

Biomasse e biocarburanti: l'analisi della sostenibilità

articolo

Ercole Amato

Il problema dell'analisi delle questioni legate all'utilizzo dei prodotti energetici di derivazione vegetale è un problema che negli ultimi anni ha subito valutazioni discordanti. Da un primo approccio molto favorevole alla prospettiva del loro effetto di sostituzione dei prodotti energetici fossili si è passati nel corso del tempo ad una visione molto più critica che deriva dalla contrapposizione tra la filiera produttiva dei biocarburanti e la filiera produttiva alimentare. Naturalmente la produzione dei biocarburanti ha avuto bisogno di un incremento costante di aree coltivabili e questo anche per la richiesta sempre crescente a livello mondiale di questi prodotti dovuta a scelte di carattere politico, in primo luogo a livello europeo¹. Questo incremento non poteva non entrare in conflitto con la destinazione agricola alimentare delle stesse aree. Si è sviluppata con il tempo una valutazione di carattere economico perché i proprietari delle terre prima coltivate per scopi alimentari hanno cominciato a ritenere più conveniente la destinazione agroenergetica degli stessi lotti, diffondendosi sempre più il cambio di utilizzo dei terreni verso finalità no-food. La sottrazione di crescenti aree agricole a scopi alimentari ha provocato nel tempo degli squilibri a livello mondiale in termini di disponibilità di prodotti da destinarsi all'alimentazione². Senza soffermarsi su questioni di carattere speculativo e di politica economica internazionale è il caso di riflettere sulle questioni legate alla libera scelta degli agricoltori. Ovviamente, tenuto conto delle condizioni degli agricoltori nei paesi sottosviluppati dove già le condizioni di utilizzo e

di produzione agricola dei terreni marginali erano abbastanza complesse, l'offerta economica che molti proprietari terrieri e agricoltori hanno ricevuto per il cambio di destinazione della produzione è stata vista come una opportunità di sviluppo locale e quindi è stata lasciata alla libera scelta degli operatori. Tutto ciò non poteva non avere un impatto sulla disponibilità a livello internazionale delle derrate alimentari che nel corso degli anni ha subito delle forti contrazioni spesso connesse con l'ampliamento delle produzioni agroenergetiche³.

Dopo una lunga contrapposizione su questi temi, si è arrivati da alcuni anni ad un punto di equilibrio e cioè sono state impostate delle condizioni di sostenibilità per l'utilizzo di questi prodotti; queste condizioni sono state recepite dalla normativa internazionale in modo da cercare di raggiungere una giusta compensazione tra le esigenze di carattere sociale ed ambientale e quelle di carattere industriale ed energetico⁴.

I biocarburanti sono prodotti il cui impiego sicuramente consente di ottenere dei grandi ed importanti benefici a livello ambientale ma certamente, vista la sensibilità della filiera produttiva nei confronti dell'ambiente circostante, sono da monitorare con accuratezza da parte degli organismi internazionali di controllo per capire come possano essere ottenuti nella maniera più sostenibile e quindi più etica possibile, tenendo conto di situazioni compatibili con lo sviluppo locale soprattutto delle popolazioni in condizioni più disagiate⁵.



Presidente del CESAB (Centro Ricerche Interuniversitario in Scienze Ambientali e Biotecnologie), Docente di Politiche Economiche per l'Energia e l'Ambiente presso Unipace Roma

Per «biomassa» si intende la parte biodegradabile dei prodotti, dei rifiuti e dei residui provenienti dall'agricoltura (comprese le sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani, il cosiddetto umido, quella parte del rifiuto domestico che viene differenziato e viene destinato a vari usi, ad es. al compostaggio o alla produzione di energia⁶.

Le biomasse possono essere distinte in varie sottocategorie. In primo luogo le biomasse solide, che sono i residui della produzione agricola, quindi potature di alberi, fogliame raccolto, scarti della produzione agricola, che vengono usate per la generazione di energia termica ed elettrica. Le biomasse solide sono pertanto prodotti che possono essere esclusivamente impiegati in impianti per la generazione interna di calore, eventualmente accoppiati ad alternatori a turbina per la produzione di energia elettrica.

Rientra in questa categoria il biogas che è invece prodotto in impianti dove sono realizzati digestori in cui alcuni batteri procedono alla degradazione di parti del materiale contenuto nel digestato, soprattutto zuccheri e proteine. I batteri in sostanza digeriscono le proteine e la produzione che ne residua è un biogas costituito prevalentemente da gas metano.

Abbiamo poi i biocarburanti o bioliquidi, che sono oli vegetali o trasformazioni di oli vegetali destinati alla combustione o all'utilizzo come biocarburanti per motori.

Infine dobbiamo considerare il syngas da gassificazione che è un prodotto sintetico ottenuto dal processo di pirogassificazione del carbonio contenuto nel materiale vegetale. Attraverso il processo di pirogassificazione, in condizioni di assenza di ossigeno (quindi in condizioni anaerobiche), sfruttando l'alta temperatura di questi impianti, si ottiene una scomposizione molecolare della materia prima nelle varie componenti chimiche: un gas

molto ricco di metano ma anche molto ricco di idrogeno che ha un potere calorifico più elevato del metano.

Nell'ambito del concetto generale di biomasse e biocarburanti esiste quindi già una sottodistinzione tra biomasse solide, biogas, biocarburanti o bioliquidi e singas. A questo punto occorre precisare con maggiore precisione la differenza tra biocarburanti e bioliquidi.

Per biocarburanti si intendono quei prodotti energetici di derivazione biologica destinati ad alimentare i motori a scoppio cioè motori endotermici che contengono al loro interno una camera di scoppio che genera il movimento di un asse destinato a garantire l'autotrazione di aerei, navi, automobili, generatori elettrici.

I bioliquidi sono invece quei prodotti sempre di origine vegetale che sono destinati alla produzione di calore tramite combustione in caldaie o alla produzione di energia elettrica attraverso il loro impiego in un bruciatore che, scambiando il calore con un fluido, produce l'espansione di un gas tramite il quale si attiva il movimento di una turbina collegata ad un generatore elettrico. La produzione di energia in questi impianti, cosiddetti esotermici, generalmente avviene attraverso l'impiego di biomasse solide ma possiamo avere anche impianti che funzionano con bioliquidi⁷.

Le tipologie più frequenti di biocarburanti e bioliquidi sono il biodiesel, che viene usato come sostitutivo del gasolio, il bioetanolo, che è sostitutivo della benzina, l'ETBE, anche esso sostitutivo della benzina, e poi i biocarburanti di seconda generazione o di terza generazione. I primi tre sono considerati biocarburanti di prima generazione, cioè biocarburanti che derivano direttamente da materie prime vegetali, soprattutto oli o alcole⁸.

I biocarburanti di seconda generazione sono quei prodotti ottenuti dalla trasformazione della lignocellulosa o da altri processi chimici. Parliamo quindi di prodotti che si ottengono

*I biocarburanti sono
quindi attualmente
l'unica soluzione
valida come alternativa
all'utilizzo dei derivati del
petrolio*

direttamente dalle fibre delle materie vegetali che vengono scomposte attraverso processi industriali di alto profilo. I biocarburanti di seconda generazione sono l'etanolo derivato da biomasse legnocellulosiche, il FT-Diesel (diesel di sintesi derivato dal processo di Fischer-Tropsch) e il biodimetiltere.

Il biocarburante di terza generazione è invece il biodiesel ottenuto dall'olio prodotto dalla coltivazione di microalghe. Gli impianti di coltivazione delle microalghe sono costituiti da vasche di vario tipo e forma dove si producono alghe da cui si estrae l'olio impiegato per la produzione di biodiesel⁹.

La materia prima vegetale utilizzata per ottenere l'olio da impiegare nella produzione di biodiesel può essere ad es. il girasole, la soia, il mais, la colza, la palma, gli oli vegetali esausti che costituiscono gli scarti dei processi di cottura. Con un processo di esterificazione viene realizzata una reazione tra gli acidi grassi degli oli vegetali e l'alcole etilico o metilico in impianti dedicati da cui si ottiene un prodotto che è in sostanza una trasformazione dell'olio attraverso la reazione chimica con l'alcole che ne incrementa il potere calorifico. Gli acidi grassi contenuti nell'olio vengono completamente separati dal prodotto finito perché altrimenti danneggerebbero il motore a scoppio: da questo processo di esterificazione otteniamo la glicerina impiegata per scopi industriali.

Il bioetanolo è invece sostanzialmente alcole che viene ottenuto da quei prodotti che contengono sostanze degradabili e fermentabili e quindi idonee a produrre alcole: barbabietola da zucchero, cereali, scarti agricoli, legna paglia ecc. Da questa operazione si ottiene un alcole che deve essere distillato e rettificato e può essere impiegato direttamente nei motori a scoppio in aggiunta alla benzina.

L'ETBE si ottiene invece da un processo industriale più spinto perché è un prodotto a maggiore contenuto di potere calorifico che si ottiene dalla reazione chimica tra il bioetanolo e l'isobutilene. Quindi è un prodotto per metà di origine biologica e per metà di origine fossile. L'ETBE è un prodotto energetico non completamente biologico perché il prodotto contiene alcole solo per il 47%;

il restante 53% è composto da prodotto fossile.

Questi prodotti sono impiegati come carburanti per motori fissi o autotrazione, carburanti per la produzione di elettricità, combustibili per il riscaldamento civile e combustibili per la produzione di elettricità. Si è parlato negli ultimi anni della sostituzione di carburanti fossili con prodotti più compatibili con l'ambiente. Si è pensato ad esempio all'impiego dell'energia elettrica per il movimento delle automobili. Sono però tutte soluzioni che rimandano alla stessa origine: quello che può generare un movimento meccanico se non è un carburante fossile può essere l'energia elettrica ma il problema riguarda sempre la produzione dell'elettricità. L'elettricità come sappiamo non esiste in natura e quindi deve essere prodotta ma la produzione intensiva di energia elettrica ha bisogno di ulteriore energia. In ogni processo fino ad ora utilizzato per produrre elettricità in modo alternativo all'impiego di prodotti fossili occorre impiegare a propria volta energia (per il funzionamento delle pile a combustibile occorre produrre idrogeno che si ottiene da idrolisi o estraendolo da gas metano).

I biocarburanti sono quindi attualmente l'unica soluzione valida come alternativa all'utilizzo dei derivati del petrolio nel fornire energia accumulabile in abbondanza per i motori a scoppio.

Qual è l'impatto che questi prodotti biologici possono avere sull'ambiente? Teniamo conto che il 30% delle emissioni di CO₂ nei paesi industrializzati deriva dal settore dell'industria e dei trasporti. Abbiamo un rilascio ogni anno in atmosfera di circa 900 mln di tonn. di anidride carbonica solo per l'utilizzo dei prodotti fossili in questi due settori. L'impatto sull'ambiente di queste attività è pesantissimo¹⁰. L'utilizzo di prodotti energetici ecosostenibili sarebbe quindi la soluzione per risolvere il problema dell'incremento dei gas serra.

Tale problema sarebbe sicuramente allievato dall'utilizzo dei biocarburanti: per questi prodotti infatti il bilancio del carbonio è nullo perché il biocarburante essendo di derivazio-

ne vegetale utilizza piante che nel loro ciclo di vita hanno assorbito carbonio dall'atmosfera. Quando il biocarburante viene combusto e quindi avviene l'ossidazione del carbonio con l'ossigeno contenuto nell'atmosfera si ottiene l'anidride carbonica. Il carbonio nel processo di ossidazione si unisce all'ossigeno creando la molecola CO₂. Il carbonio contenuto nella CO₂ così prodotta corrisponde a quello contenuto nel biocarburante che è uguale a quello che la pianta ha assorbito dall'atmosfera. In questo caso parliamo quindi di bilancio zero del carbonio. Non si aggiunge nulla né si sottrae nulla dall'atmosfera; con il processo di combustione dei biocarburanti andiamo a rilasciare esattamente quello che era stato sottratto, effettuando in sostanza un'operazione di compensazione¹¹.

Bisogna pensare che le piante sono dei depositi di carbonio. Attraverso la fotosintesi clorofilliana le piante assorbono CO₂ dall'aria, scomponendola e accumulando carbonio nelle proprie fibre, rilasciando ossigeno. Quando il prodotto vegetale viene bruciato questo carbonio è rilasciato nuovamente in atmosfera.

La differenza in termini di emissioni di CO₂ rispetto ai prodotti fossili sta nel fatto che i prodotti fossili derivano dal petrolio che è una sostanza dove si è accumulato carbonio in milioni di anni attraverso un processo geologico di trasformazione di piante o animali che ha degradato il carbonio in essi contenuto. Durante la combustione di un carburante fossile si emette, quindi, in atmosfera carbonio che è stato sottratto all'ambiente milioni di anni fa. Il biodiesel contiene invece carbonio accumulato da piante contemporanee a noi; con l'uso dei derivati dal petrolio, invece, non facciamo altro che rilasciare carbonio altrimenti stoccato nel sottosuolo andando ad incrementare i livelli di carbonio contenuti in atmosfera.

Bisogna poi tenere conto che rispetto al prodotto fossile il biocarburante combusto non emette componenti del cosiddetto particolato o polveri sottili, e neanche anidride solforosa e ossidi di azoto.

L'esame dei benefici prodotti dai biocarburanti non deve essere condotto solo in sca-

la globale ma anche in scala locale perché se si riesce ad accorciare la filiera produttiva, impiegando i prodotti vegetali per scopi energetici il più vicino possibile ai luoghi di produzione, si ottiene il massimo risultato in termini ambientali perché la combustione avviene presso l'area di produzione dove il vegetale ha potuto sintetizzare il carbonio dall'atmosfera; quindi a livello locale il bilancio è zero. In presenza invece di un processo di filiera lunga il vantaggio ambientale si ha nei luoghi di produzione spesso molto lontani dai luoghi di impiego. Oltre ciò, la problematica connessa con la filiera lunga coinvolge tutta una serie di passaggi produttivi, in primo luogo i costi energetici dei trasporti che incidono nel bilancio generale del carbonio: più è ampio l'impiego dei mezzi di trasporto maggiore sarà la CO₂ emessa dagli stessi. Quindi il calcolo complessivo del beneficio del prodotto energetico vegetale viene limitato¹².

Tra i vantaggi che si ottengono dall'impiego dei biocarburanti c'è sicuramente la riduzione della dipendenza dal greggio, con l'attivazione di processi economici che possono ricadere sul territorio dove i vegetali vengono ottenuti. L'agroenergia non genera solo vantaggi per l'ambiente ma anche dal punto di vista economico e occupazionale perché stimola l'utilizzo di aree depresse dove magari non sono possibili colture tradizionali alimentari e crea una produzione distribuita di energia. Se in alcuni paesi in via di sviluppo si dovesse riuscire a localizzare aree di produzione di olio per la produzione di energia elettrica si riuscirebbe a garantire alle comunità locali l'autosufficienza energetica.

A questo punto occorre affrontare l'argomento più delicato nell'ambito dello studio dei biocarburanti e cioè le condizioni di sostenibilità. Si è detto sopra che la crisi della produzione dei biocarburanti negli ultimi anni è derivata dal fatto che molte aree prima destinate alla produzione agricola alimentare sono state orientate alla produzione agricola energetica. Sono state ad esempio disboscate enormi aree boschive per l'impianto di palme per la produzione di olio. Questo ha creato grandi disequilibri a livello internazionale¹³. Di conseguenza, non si può valutare solo il

vantaggio ambientale ed energetico di questi prodotti, occorre anche individuare nel caso specifico se essi siano stati ottenuti attraverso attività incompatibili con una equilibrata gestione delle risorse locali¹⁴.

Secondo le condizioni di sostenibilità dei biocarburanti recepite dalla normativa internazionale, per essere una valida alternativa ai carburanti fossili, un biocarburante dovrebbe fornire un guadagno energetico netto, produrre benefici ambientali, essere economicamente competitivo ed essere producibile in grande quantità senza pregiudicare i rifornimenti alimentari¹⁵.

Quando si fa riferimento al guadagno energetico netto significa che l'energia impiegata per la fabbricazione del biocarburante non deve essere mai superiore all'energia ottenuta dall'impiego del biocarburante. L'impiego di quest'ultimo deve produrre effetti benefici ambientali, quindi riduzioni di inquinanti di varia natura (CO₂, polveri sottili, sostanze acide, ecc.), essere competitivo economicamente (se si ottiene un biocarburante con un costo notevolmente superiore al carburante fossile è inutile sostenerlo con politiche economiche internazionali perché non sarà mai la scelta giusta), deve essere producibile in grande quantità senza pregiudicare i rifornimenti alimentari, quindi senza sottrarre terre attualmente destinate alla produzione agricola alimentare¹⁶.

L'esame del guadagno energetico netto si effettua attraverso l'applicazione del coefficiente di efficienza energetica EROEI, Energy Returned On Energy Invested: l'energia ottenuta in rapporto all'energia impiegata. Per il biodiesel da girasole l'energia ottenuta è da tre a cinque volte quella impiegata nel ciclo di produzione. Il biodiesel di terza generazione presenta un coefficiente di efficienza quasi pari a 50 volte l'unità di energia che viene impiegata per la produzione di una pari quantità di prodotto. Per alcuni prodotti, ad esempio cereali, il valore è molto ridotto perché per la coltivazione di alcuni di essi occorre impiegare in maniera più intensiva i mezzi di produzione agricola: acqua, mezzi meccanici, arature. Per quanto riguarda il coefficiente EROEI, il petrolio assicura un

valore che può arrivare a 100 volte perché il petrolio ha bisogno di processi industriali limitati: una volta individuato il giacimento, i costi energetici impiegati per l'estrazione sono infatti molto contenuti¹⁷.

Normalmente per stabilire il confronto fra gli inquinanti emessi dall'impiego dei prodotti vegetali e quelli emessi dai prodotti energetici fossili si valutano anche le emissioni rilasciate dalle lavorazioni agricole. Si trovano in letteratura i calcoli dell'energia impiegata per la produzione dei biocarburanti che tengono conto dei processi di lavorazione agricola: aratura, concimazione, raccolta, preparazione del terreno, ecc.

Generalmente, invece, non sono mai tenuti in considerazione i processi industriali di movimentazione dei prodotti energetici fossili: il greggio è sempre considerato nel calcolo degli inquinanti secondo le emissioni individuate a seguito del processo combustione.

Se è vero che nella valutazione complessiva del bilancio energetico dei prodotti biologici devono essere prese in considerazione le emissioni collegate con i processi di produzione agricola, è anche vero che il petrolio, pur non impegnando grandi quantità di energia nella fase produttiva, ha invece dei grandi costi energetici nella fase di movimentazione. Oltre tutto, sussistono anche problemi di carattere ambientale collegati ai rischi che la movimentazione del greggio produce negli spostamenti, ad esempio via mare, cosa che invece non sussiste per quanto riguarda gli oli vegetali perché le eventuali perdite di prodotti vegetali negli oceani sono degradate attraverso l'azione di agenti biologici o dell'ossidazione naturale.

La produzione di biocarburanti, inoltre, è possibile nei processi di filiera corta, al contrario della produzione di prodotti energetici fossili che sono invece quasi sempre estratti molto lontano dalle zone di impiego finale.

Per quanto riguarda l'analisi degli inquinanti da combustione, la riduzione effettiva delle emissioni inquinanti totali (anidride carbonica, anidride solforosa, ossidi di azoto, particolato, ecc.) dipende molto dalla caratteristica di filiera: nei casi di filiera corta la percentuale di riduzione è, ovviamente, a seconda delle

tipologia dei vegetali, superiore ai casi di filiera lunga per le ragioni sopra specificate.

Esaminiamo ora in dettaglio la riduzione solo della CO₂ emessa dai veicoli. Come risulta dallo studio della Commissione europea WTW JRC/EUCAR/Concawe, l'abbattimento della CO₂ emessa dai motori che sono riforniti con biocarburanti è anche esso evidente: bioetanolo da mais: -30% / -5%, biodiesel: -75% / -32%, bioetanolo da barbabietola: -74% / -35%, bioetanolo da lignocellulosa: -90% / -74%. I dati variano molto a seconda del contenuto di carbonio nel biocarburante, del processo industriale di fabbricazione e della tipologia del motore¹⁸. Il panorama sulla sostenibilità è ora quasi completo. Manca solo da esaminare l'aspetto connesso con i cosiddetti "costi esterni". Una valutazione oggettiva dell'impatto complessivo associato all'uso delle diverse fonti di energia può essere condotta calcolando i cosiddetti "costi esterni" associati all'uso delle diverse fonti energetiche, ovvero dei costi derivanti dalla monetizzazione degli impatti sulla salute, sull'ambiente e sulle attività economiche, inclusi gli effetti di possibili incidenti, tenendo conto di tutto il ciclo produttivo. Nell'ambito del progetto europeo Externe è stato elaborato uno studio che valuta i costi esterni medi in 15 paesi europei. Non parliamo solo di ambiente ma di problemi di carattere sanitario e sociale: non, quindi, di ambiente a livello di sistema medio grande ma di impatto locale. Per la valutazione di tali costi si pone come uguale a 1 i costi esterni prodotti da un impianto eolico che è quello che ha il minimo impatto ambientale e socio-sanitario. Posto uguale a 1 i costi esterni di un impianto eolico, l'utilizzo dei seguenti prodotti produce costi esterni pari a: 85 volte per il carbone, 70 volte per il gasolio, 25 volte per il gas, 15 volte per le biomasse. Come si vede, i costi esterni dell'energia da biomassa sono 5 volte inferiori a quelli derivanti dalle fonti fossili¹⁹.

In conclusione, possiamo a questo punto fornire una sintesi dell'analisi di questi prodotti. Dal punto di vista sanitario, sociale, ambientale ed economico (in senso generale, non in relazione solo ai costi del prodotto ma

in considerazione di una economia di scala locale cioè in relazione anche agli effetti sullo sviluppo di processi occupazionali di filiera che producono reddito), le biomasse sono sicuramente una ottima opportunità da valorizzare. Esse, però, non possono certo essere considerate la soluzione definitiva al problema dell'approvvigionamento di energia completamente sostenibile, disponibile in grande quantità e a basso costo.

NOTE

¹ Sorda, G., Banse, M. & Kemfert, C., An overview of biofuel policies across the world, *Energ Policy*. 38, 6977–6988, 10.1016/j.enpol.2010.06.066 (2010).

² FAO-OECD, Food and Agriculture Organization/Organization for Economic Co-operation and Development: Price Volatility in Food and Agricultural Markets: Policy Responses. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011).

³ Lima, M., Skutsch, M. & de Medeiros Costa, G. Deforestation and the social impacts of soy for biodiesel: perspectives of farmers in the south Brazilian Amazon. *Ecol Soc*. 16(4): 04, 10.5751/ES-04366-160404 (2011).

⁴ Rosegrant, M. W. & Msangi, S. Consensus and Contention in the Food-Versus-Fuel Debate. *Annu Rev Env Resour* 39, 271–294, 10.1146/annurev-environ-031813-132233 (2014).

⁵ Achten, M. J. W. & Verchot, L. V. Implications of biodiesel-induced land-use changes for CO₂ emissions: case studies in tropical America, Africa, and Southeast Asia. *Ecol and Soc*. 16(4): 14, 10.5751/ES-04403-160414 (2011).

⁶ European Union, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (2009).

⁷ Quaderni energia ENEA 2011: <http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/documenti/quaderni-energia/biomasse.pdf>.

⁸ Rulli, M. C. *et al.* The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Sci. Rep.* 6, 22521; doi: 10.1038/srep22521 (2016).

⁹ Gerbens-Leenes, P. W., Xu, L., de Vries, G. J. & Hoekstra A. Y. The blue water footprint and land

use of biofuels from algae, *Water Resour Res*, 50, 8549–8563, 10.1002/2014WR015710 (2014).

¹⁰ International Energy Agency, IEA database, Available at <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch>.

¹¹ Rapporto FAO “THE STATE OF FOOD AND AGRICULTURE 2008 - BIOFUELS: prospects, risks and opportunities”, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Rome, 2008.

¹² Meyfroidt, P. *et al.* Globalization of land use: distant drivers of land change and geographic displacement of land use. *Curr Opin Environ Sustain* 5, 1–7, 10.1016/j.cosust.2013.04.003 (2013).

¹³ Fitzherbert, E. B. *et al.* How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends Ecol Evol*. 23, 538–545, 10.1016/j.tree.2008.06.012 (2008).

¹⁴ Carlson, K. M. *et al.* Committed carbon emissions, deforestation, and community land conversion from oil palm plantation expansion in West Kalimantan, Indonesia. *Proc Natl Acad Sci USA* 109, 7559–7564, 10.1073/pnas.1200452109 (2012).

¹⁵ Direttiva 2015/1513 del 9 settembre 2015 che modifica la direttiva 98/70/CE, relativa alla qualità

della benzina e del combustibile diesel, e la direttiva 2009/28/CE, sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili.

¹⁶ United Nations Environment Programme, *Towards sustainable production and use of resources: Assessing Biofuels*, UNEP, Division of Technology Industry and Economics, Paris (2009).

¹⁷ Cutler J.Cleveland, Robert Costanza, Charles A.S.Hall, Robert Kaufmann, Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective Science, Vol.225, No. 4665 (Aug. 31, 1984), 890-897; David Elliott, A sustainable future? the limits of renewables, Before the wells run dry, Feasta 2003; Ian Hore-Lacy, Renewable Energy and Nuclear Power, Before the wells run dry, Feasta 2003; Cutler Cleveland, Net energy from the extraction of oil and gas in the United States, Energy, Volume 30, Issue 5, April 2005, 769-782.

¹⁸ <http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>.

¹⁹ The ExternE ‘Externalities of Energy’ report, 2001, European Commission ExternE Programme, DG12, L-2920 Luxembourg. Methodology 2005 Update. https://ec.europa.eu/research/energy/pdf/kina_en.pdf.