Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
125° (2007), Vol. XXXI, P. II, t. I, pp. 169-178

PAOLO CICCIOLI * – FRANCESCO LORETO **

Impatto della combustione di biomassa sulla qualità dell'atmosfera

Sommario – Attraverso l'analisi dei dati disponibili sull'emissione di combustione di biomassa originata dagli incendi boschivi, viene analizzato il potenziale impatto che l'uso di questo combustile a fini energetici può avere sulla qualità dell'atmosfera e sui cambiamenti climatici. Sulla base di queste considerazioni, indicazioni sono date per minimizzarne l'impatto.

Abstract – The potential impact on the quality of the atmosphere and climate changes arising from the use of biomass for energy production is analyzed on the light of emission data available on biomass burning. Indications are given to minimize this impact.

Introduzione

La biomassa vegetale terrestre rappresenta un'importante alternativa ai combustibili fossili per la produzione di energia in quanto la sua combustione dà luogo al rilascio di quella parte di CO_2 precedentemente rimossa dall'atmosfera attraverso la fotosintesi, che è stata convertita dalle piante in massa legnosa. Malgrado questi aspetti positivi, l'uso della biomassa come combustibile non è scevro da problemi. In aggiunta alla CO_2 , la combustione di biomassa produce infatti un numero alquanto consistente di altri inquinanti in grado di alterare la qualità dell'aria e di influenzare il clima. Scopo di questo lavoro è quello di analizzare l'impatto ambientale associato allo sfruttamento della biomassa come combustibile, attraverso un'analisi dei dati finora accumulati sull'emissione ed il trasporto dei prodotti emessi

* Istituto di Metodologie Chimiche del CNR Area della Ricerca di Roma1 - 00016 Monterotondo Scalo. E-mail: paolo.ciccioli@imc.cnr.it
** Istituto di Biologia Agroambientale e Forestale CNR Area della Ricerca di Roma1 - 00016 Monterotondo Scalo.

e/o formati nell'atmosfera. Sulla base di queste indicazioni, verranno definiti i possibili accorgimenti per minimizzare i problemi principali associati con il suo uso.

Principali componenti emessi durante la combustione da biomassa

Nell'ultimo decennio una serie crescente di studi è stato effettuato al fine di determinare i componenti emessi dalla combustione da biomassa. La motivazione principale di questo interesse risiede nell'enorme numero di incendi che si sviluppano sulla superficie terrestre a carico delle aree forestali, delle praterie e delle savane (Scholes *et al.*, 2003). La pratica di incendiare larghe aree ricche di biomassa è tutt'altro che scomparsa nel nostro pianeta. Essa è ancora comunemente praticata dalle popolazioni dell'Africa, dell'Asia e del Sud America per procurarsi aree da adibire a pascolo e coltivazione. La biomassa vegetale rappresenta anche la sorgente energetica principale per le popolazioni più povere del pianeta. È stato stimato che metà della popolazione della terra soddisfa il 35% dei propri bisogni energetici attraverso la combustione di biomassa (Scholes *et al.*, 2003). Per questo motivo essa copre attualmente il 14% del fabbisogno globale di energia. Combustione di biomassa ha luogo anche nelle aree più sviluppate della terra per cause accidentali (fulmini, autocombustione), dolose (speculazioni per convertire aree boschive in aree turistiche e residenziali) o ragioni legate a pratiche agricole. Anche se molto meno comune che in passato, l'incendio è ancora usato in alcune regioni d'Europa per eliminare dal suolo i residui di coltivazione di cereali grano, mais e riso.

Sulla base di studi effettuati in laboratorio (Lobert and Warnatz, 1993), la combustione di biomassa si svolge in due fasi diverse. Ad una prima fase chiamata di flaming, caratterizzata da un basso rapporto CO/CO_2 (2-3%), emissione di fuliggine (carbone) ed alte temperature di combustione, segue una seconda fase (chiamata smoldering) in cui si ha un drastico aumento del rapporto CO/CO_2 (15-17%), l'emissione di particelle carboniose grigio-biancastre e temperature più basse di combustione. Tra le due fasi, quella di flaming è quella caratterizzata dalla maggiore efficienza nel convertire il materiale organico in CO_2, H_2O e carbone. È quella in cui si osserva la maggiore in perdita in peso della biomassa originale (72% ca.) e la minore emissione di composti organici volatili VOC e particelle La propagazione dell'incendio avviene attraverso una fase preliminare caratterizzata dalla vaporizzazione VOC dalle foglie e dal fusto, che si infiammano (glowing combustion), una volta raggiunto il rapporto VOC/aria ottimale e la temperatura d'innesco. Se si considera l'emissione totale, espressa comunemente in peso di composto per peso di biomassa secca, si ottengono, per varie tipologie di incendi, i valori di emissione riportati in Tabella 1. Queste stime sono stati ottenute elaborando i risultati di un numero elevatissimo di studi effettuati in laboratorio e di campo (Andreae e Merlet, 2001). I dati in Tabella mostrano come la combustione di biomassa produca composti non molto dissimili da quelli prodotti dalla combustione di carbone. Oltre la CO_2, che è il prodotto gassoso principale, si ha infatti produ-

Specie	Savane e Praterie	Foreste Tropicali	Foreste Temperate e Boreali	Residui di coltivazioni agricole	Combustione di carbone
CO_2	1613 ± 95	1580 ± 90	1569 ± 131	1515 ± 177	2611 ± 241
CO	65 ± 20	104 ± 20	107 ± 37	92 ± 84	200 ± 38
CH_4	2,3 ± 0,9	6,8 ± 2,0	4,7 ± 1,9	2,7*	6,2 ± 2,3
VOC-CH_4	3,4 ± 1,0	8,1 ± 3,0	5,7 ± 4,6	(7)	2,7 ± 1,9
Particolato Totale (TPM)	8,3 ± 3,2	6,5-10,5*	17,6 ± 6,4	13**	(12)
Particolato < 2,5 mm (PM 2.5)	5,4 ± 1,5	9,1 ± 1,5	13,0 ± 0,7	3,9**	(9)
Carbonio totale particellare (TC)	3,7 ± 1,3	6,6 ± 1,5	6,1-10,4*	4**	6,3**
Carbonio organico (OC)	3,4 ± 1,4	5,2 ± 1,5	8,6-9,7	3,3**	4,8**
Carbone (BC)	0,48 ± 0,18	0,66 ± 0,31	0,56 ± 0,19	0,69 ± 0,13	1,5**
NO_x (espressi come NO)	3,9 ± 2,5	1,6 ± 0,7	3,0 ± 1,4	2,5 ± 1,0	3,9**
N_2O	0,21 ± 0,1	(0,2)	0,26 ± 0,07	0,07**	(0,2)

Tab. 1 – Fattori di emissione (in g kg^{-1} di massa secca bruciata) dei principali composti prodotti dalla combustione di biomassa in vari ecosistemi e nella combustione di carbone, secondo Andreae e Merlet (2001). Valori in parentesi sono le migliori stime. Valori marcati con * sono i valori massimi e minimi misurati. ** Valori di cui non è nota o indicata la precisione.

zione di monossido di carbonio (CO), metano (CH_4), VOC pirogenici e biogenici e di monossido (NO) e protossido di azoto (N_2O). Per quel che concerne il materiale particellare totale, la quantità emessa è assai elevata. Essa è costituita per lo più da particolato carbonioso inferiore ai 2,5 μm. La frazione più rilevante di questo particolato carbonioso non è costituita però da fuliggine (particelle di carbone), ma da particelle formate da carbonio organico parzialmente combusto. Ambedue risultano ricchi di idrocarburi policromatici (PAH) e derivati nitrati potenzialmente tossici per l'uomo e l'ambiente (Ciccioli *et al.*, 1996). Molto interessante risulta la composizione dei VOC, in quanto insieme ad idrocarburi potenzialmente tossici, ma scarsamente reattivi (benzene, acido acetico, acido formico, metanolo, acetonitrile), sono presenti composti, come gli xileni, l'isoprene ed i monoterpeni, (isoprenoidi a 10 atomi di carbonio), caratterizzati da un'alta reattività atmosferica. In uno studio più recente (Ciccioli *et al.*, 2001), è stata anche evidenziata la presenza nella combustione di biomassa di pino (*Pinus pinea*) di sostanziali quantità di sesquiterpeni (isoprenoidi con 15 atomi di carbonio), che sono anch'essi altamente reattivi. Essi si liberano sia nella fase di pre-riscaldamento

(glowing) che nella fase di smoldering. Le piccole dimensioni del materiale particolato prodotto dalla combustione di biomassa combinata con l'alta reattività della componente gassosa rende questa sorgente particolarmente adatta al trasporto a lunga distanza, cosicché l'impatto da essa generato si può propagare ben oltre i 10.000 km (Heitzemberg *et al.*, 2003). I dati in Figura 1 visualizzano bene le aree interessate dall'impatto delle particelle di carbone originate dagli incendi che si sviluppano sulla superficie terrestre. Secondo alcuni autori (Andreae e Merlet, 2001), la combustione di biomassa immette nell'atmosfera ca. 13.400 Tg anno^{-1} di CO_2, 82 Tg anno^{-1} di particolato, 49 Tg anno^{-1} di VOC escluso il metano, 39 Tg anno^{-1} di CH_4, 20,7 Tg anno^{-1} di ossidi di azoto ($NO_x = NO + NO_2$), 10,3 Tg anno^{-1} di NH_3 e 1,31 Tg anno^{-1} di N_2O. Questi valori si basano su di una stima di biomassa bruciata di ca. 8.600 Tg anno^{-1}. Di questa massa totale, ca. 2.900 Tg anno^{-1} provengono da uso domestico, mentre il resto deriva essenzialmente da combustione di aree forestali nelle zone tropicali dell'Amazzonia, del Centro Africa e del Sud-Est Asiatico. Sebbene la massa di particolato prodotta dalla combustione di biomassa sia appena il 5% ca. della polvere minerale emessa dai deserti, il numero di particelle prodotte è notevolmente elevato, in quanto esse sono caratterizzate da dimensioni più piccole

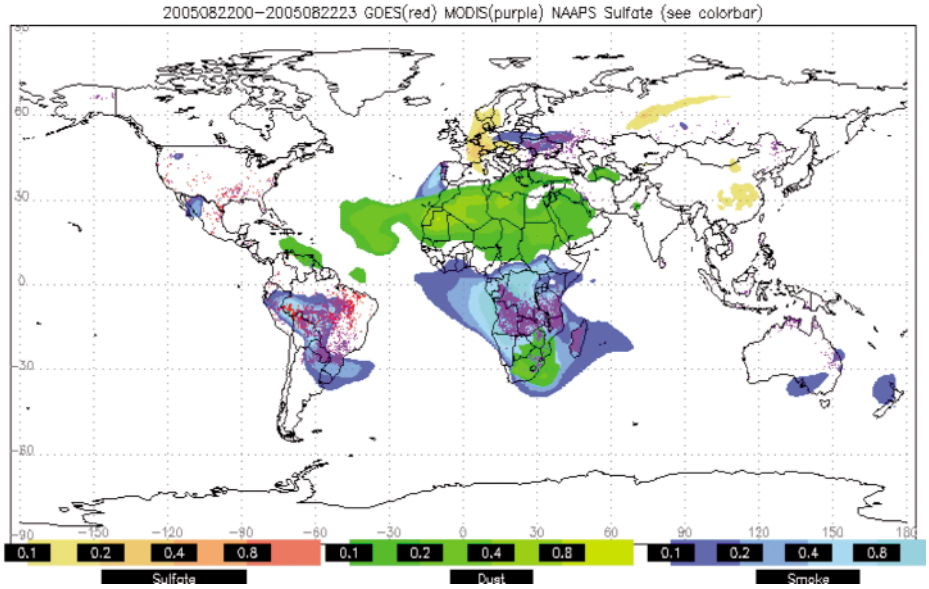

Fig. 1. Concentrazioni di particolato fine (< 5μm) composto da fuliggine da combustione di biomassa (tonalità azzurro-blu), di polvere minerale dal suolo (tonalità verde chiaro-verde scuro) e di solfato di origine fotochimica (tonalità giallo-arancione) determinata sulla superficie terrestre mediante il modello NAAPS sviluppato dal servizio meteorologico della Marina degli Stati Uniti (http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/), usando la meteorologia reale. I dati si riferiscono al giorno 22 Agosto 2006. I punti in viola e rosso indicano gli incendi rilevati attraverso osservazioni satellitari (GOES e MODIS).

(ca. 2 ordini di grandezza) e densità mediamente più basse (circa la metà) di quelle della polvere minerale. In particolare, la combustione di biomassa risulta una sorgente molto importante di particelle in grado di agire da nuclei di condensazione delle nubi (CCN). Le stime presenti (Andreae e Merlet, 2001) indicano una produzione globale annua pari a ca. $1{,}7 \cdot 10^{28}$ CCN per anno. Un valore che rende la combustione da biomassa una delle sorgenti primarie di CCN su scala globale.

I principali effetti ambientali associati alla combustione da biomassa

A parte la potenziale tossicità dell'emissione, che si esplica per lo più su scala locale e a mesoscala (alcune centinaia di km dall'incendio), la combustione da biomassa ha effetti su scale molto più grandi. Il metano e di protossido di azoto producono effetti su scala globale in quanto questi gas sono in grado di agire da gas serra. Il particolato carbonioso può influire sul clima in vari modi. Il principale è l'attenuazione della radiazione incidente, che può ridurre la temperatura al suolo. In questo ruolo molto efficienti sono le particelle fuligginose in quanto assorbono completamente la luce, essendo assimilabili ad un corpo nero. In aggiunta a questo effetto (chiamato effetto diretto) vi sono anche altri effetti (effetti indiretti) che derivano dall'interazione tra CCN e nubi. L'introduzione di CCN in nubi formatisi sopra gli oceani ha come effetto principale quello di ridurre il diametro aerodinamico delle goccioline di acqua e dei cristalli di ghiaccio presenti in esse (Ramanathan *et al.*, 2001). Tale diminuzione allontana la nube dalla condizione in cui essa può generare la precipitazione. In nubi non investite da CCN è sufficiente un'altitudine in cui si abbiano temperature prossime ai 0 °C per raggiungere il diametro critico necessario affinché le goccioline ed i cristalli precipitino al suolo (ca. 15 mm). In una nube alterata dall'introduzione di CCN, la diminuzione del diametro delle goccioline di acqua e di ghiaccio è tale che esse possono raggiungere il diametro critico solo a temperature variabili tra i -10 ed i -20 °C (Ramanathan et al., 2001). Fino a che la nube non raggiunge una quota dove si hanno tali temperature, non si osserva precipitazione. A causa di ciò nubi impattate da CCN aumentano notevolmente in altezza ed in volume. I gradienti termici che si generano al loro interno ne aumentano la turbolenza ed i moti interni danno luogo a intensi campi elettrici, capaci di generare un numero elevato di fulmini. Quando si raggiunge il diametro critico, la precipitazione avviene in regime temporalesco. Il primo risultato dell'ingrandimento delle nubi è un aumento dell'albedo ed una diminuzione della quantità di radiazione incidente che raggiunge il suolo. Il secondo effetto è una diminuzione della precipitazione ed un'alterazione del ciclo idrogeologico nelle aree in cui si ha un'elevata emissione di CCN (Ramanathan *et al.*, 2001). La precipitazione verrà allontanata dal punto di emissione di CCN in quanto la nube si deve sviluppare verticalmente fino ad una quota in cui le goccioline di acqua e ghiaccio raggiungono di nuovo il diametro critico. La distanza a cui avverrà la precipitazione sarà funzione di vari parametri, tra cui la concentrazione dei CCN iniet-

tati nella nube. In aree dove già sono avvenuti incendi, la distanza sarà ulteriormente aumentata dal fatto che la nube non sarà rifornita dall'acqua generata dalla evapo-traspirazione della vegetazione e la sua temperatura verrà ulteriormente innalzata dalla maggiore quantità di calore sensibile trasmessagli dal suolo coperto da materiale combusto (essenzialmente carbone). Anche se su scala continentale la precipitazione subirà solo variazioni minime, su scala locale la diminuzione delle precipitazioni può esser talmente drammatica da innescare fenomeni di desertificazione (Rosenfeld *et al.*, 2001). Dato che in Italia l'emissione antropica di particolato è concentrata nelle aree costiere, essa tende a spostare la precipitazione verso l'interno. Se il passaggio delle nubi è sufficientemente lento, si potranno osservare precipitazioni a carattere temporalesco sui rilievi Appenninici ed Alpini. Se invece la nube non è in grado di raggiungere le quote necessarie per la precipitazione nel tempo di trasferimento tra una costa all'altra, le nubi si muoveranno prima sul mare e poi su aree dell'Europa continentale prima di dar luogo a precipitazione. Tale fenomeno può essere favorito da produzione di CCN nelle aree boschive Appenniniche o Alpine. Per questo motivo, l'Italia risulta un paese estremamente sensibile a cambiamenti climatici indotti da un aumento di CCN. Se non si riduce la loro concentrazione, il rischio di desertificazione delle aree costiere meno ricche di vegetazione è estremamente serio. L'introduzione di nuovi sistemi per la produzione di energia basati sulla combustione deve essere, perciò, valutato attentamente, anche perché, in aggiunta ad una produzione primaria di CCN, essi possono dar luogo anche ad una formazione secondaria derivante dalla ossidazione fotochimica dei gas emessi dalla combustione.

Le reazioni fotochimiche si innescano ogniqualvolta NO_x e VOC sono esposti alla componente ultravioletta della radiazione solare. Esse danno luogo ad una serie di prodotti (Ciccioli e Cecinato, 1992), chiamati inquinanti fotochimici. Oltre all'ozono, che è usato come indicatore dell'inquinamento fotochimico, vengono prodotti altri composti gassosi, quali le aldeidi ed i chetoni, i perossiacilnitrati (PAN), gli alchil nitrati e l'acido nitrico, HNO_3. I composti prodotti in fase solida sono l'acido solforico ed i solfati e nitrati di ammonio, di metalli alcalini ed alcalino-terrosi. È il materiale particellare e non l'ozono che è responsabile della notevole riduzione di visibilità che si osserva negli episodi di inquinamento fotochimico. Essa giustifica il termine di smog fotochimico, con cui è comunemente indicato questo tipo d'inquinamento. Recentemente è stato trovato che le reazioni fotochimiche possono anche dar luogo alla produzione di aerosoli organici secondari (SOA) (Hoffman *et al.*, 1997), in grado di trasformarsi in CCN. Essi si formano per ossidazione di alcuni VOC per reazione con ozono e radicali OH. La produzione di CCN da processi fotochimici non è facilmente quantificabile in quanto i processi che conducono alla loro formazione non sono lineari, e dipendono dall'emissione di VOC e NO_x e dalle condizioni di reazione (luce, temperatura, umidità) che la massa d'aria inquinata incontra durante il suo cammino. Quello che si sa di certo da misure effettuate nell'atmosfera è che la loro produzione è comparabile, o addirittura

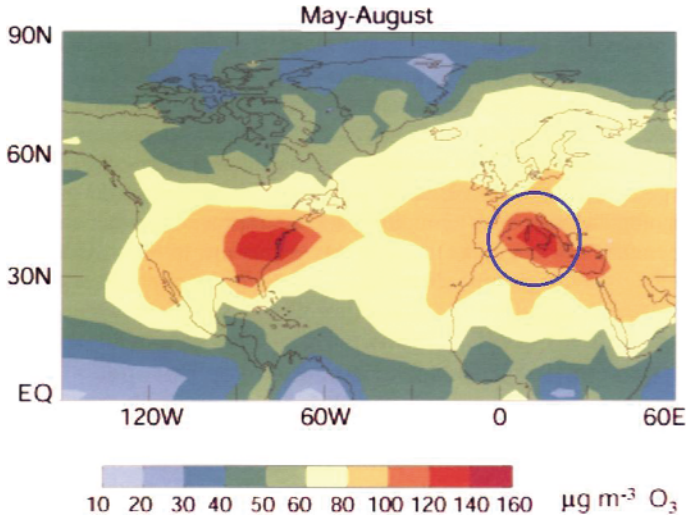

Fig. 2. Concentrazioni medie estive di ozono nell'America settentrionale ed in Europa determinate da misure satellitari. Le unità Dobson sono state convertite in concentrazione espresse in mg m^{-3} (ciasuna di queste unità corrisponde a ca. 0,5 ppbv).

superiore all'emissione diretta e che svolgono un ruolo fondamentale nei promuovere i cambiamenti climatici (Kanakidou *et al.*, 2005). Si sa inoltre che i VOC più reattivi nella formazione di SOA sono i monoterpeni e sesquiterpeni prodotti dalle piante. Limitare l'emissione di VOC e NO_x da combustione è particolarmente importante in tutta l'area Mediterranea dove elevatissima è la formazione di smog fotochimico. Essa è favorita sia dalle alte temperature ed elevate irradiazioni che si hanno per buona parte dell'anno che dai particolari sistemi di circolazione delle masse d'aria, che si stabiliscono nelle aree costiere in prolungati periodi di alta pressione. In Italia, i fenomeni di circolazione di brezza favoriscono la formazione di CCN in aree boschive in quanto trasportano ozono verso i rilievi interni della penisola e le Alpi, dove più abbondante è l'emissione di VOC reattivi.

La Figura 2 mostra bene perché l'area Mediterranea sia oggi considerata uno degli *hot-spot* su scala mondiale per questo tipo di inquinamento, con valori che spesso eccedono i 100 ppbv di ozono, in aree suburbane e rurali. La Figura 3 mostra anche come gli incendi di biomassa sviluppatisi in un'area limitata del Portogallo siano potenzialmente in grado di alterare la qualità dell'aria in tutto il bacino del Mediterraneo. Nel caso in Figura, solo un'inversione nella direzione del vento ha impedito che l'Italia venisse investita dalla nube inquinata proveniente dal Portogallo, ma non da quella proveniente dagli incendi sviluppatesi nei Balcani.

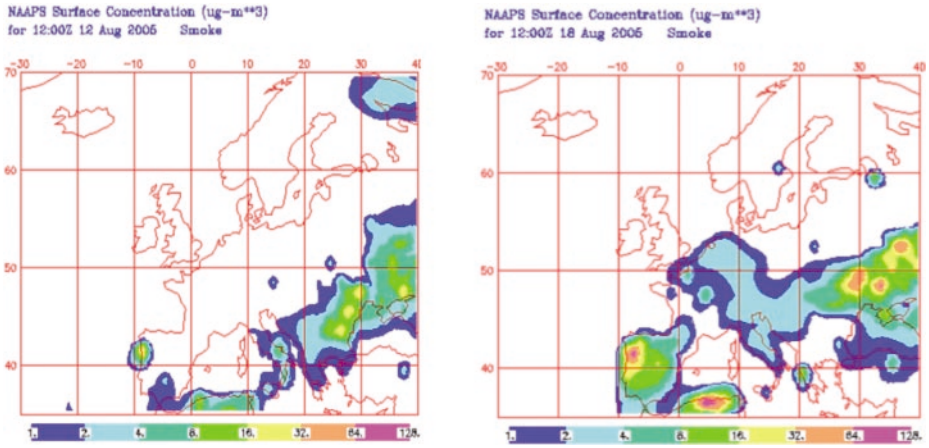

Fig. 3. Concentrazioni di particelle di fuliggine originate dagli incendi forestali sviluppatesi in Europa il 12 di Agosto 2006, stimate secondo il modello NAAPS (vedi Figura 1). A sinistra è riportata l'area interessata dall'emissione il giorno 12, mentre a destra è riportata l'area interessata il giorno 18. È interessante notare come gli incendi boschivi sviluppatesi in Italia vengano estinti, quelli in Portogallo, Grecia e nei Balcani si sono ulteriormenta sviluppati incrementando le concentrazioni al suolo in vaste aree limitrofe, inclusa l'Italia.

Considerazioni sull'uso della combustione di biomassa a fini energetici

Gli impianti di combustione, sia su fiamma che interna (motori), rappresentano nel nostro paese la sorgente di gran lunga più importante di NO_x. La formazione di NO avviene per reazione diretta di ossigeno ed azoto in ogni impianto in cui si raggiungano alte temperature. La formazione di NO_2 è molto più piccola di quella dell' NO, e si osserva in misura apprezzabile solo in combustioni poco efficienti caratterizzate da basse temperature. La maggior parte dell'NO_2 si forma infatti in aria per reazione tra NO ed ozono. In misura variabile, anche i VOC sono prodotti da processi di combustione. Dato che nessun sistema può mai raggiungere il 100% di efficienza, si avrà sempre una piccola parte di combustibile che non verrà convertita in CO_2 ed emessa sotto forma di VOC. La quantità prodotta sarà funzione dell'efficienza di combustione e dei sistemi usati per limitare l'evaporazione del combustibile. Per quel che concerne il primo punto, il miglior metodo per ridurre l'emissione di VOC è quello di aumentare l'efficienza di combustione. Nel caso di impianti per la produzione di energia, questo si traduce nel raggiungere e mantenere temperature della fiamma che siano i più alti e costanti possibile. Tra i vari combustibili, quelli preferibili sono quelli che, a parità di potere calorifico, hanno un grado di infiammabilità elevato, non contengono acqua e non producono particolato e VOC fotochimicamente reattivi. Se si analizzano questi aspetti, si vedrà che la combustione di biomassa non risulta affatto vantaggiosa rispetto ad altri combustibili fossili, ed in particolare rispetto al metano. Questo perché i com-

posti in grado di formare SOA e CCN con il più alto grado di efficienza sono proprio i monoterpeni e sesquiterpeni prodotti dalle piante (Hoffman *et al.*, 1997). Basta introdurre piccole quantità di limonene (monoterpene) o β-cariofillene (sesquiterpene) in una busta di platica trasparente dove è presente aria contenente ozono e un poco di particolato atmosferico, ed esporla per pochi minuti alla radiazione solare, affinché si abbia una rapida opacizzazione del contenitore dovuta all'enorme sviluppo di aerosoli. La presenza di monoterpeni e sesquiterpeni nella combustione di biomassa rende potenzialmente più inquinante l'opzione energetica basata sull'uso di questo combustibile. Per limitarla al massimo è necessario mantenere alta (sopra i 900°C) e costante la temperatura di combustione. Questo non è facile in quanto la massa legnosa, a differenza dei combustibili fossili liquidi e gassosi, è fortemente idrofila e contiene quantità variabili di acqua. La presenza di acqua nel combustile riduce l'efficienza di combustione in quanto abbassa la temperatura della fiamma. Per evitare oscillazioni della temperatura che portano ad aumenti dell'emissione sia gassosa che particellare, è necessario che la biomassa introdotta nel forno venga essiccata così da possedere un contenuto di acqua minimo e costante. Ciò richiede che si abbiano dei forni di essiccazione in linea con l'impianto stesso. Data la criticità di questi aspetti, è fondamentale che in un impianto alimentato a biomassa la combustione sia continuamente controllata e che siano presenti i medesimi sistemi di abbattimento delle centrali a carbone ed a combustibile liquido. Per questi motivi, solo un impianto sufficientemente grande (ca. 1.000 MW) può fornire delle garanzie ambientali adeguate a costi accettabili. Esso offre inoltre il vantaggio che si può agire sull'altezza degli scarichi e la temperatura dei fumi per ridurne l'impatto. Infine va ricordato che un grande impianto, soprattutto se ubicato tenendo conto del regime prevalente dei venti, delle situazioni orografiche e del numero e delle sorgenti già esistenti, può essere meglio monitorato di un numero di piccoli impianti, in cui, tra l'altro, è difficile controllare la qualità del combustibile usato. Il materiale legnoso, per le sue caratteristiche è infatti in grado di assorbire composti tossici liquidi (quali PAH, vernici o soluzioni contenenti metalli pesanti) con grande facilità. L'uso di questo tipo di biomasse (che in realtà sono dei veri e propri rifiuti tossici e nocivi) in piccoli impianti difficili da controllare potrebbe infatti portare a seri problemi ambientali anche per quel che concerne la salute.

BIBLIOGRAFIA

Andreae M.O. and Merlet P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, 15, 955-966.

P. Ciccioli, A. Cecinato, E. Brancaleoni, M. Frattoni, P. Zacchei, A.H. Miguel, P. De Castro Vasconcellos (1996). Formation and transport of 2-nitrofluoranthene and 2-nitropyrene of photochemical origin in the troposphere. *J. Geophys. Res*., 101, 19567-19581.

P. Ciccioli and A. Cecinato (1992) Advanced methods for the evaluation of atmospheric pollutants relevant to photochemical smog formation and dry deposition. In: *Gaseous pollutants: Characterization and Cycling,* Edited by J.O. Nriagu, John Wiley & Sons, New York, USA, Chapter 11, pp. 461-534.

Ciccioli P., Brancaleoni E., Frattoni M., Cecinato A. and Pinciarelli L. (2001). Determination of volatile organic compounds (VOC) emitted from biomass burning of Mediterranean vegetation species by GC-MS. *Anal. Let*., 34, 937-955.

Heitzemberg J., Raes F., S.E. Scwartz and co-authors (2003) Tropospheric Aerosols. *In Atmospheric Chemistry in a Changing World* . G.P. Brasseur, R.G. Prinn, A.A.P. Pszenny Ed., Springer-Verlag Heidelberg, pp. 125-156

Hoffmann, T., Odum, J.R., Bowman, F., Collins, D., Klockow, D., Flagan, R.C., and Seinfeld, J.H. (1997) Formation of organic aerosols from the oxidation of biogenic hydrocarbons, *J. Atmos. Chem*., 26, 189-222, 1997.

Lobert, J.M., and J. Warnatz (1993) Emissions from the combustion process in vegetation, in Fire in the Environment. In: *The Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*, edited by P.J. Crutzen and J.G. Goldammer, pp. 15-37, John Wiley, New York.

Kanakidou M., J.H. Seinfeld, S.N. Pandis, I. Barnes, F.J. Dentener, M.C. Facchini, R. Van Dingenen, B. Ervens, *et al.* (2005) Organic aerosol and global climate modelling: a review. Atmos. Chem. Phys., 5, 1053-1123.

Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J.T. Kiehl, and D. Rosenfeld, 2001: Aerosols, Climate and the Hydrological Cycle. *Science*, 294, 2119-2124.

Rosenfeld D., Rudich Y., and Lahav R. (2001) Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop. *PNAS,* 98, 5975-5980.

Scholes M.C., Matrai P.A., Andreae M.O., Smith K.A., Manning M.R. and co-authors (2003) Biosphere-Atmosphere Interactions. *In Atmospheric Chemistry in a Changing World* . G.P. Brasseur, R.G. Prinn, A.A.P. Pszenny Ed., Springer-Verlag Heidelberg, pp. 19-71.