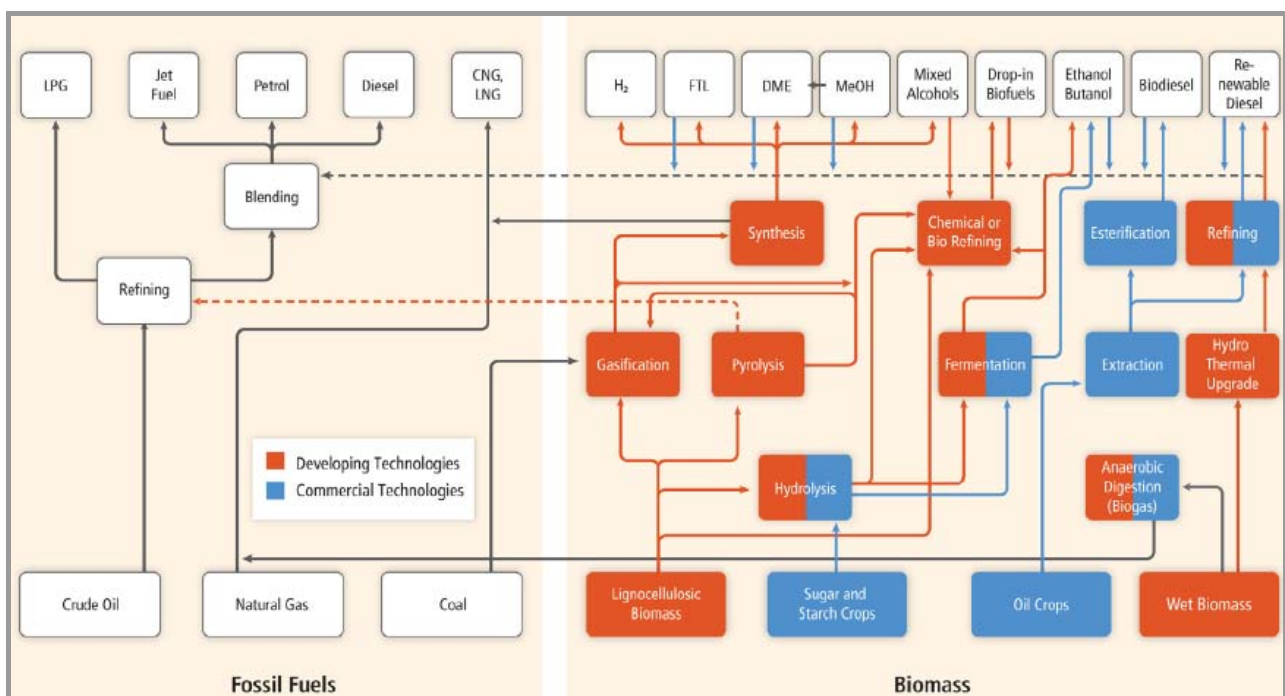


Utilizzo delle tecnologie CDR e BECCS per la rimozione della CO₂ dall'atmosfera

di Toni, Federico, Fondazione per lo Sviluppo sostenibile e Osservatorio CCS

Ottobre 2014



Modalità a confronto di produzione energetica fossile e da biomassa

INDICE

Premessa	3
L'obiettivo dei 2° e l'opzione <i>carbon-negative</i>	4
I limiti del fattore tecnologico	7
I limiti della disponibilità della bioenergia per la BECCS	10
I limiti dello stoccaggio sotterraneo della CO2	12
I metodi CDR - DAC di estrazione diretta della CO2 dall'atmosfera	16
<i>Riforestazione ed afforestazione</i>	16
<i>Cattura del carbonio da bioenergia (BECCS)</i>	16
<i>Cattura diretta dall'aria (DAC)</i>	17
<i>Fertilizzazione oceanica</i>	17
<i>Mineralizzazione rafforzata</i>	17
II problema dei costi, il Rapporto McKinsey	19
<i>Low-carbon energy supply</i>	19
<i>Terrestrial carbon – forestry and agriculture</i>	20
<i>Carbon Capture and Storage (CCS)</i>	20
Le opzioni di mitigazione <i>carbon negative</i> secondo l'IPCC AR5 WKG III	21
I conflitti di uso del suolo per l'energia e l'alimentazione secondo l'IPCC AR5	25
<i>I residui forestali</i>	26
<i>I residui agricoli</i>	27
<i>I rifiuti organici</i>	28
<i>Riduzione della domanda di biomassa tradizionale</i>	29

Premessa

Poiché l'eccesso di gas serra nell'atmosfera è tra i responsabili dei cambiamenti climatici, le soluzioni per fare in modo che nei decenni futuri la concentrazione in atmosfera di queste sostanze diminuisca sono essenzialmente due: produrne quantità minori (cd. Mitigazione) e, in secondo luogo, studiare e utilizzare metodi che consentano di rimuovere dall'atmosfera più CO₂ di quanta non ne sia assorbita attraverso il ciclo naturale del carbonio dagli oceani, vegetazione e suolo. A questa seconda opzione ci si riferisce con l'espressione "emissioni negative": i sistemi che permettono di assorbire alcuni gas a effetto serra, riducendone la loro concentrazione in atmosfera e quindi gli effetti sul clima. Su questo argomento il CMCC italiano¹ ha organizzato nel maggio del 2013 un importante convegno².

Considerando obiettivi di concentrazione di gas a effetto serra in linea con un aumento di temperatura media della superficie terrestre compreso tra 2 e 2,5°C, vanno valutati i possibili risultati di strategie per la CDR (*Carbon Dioxide Removal*). Allo stato della conoscenza scientifica e della tecnologia ciò lascerà un po' di delusione in coloro che pensano di ovviare solo con la CDR al problema di dover ridurre nei prossimi decenni la concentrazione di gas a effetto serra in atmosfera attraverso un severo abbattimento delle emissioni.

Quando si considerano strategie di riduzione delle emissioni che contemplano impegni decisi da prendere nei primi decenni del secolo per ottenere importanti risultati di contenimento della concentrazione CO₂equivalente (CO_{2eq}) alla fine del secolo, i modelli mostrano che occorre una forte decarbonizzazione dell'economia globale, in particolare del settore energetico. Metodi e tecnologie CDR mostrano di poter essere competitivi solo più in là negli anni, cioè quando,

¹ CMCC, Centro Euromediterraneo per i Cambiamenti Climatici

² *Climatic Change Special Issue: Science and Policy of Negative Emission Technologies* (Volume 118, Issue 1, May 2013)

- *Modeling meets science and technology: an introduction to a special issue on negative emissions*, Massimo Tavoni e Robert Socolow – curatori del volume – ne spiegano i contenuti e gli elementi salienti
- *Adjustment of the natural ocean carbon cycle to negative emission rates*, firmato da Marcello Vichi, Antonio Navarra e Pier Giuseppe Fogli.
- *Direct air capture of CO₂ and climate stabilization: A model based assessment*, l'articolo di Chane Chen e Massimo Tavoni
- *Modeling and Policy of CO₂ Removal from the Atmosphere*,

Il workshop internazionale da cui è ricavato il numero della rivista si è svolto a Venezia, organizzato dall'International Center for Climate Governance e dal Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici, in collaborazione con la Princeton University

in conseguenza dell'attuazione di strategie convenzionali per la mitigazione, una parte considerevole della riduzione delle emissioni sarà stata già raggiunta. Si tratta, infatti, di tecniche che mostrano efficacia solo dopo che il *surplus* di emissioni di CO₂ proveniente da combustibili fossili sia stato in buona misura eliminato e, anche in quel caso, la riduzione di concentrazione procederebbe a ritmi molto lenti (circa 1 ppm l'anno, il che vuol dire che per abbassare la concentrazione di CO_{2eq} da 550 ppm a 450 ppm occorrerebbe circa un secolo).

Infine, emerge chiaramente come la ricerca sui cambiamenti climatici non possa prescindere da uno sguardo multidisciplinare che sappia mettere insieme punti di vista diversi e necessari allo studio di temi così complessi. Le tecnologie CDR possono giocare un ruolo efficace quando impiegate in maniera integrata ad altre strategie di mitigazione che mirano a ridurre le emissioni di gas a effetto serra, altrimenti i benefici prodotti dalla rimozione dell'anidride carbonica dall'atmosfera potrebbero essere superati da conseguenze negative sul piano ambientale e sociale, quali ad esempio l'eccessivo sfruttamento del suolo e delle risorse idriche o il rilascio di CO₂ da parte degli oceani.

Le simulazioni evidenziano che la rimozione di CO₂ dall'atmosfera tramite CDR avrebbe come conseguenza il rilascio di CO₂ dagli oceani; pertanto l'efficacia delle strategie a emissioni negative ne risulterebbe diminuita, con un aumentato bisogno di rimozione di CO₂ dall'atmosfera. Le simulazioni mostrano che le azioni di CDR devono sempre considerare anche un rilascio extra del carbonio antropogenico accumulato nell'oceano dalle emissioni passate e così aumenta necessariamente il bisogno di rimozione di CO₂ dall'atmosfera, che deve essere dunque pianificato accuratamente.

L'obiettivo dei 2° e l'opzione *carbon-negative*

Sulla base delle evidenze scientifiche disponibili, i responsabili politici hanno proposto di utilizzare il cosiddetto obiettivo 2 °C di aumento massimo della temperatura media globale al di sopra dei livelli pre-industriali, come un obiettivo importante per la politica internazionale sul clima.

Supponendo che le politiche attive debbano mirare a raggiungere un tale obiettivo con una probabilità superiore al 50% (sulla base delle nozioni che abbiamo sulla sensibilità climatica), le emissioni globali di gas serra dovrebbero essere dimezzate nei prossimi 40 anni e portate ad un livello vicino allo zero nella seconda metà del secolo. Al contrario, le tendenze storiche in termini di flussi di gas serra stanno portando ad un continuo aumento delle emissioni.

Al momento, i negoziati internazionali hanno fatto pochi progressi nella formulazione di politiche internazionali efficaci sul clima. Mentre è non è ancora

certo che gli impegni attuali volontari (*pledge*) scaturiti dall'accordo di Copenaghen saranno attuati con successo, non avrebbero di certo portato con percorsi di minimo costo ai livelli di emissione compatibili con l'obiettivo dei 2 °C. Né ci sono ancora evidenze che i negoziati in corso per le politiche post 2020 avranno miglior successo.

Un possibile modo per affrontare queste prospettive è l'approccio dei cosiddetti scenari di *overshoot*. Questi consentono il superamento delle concentrazioni, per un periodo limitato di tempo, a livelli a più elevati di quelli coerenti con gli obiettivi di contenimento della temperatura a lungo termine. Tali scenari di (limitato) *overshoot* possono essere graditi in quanto richiedono meno riduzioni a breve termine e sembrano avere rischi aggiuntivi limitati. Gli scenari di *overshoot* della temperatura media globale, pur potendo essere a loro volta considerati, comportano chiaramente maggiori rischi perché livelli di temperatura più elevati possono ovviamente causare impatti climatici pesanti e ci può volere molto tempo per tornare all'obiettivo proposto. L'aumento dei livelli termici potrebbero causare dei *feedback* che si tradurrebbe in un ulteriore cambiamento climatico (ad esempio i *feedback della* temperatura sul ciclo del carbonio, che riduce l'assorbimento di carbonio da parte degli ecosistemi).

Molti scenari di *overshoot* in concentrazione hanno bisogno di emissioni nette negative nella seconda metà del secolo³. Emissioni nette negative possono essere ottenute in modi diversi: opzioni importanti includono la bioenergia combinata con la cattura e stoccaggio del carbonio (BECCS)⁴, il rimboschimento l'afforestazione e forme di geo-ingegneria, rimozione dell'anidride carbonica o CDR, come la cattura della CO₂ direttamente dall'aria e dalla fertilizzazione degli oceani. Lo stoccaggio del carbonio nei suoli attraverso l'utilizzo di *biochar*⁵ o per la produzione di bioenergia su praterie degradate potrebbe contribuire ad emissioni nette negative.

³ Si vedano, tra gli altri contributi, Christian Azar et. al., *The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio-energy with carbon capture and storage (BECCS)*, *Climatic Change* (2010) 100:195–202, o anche: Brian O'Neill et. al., 2010, *Socio-economic Scenario Development for Climate Change Analysis*, IPCC Working Paper

⁴ Il termine BECCS è stato introdotto in: B.S. Fisher et al., 2007, *Issues related to mitigation in the long term context*, in B. Metz et al. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United

Kingdom and New York, United States, pp. 169-250.

⁵ Carbonio di origine biologica usato come ammendante. Si veda: Josiah Hunt, 2010, *The Basics of Biochar: A Natural Soil Amendment*, Soil and Crop Management, SCM-30

Di queste opzioni, la DAC, la cattura diretta dall'aria è relativamente costosa, mentre la fertilizzazione degli oceani (e molte altre forme di geo-ingegneria) comportano gravi rischi ambientali. Come tale, la BECCS e la riforestazione sembrerebbero essere le opzioni più interessanti per creare emissioni negative.

L'interesse per l'opzione *carbon-negative* della BECCS è cresciuta rapidamente in quanto ha il potenziale per offrire riduzioni profonde della concentrazione di CO₂ in atmosfera. Sembra anche essere praticabile e conveniente⁶. L'IPCC afferma che il successo della diffusione delle tecnologie CCS in combinazione con la conversione energetica della biomassa potrebbe comportare eliminazioni di gas ad effetto serra a livelli di costo interessanti⁷. La BECCS potrebbe essere applicata a una vasta gamma di tecnologie legate alla biomassa⁸. Mentre la CCS convenzionale è ben noto come tecnica di riduzione del carbonio e viene introdotta in tutti gli scenari come una delle tecnologie fondamentali nella lotta al cambiamento climatico, della BECCS si è ancora parlato poco.

Diversi studi hanno dimostrato che la probabilità di cogliere l'obiettivo dei 2 °C è correlato con gli *stock* atmosferici della CO₂ (le emissioni di CO₂ cumulative o storiche), piuttosto che con i flussi (le emissioni annuali)⁹, e dimostrano che il bilancio delle emissioni di CO₂ nei prossimi quattro decenni, è il miglior predittore della probabilità di raggiungere tale obiettivo. È dimostrata una chiara relazione tra il bilancio del carbonio e gli obiettivi climatici a lungo termine. Emissioni a breve termine più elevate, compensate dalle emissioni negative a lungo termine, si possono trattare con l'approccio del *carbon budget*¹⁰, chiaramente per i bilanci a breve termine, ma anche per i bilanci a lungo termine. Ad esempio, concentrazioni di CO₂ più elevate si traducono in un tasso di assorbimento più alto di oceani e biosfera, aumentando il bilancio in funzione del livello di *overshoot*. Temperature più alte, tuttavia, potrebbero portare a *feedback* positivi del ciclo clima-carbonio come una crescita ridotta della biosfera o il rilascio di gas serra provenienti dalla tundra, portando ad un *budget* di carbonio inferiore.

In media, l'ambizione di soddisfare l'obiettivo dei 2 °C, con una probabilità di circa il 66% corrisponde ad un *budget* massimo per le emissioni di CO₂ per

⁶ OECD/IEA, 2011, *Combining Bioenergy with CCS Reporting and Accounting for Negative Emissions under UNFCCC and the Kyoto Protocol*, Working Paper

⁷ IPCC, 2011, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Working Group III Mitigation of Climate Change, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Germany, <http://srren.ipcc-wg3.de/report>

⁸ Global CCS Institute, 2010, *Global Status of BECCS Projects*, Biorecro AB, Stockholm, Sweden

⁹ Meinshausen et al., 2006, *Multi-gas emissions pathways to meet climate targets*, *Clim Chang* 75:151–194; ed anche: Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W et al., 2009, *Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C*, *Nature* 458:1158–1162

¹⁰ Si consulti il sito www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/

questo secolo di 1600 GtCO₂. Per confronto, lo scenario medio *baseline* delle emissioni calcolato in un recente studio di confronto tra modelli diversi, porta ad una emissione di oltre 5200 GtCO₂, cioè più di 3 volte il *budget* di emissioni consentito dall'obiettivo di Copenhagen.

I limiti del fattore tecnologico

L'efficacia dell'abbattimento delle emissioni è limitata da diversi fattori. Prima di tutto, la tecnologia ha una certa durata e le sostituzioni premature sono costose. La durata tipica di una centrale a combustibili fossili, per esempio, è di circa 40, durate analoghe valgono per gli impianti industriali. Mentre la vita di altre tecnologie, come ad esempio una autovettura, può essere molto più breve, anche la durata di vita delle infrastrutture associate può essere rilevante (stazioni di rifornimento; fabbriche di auto, ecc). Altri fattori importanti sono l'inerzia nel cambiamento delle preferenze dei consumatori, i processi negoziali internazionali, la formulazione delle politiche e il tasso massimo di dispiegamento delle nuove tecnologie. Questi fattori sono molto incerti. Si è constatato che negli scenari esistenti per gli obiettivi climatici più ambiziosi, quasi nessun periodo è stato trovato con tassi di riduzione del 4%/anno (rispetto ai livelli del 2000 delle emissioni) per 10 anni o più. Anche un tasso di riduzione delle emissioni del 4% richiede un tasso di decarbonizzazione del 6%, ipotizzando una crescita media del 2% del reddito. Storicamente, gli alti tassi di decarbonizzazione globali sono dell'ordine del 2%/anno (tenuti per periodi di tempo relativamente brevi).

Un secondo fattore chiave è il potenziale di riduzione totale. In alcuni settori, le emissioni possono essere ridotte a zero nel corso del tempo. Ad esempio, nel settore energetico esistono diverse opzioni alternative che possono ridurre significativamente le emissioni (fonti rinnovabili, CCS). In altri settori, tuttavia, il potenziale sembra essere più limitato. Ad esempio, il potenziale di riduzione per alcuni modi di trasporto come il trasporto aereo e il trasporto merci sembra essere attualmente limitato alle sole efficienza energetica e all'uso di bio-energia, che peraltro genera emissioni di almeno alcuni GHG. Per diverse fonti di emissioni non-CO₂, sarà difficile ridurre le emissioni a zero.

Il potenziale di riduzione delle emissioni sotto lo zero nel lungo termine gioca un ruolo fondamentale. Può ridurre la domanda di abbattimento delle varie opzioni di riduzione delle emissioni in alcuni settori, ma consente anche il "trasferimento" delle riduzioni delle emissioni dal breve termine ad un momento successivo. Abbiamo già detto che per raggiungere l'obiettivo dei 2 °C, il *budget* cumulativo delle emissioni 2000-2100 (uso del suolo ed energia) deve essere pari a 1600 GtCO₂. Supponiamo che tutti i percorsi di mitigazione

nel corso del secolo prevedano che le emissioni vengano ridotte linearmente in misura pari ad una data percentuale delle emissioni al 2000 (adottando una strategia di ripartire in egual misura il carico della riduzione delle emissioni nel tempo). Questo tasso massimo viene mantenuto fino a raggiungere il massimo potenziale di riduzione. Quantitativamente, questo tasso può variare tra il 2 e il 4% (tassi di riduzione inferiori al 2% sono incompatibili con il *budget* delle emissioni, mentre i tassi di riduzione più elevati sembrano improponibili sulla base della discussione di cui sopra). Il potenziale di riduzione massima in termini di livello minimo di emissioni ottenibile varia da 5 GtCO₂/anno fino a -10 GtCO₂/anno (il primo rappresenta il caso di emissioni residue elevate e il seconda l'uso di BECCS al 2%).

Partendo da questi presupposti fondamentali, è semplice ricavare la gamma delle emissioni 2020 coerenti con il bilancio complessivo delle emissioni. Va notato che anche piccole differenze nell'obiettivo di riduzione al 2020 sono di fondamentale importanza vista la quota elevata di emissioni da parte dell'infrastruttura energetico attuale e le politiche esistenti.

I grafici di Fig. 1 mostrano che in quasi tutti i casi che non ricorrono alle emissioni negative, le emissioni 2020 devono già essere ridotte in modo significativo. Ad esempio, ipotizzando un tasso massimo annuo di riduzione del 2,5%, le emissioni globali devono essere intorno al livello del 2000 nel 2020 e del 10% inferiori rispetto alla baseline. Solo con un tasso di riduzione delle emissioni a lungo termine del 4%, le riduzioni delle emissioni 2020 potrebbero essere limitate.

In tutti i casi, in termini di *carbon budget*, senza emissioni negative, al 2050 le emissioni devono essere circa il 60-80% al di sotto del livello del 2000. Se poi le emissioni non possono essere ridotte a zero, la necessità di riduzioni delle emissioni a breve termine è ancora più urgente (vedi pannello b). Per esempio, supponendo che a fine secolo le emissioni siano pari a 5 GtCO₂/anno, le emissioni al 2020 dovrebbero essere ridotte del 25% al di sotto della linea di base al fine di raggiungere l'obiettivo dei 2 °C.

La situazione cambia notevolmente se le emissioni negative vengono considerati possibili: l'urgenza delle riduzioni delle emissioni a breve termine diventa molto minore (pannello c). Sono stati studiati tassi di emissione negativi di -6 e -10 GtCO₂/anno. Le riduzioni delle emissioni richieste per il 2020 sono notevolmente più piccole: 0-10% rispetto alla *baseline* per i tassi di riduzione annui delle emissioni pari al 2-3%; per un tasso di riduzione delle emissioni del 4% si possono evitare riduzioni al 2020. Le implicazioni di questi calcoli per il 2020 sono riassunte nel pannello d.

Figura 1. Percorsi di emissione illustrativi sulla base di un *carbon budget* secolare di 1600 GtCO₂ e un tasso costante di riduzione delle emissioni (in% dei livelli di emissione del 2000).

Pannello a) percorsi di emissione verso emissioni zero

Pannello b) mostra i risultati se il potenziale di riduzione delle emissioni è limitato

Pannello c) mostra i risultati se le emissioni possono andare in negativo

Pannello d) riassume la finestra di emissione per il 2020 (le emissioni nel 2100 sono pari a zero, +5 GtCO₂ e -10 GtCO₂/anno con un tasso massimo di riduzione del 2-3% all'anno. Sul lato alto, i risultati sono vincolato dallo scenario medio di riferimento dall'esercizio EMF-22

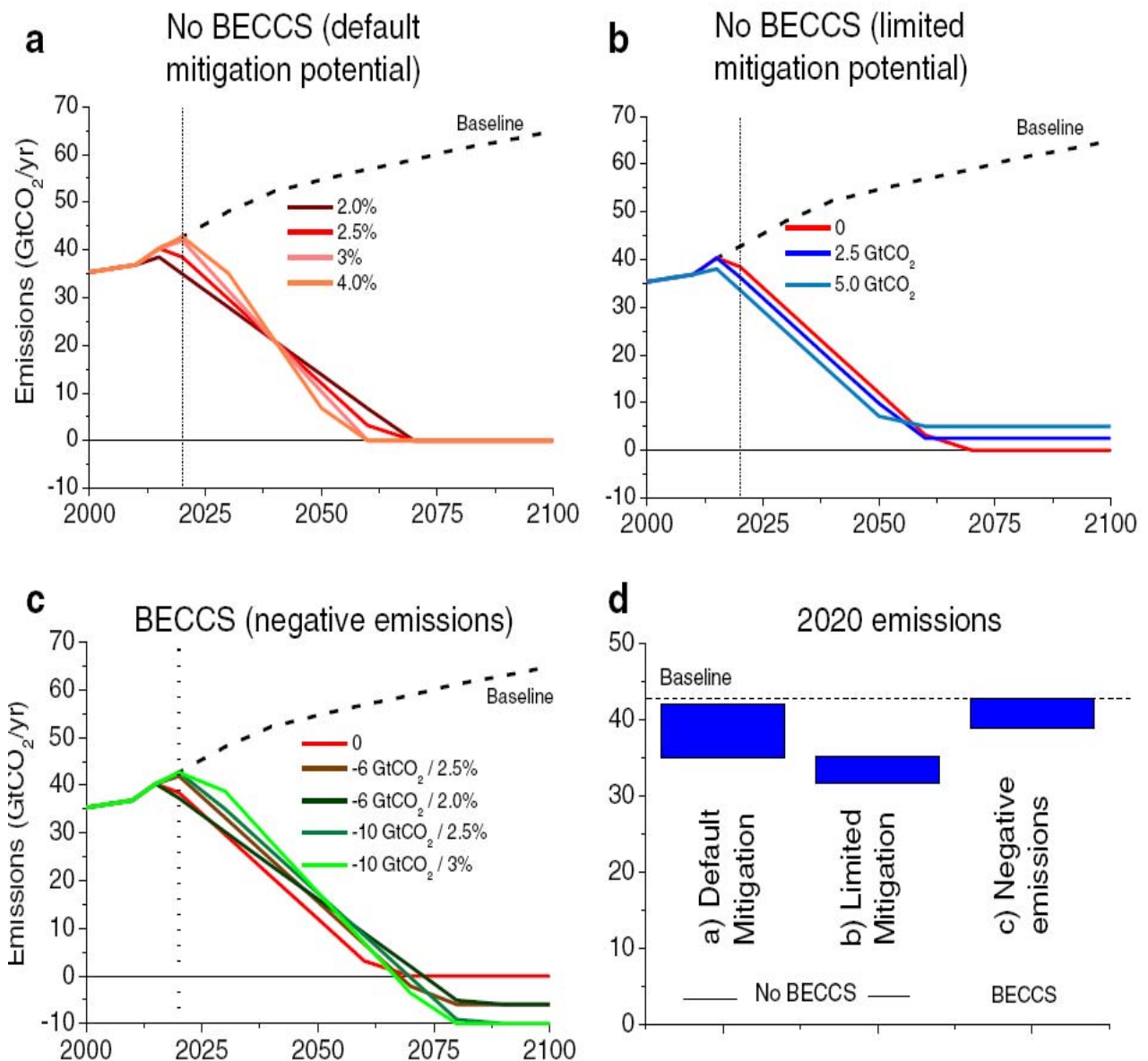
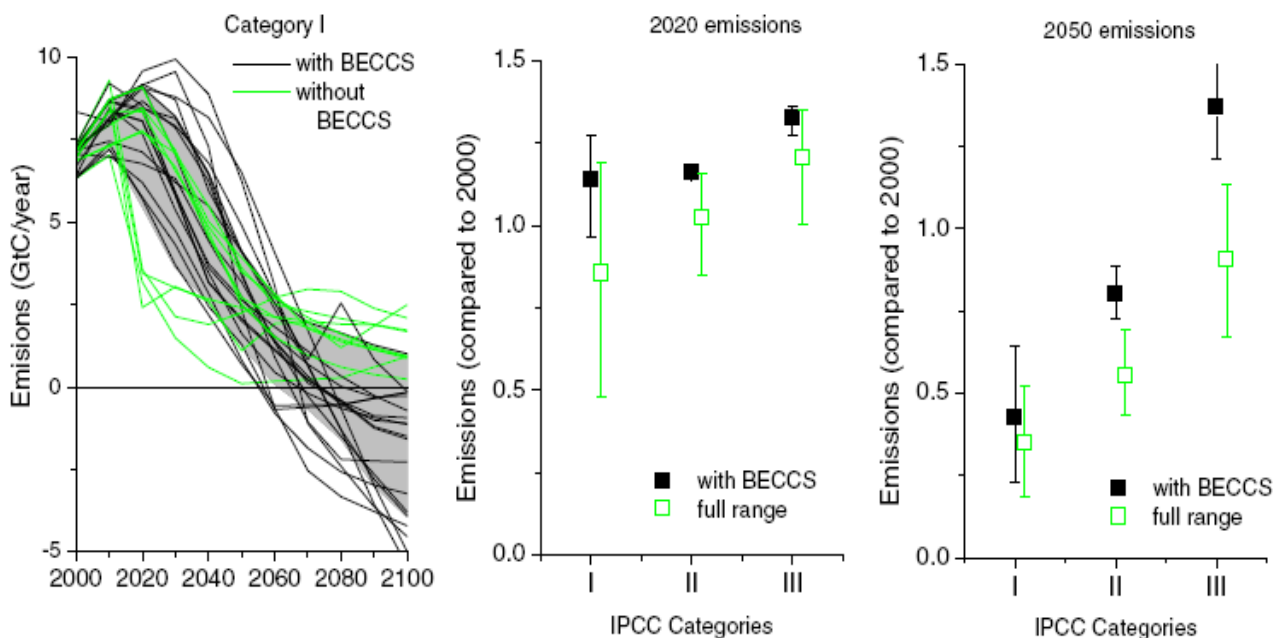


Figura 2. Panoramica degli scenari sviluppati in letteratura coerenti con l'obiettivo dei 2 °C, con e senza emissioni negative. Le categorie IPCC classificano gli scenari sulla base della loro forzante radiativa al 2100. Le tre categorie più basse sono: I: <math> < 3,0 \text{ Wm}^{-2}</math>, II: $3-3,5 \text{ Wm}^{-2}$ e III: $3,5-4,0 \text{ Wm}^{-2}$. Il pannello di sinistra mostra le emissioni di CO₂ per tutti gli scenari della categoria bassa. La parte centrale e il pannello a destra mostrano gli intervalli di emissione per gli scenari nel 2020 e il 2050 (medie nella fascia grigia e la gamma completa)



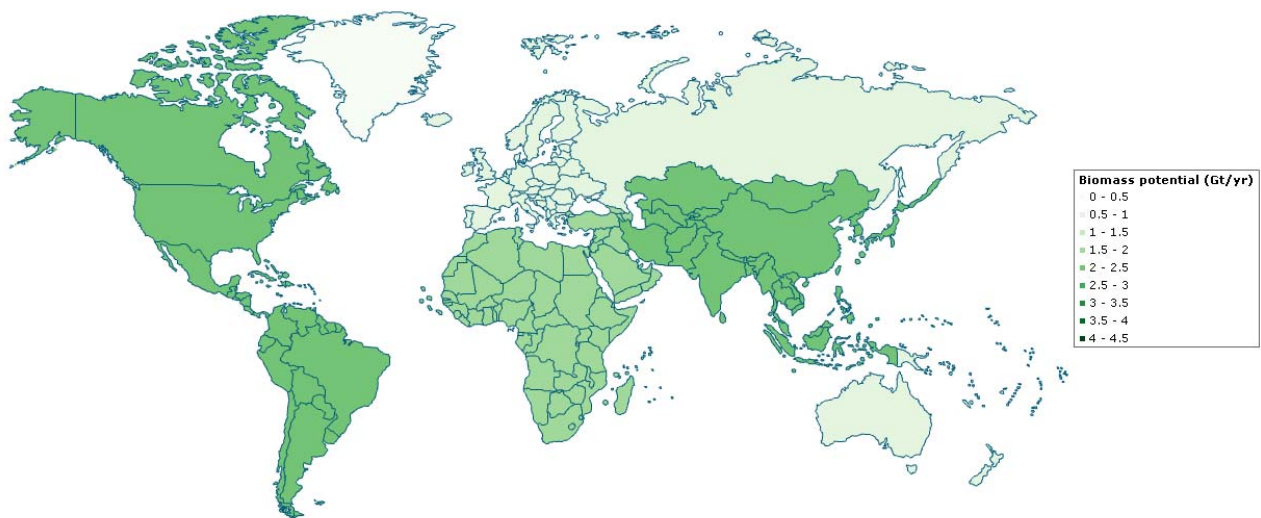
I limiti della disponibilità della bioenergia per la BECCS

Si discute aspramente sui limiti della disponibilità della bioenergia. Le preoccupazioni sono molte e fondate. Prima di tutto, ci sono pressioni concorrenti sulle risorse territoriali scarse per la produzione alimentare, del legname e la domanda di bioenergia. Nei prossimi quattro decenni, è probabile che sarà richiesto un aumento della produzione agricola di circa il 60% al fine di nutrire 9 miliardi di persone con diete sempre più intensive di carne. Allo stesso tempo, vi sono evidenze che anche la produzione di quantità relativamente piccole di bioenergia hanno contribuito a gonfiare i prezzi alimentari.

Si parte dal principio che un potenziale sostenibile di produzione di bioenergia non deve minacciare la sicurezza alimentare. Inoltre il potenziale di bioenergia dipende fortemente dallo sviluppo del sistema agricolo (in particolare dall'aumento di produttività). Altrettanto importanti sono le limitazioni poste dalla tutela della biodiversità, dalla scarsità d'acqua e dalla prevenzione del degrado del suolo. Né si può mancare di prendere in considerazione le

emissioni di gas serra associate alla produzione di bioenergia. La capacità della BECCS di assicurare emissioni nette negative dipende ovviamente dalle dimensioni di tali emissioni.

Figura 3. Disponibilità mondiale di produzione di biomassa su base annua per regione (fonte, IEAGHG¹¹)



Per la produzione di bioenergia di II generazione (legnosa) per l'utilizzo in centrali elettriche, le emissioni di conversione sono generalmente basse: è necessaria una relativamente minima trasformazione della biomassa (rispetto, ad esempio, alla produzione di biocarburanti di I generazione), e la bioenergia legnosa può, con un appropriato sistema di gestione, si può produrre con l'impiego di pochissimo fertilizzante. L'impatto netto sulle emissioni di gas serra, dunque, dipende soprattutto dalle emissioni di CO₂ per effetto del cambiamento di uso del suolo associato, sia direttamente - sul luogo di produzione della bioenergia legnosa - che indirettamente per effetto dello spostamento delle altre attività. Le stime di queste emissioni variano fortemente: possono essere perfino pari alle emissioni tipiche dei combustibili fossili o, viceversa, essere addirittura negative se la produzione di bioenergia contribuisce al miglioramento dei suoli degradati. È stato dimostrato che il potenziale sostenibile nel 2050 può variare tra 0 e 200 EJ¹²/anno a seconda di una serie di ipotesi relative ai fattori di cui sopra. Un valore tipico sarebbe di circa 150 EJ/anno combinando coltivazioni bio-energetiche dedicate con residui, supponendo che i siti possano produrre circa 5 - 10 tonnellate di

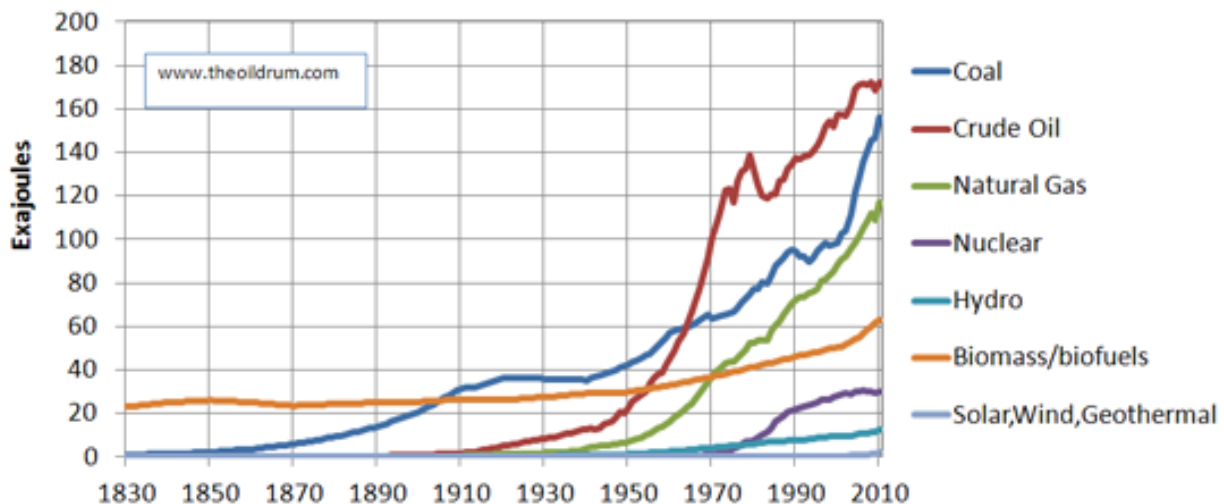
¹¹ IEAGHG, 2011, *Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2011/06

¹² 1 esajoule di energia è pari a 0,28 10¹⁰ Megawattora. È l'ordine di grandezza dei consumi di petrolio e carbone nel 2010 (Fig.3)

materia secca per ettaro all'anno. Entro il 2100, questo valore può essere di circa 250 EJ/anno.

Supponendo che tutta la bioenergia venga utilizzata in impianti BECCS, una efficienza di cattura del 90% e un fattore di emissione di uso del suolo causato dalla produzione di bioenergia di 15 kg di CO₂ per GJ, è facile calcolare che il potenziale totale massimo assoluto di emissioni negative sarebbe dell'ordine di 10 GtCO₂/anno nel 2050 e 20 GtCO₂ nel 2100.

Figura 4. Consumi globali di energia per tipo (fonte: Bardi)

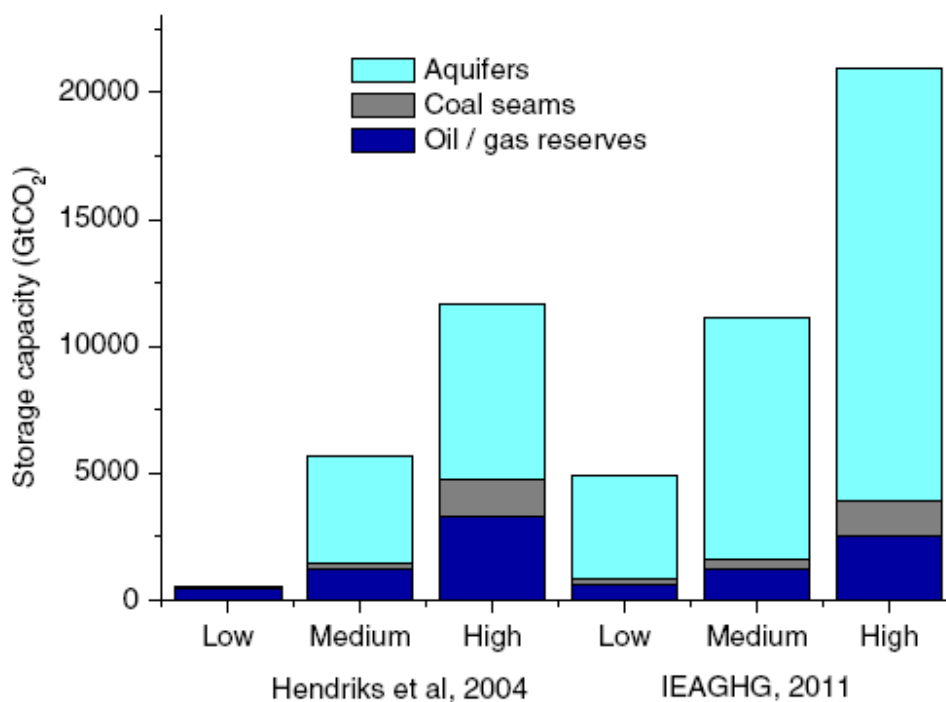


Il dato della emissione di 15 kg di CO₂ per GJ è basato su un ampio esame della letteratura e riduce l'efficacia netta della BECCS di circa un quinto (ma come si è più volte detto vi è una notevole margine di incertezza). Va osservato che il potenziale della BECCS è probabilmente minore a causa della competizione con altre forme di utilizzo di bioenergia, come il settore dei trasporti e la produzione di materiali.

I limiti dello stoccaggio sotterraneo della CO₂

Ci sono anche da fare i conti con la tecnologia CCS, ed in particolare con lo stoccaggio, che può risultare vincolante. Prima di tutto, la capacità di stoccaggio della CO₂ è incerta: mentre c'è qualche dato attendibile circa la sicurezza dello stoccaggio della CO₂ nei serbatoi depleti di combustibili fossili, è più incerto il potenziale di stoccaggio in sicurezza in altre categorie, come il *coal-bed*, gli acquiferi salini o addirittura l'oceano. In secondo luogo, l'accettazione sociale è quanto meno un vincolo importante. Le comunità locali si sono opposte con successo ai progetti CCS, sulla base dei rischi percepiti. Da un punto di vista tecnico, la capacità stimata di stoccaggio globale, basata su una serie di ipotesi, va da 500 a circa 10.000 GtCO₂.

Figura 5. Capacità di stoccaggio della CO₂ stimata (fonte Hendriks and IEAGHG¹³)



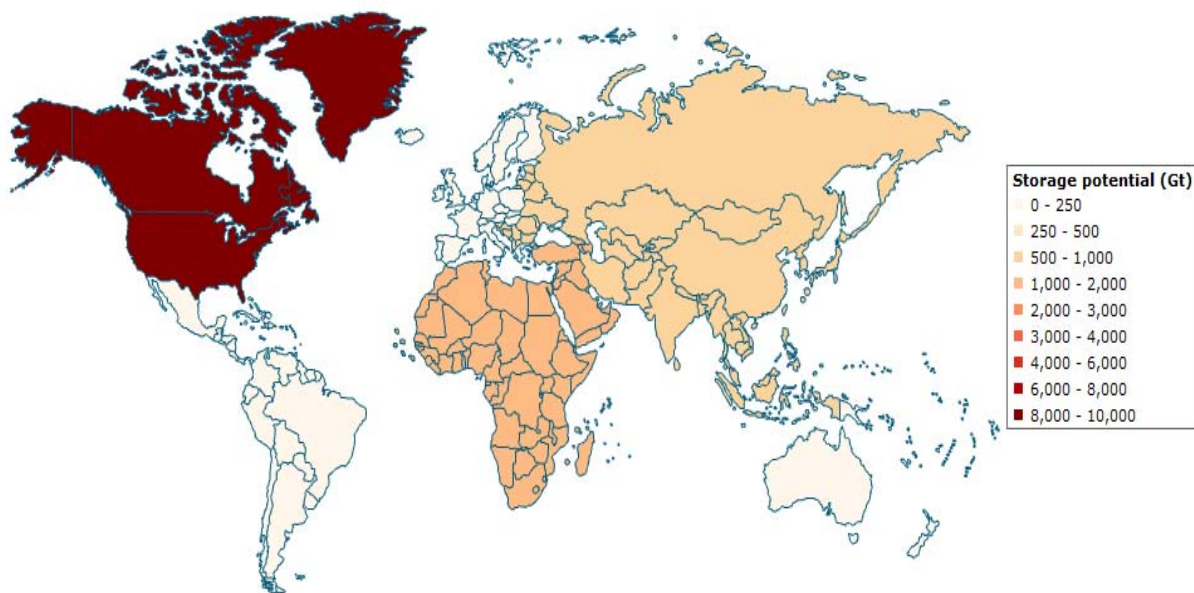
La capacità dei serbatoi di combustibili fossili (la parte più certa) va da 500 a circa 3000 GtCO₂. Un recente studio dell'Agenzia internazionale per l'energia (IEA) trova numeri un po' più bassi nella maggior parte delle regioni, ma numeri notevolmente più alti negli Stati Uniti. Come risultato, la loro stima totale globale è leggermente superiore, mentre la quota in sostituzione dei combustibili fossile è stata stimata in 600-2500 GtCO₂.

Supponendo che la CCS sia chiamata in campo soprattutto nella seconda metà del secolo, l'uso della capacità totale dei giacimenti di petrolio e di gas vuoti permette un tasso medio annuale di stoccaggio da 10 a più di 65 GtCO₂. Usando i giacimenti di carbone e le falde acquifere sposterebbe notevolmente verso l'alto il limite di gamma superiore. Gli stessi serbatoi, tuttavia, potenzialmente utilizzati per stoccare la CO₂ generata dai combustibili fossili, devono rendere disponibile lo spazio per la BECCS. A conti fatti, in base alle stime più ottimistiche, la capacità di stoccaggio è tale da non limitare la capacità dell'impiego della BECCS a livello globale (anche se la capacità potrebbe esaurirsi in regioni specifiche, densamente popolate, come la Corea, il Giappone e l'India). Sotto ipotesi pessimistiche, tuttavia, la possibilità della BECCS potrebbe essere gravemente limitata dalla capacità di stoccaggio che

¹³ IPCC (2005). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, UK and GCCSI (2011) Economic assessment of carbon capture and storage technologies 2011 update. Global CCS Institute, Canberra

tecnicamente potrebbe scendere a 10 GtCO₂/anno, ma che l'accettazione sociale potrebbe ridurre anche a zero.

Figura 6. Capacità mondiale di stoccaggio di CO₂ per regione (fonte, IEAGHG)



Il tasso massimo di stoccaggio potrebbe dunque aumentare l'incertezza della tecnologia BECCS, non meno che i costi della CCS. Questi ultimi sono determinati dai costi di cattura, trasporto e stoccaggio, ed è ancora necessaria molta innovazione per aumentare la competitività della BECCS.

L'importanza della BECCS dipende anche dalla disponibilità di altre opzioni *carbon-negative*. Riforestazione e afforestazione (AR) costituiscono una più che ragionevole alternativa, anche se le emissioni negative possono essere raggiunte solo dopo una prima sostanziale riduzione delle emissioni causate dalla deforestazione in corso. Gli studi sul potenziale dell'AR ne provano sia il potenziale tecnico che economico anche nelle stime più realistiche che tengono conto di tutti i tipi di limitazioni pratiche. Il potenziale di mitigazione da riforestazione arriva fino a 10 GtCO₂/anno nel periodo 2010-2050 con le ipotesi più ottimistiche, ma la misura di 4 GtCO₂/anno appare più realistica. In condizioni pessimistiche, tuttavia, non ci sarebbe alcun potenziale realistico. Questi numeri sono ragionevolmente coerenti con la stima di 1,3 - 4,2 GtCO_{2eq}/anno riportato dal quarto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR4)¹⁴.

¹⁴ IPCC, 2007, Fourth Assessment Report: Climate Change, AR4, Working Group III: Mitigation of Climate Change, § § 4.3.6 Carbon dioxide capture and storage (CCS). Referenziato in http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch4s4-3-6.html

Ovviamente, il potenziale di bioenergia e il potenziale AR finiscono per competere per le stesse superfici. Un altro punto è che entrambe le tecnologie di bioenergia e rimboschimento potrebbero, se introdotte su larga scala, portare non solo al sequestro del carbonio, ma anche ad impatti biofisici sul clima, come i cambiamenti di albedo. Questi impatti sono ancora di incerta valutazione, poiché è ancora povera la nostra attuale comprensione dell'interazione tra il cambiamento di uso del suolo e del clima (ad esempio, l'impatto della deforestazione e il cambiamento dell'uso del suolo nella foresta amazzonica o in Africa). C'è più consenso sull'impatto del cambiamento dell'uso del suolo nelle aree coperte dalla neve nella zona temperata, dove le misure di rimboschimento su larga scala potrebbe portare a un impatto netto sul riscaldamento.

Tabella 1. Potenziale globale di stoccaggio della CO₂ in Gt per tre tipi di depositi
(Fonte Hendricks, *Geocapacity (EU), NETL/DOE (US)*¹⁵)

	Oil and gas			Unmineable coal seams			Aquifers		
	low	best	high	low	best	high	low	best	high
Africa & Middle East	209	522	1,430	-	8	46	216	588	1,736
Asia	36	91	234	-	179	967	53	370	1,614
Oceania	8	20	49	-	11	54	0	2	9
Latin America	29	89	331	-	2	12	33	121	479
Non OECD Europe & Former Soviet Union	310	310	310	25	25	25	379	379	379
North America	22	156	166	157	176	229	3,307	8,001	12,774
OECD Europe	19	19	19	1	1	1	82	82	82
WORLD	633	1,205	2,539	183	402	1,333	4,071	9,542	17,074

Le considerazioni di cui sopra implicano che le stime ottimistiche sulle emissioni negative potrebbero essere nell'ordine di 10-20 GtCO₂/anno per la BECCS e circa 4 GtCO₂/anno per le connesse opzioni forestali. Stime più realistiche, tuttavia, sono suscettibili di ridurre questo potenziale alla metà o a meno.

¹⁵ Hendriks et al., 2004, *Global carbon dioxide storage potential and costs*, Utrecht, Ecofys, TNO for Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu; GeoCapacity, 2009, *Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide*, EC - Sixth Framework Programme/Geological Survey of Denmark and Greenland; NETL/DOE, 2008, *Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada (Atlas II)*, Department of Energy, Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory

I metodi CDR - DAC di estrazione diretta della CO₂ dall'atmosfera

L'acronimo CDR (*Carbon Direct Removal*) definisce una categoria di tecnologie che, oltre quelle già discusse, comprende le DAC (*Direct Air Capture*). Includere quindi approcci come la afforestazione e riforestazione a grande scala (AC), cattura e stoccaggio del carbonio basata sulla biomassa usata per generare energia (BECCS) e le DAC, la cattura diretta dall'aria, la fertilizzazione degli oceani, e la rimozione chimica della CO₂. Ognuno di questi presenta oggi una potenzialità più o meno remota di rimuovere CO₂ dall'atmosfera, rallentando o anche invertendo il flusso carbonico antropogenico verso l'atmosfera e gli oceani¹⁶.

Riassumendo alcune considerazioni già svolte si può far riferimento alla seguente classificazione:

Riforestazione ed afforestazione (AC). Sfrutta la fotosintesi clorofilliana, l'energia solare e l'acqua. Rimuove CO₂ dall'atmosfera per farne materiale da costruzione di tutti gli esseri viventi. Tuttavia, se la foresta viene successivamente distrutta o trasformata in combustibile il carbonio viene rilasciato in atmosfera. Per le applicazioni su larga scala c'è una potenziale competizione con gli altri usi del suolo (per esempio, la produzione alimentare (*food*), la silvicoltura commerciale (*timber*), le colture bio-energetiche, gli insediamenti urbani, le infrastrutture grigie dei suoli). I costi sono inizialmente relativamente bassi, almeno fino a quando i conflitti d'uso del territorio diventano più acuti.

Cattura del carbonio da bioenergia (BECCS). Si applica la CCS alla biomassa, per esempio nella generazione di elettricità o nella produzione di biocarburanti liquidi. Dal momento che il ciclo di combustione di una biomassa si presume essere di circa *carbon neutral* (il raccolto successivo è infatti in grado di assorbire una quantità di CO₂ pari al prodotto della combustione), sequestrando la CO₂ emessa si ottiene una rimozione netta dall'atmosfera. La BECCS è probabilmente un po' più costosa della CCS perché le materie prime sono più costose e gli impianti sono più piccoli. Un'alternativa è il *biochar*, carbone che può essere mescolato nel terreno, intrappolando notevoli quantità di carbonio con potenziali benefici per la produttività agricola. Un'alta opzione potrebbe essere quella di seppellire la biomassa in condizioni che impediscano

¹⁶ James Meadowcroft, 2012, *Exploring negative territory Carbon dioxide removal and climate policy initiatives*, in *Climatic Change Special Issue: Science and Policy of Negative Emission Technologies* (Volume 118, Issue 1, May 2013) - (cit.)

il normale decadimento. Mentre con il *biochar* si produce energia, la sepoltura a grande scala della biomassa non dà benefici ulteriori.

Cattura diretta dall'aria (DAC). Prevede il prelievo diretto della CO₂ dall'atmosfera e il successivo sequestro, di solito in una formazione geologica. Gli impianti DAC su base industriale potrebbero essere situati in prossimità di siti di stoccaggio, perché, rispetto alla BECCS, il trasporto lo fa l'atmosfera e la rapida diffusione aerea della CO₂. La difficoltà sta ovviamente nel fatto che le concentrazioni atmosferiche di CO₂ sono molto più basse rispetto ai fumi di combustione. La DAC rimane in una fase relativamente iniziale di sviluppo. Come la CCS e la BECCS, richiede siti di stoccaggio appropriati.

Fertilizzazione oceanica. Si basa sulla semina minerale del mare per incoraggiare l'assunzione di biossido di carbonio da organismi biologici che – *post mortem* – trasferiranno la CO₂ nelle profondità oceaniche. La fertilizzazione con il ferro è per ora favorita, anche se altri hanno proposto di usare azoto e fosforo. Incertezze importanti rimangono circa l'efficacia del processo e sui potenziali effetti collaterali tra cui l'impatto sulla ecologia dell'oceano.

Mineralizzazione rafforzata. Sfrutta processi chimici naturali in cui minerali superficiali sono lentamente trasformati dall'assorbimento della CO₂. Potrebbe essere utilizzata una varietà di processi chimici, la maggior parte richiede l'estrazione e la frantumazione delle rocce per accelerare l'assorbimento della CO₂, con deposizione a terra o mare.

Come si vede gli approcci CDR sono molti e vari. Condividono la capacità di rimuovere la CO₂ dall'atmosfera, e poco altro. La CO₂ viene catturata e immagazzinata con meccanismi vari, che coinvolgono diversi processi naturali e molti interventi tecnologici. Gli approcci presentano vari profili di costi e benefici, effetti collaterali, rischi e fattori limitanti. Gli sforzi di razionalizzazione¹⁷ sottolineano problemi di costo, calcolano il potenziale di riduzione massima della CO₂ (in ppm) in questo secolo, i vincoli finali, la significatività degli effetti ambientali attesi, e il rischio di effetti ambientali imprevisti.

Una differenza importante riguarda la destinazione del carbonio immagazzinato, nell'ordine la biosfera terrestre, lo stoccaggio geologico, le rocce superficiali o il fondo dell'oceano con vantaggi e controindicazioni. Il carbonio sequestrato nelle foreste resta vulnerabile agli interventi industriali. Il riversamento negli ecosistemi oceanici è particolarmente problematico: si tratta di ecosistemi aperti, senza protezione, e ricchi di risorse viventi a rischio

¹⁷ Royal Society, 2009, *Geoengineering the Climate*, The Royal Society, London

che già assorbono grandi quantità di CO₂. Per di più, la conoscenza scientifica in materia è in grave ritardo.

A differenza di altri CDR, gli approcci della afforestazione e riforestazione sono opzioni concrete, scalabili a costi ragionevoli e riconosciute nel quadro degli accordi internazionali sul clima in vigore e nelle relative linee guide di contabilità. Le misure per incoraggiare i paesi in via di sviluppo a ridurre le emissioni da deforestazione e da degrado forestale (REDD) sono al centro del negoziato internazionale, con stime attuali di emissioni di carbonio lorde dalla distruzione delle foreste tropicali che vanno da circa 0,8 a 2,8 GtC all'anno¹⁸.

In secondo luogo, la scala ovviamente conta. In prima istanza la scala si riferisce alla quantità di carbonio che potrebbe in ultima analisi essere estratta, la velocità con cui questo risultato potrebbe essere realizzato e la durata di tempo che dovrebbe rimanere isolata dall'atmosfera. Le stime di queste grandezze sono sensibile alle ipotesi iniziali - la praticabilità del percorso, i fattori limitanti, i costi e così via.

Uno studio recente¹⁹ ha calcolato per il 2050 un contributo potenziale dal rimboschimento di 1,5 GtC/anno (fino ad un massimo di 300 GtC); un potenziale contributo da *biochar* fino a 0,87 GtC/anno (fino a un massimo di 500 GtC); e un potenziale della BECCS fino a 4 GtC/anno (limitato in ultima analisi dalla disponibilità di stoccaggio geologico a 500-3000 GtC).

Per non perdere di vista gli ordini di grandezza si consideri che i flussi di CO₂ emessi annualmente per combustione di combustibili fossili vale poco più di 8 GtC.

Per il DAC e la cattura aerea diretta si parla di una possibile velocità di assorbimento, dopo 50 anni di sforzi di ricerca, di 1 GtC all'anno²⁰. Ma in tutti i casi le riduzioni richiederanno uno sforzo sociale immenso: la semina e la gestione di milioni di chilometri quadrati di foresta; la coltivazione di materiali biologici per la BECCS o per incorporare il carbonio nel suolo; la diffusione della DAC e dell'iniezione di CO₂ nel sottosuolo, o l'estrazione e la lavorazione dei minerali in quantità paragonabili per ordine di grandezza a quelli del sistema energetico che produce la stessa CO₂. Ne segue sfortunatamente che le stime ambiziose della potenzialità della CDR, soprattutto dalla metà del secolo in poi, deve essere considerata con cautela.

¹⁸ N. Harris et al., 2012, *Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions*, Science 336 (6088):1573-1576

¹⁹ T. Lenton, 2010, *The potential for land-based biological CO₂ removal to lower future atmospheric CO₂ concentration*, Carbon Management, 1:145-160

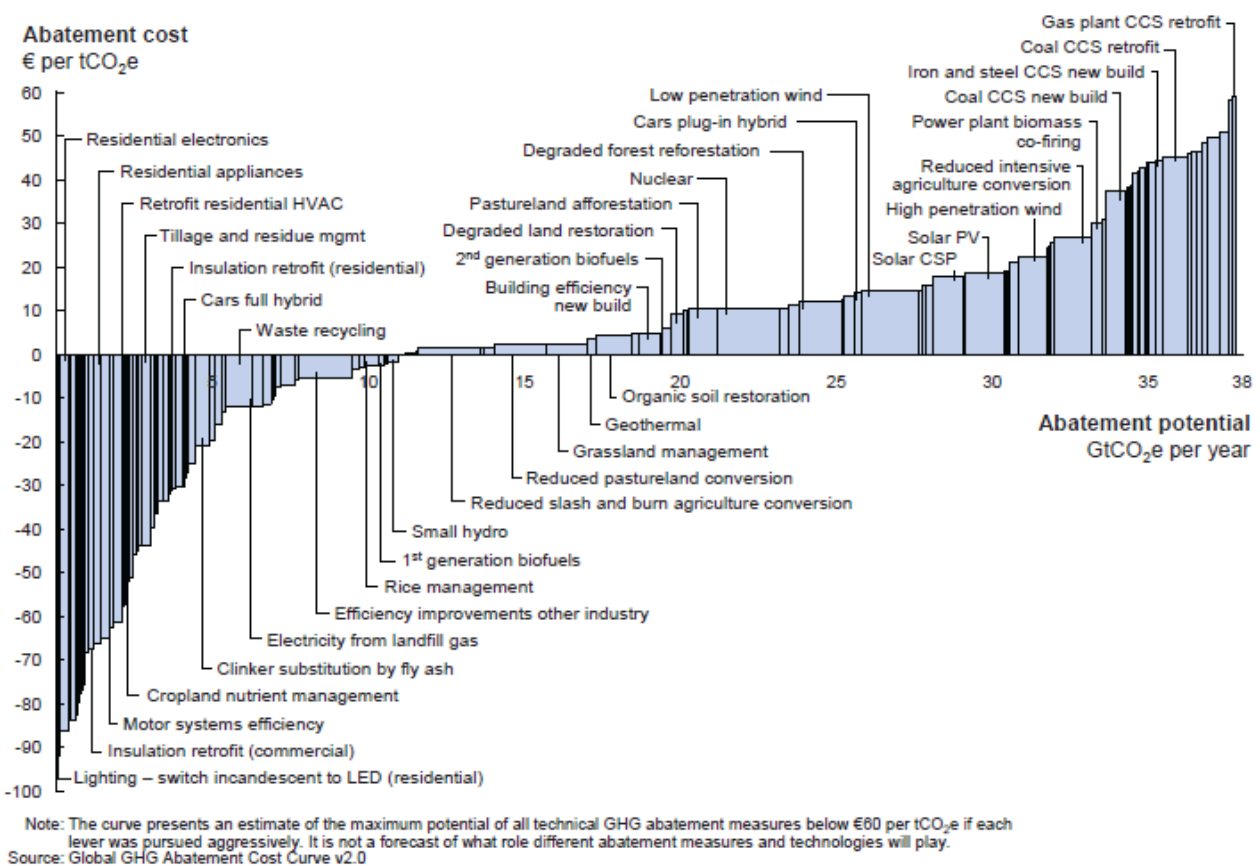
²⁰ Si veda Socolow in nota 1

Infine, tutti questi approcci affrontano incertezze su più piani. Nonostante la lunga esperienza umana con la silvicoltura e la gestione forestale la conoscenza dei cicli dei biomi forestali è limitata. La ricerca sul *biochar* è minima. Non vi è alcuna ricerca su come seppellire la biomassa. La conoscenza degli ecosistemi oceanici, lo abbiamo detto, è limitata e le interazioni tra oceano e atmosfera sono poco compresi. Anche la conoscenza del sottosuolo è parziale: conosciamo abbastanza la geologia dei giacimenti di combustibili fossili, ma molto meno su tutto il resto, comprese le interconnessioni tra i processi biologici in profondità e la biosfera.

Il problema dei costi, il Rapporto McKinsey

Fig. 11

Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030



Low-carbon energy supply (opportunity of 12 GtCO₂e per year in 2030). There are many opportunities to shift energy supply from fossil fuels to low-carbon alternatives. Key examples include electricity production from wind, nuclear, or hydro power, as well as equipping fossil fuel plants with carbon capture and storage (CCS), and replacing conventional transportation fuel with biofuels. If these low-carbon alternatives were to be fully implemented, we estimate that they

have the potential to provide about 70 percent of global electricity supply by 2030 compared with just 30 percent in 2005; and that biofuels could provide as much as 25 percent of global transportation fuel by 2030. This would constitute a major shift in global energy supply. Several of these low-carbon energy technologies are too expensive today to deploy on a large scale without financial incentives, emphasizing the need to provide sufficient support to make them travel down the learning curve allowing them to contribute to their full potential.⁵

Terrestrial carbon – forestry and agriculture (opportunity of 12 GtCO₂e per year in 2030). Forests and soils act as natural sinks for carbon. Halting ongoing tropical deforestation, reforesting marginal areas of land, and sequestering more CO₂ in soils through changing agricultural practices would increase carbon sequestration. This would lead to negative net emissions of CO₂e into the atmosphere from these sectors in the period we have studied (implying that more carbon is stored than is released from these sinks), a major abatement opportunity versus the BAU in which deforestation continues. However, capturing these opportunities would be highly challenging. More than 90 percent of them are located in the developing world, they are tightly linked to the overall social and economic situation in the concerned regions, and addressing the opportunities at this scale has not before been attempted.

Our estimate of the feasibility and cost of this opportunity is therefore subject to significant uncertainty. We also note that terrestrial carbon opportunities are temporary in nature because the sinks would saturate between 2030 and 2050, so that, at the end of this period, there would be few additional areas of marginal land left available for re-forestation.

Carbon Capture and Storage (CCS). Our modeling assumes that this technology – at the demonstration stage today – will prove feasible at a large scale, and will come down to a cost of €30 to €45 per tCO₂e in a 2030 perspective. As such, we estimate that it could have a significant emissions impact – as it is the only currently feasible technology that allows for continued use of coal for power generation, while at the same time reducing emissions substantially. CCS can also be used to address the emissions from large point sources in Iron and Steel, Chemicals, Cement, and Petroleum. We estimate that the combined potential for CCS across Power and these Industry sectors is up to 3.3–4.1 GtCO₂e per year by 2030.

Le opzioni di mitigazione *carbon negative* secondo l'IPCC AR5 WKG III

Il cambiamento climatico può essere attenuato e la temperatura globale stabilizzata solo se l'importo totale di CO₂ emessa verrà limitata fino al punto che le emissioni siano forzate ad avvicinarsi allo zero.

Le emissioni dirette di CO₂ da combustione di materie prime biogeniche in generale corrispondono alla quantità di CO₂ atmosferica sequestrata attraverso il ciclo di crescita delle biomasse. Le emissioni provengono dai combustibili fossili utilizzati durante l'impianto, la ricrescita e il ciclo di raccolta della biomassa. Occorre inoltre conteggiare le emissioni potenziali dell'uso del suolo e quelle generate dalla gestione del cambiamento. Il ciclo di vita delle emissioni dipende dal tipo di materia prima, dalla posizione specifica, dalla scala, dalle pratiche di produzione di biomassa e dalla dinamica della gestione dell'uso del suolo. In alcuni casi, se la crescita della biomassa accumula carbonio nel suolo fino a raggiungere l'equilibrio, ulteriore sequestro del carbonio può verificarsi, ma questi possono essere effetti a breve termine. Le emissioni indirette riguardano più direttamente l'uso di colture alimentari per fini energetici rispetto all'uso di biomassa lignocellulosica (vedere Sezione 11.13). Specie a rotazione breve (piante erbacee) e rifiuti hanno cicli di emissioni nette quasi-zero²¹.

Una volta che le emissioni dirette vengono catturate e stoccate nel sottosuolo utilizzando le tecnologie CCS si ottiene una riduzione netta della CO₂ atmosferica. Di conseguenza, una combinazione di bio-energia e CCS (BECCS) generalmente si tradurrà in emissioni nette negative. Attualmente, due esempi su piccola scala di precursori commerciali della BECCS sono disponibili per la cattura di emissioni di CO₂ da impianti di produzione di etanolo e da impianti EOR per il recupero di petrolio in strutture a breve distanza (DiPietro e Balash, 2012).

La BECCS è una delle poche tecnologie che è in grado di rimuovere le emissioni storiche di CO₂ rimaste in atmosfera. Come già notato in precedenza questa opportunità consente di decidere il momento opportuno dell'intervento nel ciclo di ogni scenario, restituendo un po' di flessibilità alla progettazione degli scenari di mitigazione. La BECCS gioca pertanto un ruolo di primo piano in molti dei percorsi di stabilizzazione bassa discussi in questo AR5 ed in un particolare *nel RCP 2.56* discussi nel Capitolo 6 e Sezione 7.11.

²¹ I materiali qui discussi sono referenziati nell'IPCC AR5 WKG III, in particolare ai capitoli 7, 11

I rischi potenziali associati con la tecnologia BECCS sono legati a quelli connessi con la fornitura a monte della biomassa 9 utilizzata (vedi **non-sparizione del ciclo di vita Sezione 11.13**), così come quelli derivanti dalla cattura, il trasporto, e lo stoccaggio a lungo termine della CO₂ (*leakage*), che peraltro verrebbe consegnata all'atmosfera ed agli oceani. I costi della BECCS possono essere ridotti utilizzando mezzi di conversione di biomassa su larga scala, che, a loro volta, richiedono lo sviluppo in condizioni di vantaggio costo-efficacia di sistemi per la fornitura e la logistica a basse emissioni di grandi quantità materie prime biogeniche (**sezione 11.13.3**).

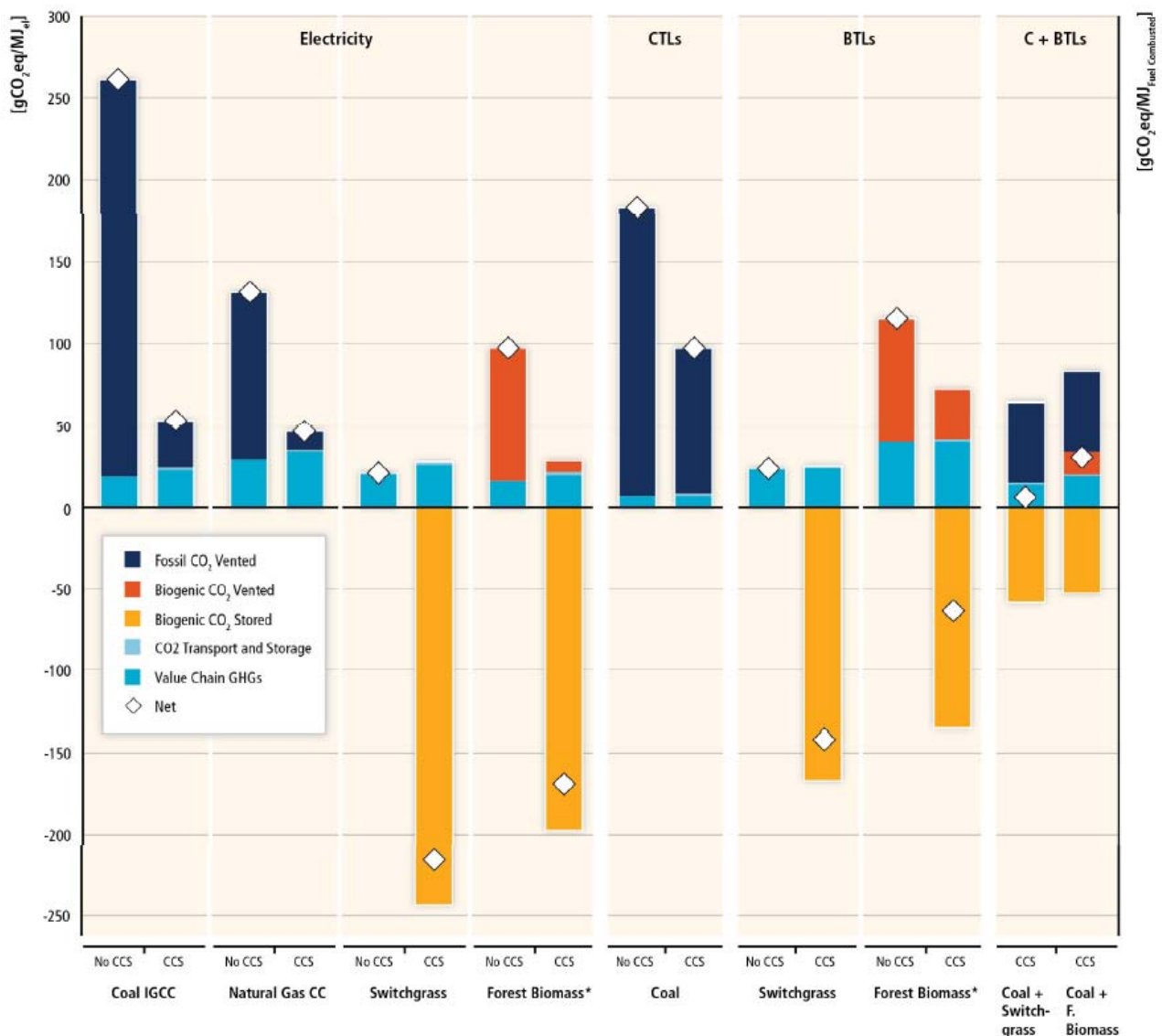
Perché la bioenergia accoppiata con la CCS possa essere la desiderata opzione *carbon-negative* per mitigare i cambiamenti climatici occorre che le tecnologie CCS siano implementate con successo (Cao e Caldeira 2010; Lenton e Vaughan 2009). La BECCS ha un posto di rilievo negli scenari di mitigazione nel lungo periodo (Sezioni 6.3.2 e 6.3.5) per due ragioni: la disponibilità di emissioni negative alla giusta scala può consentire un certo spostamento in avanti nel tempo delle emissioni, dando respiro all'evoluzione tecnologica e alla transizione verso la *green economy*; inoltre in tutti gli scenari, emissioni negative da BECCS possono compensare le emissioni residue in altri settori (soprattutto trasporti, ma anche agricoltura) nella seconda metà del 21° secolo.

Come illustra la Fig. 12, la BECCS è nettamente diversa dalla CCS fossile perché non solo riduce le emissioni di CO₂ mediante lo stoccaggio geologico del carbonio a lungo termine, ma sequestra continuamente CO₂ dall'aria attraverso la rigenerazione della biomassa. La diffusione della BECCS è nelle fasi di sviluppo e di esplorazione. Il progetto BECCS più rilevante è l'Illinois Basin - Decatur che viene progettato per iniettare 1 Mt CO₂/anno (Gollakota e McDonald, 2012; Senel e Chugunov, 2013). Negli Stati Uniti, due impianti di produzione di etanolo per fermentazione sono attualmente integrati con la cattura di anidride carbonica, *pipeline* di trasporto, e la commerciano per l'EOR petrolifero in pozzi vicini ad una velocità di circa 0,2 Mt CO₂/anno (DiPietro et al., 2012). In totale, ci sono 16 progetti globali BECCS in fase di esplorazione (Karlsson e Byström, 2011).

Fondamentale per uno stoccaggio di CO₂ *carbon-negative* a scala adeguata è la realizzazione di sistemi di approvvigionamento di materie prime di biomassa lignocellulosica e il loro inserimento sui mercati come *commodity* e tecnologie efficienti di conversione energetica in impianti anch'essi di dimensione adeguata. Ciò è necessario per beneficiare di una riduzione dei costi per il ben noto fenomeno dell'*apprendimento tecnologico* al pari del sistema integrato della CCS, con condizioni finanziarie e istituzionali che riducono al minimo i

rischi di investimento e facilitano la diffusione della tecnologia (Eranki e Dale, 2011; IEA, 2012C, 2013).

Figura 11. Illustrazione della somma delle emissioni in CO₂eq derivanti dalla supply chain per il trasporto e la generazione di energia alternative, sia con e senza CCS (Sono prese in considerazione le differenze di densità carbonica tra biomassa forestale e il panico verga, ma non il potere calorifico. Le emissioni specifiche variano con la materia prima e con la tecnologia di conversione, così come il calcolo del ciclo di vita dei gas serra. Vanno prese in considerazione per i fini decisionali e per gli aspetti di mercato fattori come le variazioni di carbonio organico nel suolo, o i cambiamenti dell'albedo superficiale, elementi che portano a risultati quantitativi anche significativamente diversi. (Sezione 11.13.4, Figure 11.23 e 11.24). Le unità usate sono gCO₂eq / MJel (energia elettrica a sx); gCO₂eq/MJ bruciata (trasporti combustibili a dx). Le missioni di CO₂ dirette da conversione dell'energia ('ventilato' e 'conservato') sono adattati dai valori medi calcolati da esperti. Gli impatti a monte nella supply chain associati con l'approvvigionamento delle materie prime (ad esempio, somma di gas serra provenienti da miniere/coltivazione, i trasporti, ecc) sono ricavati dalla letteratura (Fonte: IPCC AR5 WKG III)



Occorre perfezionare un'analisi integrata di sistema per mettere in campo conoscenze e tecnologie bioenergetiche. Un sistema di trattamento della materia prima originaria per mettere in commercio a livello globale della biomassa addensata potrebbe inoltre diminuzione della pressione sulla necessità di una stretta contiguità tra i luoghi di stoccaggio e quelli della produzione (IEA, 2011;. Junginger et al, 2014).

Il potenziale tecnico complessivo di stoccaggio è stimato a circa 10 GtCO₂ all'anno sia per la gassificazione integrata a ciclo combinato (IGCC) -CCS che per la co-combustione (IGCC con co-gassificazione di biomassa), e biomassa gassificazione integrata a ciclo combinato (BIGCC) -CCS dedicato, e circa 6 GtCO₂ stoccaggio di biodiesel basato su gassificazione e sintesi di Fischer-Tropsch (FT diesel), e 2,7 GtCO₂ per la produzione di biometano (Koornneef et al., 2012, 2013). Un altro studio stima la capacità potenziale (simile al potenziale tecnico) di essere tra 2.4 e 10 GtCO₂ all'anno per 2030–2050 (McLaren, 2012).

Il potenziale economico, ad un prezzo della CO₂ di circa 70\$/t è stimato essere circa 3,3 GtCO₂, 3.5, 3.1 GtCO₂ GtCO₂ e 0,8 GtCO₂ nei corrispondenti quattro casi, giudicate quelli con più alto potenziale economico (Koornneef et al., 2012, 2013). I potenziali sono valutati su una rotta per rotta e non può semplicemente essere aggiunto, in quanto possono competere e sostituire l'altro.

Figure pratici potrebbero essere non molto più alto di 2,4 GtCO₂ ogni anno a 70–250 USD / t CO₂ (McLaren, 2012). Complessivamente, fino al 2050, il potenziale economico è ovunque tra 2–10 GtCO₂ all'anno. Alcuni scenari di stabilizzazione climatica vedono notevole spiegamento maggiore verso la fine del secolo, anche in alcuni 580–650 scenari ppm, che opera sotto diverse scale temporali, socio-economico ipotesi, portafogli tecnologia, prezzi di CO₂ e BECCS interpretariato come parte di un generale quadro di mitigazione (ad esempio, Rose et al, 2012;. Kriegler et al, 2013;. Tavoni e Socolow, 2013).

Possibili rischi climatici di BECCS si riferiscono alla riduzione del carbonio terra stock, scale possibili di biomassa produzione e aumentato le emissioni di N₂O, e la potenziale perdita di CO₂, che è stato memorizzato in serbatoi geologici profondi (Rodi e Keith, 2008). Le ipotesi di spazialmente sufficiente opportuno cattura CCS, gasdotti, e infrastruttura di storage sono incerti. I punti salienti della letteratura che BECCS così come la realizzazione CCS dipende forti incentivi finanziari, in quanto non sono costo competitivo altrimenti (sezioni 7.5.5, 7.6.4, 7.9, 7.12).

I conflitti di uso del suolo per l'energia e l'alimentazione secondo l'IPCC AR5

L'IPCC ha prodotto, prima della pubblicazione dell'AR5, un rapporto approfondito ed estensivo con una panoramica completa sulle bioenergie²². Tuttavia, AR5 ritiene di reintervenire sulla questione proprio perché molti degli scenari di mitigazione più stringenti (mirati alla concentrazione di 450 ppm, ma anche a 550 ppm di CO_{2eq} a fine secolo, [vedere la Sezione 11.9.1](#)) si basano pesantemente su una diffusione a larga scala di bioenergia con cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica (BECCS).

La bioenergia è l'energia derivata da biomassa, in forma solida, liquida e gassosa per una vasta gamma di utilizzi, tra cui i trasporti, il riscaldamento, la produzione di energia elettrica, e la cucina. La bioenergia ha un notevole potenziale di mitigazione, ma ci sono questioni gravi di sostenibilità delle pratiche e di efficienza dei sistemi bioenergetici che possono causare effetti sia positivi che negativi. La loro diffusione ha bisogno di equilibrare gli obiettivi ambientali, sociali ed economici che non sono sempre completamente compatibili. Di conseguenza la sostenibilità della bioenergia dipende dalla tecnologia utilizzata; dal territorio, dalla scala e dai ritmi di produzione; dal tipo di terreni utilizzati (foreste, praterie, terreni marginali o *set-aside*, terreni a coltura agricola); e dai *modelli di business* e dalle pratiche adottate – se esse si integrano o rivoluzionano l'utilizzazione tradizionale del suolo.

Il potenziale tecnico della bioenergia, è la quantità della produzione teorica di bioenergia ottenibile con la piena attuazione di tecnologie o pratiche dimostrate. Purtroppo non esiste una metodologia standard per stimare il potenziale tecnico della bioenergia, e le stime disponibili sono piuttosto divergenti. La maggior parte degli studi recenti stimano questa potenzialità bioenergetica dando priorità alla produzione di fibre alimentari ed escludendo la deforestazione. Ne risulta, peraltro correttamente, un modello della potenziale bioenergia sostenibile che ingloba una gamma completa di vincoli ambientali²³. ([Batidzirai et al., 2012](#)). Stime pubblicate di recente, che assumono questa definizione estesa di bioenergia sostenibile (al netto, pertanto, di considerazioni economiche e dei problemi di accettabilità sociale) danno luogo a stime tecniche globali della potenzialità al 2050 su un arco di circa tre ordini di grandezza, da meno di 50 EJ a più di 1.000 EJ/anno ([Smeets et al, 2007](#); [Campo et al, 2008](#); [Haberl et al, 2010](#);.. [Batidzirai et al, 2012](#)).

²² IPCC, 2011, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, SRREN, cap. 2, Bioenergy

²³

A titolo di esempio, IPCC SRREN 2011 riferiva potenzialità tecniche globali bioenergetiche di 50-500 EJ/anno per l'anno 2050. La valutazione Global Energy ha dato un intervallo tra 160 e 270 EJ/anno (Johansson et al., 2012). La discussione che ha fatto seguito alla pubblicazione di questi Rapporti globali non ha portato ad un consenso sulla entità del potenziale tecnico globale futuro della bioenergia, ma ha aiutato a capire meglio alcuni dei suoi numerosi determinanti strutturali. (Wirsenius et al, 2011;. Berndes, 2012; Erb et al, 2012a.).

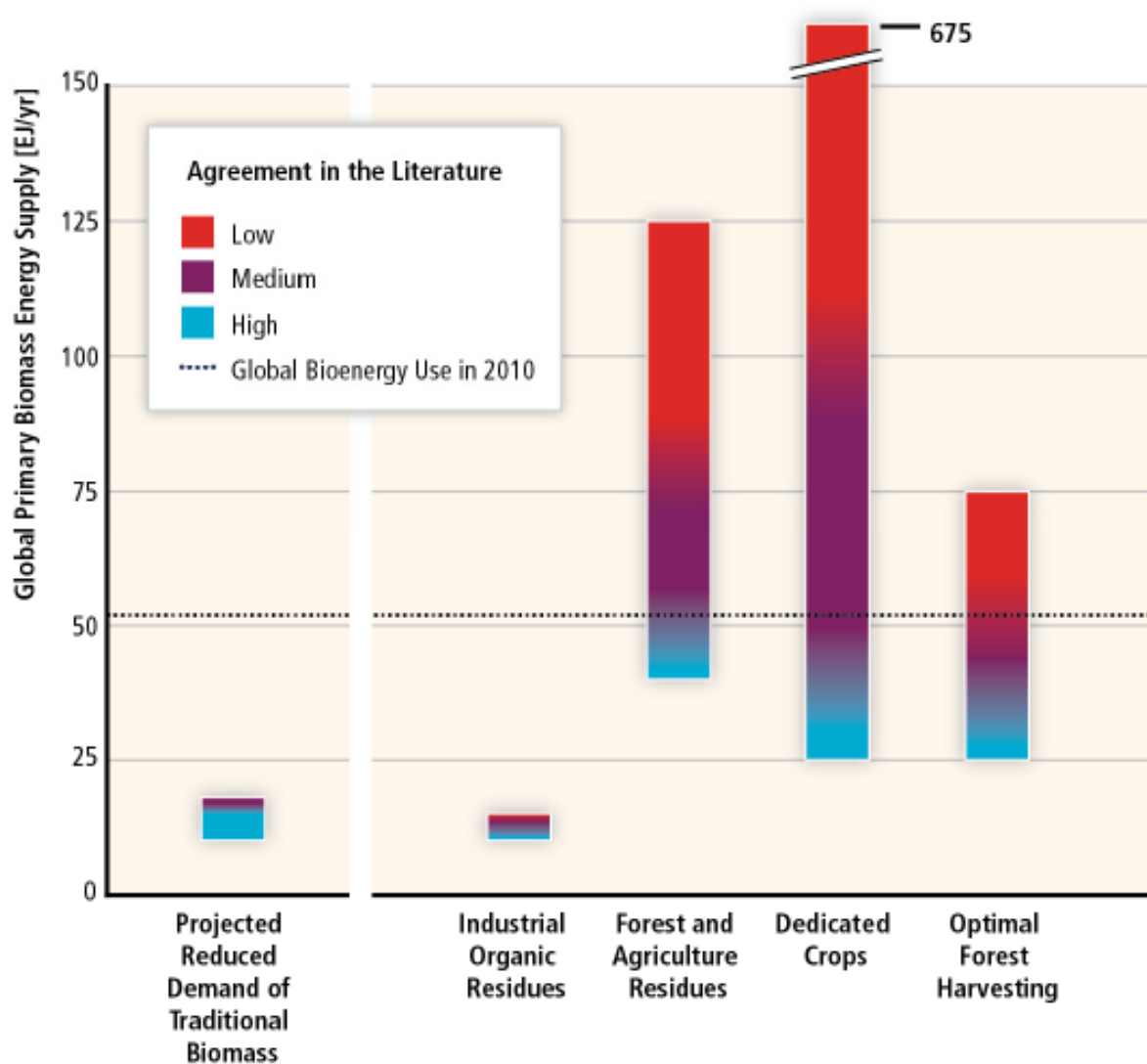
Quanta biomassa per usi energetici sarebbe (tecnicamente) disponibile in futuro dipende da una moltitudine di fattori sociali, politici ed economici, ad esempio, la regolamentazione del possesso della terra, il commercio, e tecnologia. (Dornburg et al., 2010) La Fig. 12 mostra le stime del potenziale di bioenergia tecnico mondiale nel 2050 per categorie di risorse.

La variabilità delle stime deriva da una valutazione di un gran numero di studi basati sul cosiddetto "primo principio" della priorità delle fibre alimentari e da varie restrizioni in materia di limitazioni di accesso alle risorse e dalle preoccupazioni ambientali, ma senza considerazioni esplicite dei costi. La maggior parte degli studi concordano sul fatto che il potenziale tecnico della bioenergia nel 2050 è di almeno circa 100 EJ/anno, con l'eccezione di alcuni modelli che portando a stime superiori ai 500 EJ/anno (Smeets et al., 2007).

AR5 avverte che i diversi punti di vista circa la sostenibilità e i vincoli socio-ecologici portano a stime molto diverse, con alcuni studi che segnalano cifre molto inferiori. Come mostrato nella Figura 13, il potenziale bioenergetico totale tecnico è composto da varie categorie di risorse che si differenziano in termini di potenziale assoluto, di implicazioni nell'uso e nelle opinioni degli esperti. Ci sono poi differenze regionali, pur sempre importanti, come lo *share* di ciascun risorsa all'interno del potenziale locale e i suoi importi massimi. In sintesi:

I residui forestali comprendono residui di diradamento e raccolta silvicolturale; residui di lavorazione del legno quali segatura, cortecce, residui di lavorazione della carta (*black liquor*) e legno morto per effetti naturali, quali tempeste e aggressioni di insetti. L'uso di queste risorse è generalmente vantaggioso e gli eventuali effetti collaterali negativi possono essere attenuati attraverso il controllo dei residui di asportazione considerando biodiversità, clima, topografia, e caratteristiche del suolo. Soprattutto nelle regioni temperate e boreali, la materia organica trattiene il carbonio organico più a lungo se i residui sono lasciati a decomporsi lentamente, invece di utilizzarli per produrre energia.

Figura 13. Potenziale globale tecnico della bioenergia per le principali categorie di risorse per l'anno 2050. La gradazione del colore ha lo scopo di mostrare qualitativamente il grado di accordo nella stime, dal blu (grande accordo in letteratura) al viola (accordo medio) al rosso (poco accordo). Inoltre, riducendo la domanda di biomassa tradizionale, aumentando l'efficienza dell'uso potrebbe rilasciare le biomasse salvate per altri scopi energetici con grandi benefici da un sostenibile prospettiva di sviluppo (Fonte: IPCC AR5 WKG III)



I residui agricoli comprendono letame, residui dei raccolti (paglia, etc.), e residui di lavorazione (lolla di riso etc.), buoni per la bioenergia. Tuttavia, possibili effetti collaterali negativi sono la perdita di carbonio nel suolo associato ai residui della raccolta agricola, fenomeno complesso che dipende dalle diverse colture, dal clima e dalle condizioni del suolo. Devono anche essere considerati gli usi alternativi dei residui (biancheria da letto, uso come fertilizzante). I residui hanno costi diversi di raccolta e di lavorazione (sia in agricoltura che in silvicoltura) a seconda della qualità dei residui e della dispersione, con i residui secondari che spesso hanno il vantaggio di non

essere dispersi e di avere una qualità relativamente costante. Tecnologie di addensamento e di stoccaggio consentirebbero raccolte migliori per costo-efficacia in aree più grandi. La ottimizzazione della rotazione delle colture per l'alimentazione e per i raccolti bioenergetici e l'uso dei residui in impianti a biogas possono dare rendimenti più elevati della bioenergia dai residui senza creare competizione cibo-energia.

La gestione ottimale delle risorse forestali si basa sulla frazione di raccolta sostenibile (spesso posta uguale all'incremento netto annuo) nelle foreste disponibili per l'estrazione del legno, che si aggiunge alla domanda di biomassa prevista per la produzione di altri prodotti forestali per altri usi (ad esempio, cellulosa e carta) e di biomassa non utilizzata commercialmente. Il potenziale della risorsa dipende da fattori sia ambientali che socioeconomici e dal cambiamento nei regimi di gestione forestale e di raccolta causata dalla domanda di bioenergia che a sua volta dipende dal regime proprietario e dalla struttura del settore industriale che si serve della foresta. Inoltre, la produttività forestale e lo stoccaggio del carbonio in risposta ai cambiamenti nella gestione e nella raccolta forestale dipende dalla natura dell'ecosistema forestale, come la forma storica della gestione della foresta e gli eventi come incendi, tempeste, epidemie e insetti, ma anche dalle pratiche di gestione (compreso il reimpianto dopo la raccolta, la protezione del suolo, il riciclo dei nutrienti, e tipi di suolo). In fin dei conti l'ottimizzazione della gestione forestale per la mitigazione è una questione complessa con molte incertezze, ancora oggetto di dibattito scientifico. Molte attività intensive di gestione delle foreste dall'inizio a metà del XX secolo, così come altri fattori quali il recupero da un uso eccessivo passato, hanno portato ad una forte capacità delle foreste di fare da *sink* del carbonio in molte regioni OCSE, purtroppo temporanea man mano che si torna a condizioni normali. Una gestione forestale attiva, compresa la gestione della bioenergia, è quindi importante per sostenere la funzione di *sink* di carbonio delle foreste nel futuro, anche se molti paesi dovrebbero rendersi conto che per alcune aree forestali vecchie, la conservazione degli *stock* di carbonio può essere preferibile, e che le foreste gestite attivamente potrebbero per qualche tempo (decenni) agire come sorgenti di emissioni.

I rifiuti organici comprendono i rifiuti provenienti dalle abitazioni domestiche, dai ristoranti, i prodotti di legno di scarto, della carta, delle costruzioni, i rifiuti legnosi di demolizione, rifiuti e acque adatte per produzione anaerobica di biogas. I rifiuti organici possono essere dispersi ed anche eterogenei in termini di qualità, ma la salute e l'ambiente guadagna dalla raccolta e dalla corretta

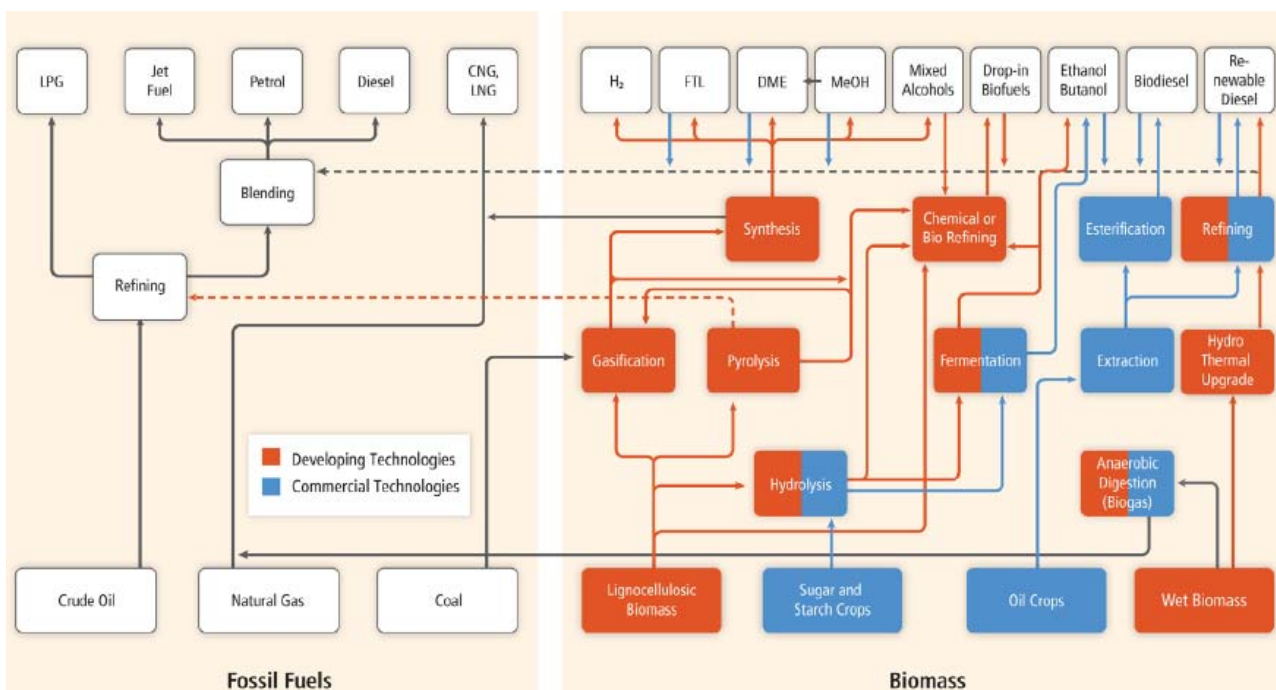
gestione tramite combustione o digestione anaerobica. La competizione con gli usi alternativi dei rifiuti possono limitare il potenziale di queste risorse.

Piantagioni da biomassa dedicate sono specie annuali (cereali, olio, zucchero) e colture a piante perenni (il panico verga, il *Miscanthus*) e piantagioni di alberi (sia cedui che a stelo singolo, salice, pioppo, eucalipto, pino). La gamma delle stime di potenzialità tecniche bioenergetiche di questa risorsa nel 2050 è particolarmente elevata (da 50 a più di 500 EJ/anno). Le potenzialità delle piantagioni dedicate a biomassa sono generalmente calcolate come prodotto dell'area disponibile per le colture energetiche per la resa per unità di superficie e per anno. Alcuni studi hanno identificato un potenziale tecnico considerevole (fino a 100 EJ) per la produzione di bioenergia utilizzando terreni marginali e degradati (ad esempio, terreni salini) che non sono in uso per la produzione di alimenti o per il pascolo. Tuttavia, queste quantità inutilizzate e disponibili sono in contestazione. Il contrasto dei punti di vista sulle future potenzialità bioenergetiche tecniche da piantagioni dedicate a biomassa può essere spiegato dalle differenze nelle ipotesi di futuri possibili rese delle colture agricole, dall'efficienza di alimentazione del bestiame, dalla disponibilità di terreni e dalle rese delle colture energetiche. La maggior parte degli scienziati concordano sul fatto che gli aumenti dei rendimenti delle colture alimentari e un'alimentazione di qualità più elevata e minore consumo di prodotti animali potenzia le colture bioenergetiche.

Riduzione della domanda di biomassa tradizionale. Una notevole quantità di biomassa diventa disponibile per applicazioni moderne per migliorare l'efficienza degli usi finali di consumo di biomassa tradizionale per l'energia, per lo più nelle famiglie, ma anche nelle piccole industrie (come carbonaie, fornaci di mattoni, ecc.). La bioenergia tradizionale rappresenta circa il 15% del consumo totale mondiale di energia e l'80% dell'uso corrente di bioenergia (≈ 35 EJ/anno) per soddisfare le esigenze di cottura di $\sim 2,6$ miliardi di persone. Uso bioenergia tradizionale copre diversi usi finali, tra cui la cucina, l'acqua, il riscaldamento degli ambienti, e le piccole industrie (come mattoni e ceramica forni, panetterie, e molti altri). La cucina è l'uso finale dominante; è per lo più fatto in caminetti e stufe rudimentali, con circa il 10–20% di efficienza di conversione, che comporta un consumo molto elevato di energia primaria. Stufe avanzate a legna e biogas possono ridurre il consumo di combustibile di biomassa del 60% o più e quindi abbassare il forzante radiativo atmosferico, ridurre le emissioni della CO₂ e in molti casi le emissioni di fuliggine (*black carbon*), fino al 90%. Supponendo che i risparmi effettivi raggiungono in media il 30–60% del consumo corrente, il totale potenziale di riduzione della domanda di bioenergia tradizionale può essere stimato a 8–18

EJ/anno. Non è nota la frazione di biomassa tradizionale globale consumato in modalità non sostenibili con il degrado delle foreste e la deforestazione. Studi nazionali dettagliati hanno stimato una frazione di biomassa non rinnovabile dall'uso tradizionale della bioenergia molto variabile, ad esempio, dall'1,6% per Repubblica Democratica del Congo al 73% per il Burundi, con la maggior parte dei paesi nell'intervallo tra 10–30% - il che significa che il 70–90% del totale degli usi tradizionali della bioenergia è gestito in modo sostenibile. Così una frazione della biomassa tradizionale risparmiata attraverso una migliore tecnologia, non dovrebbe essere utilizzati per altri scopi energetici, ma semplicemente non consumata per contribuire a ripristinare gli ecosistemi locali.

Figura 14. Modalità a confronto di produzione energetica fossile e da biomassa
(Fonte: GEA²⁴)



The risks associated with a large-scale deployment of CCS technologies include concerns about the lifecycle toxicity of some capture solvents (IEAGHG, 2010; Korre et al., 2010; Corsten et al., 2013), the operational safety and long-term integrity of CO₂ storage sites (Birkholzer et al., 2009; Oruganti and Bryant, 2009; Juanes et al., 2010, 2012; Morris et al., 2011; Mazzoldi et al., 2012), as well as risks associated with CO₂ transport via dedicated pipelines (Aines et al., 2009; Mazzoldi et al., 2012).