign Agricultural Service, 2011, disponibile on line: http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Italian%20Biofuels%202011_Rome_Italy_12-29-2011.pdf Ultimo accesso gennaio 2011.
 - [11] Dinh L.T.T., Guo Y., Mannan M.S., "Sustainability evaluation of biodiesel production using multicriteria decision-making", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28, 38-46, 2009.
 - [12] EC (European Commission), "World energy Technology Outlook - 2050", 2007, disponibile on-line: http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/06_EC_-_WETO_H2_2050.pdf, ultimo accesso febbraio 2011.
 - [13] EIA (U.S. Energy Information Administration), "International Energy Statistics - CO₂ Emissions", EIA, 2011, disponibile on-line: <http://www.eia.doe.gov/ctapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8>, ultimo accesso 30 aprile 2011.
 - [14] Fukuda H., Kondo A., Noda H., "Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 5, 405-16, 2001.
 - [15] Hansen J., Sato M., Kharecha P., Beerling D., Berner R., Masson-Delmotte V., Pagani M., Raymo M., Royer D.L., Zachos J.C., "Target Atmospheric CO₂: Where should humanity aim?", *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 217-31, 2008.
 - [16] IEA (International Energy Agency), "Key World Energy Statistics", 2010, disponibile on line: http://www.iea.org/textbase/nppd/free/2010/key_stats_2010.pdf, ultimo accesso marzo 2011.
 - [17] ITF (International Transport Forum), "Reducing transport greenhouse gas emissions: trends & Data 2010", disponibile on-line: <http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10GHGTrends.pdf>, ultimo accesso gennaio 2011.
 - [18] Lagioia G., Amicarelli V., Calabrò G., Tresca FA., "Environmentally innovation in the fuel sector: the role of biofuel from algae", *Journal of Commodity Science, Technology and Quality*, 51, 119-40, 2011.
 - [19] Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J.P., Bernard O., "Life-Cycle Assessment of biodiesel production from microalgae", *Environmental Science & Technology*, 43, 6475-81, 2009.
 - [20] Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S., "Microalgae for biodiesel production and other applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 217-32, 2010.
 - [21] Nigam P.S., Singh A., "Production of liquid biofuels from renewable resources", *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, 52-68, 2010.
 - [22] Pfromm P.H., Amanor-Boadu V., Nelson R., "Sustainability of algae derived biodiesel: A mass balance approach", *Bioresource Technology*, 102, 1185-93, 2011.
 - [23] Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F.S.III, Lambin E., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry V.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J., "Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity", *Ecology and Society*, 14, art. 32, 2009.
 - [24] Schenk P.M., Thomas S.R., Stephens E., Marx U.C., Mussnug J.H., Posten C., Kruse O., Hankamer B., "Second generation biofuels: High-efficiency Microalgae for biodiesel production", *Bioenergy Research*, 1, 20-43, 2008.
 - [25] Singh J., Gu S., "Commercialization potential of microalgae for biofuels production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2596-610, 2010.
 - [26] Smith V.H., Sturm B.S.M., deNoyelles F.J., Billings S.A., "The ecology of algal biodiesel production", *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 301-9, 2009.
 - [27] Thurmond W., "Algae 2020: Vol. 2: Global Biofuels, Drop-In Fuels, Biochems Market and Forecasts", *Emerging Markets Online*, Houston (US), 2011.
 - [28] Tickell J., Tickell K., Roman K., "From the fryer to the fuel tank: the complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel", Joshua Tickell Media Productions, New Orleans, 2003.
 - [29] Yamane K., Ueta A., Shimamoto Y., "Influence of Physical and Chemical Properties of Biodiesel Fuel on Injection, Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a DI-CI Engine", *The Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines*, Nagoya, July 1-4 2001.
 - [30] Weyer K.M., Bush D.R., Darzins A., Willson B.D., "Theoretical Maxi-

- Note**
- [1] Con una elevata irradiazione la quantità di ossigeno prodotta in un fotobioreattore tubolare è pari a circa 10 g/m³/min. Un livello di ossigeno maggiore del limite di saturazione dell'aria inibisce la fotosintesi e, combinato con una intensa irradiazione, può danneggiare le cellule delle alghe. Pertanto i fotobioreattori devono essere periodicamente puliti attraverso il passaggio della biomassa in una colonna di degassazione (Chisti Y. 2007).
 - [2] I costi di produzione delle microalghe variano a seconda della radiazione solare (e quindi del luogo di localizzazione dell'impianto), della specie coltivata, dei sistemi di coltivazione adottati, del costo dell'energia e dei fertilizzanti (Chisti Y. 2007).