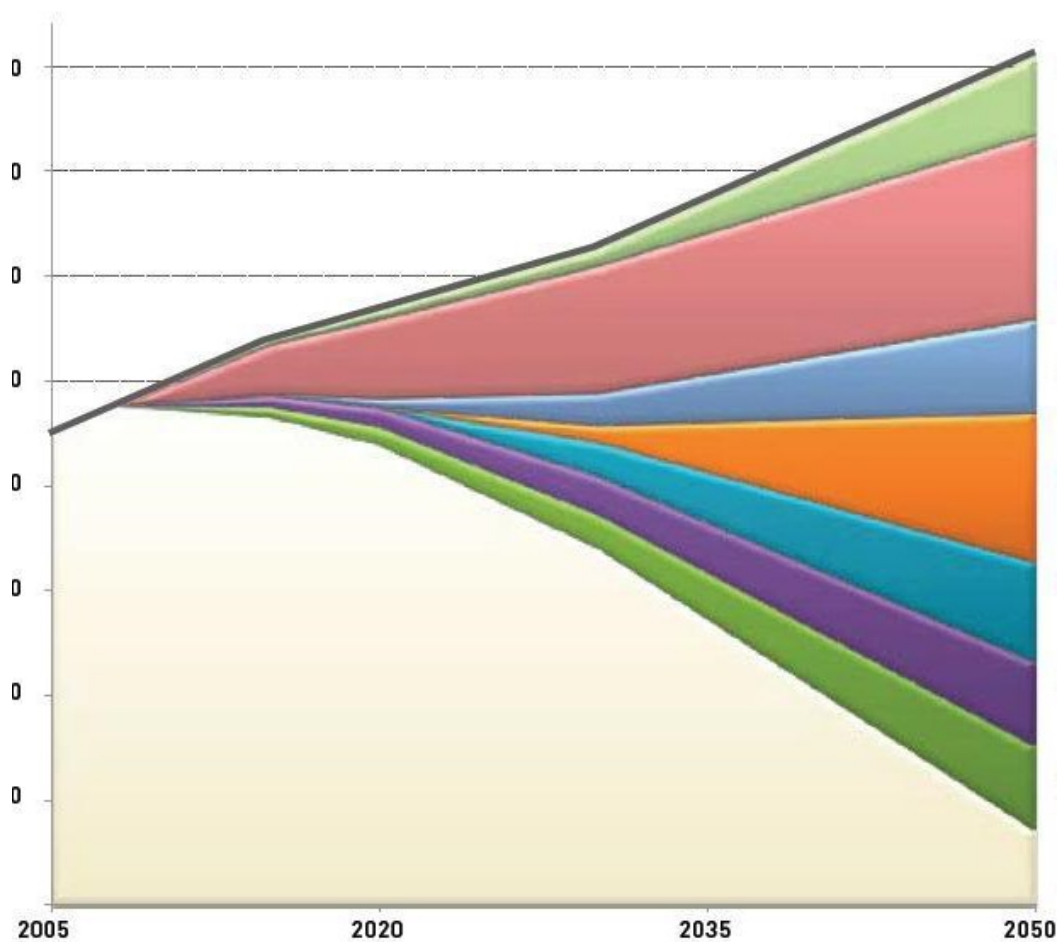


Il ruolo della CCS negli scenari di contenimento della crisi climatica

*di Toni Federico, Fondazione per lo Sviluppo sostenibile
Maggio 2015*



FONDAZIONE
PER LO SVILUPPO
SOSTENIBILE

Sustainable Development Foundation

INDICE

PARTE PRIMA.....	5
L’impatto delle fonti fossili di energia sul cambiamento climatico	5
Il negoziato internazionale sul clima	9
<i>Il Patto di Parigi</i>	<i>10</i>
<i>Il Lima Call for Climate Action</i>	<i>11</i>
<i>Il ruolo chiave di Cina e Stati Uniti.....</i>	<i>12</i>
<i>Il concetto di Carbon Budget</i>	<i>13</i>
<i>Mitigazione ed adattamento</i>	<i>17</i>
<i>Il mercato del carbonio.....</i>	<i>18</i>
Il ruolo della CCS negli scenari di mitigazione per il XXI secolo	20
<i>UN IPCC.....</i>	<i>21</i>
<i>OECD.....</i>	<i>24</i>
<i>Unione Europea</i>	<i>26</i>
PARTE SECONDA	29
Le opzioni <i>carbon negative</i> per una mitigazione forte.....	29
L’opzione <i>carbon negative</i> per l’obiettivo dei 2°	30
I limiti del fattore tecnologico.....	33
I limiti della disponibilità della bioenergia per la BECCS	36
I limiti dello stoccaggio sotterraneo della CO2.....	38
Il problema dei costi della CCS.....	42

I metodi CDR - DAC di estrazione diretta della CO2 dall'atmosfera.....	44
Le opzioni di mitigazione <i>carbon negative</i> secondo l'IPCC AR5 WKG III	47
I conflitti di uso del suolo per l'energia e l'alimentazione secondo l'IPCC AR5.....	51

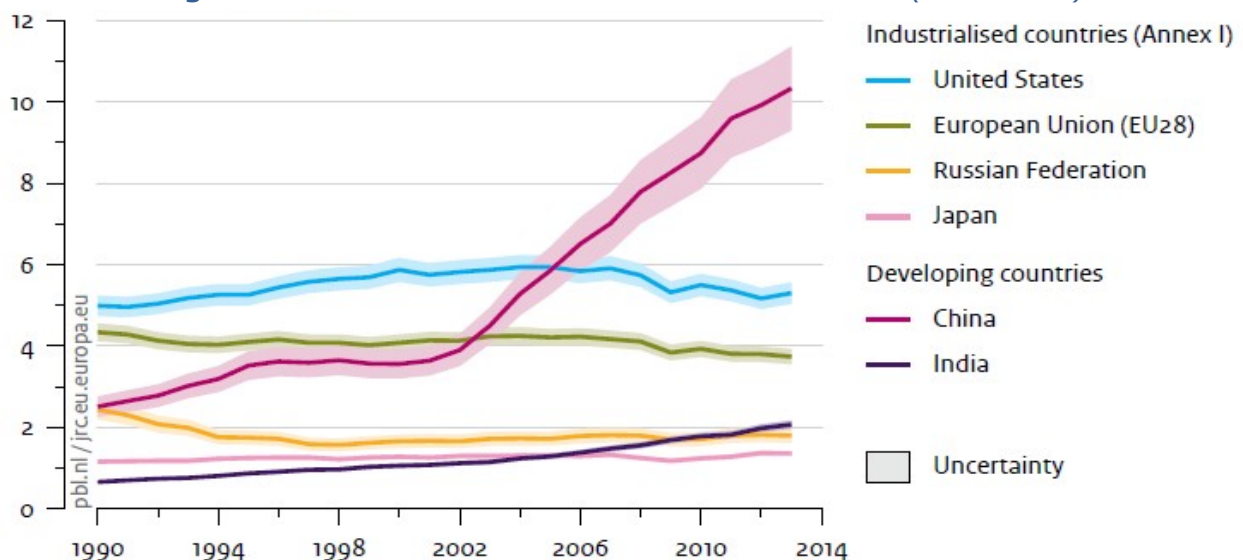


PARTE PRIMA

L'impatto delle fonti fossili di energia sul cambiamento climatico

Il settore energetico è di gran lunga la principale fonte di emissioni di gas serra, cui contribuisce per più di due terzi del totale nel 2010. Il 90% circa in volume dei gas serra legati all'energia sono le emissioni di CO₂ e circa il 9% sono metano. Il consumo globale di energia continua a crescere, guidato dai combustibili fossili, che rappresentano oltre l'80% dell'energia mondiale consumata, una quota che è in graduale aumento a partire dalla metà degli anni '90. Il settore dell'energia è la seconda fonte di emissioni di metano dopo l'agricoltura ed emette 3,1 Gt CO₂ nel 2010, pari al 40% circa del totale.

Fig. 1 Emissioni mondiali di CO₂ in Gt fino al 2013 (fonte: JRC¹)



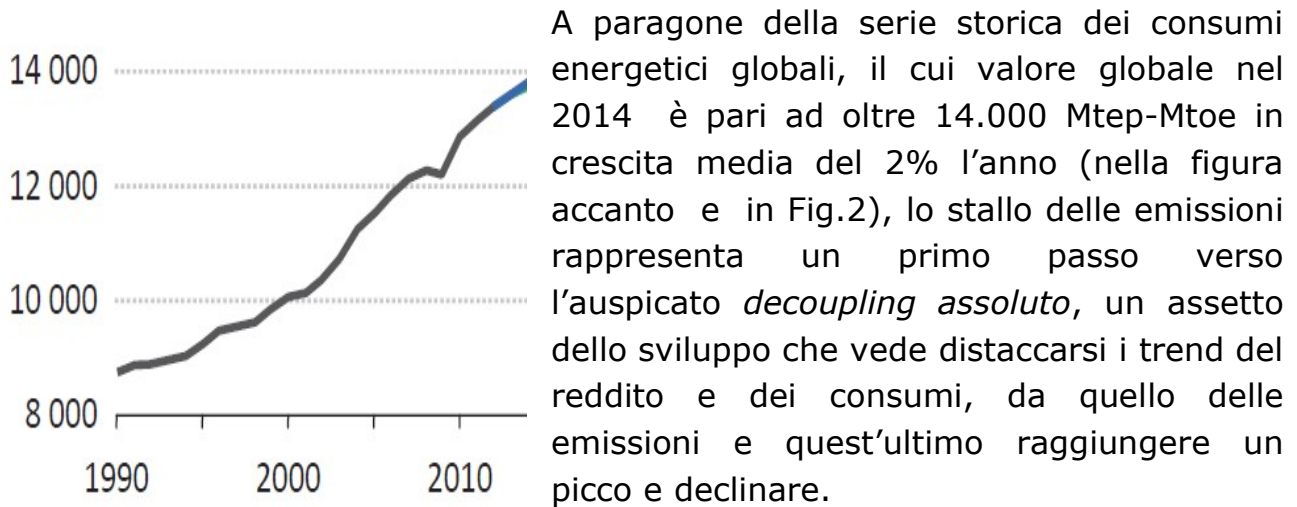
Le emissioni di CO₂ globali da combustibili fossili sono ancora aumentate nel 2012, raggiungendo le 31,6 Gt, +0,4 Gt rispetto al 2011, pari all'1,4%, un trend che, se continuato, porterebbe ad un aumento a lungo termine di 3,6 °C o più della temperatura media globale². I dati più recenti parlano di 36 Gt emesse nel 2013, +2,3% rispetto all'anno precedente, +60% rispetto al 1990, anno di riferimento per il Protocollo di Kyoto, e finalmente di una stasi nel 2014, che, a parere dell'OECD non sarebbe dovuta alla crisi economica,

¹ EU JRC, 2014, *Trends in global CO₂ emissions:2014 Report*, PBL publication n° 1490, JRC Technical Note n° JRC93171

² OECD IEA, 2013, *Redrawing the energy-climate map*, World Energy Outlook Special Report

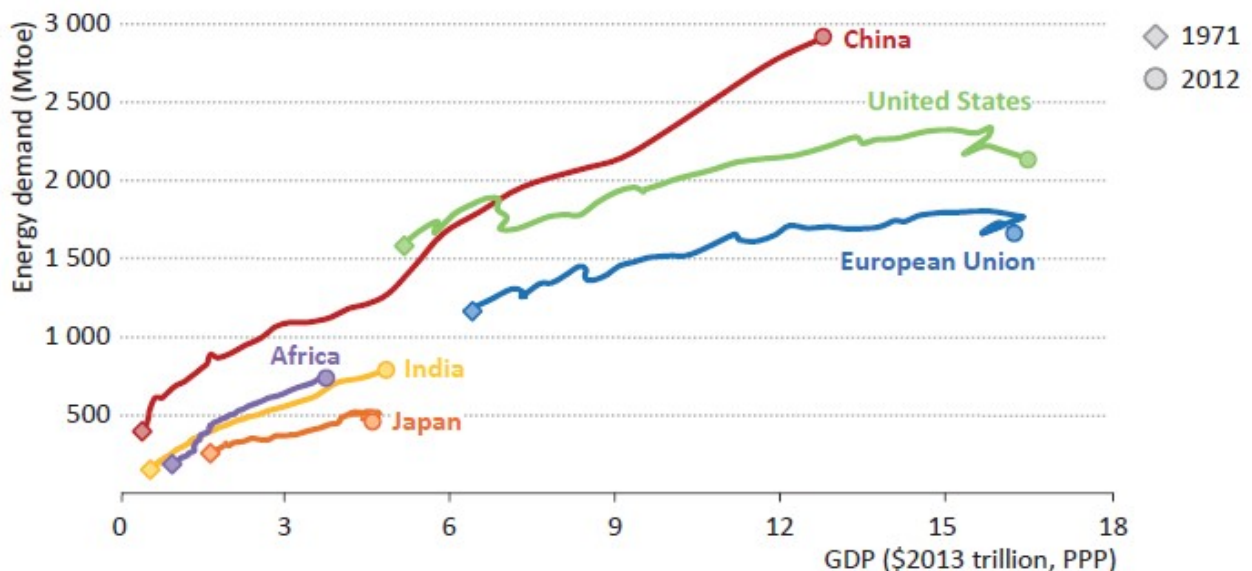


peraltro in regresso su scala mondiale, quanto ad una riduzione delle emissioni da parte della Cina³.



L'effetto della CO₂ sul clima è però purtroppo determinato dallo *stock* dei gas serra in accumulazione in atmosfera, per effetto della *perdurante* incapacità del sistema terrestre di compensare le emissioni in eccedenza. Questo significa che le concentrazioni di CO₂ in atmosfera continuano a crescere e con esse il sistema climatico a cambiare. Inoltre le emissioni antropogeniche degli altri gas serra non accennano per ora ad invertire la tendenza a crescere.

Figura 2. I consumi globali di energia e il PIL a parità di potere d'acquisto dei principali paesi emettitori di GHG tra 1971 e 2012 (fonte: OECD IEA WEO 2015⁴)



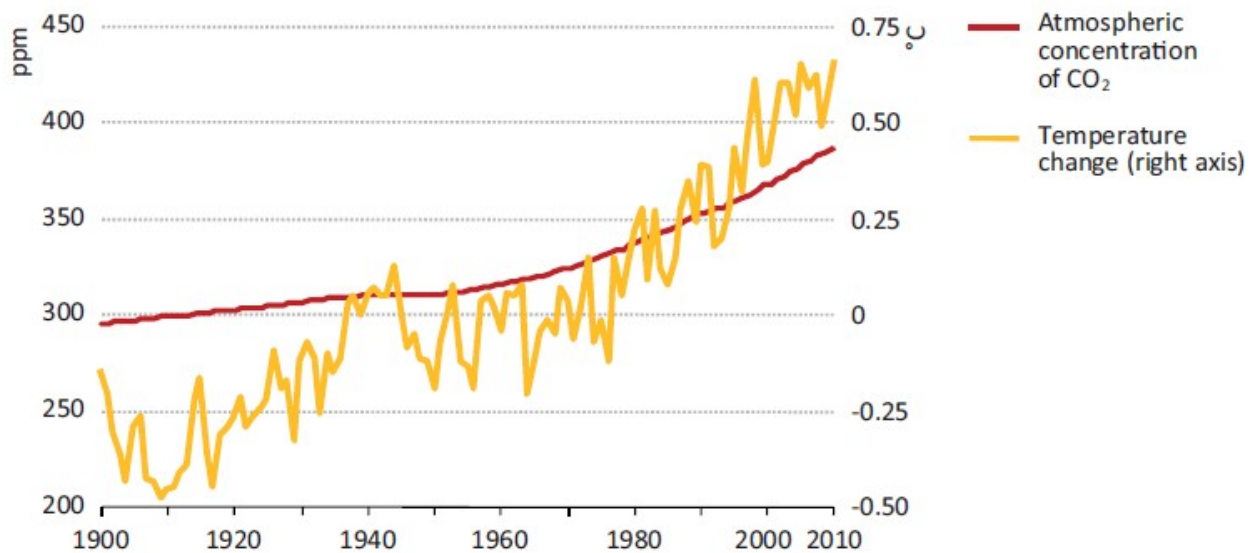
³ Questo importante risultato è stato comunicato dall'OECD IEA il 13 marzo del 2015. Vedi <http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2015/march/global-energy-related-emissions-of-carbon-dioxide-stalled-in-2014.html>

⁴ OECD IEA, 2014, *World Energy outlook*, WEO



Il tasso annuale globale delle emissioni è invece un *flusso*, che deve essere considerato una delle tante variabili di *input* del sistema climatico. Un complesso sistema di interazioni e di condizionamenti determina lo *stato* del sistema climatico, di cui la concentrazione dei vari gas serra costituisce una delle principali variabili. Le concentrazioni determinano con leggi note le forzanti radiative (*radiative forcing*), che misurano i flussi termici differenziali netti al limite dell'atmosfera e quindi, se positivi, il riscaldamento del sistema climatico e della superficie terrestre. Le emissioni mondiali di CO₂ nel 2009 e nel 2014 sono diminuite, ma troppo poco, mentre la concentrazione di CO₂ continua ad aumentare come la temperatura media⁵ (Fig. 3).

Figura 3. Concentrazioni globali della CO₂ in atmosfera e aumento della temperatura media (fonte OECD IEA cit.)



La crescita delle emissioni causate dall'aumento del consumo globale di combustibili fossili è quotato dall'IEA nel 2012 (cit.) al 2,7% per il gas naturale, all'1,1% per il petrolio e allo 0,6% per il carbone. Tenendo in considerazione i fattori stechiometrici di emissione carbonica, che sono specifici di ogni carburante, gas naturale e carbone rappresentano ciascuno il 44% del totale delle emissioni di CO₂ legate all'energia, seguiti dal petrolio al 12%. Le tendenze globali a scala regionale evidenziavano nel 2012, un aumento del 3,1% delle emissioni di CO₂ nei paesi non-OCSE, solo in parte compensato da una riduzione delle emissioni dell'1,2% nei paesi OCSE.

La diminuita restituzione di energia termica da parte della terra, certificata dalle forzanti radiative crescenti per tutti i gas serra, produce un riscaldamento

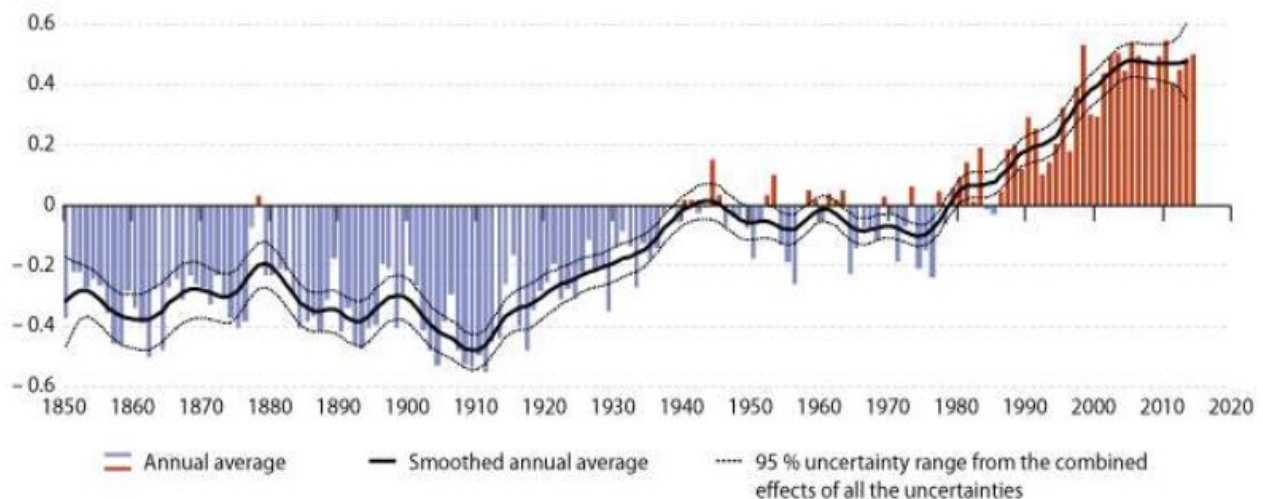
⁵ Ronchi, 2015, *Il contributo della green economy alla ripresa dell'Italia*, Presentazione al Meeting di primavera in preparazione degli Stati Generali della *green economy* 2015, in: http://www.fondazionevilupposostenibile.org/f/Documenti/2015/Edo_Ronchi_Il_contributo_della_green_economy_web_version.pdf



globale del sistema climatico. L'indicatore guida del riscaldamento è la temperatura media globale superficiale. L'aumento misurato dal 1990 al 2014 della temperatura superficiale globale, rispetto alla media 1961-1990, è stato di poco più di 0,4 °C (0,7 °C rispetto al periodo preindustriale, Fig 4). Il 2014 è stato l'anno più caldo di sempre. 14 dei 15 anni più caldi della storia sono concentrati negli ultimi 20 anni.

Il riscaldamento terrestre non è affatto un fenomeno uniforme. La distribuzione termica regionale è un fenomeno assai complesso. Non sorprende, ad esempio, che il riscaldamento osservato è generalmente più grave nell'emisfero settentrionale o al Polo nord piuttosto che al Polo sud. Ciò comporta che gli eventi atmosferici estremi, causati dal cambiamento, stanno aumentando di intensità e di frequenza particolarmente in alcuni distretti, che sono oltretutto spesso più vulnerabili.

Figura 4. Anomalia termica media globale 1850-2014 in °C rispetto alla media 1961-1990 (fonte: University of East Anglia and UK MetOffice)



La gravità della minaccia climatica non è quindi rappresentata adeguatamente alla scala regionale dalla temperatura media superficiale. Il grafico di Fig. 4 mostra addirittura una stasi della temperatura media nell'ultimo decennio. Aspre dispute si sono levate da parte degli scettici che vi vedono una smentita dell'allarme climatico. Si tratta invece di un fenomeno di natura statistica, del tutto compatibile con il preoccupante *trend* a crescere che si è innescato nei primi anni '70 e che viene quotidianamente confermato da eventi climatici estremi senza precedenti, siccità, precipitazioni estreme e concentrate, ondate di caldo e di freddo etc.

Da questi brevi cenni si comprende che il contenimento dei cambiamenti climatici si potrà ottenere soltanto con un drastico taglio delle emissioni che sia capace di stabilizzare le concentrazioni dei GHG in atmosfera. Occorre quindi, come vedremo, mettere in campo tecnologie capaci di abbattere le emissioni ed addirittura estrarre CO₂ dall'atmosfera.



Il negoziato internazionale sul clima



Nel dicembre 2015, tutti i paesi si incontreranno a Parigi per firmare un accordo globale sul cambiamento climatico. Si tratta di un percorso negoziale tutt'altro che semplice, per effetto delle notevoli divergenze di interessi tra Nord e Sud del mondo e tra paesi a diverso grado di sviluppo economico. La strada del negoziato è stata quanto mai tormentata, i punti di accordo sono stati infinitamente meno delle divergenze, tanto che è difficile tracciarne un profilo esaustivo e coerente⁶.

Tuttavia, soprattutto sotto la spinta dell'imponente mole di dati scientifici, ma anche per l'impegno personale del Presidente americano Obama alla Conferenza di Copenhagen del 2009, sembra ormai che tutti siano d'accordo sul fatto che un aumento della temperatura media globale superiore ai 2 °C possa innescare le temute transizioni irreversibili del sistema climatico e tuffare l'umanità in un futuro pieno di incognite. Si tratta di un obiettivo molto difficile da realizzare, tutti i trend e gli scenari portano a previsioni ben peggiori, ma, alla fine, l'aumento di 2 °C sarà il protagonista della Conferenza di Parigi e del Patto climatico che ivi dovrà essere sottoscritto⁷.

⁶ Una trattazione estesa del negoziato climatico si trova in: <http://www.comitatoscience.org/temi%20CG/clima/index.htm>

⁷ Si veda in italiano: Silvestrini, 2015, *2 °C (due gradi). Innovazioni radicali per vincere la sfida del clima e trasformare l'economia*, Edizioni Ambiente, Milano



Il limite dei +2 °C è dunque, anche per questo studio, il paradigma di confronto per gli scenari, le previsioni e le misure da intraprendere.

Il Patto di Parigi

L'accordo di Parigi 2015, è ormai chiaro, sarà diverso dagli accordi del passato ed in particolare dal Protocollo di Kyoto, nei quali si è tentato di dare obiettivi ai singoli paesi, definendo obblighi e regole eguali per tutti⁸. Oggi, l'approccio è sostanzialmente opposto: ai singoli paesi viene chiesto di presentare le proprie ambizioni e progetti per la mitigazione delle emissioni. A livello globale si tenta piuttosto di assicurare le condizioni necessarie per ottenere che i contributi promessi dai singoli paesi (*pledge*) possano assommarsi in un'azione globale sufficiente. A tal fine dovrà essere fornito un sostegno finanziario e tecnologico per le azioni di adattamento e per favorire ovunque una transizione verso economie e consumi a basso tenore di carbonio. Un buon accordo potrà fornire un quadro di riferimento, consentendo ai singoli paesi di fare di più di quello che possono fare da soli e garantendo, per quanto possibile, la trasparenza per migliorare la cooperazione e per rendere possibile una gestione degli sforzi a livello globale.

L'accordo di Parigi, se sarà raggiunto, andrà in vigore a partire dal 2020. Ma, alla COP 17 di Durban nel 2011, si convenne di tentare comunque di accelerare l'azione prima del 2020. Limitare il cambiamento climatico a lungo termine dipende dallo *stock* delle emissioni cumulative che permane in atmosfera e negli oceani, pertanto fare di meno oggi rende necessario uno sforzo maggiore in futuro per limitare l'aumento termico medio terrestre a meno di 2 °C sopra il livello pre-industriale o a meno di 1.5 °C, come hanno chiesto molti paesi a Cancùn.

Sono più di 90 i paesi che hanno dichiarato impegni di riduzione delle emissioni per il periodo fino al 2020 (*pledge*) che però, sommati, sono, nelle parole dell'UN FCCC, "*Lungi dall'essere sufficienti per colmare il divario delle emissioni (emissions gap)*"⁹. Altrettanto insufficienti sono, fino ad oggi, le contribuzioni finanziarie volontarie al *Green Climate Fund*, dispositivo concordato per sostenere i paesi svantaggiati nello sforzo contro i cambiamenti climatici.

Il desiderato accordo globale di Parigi dovrebbe includere piani ambiziosi di azione per ogni paese dal 2020 in poi, e un pacchetto di azioni pre-2020, con impegni di mitigazione nazionali più ambiziosi degli attuali, una migliore

⁸ Questo approccio negoziale è oggi noto con il nome di "*one size fits all*"

⁹ UNFCCC, 2013, "*Updated compilation of information on mitigation benefits of actions, initiatives and options to enhance mitigation ambition*", UNFCCC/TP/2014/8



erogazione di risorse finanziarie ed iniziative più esplicite in settori chiave, come l'efficienza energetica, le energie rinnovabili e la protezione delle foreste.

Il Lima Call for Climate Action

La Conferenza delle parti della Convenzione climatica del 2014 si è conclusa a Lima con un accordo unanime tra i 195 paesi, il "*Lima Call for Climate Action*"¹⁰, che rappresenta un compromesso tra i paesi ricchi e i poveri, ma anche una prima svolta dopo venti anni di inconcludenti negoziati¹¹.

Il documento di Lima stabilisce una nuova procedura in cui tutti i paesi, entro sei mesi, dovranno indicare il loro contributo alla mitigazione delle emissioni. Giuridicamente questo impegna tutte le nazioni a contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra, superando la dicotomia tra paesi sviluppati e in via di sviluppo, introdotta nella Convenzione climatica di Rio con il Mandato di Berlino del 1995 e consolidata con il Protocollo di Kyoto due anni dopo.

L'architettura emergente di un possibile accordo a Parigi non è più quella rigida, dall'alto (*top-down*) di Kyoto 1 e 2, un tipo di accordo protocollare che ha fatto la storia del negoziato sul clima e che ora è diventato marginale¹², ma è un *ibrido*¹³ che combina un pragmatico accesso dal basso (*bottom-up*) che lascia ai singoli paesi la responsabilità di definire il proprio impegno di mitigazione, e anche di adattamento¹⁴, attraverso dichiarazioni non formali, i cosiddetti *Intended Nationally Determined Contributions* (INDC), con elementi *top-down* per la segnalazione e la sintesi dei contributi da parte del Segretariato della Convenzione.

È importante sottolineare che la decisione di Lima prevede che gli INDC di ciascun paese devono includere una chiara dichiarazione di impegno per la mitigazione delle emissioni, e possono¹⁵ includere informazioni quantificabili sull'anno di riferimento, i tempi di esecuzione, gli importi, le ipotesi e gli approcci metodologici per la stima e la contabilità delle emissioni di gas serra, ed anche la valutazione propria di ciascun paese sulla correttezza e l'ambizione

¹⁰ http://unfccc.int/files/meetings/lima_dec_2014/application/pdf/auv_cop20_lima_call_for_climate_action.pdf

¹¹ Università di Harvard, 2014, "Assessing the Outcome of the Lima Climate Talks", di Robert Stavins dell'IPCC WKG III

¹² Il cosiddetto accordo Kyoto 2, dopo la scadenza nel 2012 del primo periodo del Protocollo di Kyoto, vede l'adesione annunciata delle sole EU, Islanda, Svizzera e Norvegia, per il 14% delle emissioni globali annue

¹³ Sulle tipologie dell'accordo di Parigi sussiste una vastissima letteratura. Si veda tra gli altri: OECD IEA, 2014, "Built to last: designing a flexible and durable 2015 climate change agreement", Climate Change Expert Group, Paper No. 2014(3)

¹⁴ L'inserimento dell'adattamento nelle dichiarazioni nazionali INDC non è affatto scontato ed è stato conseguito a Lima con il punto 12 del *Call for Climate Action*

¹⁵ Il termine "devono (*shall include*)", caldeggiato da USA, EU ed altri, è infine scaduto a Lima in un semplice "possono (*may include*)" sotto la pressione dei paesi poveri



dell'INDC presentato. Le dichiarazioni dei contributi nazionali devono essere presentate entro la fine di marzo 2015, ma i paesi che non ce la fanno possono presentare le loro osservazioni entro giugno.

Se si tratta di un compromesso al ribasso, ciò è a causa del forte contrasto tra i paesi sviluppati e in via di sviluppo, che seminerà ancora di ostacoli la strada verso Parigi. L'impossibilità di concordare un metodo unitario di conteggio e il *benchmarking* delle emissioni, abbassa ulteriormente il livello del compromesso, ma non mancherà la possibilità ad NGO, Università etc. di fare i conti sulla base dei dati dichiarati. È caduta anche la proposta di un momento di revisione per gli INDC prima di Parigi, favorita dai paesi più vulnerabili (sub-sahariani e piccoli Stati insulari). Invece, una relazione di sintesi sarà preparata dal Segretariato dell'UNFCCC entro l'1 Novembre 2015, basata sugli INDC dichiarati entro il 1° ottobre.

Il ruolo chiave di Cina e Stati Uniti

Gli Stati Uniti sono responsabili di aver creato una crisi di fatto del Protocollo di Kyoto non concedendo la ratifica dopo averlo sottoscritto. Sull'altro lato della contesa la Cina per molti anni si è avvalsa del diritto che la Convenzione climatica dell'ONU gli riconosce, cioè l'esenzione dall'obbligo di ridurre le proprie emissioni. Entrambi i paesi sono tra le prime vittime degli eventi estremi attribuiti in questi anni al cambiamento climatico. Proprio per questo è stato chiaro a Lima, fin dall'inizio, che il comunicato congiunto Cina-Stati Uniti del 12 novembre 2014 avrebbe grandemente incoraggiato i negoziati, soprattutto per la disponibilità cinese ad abbandonare il privilegio di star fuori dallo sforzo di mitigazione delle emissioni¹⁶. Unendo i due grandi paesi al piccolo gruppo che ha sottoscritto Kyoto 2, con i relativi impegni dichiarati, si passa da una copertura del 14% delle emissioni globali (Kyoto 2) al 50%. India, Brasile, Corea, Sud Africa, Messico e Indonesia sono attesi portare la copertura ad oltre l'80% delle emissioni globali, mentre perdura l'incertezza sulle intenzioni di alcuni paesi chiave come India, Russia ed Australia.

Le aperture di Cina e Stati Uniti, pur tra mille difficoltà, potrebbero essere la chiave del successo anche a Parigi.

¹⁶ In termini quantitativi gli impegni dei due paesi sono stati dati con la seguente dichiarazione: "The United States intends to achieve an economy-wide target of reducing its emissions by 26%-28% below its 2005 level in 2025 and to make best efforts to reduce its emissions by 28%. China intends to achieve the peaking of CO₂ emissions around 2030 and to make best efforts to peak early and intends to increase the share of non-fossil fuels in primary energy consumption to around 20% by 2030. Both sides intend to continue to work to increase ambition over time". Il testo si può trovare in: <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2014/11/11/us-china-joint-announcement-climate-change>



Il concetto di Carbon Budget

Per arrivare ad un bilancio del carbonio nel sistema climatico occorre fare alcune premesse. L'aumento della CO₂ atmosferica al di sopra dei livelli preindustriali è stato inizialmente, in primo luogo, causato dal rilascio di carbonio in atmosfera per effetto della deforestazione e altre attività di cambiamento d'uso dei suoli. Le emissioni di carbonio da combustibili fossili sono iniziate prima della rivoluzione industriale e sono divenute la principale fonte di emissioni antropogeniche in atmosfera dopo il 1920 e continuano ad essere dominanti fino ad oggi. Le emissioni antropiche si posizionano al di sopra del ciclo attivo naturale del carbonio che scambia flussi tra atmosfera, oceano e i serbatoi della biosfera terrestre impiegando tempi che vanno da giorni a millenni, mentre gli scambi con serbatoi geologici hanno tempi ancora più lunghi.

Un bilancio globale del carbonio dà conto della media, delle variazioni e delle tendenze delle variazioni della CO₂ in atmosfera, a partire dall'inizio dell'era industriale. Il bilancio quantifica l'immissione di CO₂ nell'atmosfera da emissioni antropogeniche, il suo accrescimento e le conseguenti modifiche allo stoccaggio di carbonio nel terreno e negli oceani per effetto dei livelli crescenti della CO₂ atmosferica, del cambiamento e della variabilità del clima e di altri cambiamenti sistemici antropogenici o naturali¹⁷.

Il bilancio del carbonio è stato ripetutamente validato in tutti i Rapporti di *assessment* della IPCC fino al recente AR5. La metodologia IPCC è infine stata adottata e utilizzata dal *Global Carbon Project*¹⁸, che coordina uno sforzo di una vasta comunità scientifica per la pubblicazione annuale dei bilanci globali del carbonio¹⁹. Il progetto tiene aggiornati tutti i dati rilevanti sulla CO₂. Del rapporto GCP 2014 riportiamo alcune delle risultanze più rilevanti.

L'aumento delle emissioni di carbonio negli ultimi dieci anni è stato impressionante. Nel 2012 la ripartizione delle emissioni di carbonio da combustibili fossili è stata: carbone (43%), olio (33%), gas (18%), cemento (5%) e *gas flaring* (1%). Benché le categorie di paesi sviluppati e in via di sviluppo siano ormai superate dai fatti, esse contribuiscono alle emissioni da combustibili fossili con quote che, per i PVS nel 1990 erano solo del 34% ed oggi sono del 57% in aumento. Quattro grandi emettitori dei due gruppi hanno rappresentato il 58% delle emissioni globali nel 2012 (Fig. 5): Cina (27%), Stati Uniti (14%), EU28 (10%) e India (6%).

¹⁷ AA.VV., 2014, *Global carbon budget 2013*, Earth Syst. Sci. Data, 6, 2014, pagg. 235–263

¹⁸ GCP, www.globalcarbonproject.org

¹⁹ Ci lavorano 77 persone di 46 organizzazioni appartenenti a 14 paesi



Figura 5 Emissioni globali da combustibili fossili per paese in GtC – moltiplicare per 3.664 per ottenere GtCO₂ (fonte: GCP)

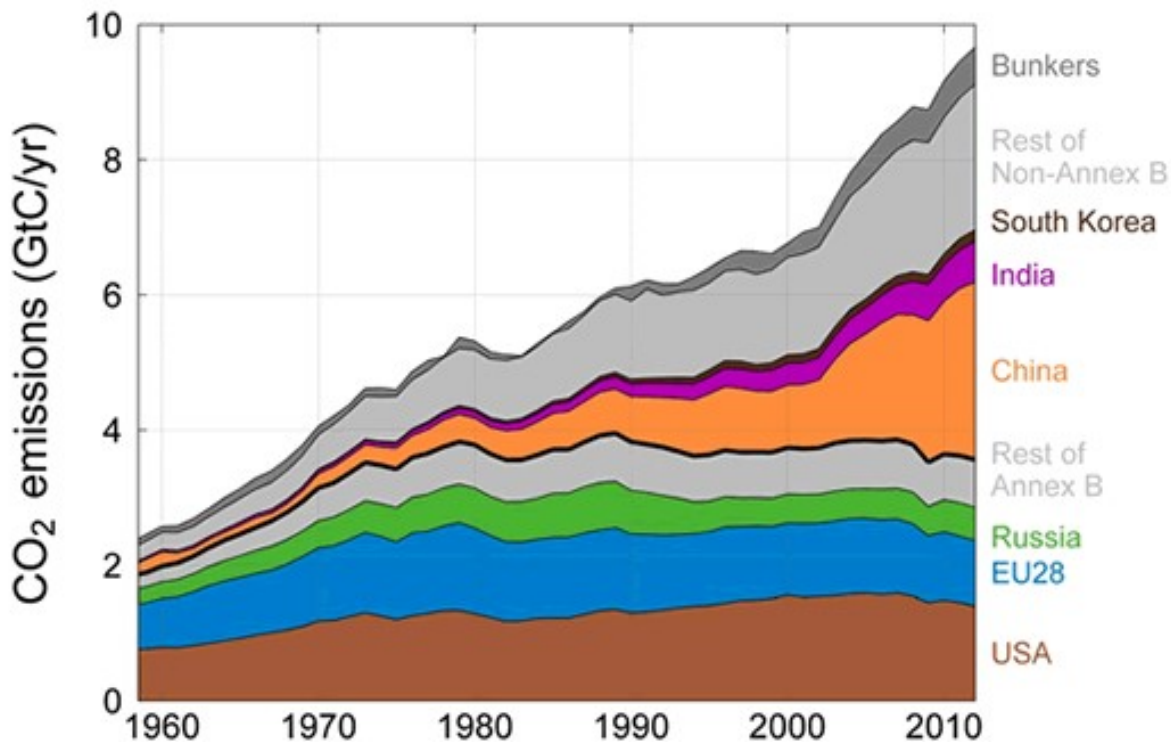
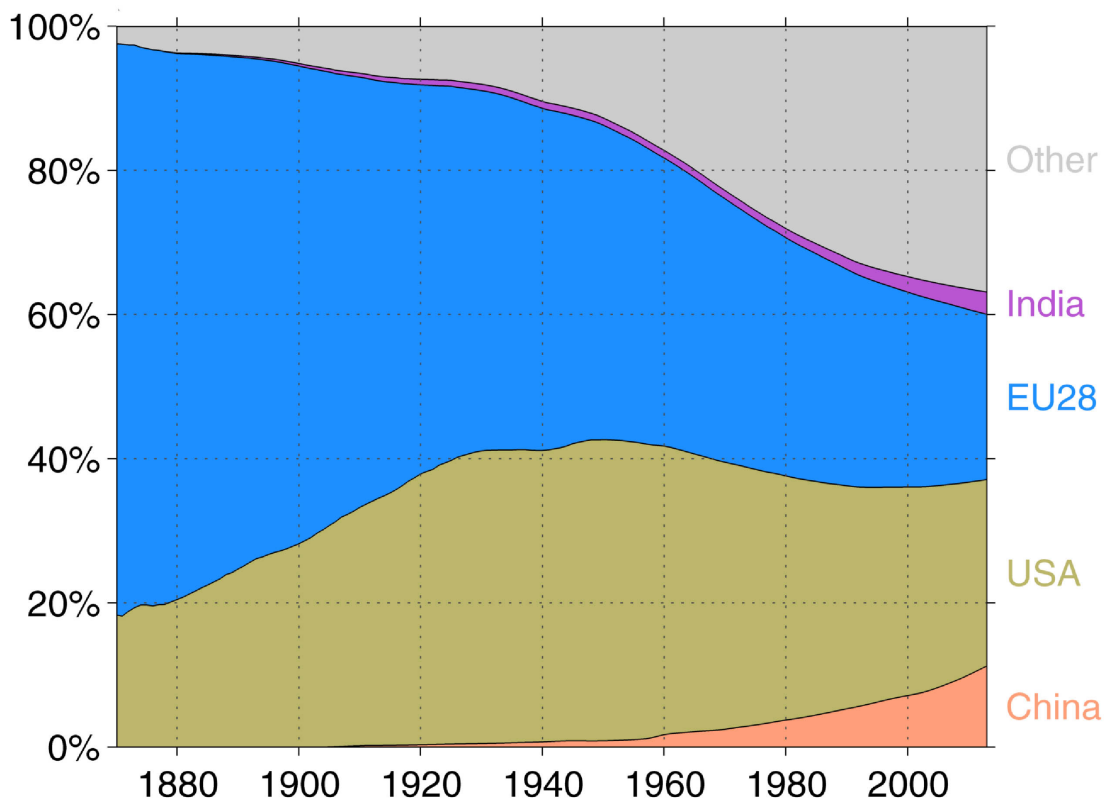


Figura 6 Emissioni cumulative percentuali della CO₂ emessa dai vari paesi (fonte: GCP, CDIAC)





La crescita delle emissioni cinesi dal 2000 è stata sbalorditiva. Tra il 1980 e il 2010 circa 600 milioni di cinesi sono stati salvati dalla povertà. Questo miracolo economico ha utilizzato un'enorme quantità di energia, gran parte della quale è venuta dall'uso intensivo del carbone ed ha portato le emissioni cinesi pro capite a superare quelle europee. Tuttavia, per il rispetto dell'equità climatica, considerando che per un arco di almeno 100 anni (tale è la persistenza della CO₂ in atmosfera) il danno ambientale è proporzionale alle emissioni cumulative e non ai flussi annuali, si deve considerare (Fig.6) che i contributi cumulativi dei vari paesi sono complessivamente ripartiti in maniera assai diversa dai flussi annuali. Seppure questo sia un dato di fatto, certamente non verrà preso come base per la ripartizione degli sforzi di mitigazione nell'atteso patto climatico di Parigi 2015. Molti osservano che una ripartizione più equa di quella basata sui flussi annuali, globali o pro-capite, è indispensabile.

Aggiungiamo che, nonostante il fatto che le emissioni di carbonio assorbano per intero l'attenzione mediatica, gli assorbitori di carbonio, foreste oceani e suolo (*sink*), sono assolutamente decisivi per l'equilibrio del sistema climatico.

Figura 7 Ripartizione globale della CO₂ emessa ed assorbita dalle tre matrici ambientali, atmosfera, oceani e suolo (fonte: GCP, CDIAC, NOAA)



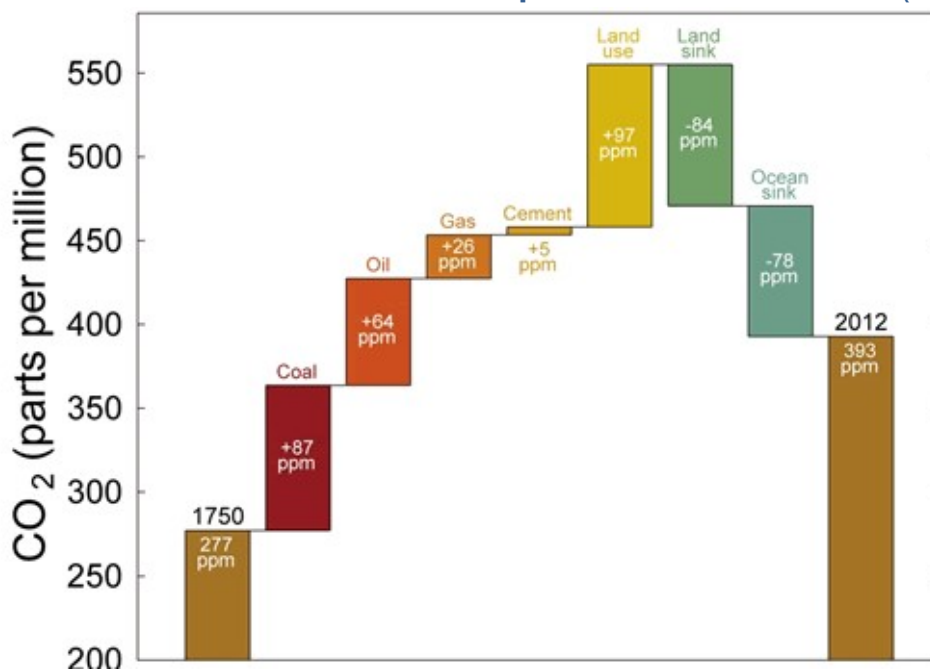
Dal 1870 le emissioni di carbonio antropogeniche sono finite in atmosfera per il 41%, mentre il suolo ne ha assorbito il 31% e gli oceani il 28% (Fig. 7). Al



crescere delle emissioni di anidride carbonica ciascuna delle tre matrici ambientali assorbe più carbonio.

Dal 1750 l'attività umana ha generato emissioni di carbonio sufficienti, senza assorbitori, a spingere l'anidride carbonica atmosferica al di sopra delle 550 parti per milione (ppm). L'assorbimento del carbonio da parte terrestre ed oceanica è quello che ha mantenuto la concentrazione media globale attuale poco al di sopra delle 400 ppm (Fig. 8).

Figura 8. Il ruolo degli assorbitori di carbonio ambientali nel contenimento della concentrazione atmosferica della CO₂ nel periodo dal 1750 al 2012 (fonte: GCP)



Abbiamo così dato gli elementi che consentono di fare un bilancio del carbonio nell'ecosistema terrestre. Fatto il bilancio dei flussi è importante fare il calcolo degli *stock* di carbonio nelle matrici ambientali, in particolare nell'atmosfera dove sono gli *stock* di carbonio a regolare il riscaldamento terrestre per il tramite dell'effetto serra. In prima approssimazione, sono le emissioni cumulative di lungo periodo a determinare la concentrazione della CO₂ in atmosfera, il relativo forzante radiativo (si veda IPCC AR5, cit.) e quindi l'entità del riscaldamento. I flussi annuali invece influenzano la variazione di queste concentrazioni e quindi l'aumento della temperatura media terrestre. Invertendo il ragionamento, ad un aumento termico in un determinato periodo corrisponde un importo cumulativo di emissioni in quello stesso periodo, sia di CO₂ che degli altri gas serra. Fissando l'intervallo di tempo da oggi a fine secolo e fissando l'aumento della temperatura che riteniamo sostenibile – oggi valutato in +2°C o meno ancora – possiamo calcolare l'importo cumulativo massimo delle emissioni. A questo dato è invalso l'uso di dare il nome di



Carbon Budget, un portafoglio di emissioni residue possibili²⁰. Alzando il *budget*, diminuisce la probabilità di limitare il riscaldamento al livello stabilito. Ad ogni *budget* è associata una probabilità di non superamento di una determinata soglia di temperatura. Viceversa ogni *target* sulla temperatura implica un differente *carbon budget*.

A titolo di esempio, lo studio appena citato calcola un CB dal 2013 al 2100 per un *target* di +2°, al 50% di probabilità, di 1550 GtCO₂. Osserviamo che se le emissioni continueranno al livello di oggi, poco al di sotto delle 30 GtCO₂ per anno, avremmo speso tutto il *budget* dei 2° entro 50 anni. Ci sono in letteratura stime del CB anche più severe di questa.

Mitigazione ed adattamento

La cattura e il sequestro del carbonio fanno parte integrante della strumentazione tecnologica per la *mitigazione* climatica, come si definisce ogni azione intrapresa per ridurre a lungo termine o per eliminare in modo permanente i rischi derivanti dal cambiamento climatico per la vita umana e il patrimonio umano e naturale. Le azioni di mitigazione sono indirizzate a ridurre le emissioni climalteranti o a migliorare la capacità naturale e artificiale di assorbimento del carbonio e degli altri gas ad effetto serra.

Come per ogni altro tipo di cambiamento che comporti esiti avversi alla natura e all'uomo, entrano in campo meccanismi di adattamento che sono risposte evolutive ecosistemiche capaci di assicurare una adeguata resilienza dei sistemi impattati. Per adattamento climatico si intende la capacità di un sistema di fronteggiare il cambiamento, l'aumentata variabilità del clima e gli eventi estremi e di moderare i potenziali danni, di sfruttare le opportunità e di fare fronte alle conseguenze.

I termini adattamento e mitigazione sono i due termini principali del lessico della lotta ai cambiamenti climatici. Mentre la mitigazione affronta le cause del cambiamento climatico, l'adattamento ne affronta gli effetti. La possibilità di regolare un sistema in modo da minimizzare l'impatto negativo e massimizzare i benefici derivanti dalle variazioni nel clima è quella che chiamiamo capacità di adattamento. Un adattamento di successo può ridurre la vulnerabilità dei sistemi naturali e antropici, spesso implementando e rafforzando strategie di resistenza esistenti nel patrimonio acquisito di conoscenza, esperienza e cultura. È però opinione corrente che, a fronte del rapido aumento dei consumi e delle emissioni, le capacità storiche di adattamento non potranno bastare, anche con l'uso di nuove tecnologie. Né sembra che gli sforzi di mitigazione saranno da soli sufficienti. In generale, una maggiore mitigazione comporta

²⁰ Carbon Tracker, 2013, *Unburnable Carbon 2013: Wasted capital and stranded assets*, The Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment



minori conseguenze a cui doversi adeguare e meno rischi per i quali dovremo cercare di essere preparati. Viceversa, maggiore è il grado di adattamento in prevenzione, minori saranno gli impatti associati con un dato livello di cambiamento climatico.

La mitigazione e l'adattamento non dovrebbero essere viste come alternative per almeno due ragioni. La prima è la forte interdipendenza dei due tipi di azioni, la seconda è che c'è una probabilità cospicua che nemmeno le due azioni combinate possano stabilizzare il clima o ridurre a livelli accettabili i prezzi da pagare per il cambiamento. Su questo difficile, forse impossibile equilibrio, si giocano le opportunità offerte dalle innovazioni "forti" come la CCS. Alcuni vorrebbero iniziative ancora più forti, come quelle note come georingegneria del clima²¹. Nella sensibilità corrente queste equivarrebbero a tentativi di evitare un cambiamento introducendo altri cambiamenti artificiali nell'ecosistema naturale, le cui conseguenze non sappiamo, quantomeno, adeguatamente valutare.

Il mercato del carbonio

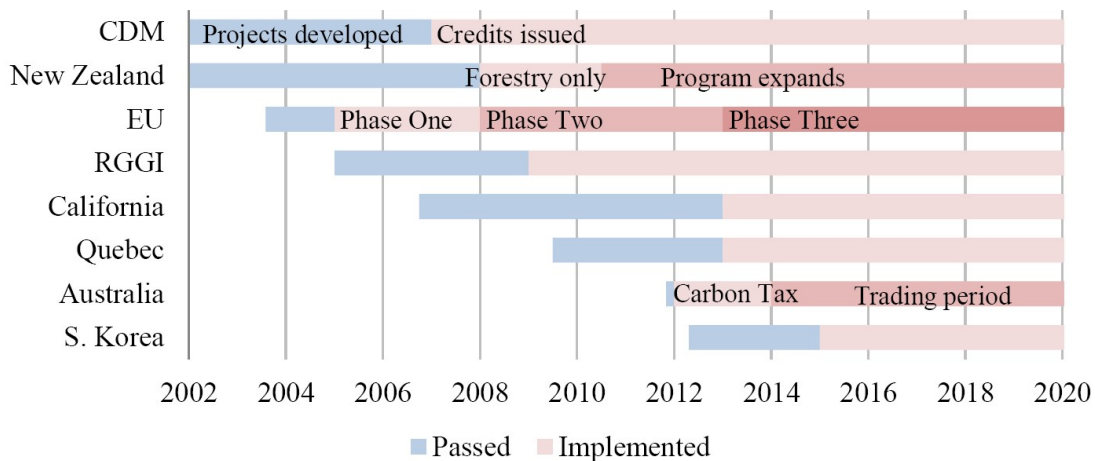
Iniziative di *pricing* del carbonio regionali e nazionali – mediante tipicamente schemi *cap&trade* e *carbon tax* - continuano a diffondersi e sono attive a livello globale nel numero di qualche decina. Con il primo schema si fissa un limite superiore (*cap*) alle emissioni e si commerciano i relativi permessi (*trading*), lasciando fluttuare il prezzo del carbonio, con il secondo si fissa invece un prezzo unitario alle emissioni senza porre limiti superiori. Diversi programmi di *trading* sono stati ancora lanciati nel 2013 e 2014, in Canada (Quebec), in Cina (le province di Guangdong e Hubei e le città di Pechino, Shanghai, Shenzhen, Chongqing e Tianjin), in Kazakistan e negli Stati Uniti (California). Lo schema della Svizzera è diventato obbligatorio. Il sistema comunitario di scambio delle emissioni (ETS) - il più grande al mondo – cresce con le nuove adesioni all'Unione europea ed è in corso di aggiornamento. Il parlamento cileno ha approvato una *carbon tax* nel 2014, la Corea prevede di lanciare un nuovo schema di *trading* entro il 2015, il Sud Africa, un anno dopo. La Norvegia ha la *carbon tax* da molti anni. C'è stato anche un certo movimento contrario: in Australia il nuovo governo ha abrogato un meccanismo esistente per le preoccupazioni per i costi dell'energia elettrica. In Messico un *cap&trade* è stato legiferato ma non è operativo. Anche in Italia abbiamo avuto una modesta *carbon-tax* per un breve periodo alla fine del secolo scorso. Lo stesso sistema degli standard obbligatori di emissioni, adottato di recente negli Stati Uniti, influenza significativamente le scelte energetiche. Dare un prezzo delle emissioni di CO₂ influenza la domanda di energia, modificando i relativi costi dei diversi combustibili (OECD, WEO 2014).

²¹ The Royal Society, 2009, *Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty*



In ogni scenario di abbattimento progressivo delle emissioni si presume che i sistemi di *trading* del carbonio esistenti e le tasse siano generalizzati e che il prezzo della CO₂ aumenti con continuità per effetto delle pressioni crescenti in favore della mitigazione climatiche. Nello scenario IEA WEO 450 ppm compatibile con l'obiettivo dei +2°, il prezzo della CO₂ in Europa, aumenta da meno di 6\$/t nel 2013 a 22 nel 2020 e a 50 nel 2040. In Cina, il prezzo imposto CO₂ passa da 10\$/t a 35 \$/t entro il 2040. Analogamente in Canada, Stati Uniti e Giappone il prezzo "ombra" del carbonio inizia da 13\$/tCO₂ per salire a 40\$ nel 2040. Nello Scenario OECD 450, si presume che il mercato del carbonio si estenda a tutti i paesi OCSE e che i prezzi della CO₂ possano raggiungere i 140\$/t nel 2040, ed anche in alcuni paesi non OCSE grandi emettitori è previsto un prezzo del carbonio, sia pure ad un livello leggermente inferiore.

Figura 9. Dinamica di sviluppo dei principali mercati del carbonio (fonte: Newel²²)



Il protocollo di Kyoto è stato il punto di partenza del mercato del carbonio. Kyoto ha istituito un sistema di limiti di emissione per un paniere di sei gas serra per i paesi sviluppati, un meccanismo di *trading* noto come *joint implementation*. Un secondo meccanismo, il CDM di *clean development*, consente ai paesi sviluppati di compensare le loro emissioni finanziando riduzioni delle emissioni nei paesi in via di sviluppo. Il protocollo di Kyoto ha dato sfortunatamente luogo ad un numero molto ristretto di operazioni tra i vari paesi. Al contrario l'Unione europea e ed altri hanno creato un regime di scambio di emissioni assai più importante. I mercati del carbonio, per nulla tra loro coordinati, sono ormai di gran lunga i maggiori mercati commerciali ambientali e delle emissioni nel mondo in termini di volume e di valore scambiato.

Poiché i GHG sono uno dei pochi esempi di inquinamento globale, dal momento che le emissioni di gas serra di tutto il mondo hanno le stesse conseguenze,

²² Newel et al., 2012, *Carbon Markets: Past, Present, and Future*, Resources for the future, DP 12-51



indipendentemente dal luogo in cui vengono emesse, sembrerebbe necessario, e soprattutto urgente, un approccio coordinato a livello internazionale. Di conseguenza, la dimensione del mercato potenziale diventerebbe molto maggiore rispetto a mercati ambientali esistenti. Con emissioni di CO₂ oltre i 30Gt, il valore di mercato di un anno di quote per queste emissioni a 10\$/t è di 300 miliardi dollari. A 25\$/t sarebbe di 750 miliardi dollari.

Il ruolo della CCS negli scenari di mitigazione per il XXI secolo

Finché i combustibili fossili e le industrie ad alta intensità di carbonio giocheranno un ruolo dominante nelle nostre economie, la cattura e lo stoccaggio del carbonio (CCS) rimarrà una soluzione indispensabile per la riduzione dei gas a effetto serra. Con il carbone, il gas e i combustibili fossili dominanti nel mix energetico, non c'è scenario accettabile a lungo termine, senza la CCS²³.

È chiaro che il mondo ha bisogno nei prossimi decenni di ridurre drasticamente le emissioni di CO₂ legate all'energia. Ciò richiederà il massiccio dispiegamento di tutte le tecnologie di energia pulita. Tramontato il nucleare, restano le energia rinnovabili, le tecnologie di trasporto più pulite, l'efficienza energetica e la cattura e stoccaggio del carbonio. Se non si può pensare che la CCS sia da sola la soluzione cercata per la crisi climatica, un portafoglio coerente di soluzioni energetiche non può prescindere dalla CCS. Per di più, la CCS è attualmente l'unica opzione di mitigazione su larga scala a disposizione per fare drastiche riduzioni delle emissioni dei settori industriali come cemento, ferro e acciaio, prodotti chimici e raffinazione. Oggi, queste emissioni rappresentano un quinto del totale delle emissioni globali di CO₂, e la quantità di CO₂ che producono è destinata a crescere nei prossimi decenni.

L'utilizzo della CO₂ potrebbe, in linea di principio, essere un sostituto per lo stoccaggio geologico. Anche se probabilmente non alla piena scala della criticità climatica, utilizzare la CO₂ è un'opzione che ha un numero crescente di sostenitori, in particolare in Cina. Circa 110 MtCO₂ all'anno vengono venduti oggi per uso industriale (OECD, cit.) e circa 20 MtCO₂ all'anno vengono usati per un maggiore recupero di petrolio e gas naturale (EOR-EGR). Negli scenari principali che illustreremo nel seguito, gli importi di cattura previsti con la CCS per rispettare l'obiettivo dei 2 °C sono però decine di volte maggiori a medio termine. È quindi improbabile che l'uso industriale della CO₂ possa raggiungere un livello comparabile ai bisogni di stoccaggio. Inoltre, molte di queste applicazioni (ad esempio bevande gassate, fertilizzanti e produzione di combustibile) comportano solo un sequestro a breve termine della CO₂ (giorni o anni) e si traducono in riduzioni delle emissioni difficili da quantificare.

²³ OECD IEA, 2013, *Technology Roadmap. Carbon capture and storage*, OECD, Paris



Al momento attuale l'utilizzo in applicazioni EOR-EGR sembra essere l'unico uso di CO₂ che potrebbe, secondo l'IEA, crescere ad una scala rilevante, con un potenziale tecnico di stoccaggio totale di circa 60 GtCO₂ per dare, a livello globale, una produzione aggiuntiva di meno di 200 miliardi di barili di petrolio. L'utilizzo di CO₂ nelle attività estrattive potrebbe essere incoraggiato da una maggiore disponibilità di CO₂ a basso costo, che potrebbero stabilirsi soltanto attraverso una efficace regolazione del mercato del carbonio, che, senza ulteriori azioni politiche, sembra ancora un obiettivo lontano.

Di seguito riassumiamo i lineamenti degli scenari di mitigazione compatibili con l'obiettivo dei 2°C e il ruolo indispensabile che viene, riservato alla CCS in tutti gli approcci.

UN IPCC

L'ultimo Rapporto di valutazione del Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC) – il quinto della serie - segnala che la temperatura media globale combinata della superficie della terra e degli oceani è aumentata di 0,85 °C per il periodo 1880-2012, e che è estremamente probabile che l'influenza umana sia stata la causa dominante del riscaldamento osservato dalla metà del 20° secolo²⁴, più di quanto non era stato valutato nel Rapporto precedente del 2008. Nel mese di settembre 2014, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale ha riferito che la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera ha superato il 142% dell'era pre-industriale e che il *forcing radiativo* – il parametro multidimensionale che determina il riscaldamento sul clima - è aumentato del 34% dal 1990 a causa di gas serra a vita lunga, come la CO₂.

L'IPCC stima che per avere una probabilità del 50% di raggiungere l'obiettivo concordato a livello internazionale di limitare l'aumento della temperatura a 2 °C al di sopra dei livelli pre-industriali e per evitare cambiamenti climatici irreversibili e catastrofici, il *carbon budget* non è più di 1000 Gt di CO₂ circa dal 2014 in poi. Portare rapidamente le emissioni mondiali al picco e poi diminuirle altrettanto rapidamente fino ad annullarle ed oltre è il terreno d'azione della CCS.

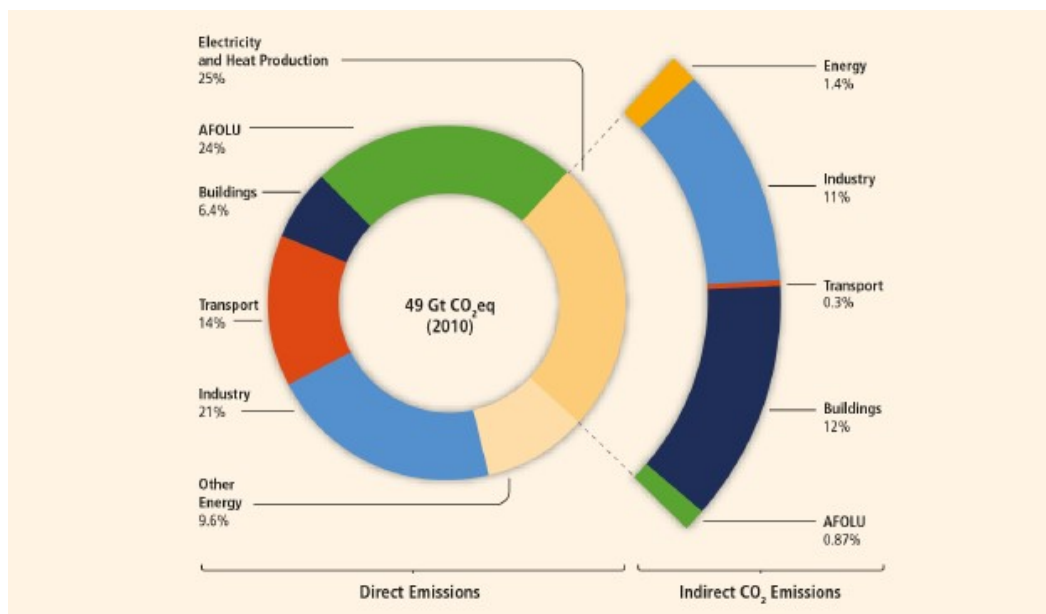
Le valutazioni di scenario dell'IPCC fanno innanzitutto perno sulla composizione attuale delle emissioni (Fig.10) e sulla considerazione che a livello globale, la crescita dell'economia e della popolazione continuano ad essere i *driver* più importanti degli aumenti delle emissioni di CO₂ da combustibili fossili. Il contributo della crescita della popolazione tra il 2000 e il 2010 è rimasto grosso modo identico ai precedenti tre decenni, mentre il contributo della crescita economica è nettamente aumentato, più che compensando la riduzione delle emissioni dovute ai miglioramenti dell'intensità energetica. Un maggiore uso

²⁴ IPCC, 2014, "V° Assessment Report", www.ipcc.ch



del carbone rispetto ad altre fonti energetiche ha invertito la tendenza di lunga data alla progressiva decarbonizzazione dell'approvvigionamento energetico del mondo. Senza sforzi aggiuntivi per ridurre le emissioni di gas serra, senza mitigazione aggiuntiva, gli scenari di riferimento danno luogo ad aumenti della temperatura media globale superficiale nel 2100 di 3,7 - 4,8 °C rispetto ai livelli pre-industriali

Figura 10. Emissioni antropogeniche totali di gas serra (GtCO₂eq/yr) dei settori economici (fonte: IPCC AR5 WGIII)



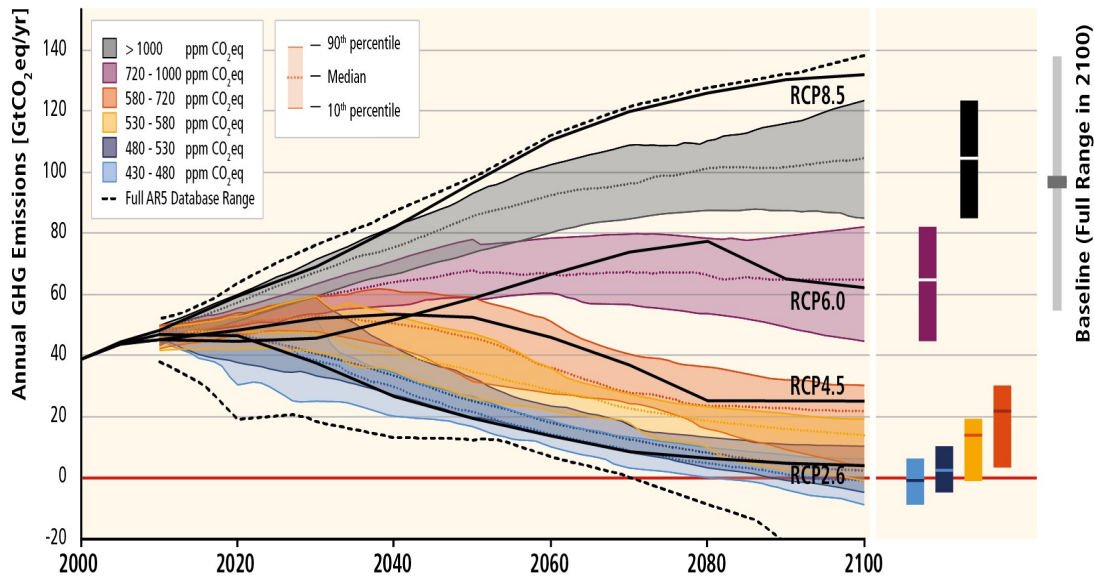
Esistono molteplici scenari, con una gamma di opzioni tecnologiche e comportamentali, con diverse caratteristiche e implicazioni per lo sviluppo sostenibile, che sono coerenti con diversi livelli di mitigazione. L'IPCC AR5 raccoglie i risultati di 900 scenari di mitigazione accreditati. Questa raccolta abbraccia livelli di concentrazione in atmosfera al 2100 da 430 ad oltre 720 ppm di CO₂eq, associati con i livelli del forzante radiativo al 2100 compresi tra 2.6 e 6.0. Gli scenari di mitigazione in cui è probabile che l'aumento di temperatura possa essere mantenuto al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli pre-industriali sono caratterizzati da concentrazioni atmosferiche di circa 450 ppm CO₂eq al 2100 ma non oltre le 500 ppm. Per gli scenari di 530-650 ppm al 2100 è improbabile restare al di sotto di +2°C rispetto ai livelli pre-industriali.

Gli scenari con una *chance* di cogliere l'obiettivo dei 2°C prevedono sostanziali tagli alle emissioni di gas serra entro la metà del secolo, attraverso un cambiamento su larga scala dei sistemi energetici. Prevedono minori emissioni totali di gas serra dal 40% al 70% a livello globale nel 2050 rispetto al 2010, e livelli di emissione vicini o sotto lo zero nel 2100. A livello globale, gli scenari che prevedono di raggiungere i 450 ppm di CO₂eq sono anche caratterizzati da più rapidi progressi nell'efficienza energetica, da una triplicazione fino a quasi una quadruplicazione entro il 2050 della quota di fonti di energia a basse



emissioni o a emissioni zero attraverso le fonti rinnovabili, i combustibili fossili con la cattura e lo stoccaggio dell'anidride carbonica (CCS) o la bioenergia con CCS (BECCS).

Figura 11. Emissioni attuali e scenari futuri secondo lo IPCC AR5 WGIII



Decarbonizzare la generazione di elettricità è una azione chiave delle strategie di mitigazione per raggiungere la stabilizzazione a bassi livelli (430–530 ppm di CO₂eq); nella maggior parte degli scenari, la decarbonizzazione avviene più rapidamente nella generazione di elettricità rispetto ai settori industriali, edilizia e trasporti e la percentuale di generazione di energia *low carbon* (energie rinnovabili e CCS) aumenta rispetto alla percentuale attuale del 30% fino ad oltre l'80% entro il 2050. La generazione da combustibili fossili senza CCS viene quasi interamente azzerata entro il 2100.

Le tecnologie per la cattura e lo stoccaggio della CO₂ (CCS) potranno ridurre le emissioni GHG degli impianti di generazione fossile se verranno incentivati attraverso strumenti regolatori e/o se diventeranno competitivi rispetto agli impianti della stessa tipologia privi di CCS, ad esempio se i costi addizionali operativi e di investimento verranno compensati da un prezzo del carbonio sufficientemente alto o da supporti finanziari diretti. Tutti i componenti dei sistemi integrati della CCS vengono già oggi utilizzati nell'estrazione dei combustibili fossili e nell'industria della raffinazione, ma la CCS non è ancora stata applicata su larga scala.

Per assicurare uno sviluppo futuro su larga scala della CCS, secondo lo IPCC, è necessario definire accuratamente le regole per le responsabilità nel breve e nel lungo termine dello stoccaggio, tanto quanto gli incentivi economici. Le barriere allo sviluppo su larga scala delle tecnologie CCS includono le criticità legate alla sicurezza operativa e all'integrità a lungo termine dello stoccaggio della CO₂ ed ai rischi collegati al trasporto. Esiste, comunque, una corposa



letteratura su come assicurare l'integrità della CO₂, sulle potenziali conseguenze della pressione generata tra le formazioni geologiche a causa dello stoccaggio della CO₂ (ad esempio, la correlazione con gli eventi sismici) e sugli impatti potenziali per la salute e l'ambiente causati da fughe della CO₂.

La combinazione di CCS e bioenergie (BECCS) offre infine la prospettiva di una fornitura di energia su larga scala con emissioni nette negative che gioca un importante ruolo in molti scenari di stabilizzazione a basse concentrazioni, sebbene comporti criticità e rischi associati alla disponibilità di risorse per la generazione da biomasse su larga scala.

OECD

Per avere una ragionevole possibilità di limitare l'aumento della temperatura media globale a 2 °C, l'OECD calcola per il settore energetico un *Carbon Budget* tra il 2012 e il 2050 di 884 GtCO₂. Ciò significa crudamente che può essere consumato prima al 2050 meno di un terzo delle riserve accertate di combustibili fossili, a meno che la tecnologia CCS non sia tempestivamente ed ampiamente diffusa²⁵. La CCS non è solo uno dei metodi di mitigazione climatica, ma investire nello sviluppo e nella diffusione delle tecnologie CCS è una importante strumento di gestione del rischio (*hedging*) per le aziende e i paesi che traggono reddito significativo dai combustibili fossili. La CCS può preservare il valore economico delle riserve di combustibili fossili e delle infrastrutture associate in un mondo che vuole intraprendere forti azioni per mitigare il cambiamento climatico. La CCS ha anche valenza strategica perché può ritardare il ritiro dalle attività di produzione e di trasformazione di infrastrutture di valore in un contesto di emissioni di CO₂ obbligatoriamente limitate.

Le emissioni cumulative di CO₂ dagli impianti oggi in esercizio o in costruzione (ad esempio, centrali elettriche, impianti industriali e di produzione di combustibile di trasporto) ammonteranno a circa 550 GtCO₂ nel 2035, gran parte del *budget* delle emissioni di cui sopra. Il *retrofit* di queste impianti con la CCS aiuterà a mitigare la quota delle emissioni di questo tipo di infrastruttura ancora attive. L'OECD valuta che il ritiro della CCS dalle opzioni di mitigazione climatica comporterebbe un aumento del 40% dell'investimento di capitale necessario per soddisfare lo stesso vincolo di emissioni²⁶.

La CCS è attualmente l'unica opzione di mitigazione su larga scala a disposizione per fare drastiche riduzioni delle emissioni dei settori industriali come cemento, ferro e acciaio, prodotti chimici e raffinazione. Oggi, queste emissioni rappresentano un quinto del totale delle emissioni globali di CO₂, e la quantità di CO₂ che producono è destinata a crescere nei prossimi decenni. I

²⁵ OECD IEA, 2012, *World Energy Outlook 2012*, OECD/IEA, Paris

²⁶ OECD IEA, 2013, *Technology Roadmap. Carbon capture and storage*, OECD/IEA, Paris



recenti miglioramenti dell'efficienza energetica in questi settori non hanno pienamente conseguito tutto il potenziale di riduzione delle emissioni in parte a causa delle emissioni non energetiche generate da molti processi industriali²⁷.

Queste premesse spiegano appieno l'importanza assegnata all'OECD IEA alla tecnologia CCS in tutti gli scenari di mitigazione che si sono via via succeduti negli ultimi anni. Impossibile qui referenziarli tutti, conviene quindi esaminare l'ultima elaborazione in ordine di tempo che conferma la centralità della CCS anche se la sua evoluzione operativa non ha tenuto il passo delle aspettative.

Lo scenario 6° (6DS) è in gran parte un prolungamento delle attuali tendenze. Entro il 2050, il consumo di energia cresce di più di due terzi rispetto al 2011 e le emissioni totali di gas serra aumenta ancora di più. In assenza di sforzi per stabilizzare le concentrazioni atmosferiche di gas serra, l'aumento della temperatura media mondiale è previsto essere di almeno 6° C a fine secolo.

Lo scenario 4° (4DS) tiene conto dei recenti impegni assunti dai paesi di limitare le emissioni e intensificare gli sforzi per migliorare la propria efficienza energetica. Pertanto l'OECD lo adotta come *baseline* primaria, per realizzare i confronti tra scenari²⁸, ma esso prefigura un aumento della temperatura a lungo termine di 4 °C. Per molti aspetti, questo è già uno scenario ambizioso che richiede cambiamenti significativi della politica e delle tecnologie rispetto al 6DS. Limitare l'aumento della temperatura a 4 °C richiede notevoli ulteriori tagli delle emissioni nel periodo successivo al 2050, ma, sfortunatamente, non evita impatti climatici drastici nel futuro.

Lo scenario 2° (2DS) è l'obiettivo di qualità ecologica e climatica dell'OECD. Disegna un sistema energetico in linea con una traiettoria delle emissioni che, secondo le ricerche più recenti nel settore della scienza climatica, darebbe almeno un 50% di probabilità di limitare l'aumento medio della temperatura globale a fine secolo entro i 2 °C. Lo scenario 2DS individua inoltre i cambiamenti che possono garantire un sistema energetico sicuro e conveniente nel lungo periodo. Il 2DS fissa l'obiettivo di riduzione dei consumi energetici, e delle emissioni di CO₂ connesse a quel processo, di oltre la metà nel 2050 rispetto al 2011 e prescrive che continuino a scendere ancora nel seguito. È importante sottolineare che il 2DS riconosce che trasformare il settore energetico è fondamentale, ma non è una soluzione sufficiente: l'obiettivo può essere raggiunto solo a condizione che la CO₂ e le emissioni di gas serra nei settori non energetici vengano anch'esse ridotte.

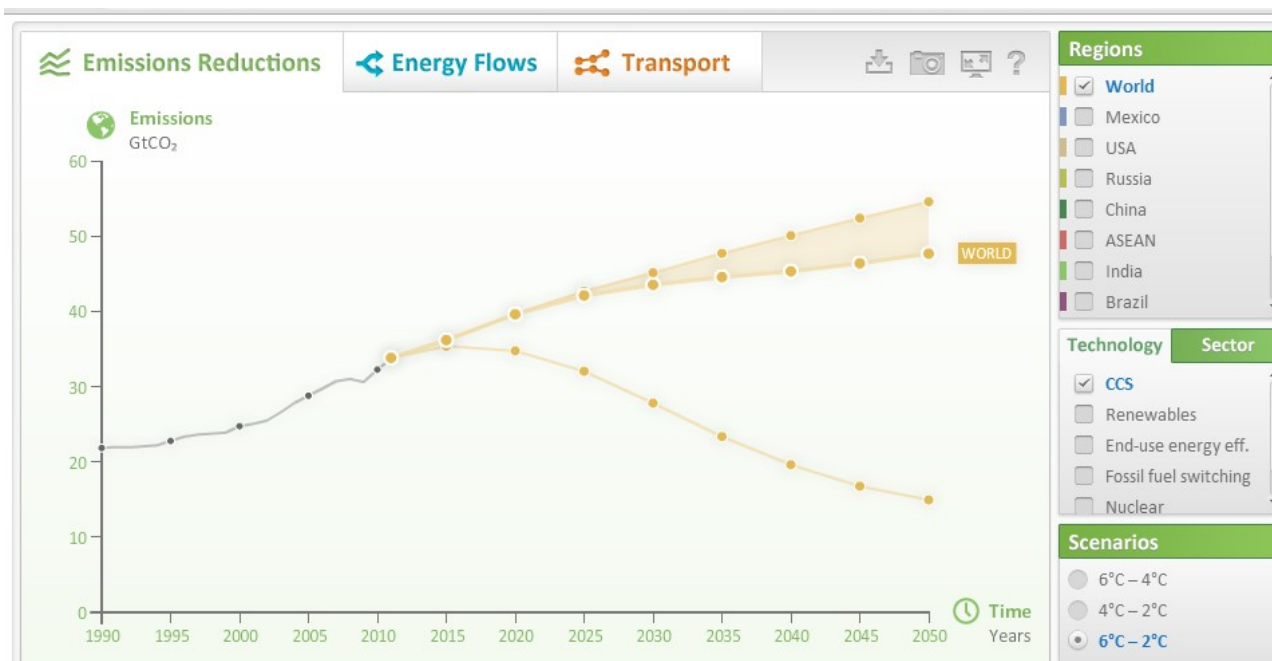
²⁷ OECD IEA, 2013, *Global Action to Advance Carbon Capture and Storage: A Focus on Industrial Applications*, Annex to Tracking Clean Energy Progress 2013, OECD/IEA, Paris

²⁸ OECD IEA, 2014, *Energy technology perspectives*, OECD IEA, Paris



La Fig. 12 illustra con grande efficacia, ed in modo interattivo sul web, le dinamiche di mitigazione nei vari paesi e in funzione delle varie tecnologie²⁹. A partire dal 6DS evidenzia il contributo di abbattimento in progressione che l'OECD si aspetta dalla CCS. Al 2050 la CCS, il cui contributo è per ora nullo, porterebbe ad oltre 5 GtCO₂ il suo contributo alla mitigazione, pari in percentuale ad oltre il 14% ed in assoluto a più di 10 volte le emissioni attuali in CO₂eq dell'Italia.

Figura 12. Effetti di mitigazione della sola CCS nella forchetta degli scenari 6DS – 2DS (fonte OECD IEA)



Tuttavia, nota l'OECD, lo sviluppo della tecnologia CCS è progredito meno del previsto in termini di impianti dimostrativi di grandi dimensioni. Di conseguenza, la proiezione a breve termine è stata rivista verso il basso nel 2014: Lo scenario 2DS abbassa le previsioni per il 2020 dai 16 GW (ETP 2012) a 4 GW a livello mondiale per le centrali fossili dotate di CCS. Allo stesso modo, l'implementazione a breve termine di CCS nei settori di trasformazione dell'industria e dei carburanti è stata rivista al ribasso, da 180 a 33 Mt MtCO₂ in volume annuo di CO₂ catturata nel 2020. Lo stesso obiettivo del 14% delle riduzioni delle emissioni cumulative al 2050 è di un quinto inferiore rispetto allo scenario 2DS presentato nel 2012.

Unione Europea

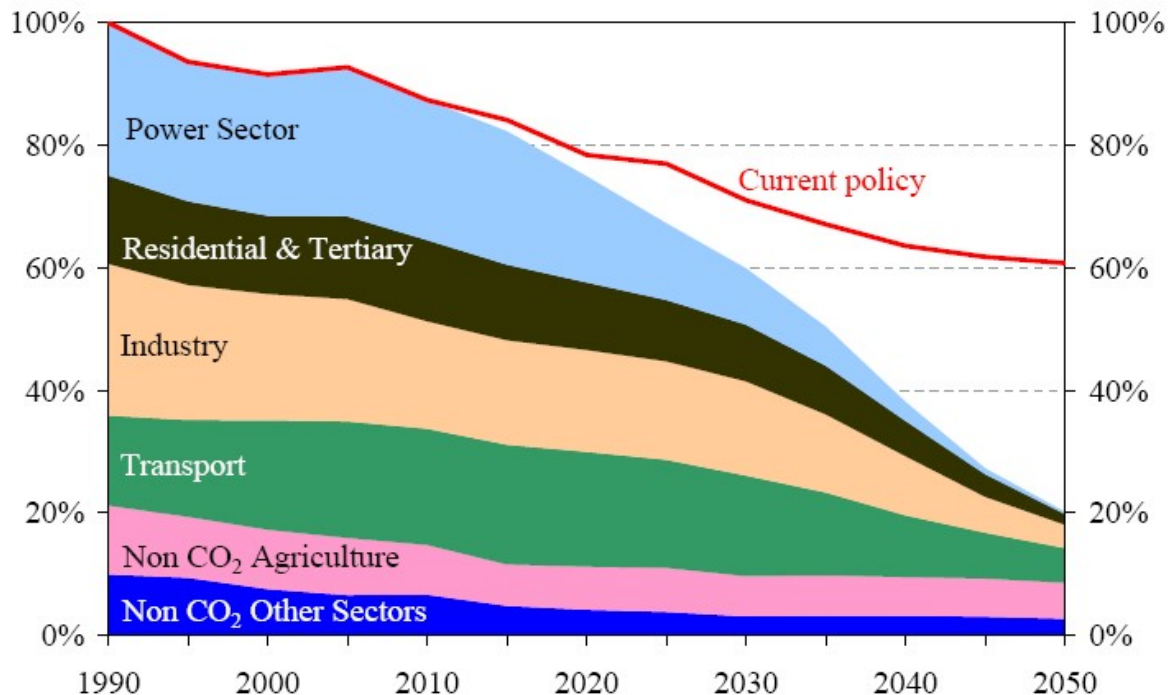
L'UE si è impegnata a ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 40% entro il 2030 ed ha avanzato questa sua proposta al mondo intero nella

²⁹ L'OECD mette a disposizione questa immagine dinamica con tutte le componenti e gli scenari in: <http://www.iea.org/etp/explore/>



prospettiva del nuovo patto climatico di Parigi³⁰. Questo obiettivo è pienamente coerente con il percorso previsto dalla *roadmap* energetica europea al 2050, elaborata nel 2011 e non più rimessa in discussione, che prevede l'abbattimento delle emissioni GHG dell'80% entro il 2050 (Fig. 13)³¹.

Figura 13. Profili abbattimento delle emissioni nella *roadmap* europea al 2050 (fonte: EU EC, cit.)



Lo scenario implica che il settore elettrico abbia emissioni zero nel 2050, tuttavia la commissione ritiene che i combustibili fossili continueranno a essere utilizzati per la produzione di energia elettrica in Europa, nonché nei processi industriali, ancora per decenni. Pertanto, l'obiettivo fissato per il 2050 può essere raggiunto solo se le emissioni dovute alla combustione di combustibili fossili saranno eliminate; in questo caso, alle tecnologie CCS è affidato un ruolo essenziale per la mitigazione delle emissioni sia nel settore energetico che in quello industriale. Le tecnologie CCS possono essere utilizzate anche nell'ambito della produzione di carburanti per autotrazione, in particolare per la produzione di combustibili alternativi come l'idrogeno da fonti fossili. Negli studi tecnici che hanno accompagnato l'elaborazione della *roadmap* europea 2050 sono stati sviluppati molti scenari di decarbonizzazione del settore elettrico. In tre di questi, come illustra la fig. 14, le tecnologie CCS sono state applicate a più del 20% del *mix* di energia elettrica dell'UE entro il 2050.

Di norma, le tecnologie CCS vengono considerate nell'ambito della combustione dei fossili, ma possono anche essere utilizzate per catturare

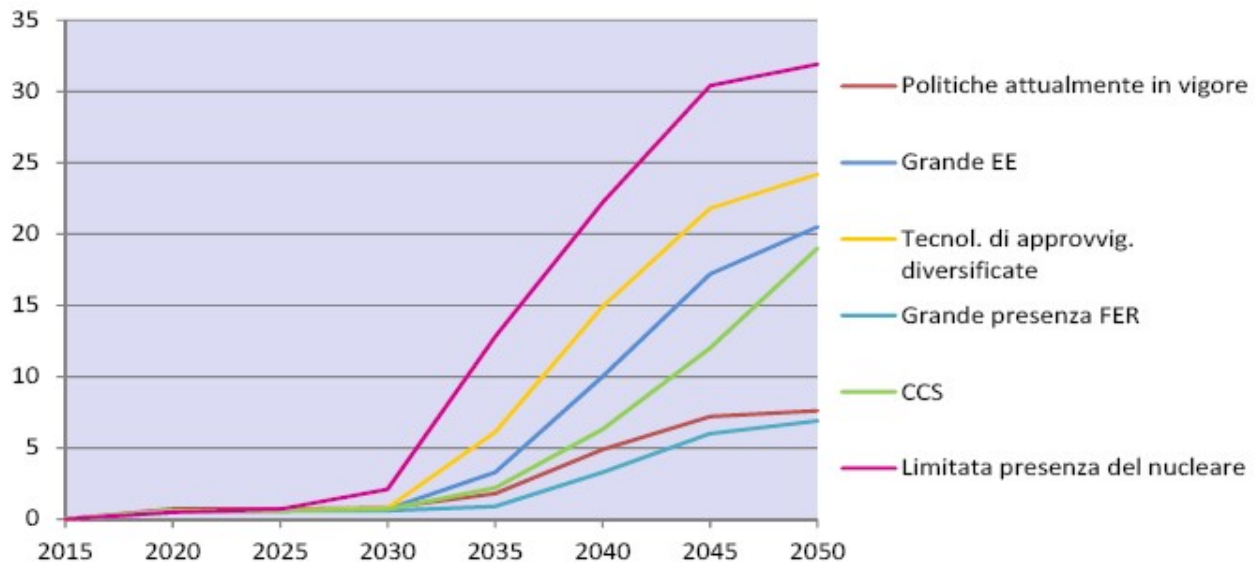
³⁰ EU Council, 2014, *Conclusions – EU GHG emissions reduction target*, EUCO 169/14

³¹ EU EC, 2011, *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*, COM(2011) 112 final



carbonio biogenico proveniente dall'uso di biomassa (Bio-CCS). Le applicazioni delle tecnologie Bio-CCS possono andare dalla cattura di CO₂ proveniente dalla co-combustione di biomassa e da centrali a biomassa, fino ai processi di produzione dei biocarburanti³².

Figura 14: Quota % delle tecnologie CCS nella produzione di energia elettrica, nella roadmap per il 2050 (fonte: EU EC, cit.)



Il secondo scenario della *roadmap* 2050, basato sulle tecnologie di approvvigionamento diversificate, indica che a partire dal 2035 potrebbero venire installate tecnologie CCS per un totale di 32 GW, fino a raggiungere circa 190 GW entro il 2050. Si tratta di un'opportunità significativa per l'industria europea nell'ambito delle tecnologie di cattura e stoccaggio, pur essendo tuttavia molto in ritardo tutto il quadro politico per lo sviluppo delle installazioni commerciali della CCS nell'UE a fronte invece di un più che adeguato completamento delle normative, tanto impiantistiche (nuove formulazioni della Direttiva VIA), che per le emissioni (IPPC, AIA), che per lo stoccaggio (Direttiva 2009/31 e dispositivi nazionali di recepimento)³³.

Nel 2013 la Commissione ha lanciato un questionario tra gli *stakeholder* i cui risultati confermano la volontà generale del pieno sviluppo della CCS e la proposta che ogni stato membro sviluppi una propria *roadmap* CCS per consentire all'Europa una assegnazione di ruolo alla CCS chiara e condivisa³⁴.

³² EU EC, 2013, *Il futuro della cattura e dello stoccaggio del carbonio in Europa*, COM(2013) 180 final

³³ EU EC, 2014, *Relazione della Commissione al Parlamento Europeo e al Consiglio sull'attuazione della direttiva 2009/31/CE relativa allo stoccaggio geologico di biossido di carbonio*

³⁴ EU EC, 2014, *Summary report on the analysis of the responses received to the Consultative Communication on the future of Carbon Capture and Storage in Europe [COM(2013)180]*



PARTE SECONDA

Le opzioni *carbon negative* per una mitigazione forte

Poiché l'eccesso di gas serra nell'atmosfera è tra i principali 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 (la 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, dalla vegetazione e dal suolo. A questa seconda opzione ci si riferisce con l'espressione "*emissioni negative di carbonio*" ottenute mediante 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 italiano³⁵ ha organizzato nel maggio del 2013 un importante convegno³⁶.

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, è indispensabile valutare i possibili risultati delle strategie per la *Carbon Dioxide Removal* - CDR. Sappiamo però che non si tratta di opzioni miracolistiche. Allo stato attuale della conoscenza scientifica e della tecnologia, l'obbligo di dover ridurre nei prossimi decenni la concentrazione dei gas a effetto serra in atmosfera attraverso un severo abbattimento delle emissioni non può essere eluso e non è ragionevole pensare che se ne possa fare a meno con il solo ricorso alla CDR.

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 CO₂ equivalente (CO_{2eq}) alla fine

³⁵ CMCC, Centro Euromediterraneo per i Cambiamenti Climatici

³⁶ 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



del secolo, i modelli mostrano che occorre una forte decarbonizzazione dell'economia globale, in particolare del settore energetico. Metodi e tecnologie CDR sembrano poter essere competitivi solo più in là negli anni, cioè quando, 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 possono essere efficaci 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, tutti necessari allo studio di temi così complessi. Le tecnologie CDR possono giocare un ruolo efficace se impiegate in maniera integrata con altre strategie di mitigazione capaci di 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 infatti che una rimozione di CO₂ dall'atmosfera tramite CDR avrebbe come conseguenza il rilascio di altra CO₂ dall'ecosistema; pertanto l'efficacia delle strategie a emissioni negative ne risulterebbe diminuita, con un aumentato bisogno di rimozione di CO₂ dall'atmosfera. Le simulazioni mostrano infatti che le azioni di CDR devono sempre considerare anche un rilascio extra del carbonio antropogenico accumulato nell'oceano dalle emissioni passate, così aumentando il bisogno di rimozione di CO₂ dall'atmosfera. Una pianificazione accurata è dunque necessaria.

L'opzione carbon negative per l'obiettivo dei 2°

Sulla base delle già discusse evidenze scientifiche disponibili, i responsabili politici hanno convenuto di utilizzare il cosiddetto obiettivo dei 2 °C di aumento massimo della temperatura media globale al di sopra dei livelli pre-industriali, come un obiettivo chiave della 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 annuali di gas serra stanno continuando a portare ad emissioni crescenti.



Il negoziato internazionale non ha ancora acquisito una formulazione condivisa per una politica comune efficace sul clima. Alla primavera del 2015, nell'immediata vigilia della Conferenza di Parigi, non è ancora certo, e nemmeno probabile, che gli impegni volontari dichiarati dai vari paesi (*pledge*), dettati dall'accordo di Copenaghen, potranno essere sufficienti. Per quanto finora se ne sa, tali impegni non porterebbero ai livelli di emissione compatibili con l'obiettivo dei 2 °C con percorsi di minimo costo. Né ci sono ancora adeguate certezze che i negoziati in corso per un patto climatico comune post 2020 potranno assicurare l'obiettivo.

Un possibile modo per affrontare queste prospettive è l'approccio dei cosiddetti scenari di *overshoot* delle concentrazioni. 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 concedere respiro ai paesi non in linea, in quanto ammettono minori riduzioni a breve termine e sembrano comportare rischi aggiuntivi limitati. Gli scenari di *overshoot* della temperatura media globale, pur potendo essere a loro volta considerati, comportano chiaramente maggiori rischi perché i 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 potrebbe causare delle retroazioni (*feedback*) che si tradurrebbero in un ulteriore aggravamento del cambiamento climatico (come ad esempio i *feedback della* temperatura sul ciclo del carbonio, che riducono l'assorbimento di carbonio da parte degli ecosistemi naturali).

Molti scenari di *overshoot* in concentrazione hanno bisogno di emissioni nette negative nella seconda metà del secolo³⁷. Emissioni nette negative possono essere ottenute in modi diversi: opzioni importanti includono la bioenergia combinata con la cattura e stoccaggio del carbonio - BECCS³⁸ -, il rimboschimento, l'afforestazione, forme di geo-ingegneria, la fertilizzazione degli oceani o la rimozione diretta dell'anidride carbonica - CDR - mediante la cattura della CO₂ direttamente dall'aria. Lo stoccaggio del carbonio nei suoli

³⁷ 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

³⁸ 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, pp. 169-250



attraverso l'utilizzo di *biochar*³⁹ o la produzione di bioenergia su praterie degradate potrebbe contribuire ad emissioni negative nette.

Tra queste opzioni, la DAC, la cattura diretta dall'aria è per il momento relativamente costosa, mentre la fertilizzazione degli oceani (come gran parte delle forme di geo-ingegneria) comporta gravi rischi ambientali. Come tale, la BECCS e la riforestazione sembrerebbero essere le opzioni più interessanti per generare emissioni negative.

La produzione di energia elettrica mediante la combustione di biomasse, o altre tecnologie per la produzione di biocarburanti, dà luogo ad emissioni di CO₂ teoricamente nulle, perché il carbonio emesso in atmosfera è lo stesso che va a costituire la biomassa attraverso la fotosintesi clorofilliana. Nei fatti, alla luce della analisi LCA del ciclo bioenergetico, le cose sono un po' diverse, perché altro carbonio ed altri gas serra vengono emessi nelle fasi di coltivazione, fertilizzazione del suolo, irrigazione, trasporto etc. Se tuttavia tutto il carbonio prodotto nella fase di combustione della biomassa viene stoccato nel sottosuolo con tecniche CCS, il bilancio finale è *carbon negative*.

L'interesse per la BECCS come opzione *carbon-negative* è cresciuta rapidamente in quanto può avere il potenziale per offrire riduzioni profonde della concentrazione di CO₂ in atmosfera. Sembra anche essere praticabile e conveniente⁴⁰. L'IPCC afferma che il successo della diffusione delle tecnologie CCS in combinazione con la conversione energetica della biomassa potrebbe comportare una eliminazione di gas ad effetto serra a livelli di costo interessanti⁴¹. La BECCS potrebbe essere applicata a una vasta gamma di tecnologie legate alla biomassa⁴². Mentre la CCS convenzionale è ben nota 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 dimostrano che la probabilità di cogliere l'obiettivo dei 2 °C è correlata con gli *stock* atmosferici della CO₂ (le emissioni di CO₂ cumulative o storiche), piuttosto che con i flussi (le emissioni annuali)⁴³, e che il bilancio

³⁹ 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

⁴⁰ OECD/IEA, 2011, *Combining Bioenergy with CCS Reporting and Accounting for Negative Emissions under UNFCCC and the Kyoto Protocol*, Working Paper

⁴¹ 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>

⁴² Global CCS Institute, 2010, *Global Status of BECCS Projects*, Biorecro AB, Stockholm, Sweden

⁴³ 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



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. Gli effetti di emissioni a breve termine più elevate, compensate con emissioni negative a lungo termine, si possono trattare, come abbiamo visto, con l'approccio del *carbon budget*⁴⁴, chiaramente per i conteggi sui flussi annuali, ma anche per i bilanci in proiezione futura. Concentrazioni temporanee di CO₂ più elevate si traducono in un tasso di assorbimento più alto di oceani e biosfera, fenomeni favorevoli a determinati livelli di *overshoot*. Abbiamo ricordato però che le temperature più alte potrebbero portare a *feedback* pericolosi del ciclo clima-carbonio come una la crescita ridotta della biosfera o il rilascio di gas serra provenienti dalla tundra, limitando ulteriormente il *budget* di carbonio residuo.

In media, l'ambizione di soddisfare l'obiettivo dei 2 °C, con una probabilità di circa il 66% corrisponde, come abbiamo visto, ad un *budget* massimo per le emissioni di CO₂ per questo secolo inferiore alle 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, ogni 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 anni, durate analoghe valgono per gli impianti industriali. Mentre la vita di altre tecnologie, come ad esempio le autovetture, 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, non vengono previsti periodi con tassi di riduzione del 4%/anno (rispetto ai livelli del 2000 delle emissioni) per 10 anni o più. Un tasso di riduzione delle emissioni del 4% richiede un tasso di decarbonizzazione dell'economia del 6%, ipotizzando una crescita media del 2% del reddito. Storicamente, gli alti tassi di decarbonizzazione globali sono dell'ordine del 2%/anno e sono tenuti per periodi di tempo relativamente brevi.

⁴⁴ Si consulti il sito www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/



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 alcune modalità di trasporto come il trasporto aereo e il trasporto merci sembrano essere attualmente limitati alla sola efficienza energetica e all'uso di bio-energia, che peraltro genera emissioni di almeno alcuni gas serra. 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 inferiore alle 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 secondo comporta l'uso di BECCS al 2%).

Partendo da questi presupposti fondamentali, è semplice ricavare la forchetta delle emissioni 2020 coerenti con il bilancio complessivo. 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 energetica 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 devono già essere ridotte in modo significativo nel 2020. 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.

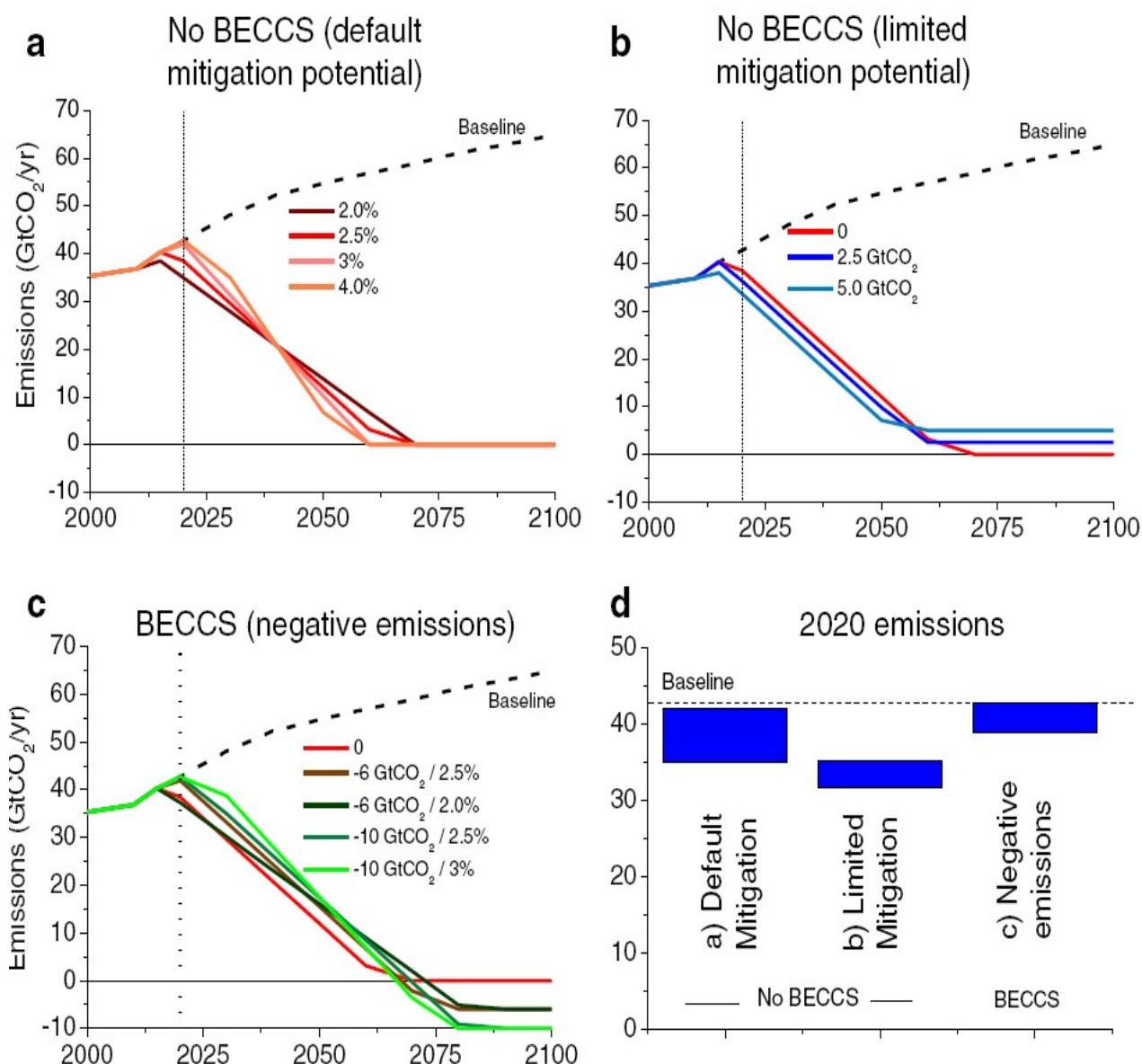
Figura 1. Percorsi di emissione illustrativi sulla base di un *carbon budget* secolare di 1600 GtCO₂ e un tasso costante di riduzione delle emissioni (in % dei livelli di emissioni del 2000).

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) mostra 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 (fonte IPCC AR5)



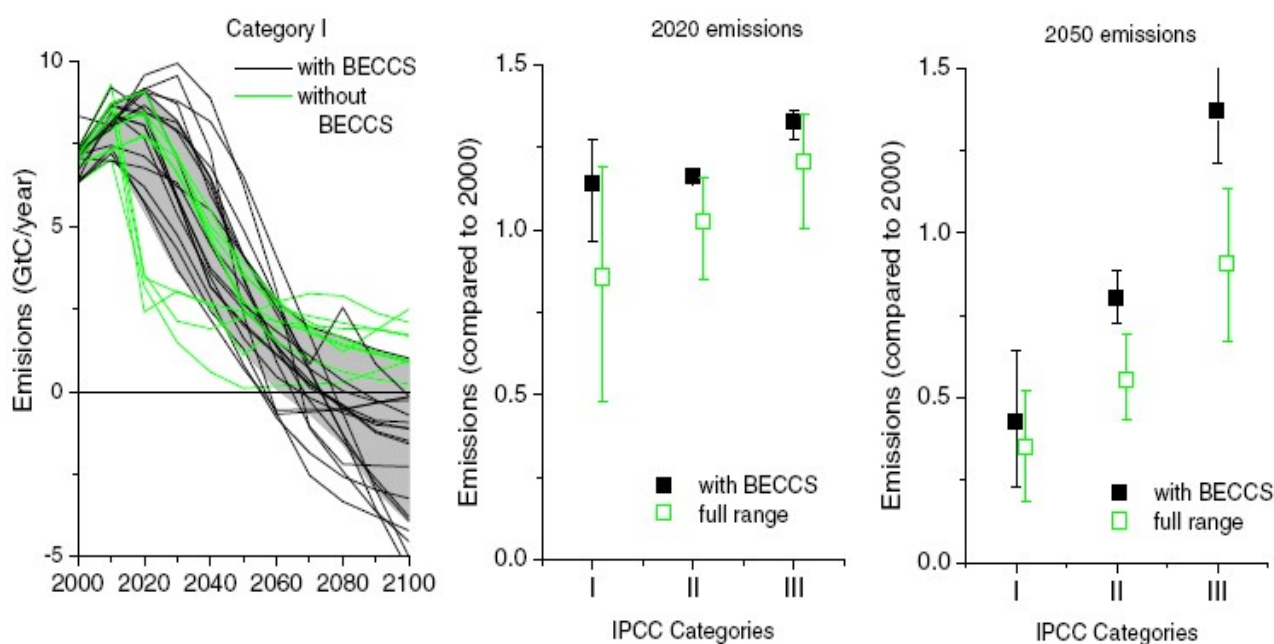
In tutti i casi, in termini di *carbon budget*, senza emissioni negative al 2050 le emissioni devono essere circa il 60-80% al di sotto del livello del 2000. Se poi le emissioni non possono essere ridotte a zero, la necessità di riduzione delle emissioni a breve termine è ancora più urgente (vedi pannello 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 vengono considerate possibili le emissioni negative: 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 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: <3,0 Wm⁻², II: 3-3,5 Wm⁻² e III: 3,5-4,0 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) (fonte IPCC AR5)



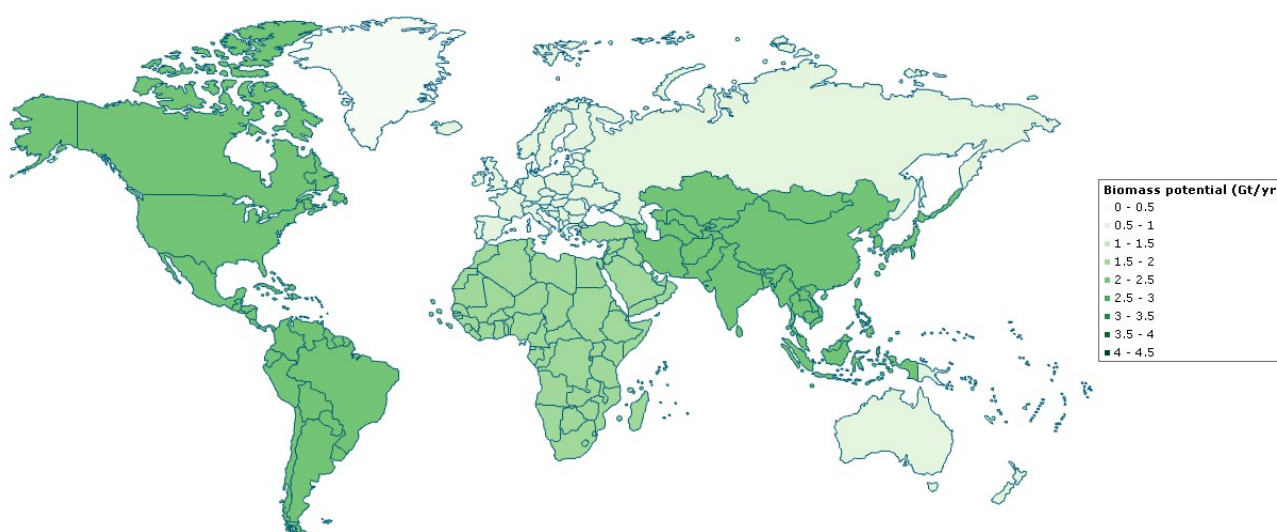
I limiti della disponibilità della bioenergia per la BECCS

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 inevitabilmente sempre più intensive a base di carne. Allo stesso tempo, vi sono evidenze che anche la produzione di quantità relativamente piccole di bioenergia hanno già 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, IEAGHG⁴⁵)



Per la produzione di bioenergia di II generazione (legnosa) con l'utilizzo in centrali elettriche, le emissioni di conversione sono generalmente basse: è necessaria una trasformazione relativamente minima della biomassa (rispetto, ad esempio, alla produzione di biocarburanti di I generazione). Inoltre la bioenergia legnosa, 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 associato di uso del suolo, 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

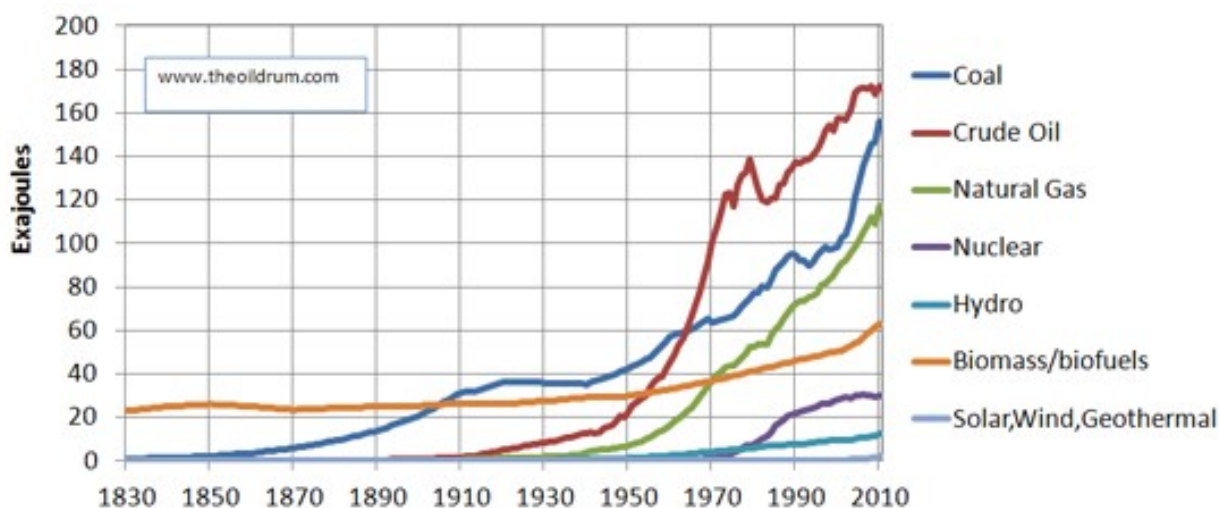
⁴⁵ OECD IEAGHG, 2011, *Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2011/06



potenziale sostenibile nel 2050 può variare tra 0 e 200 EJ⁴⁶/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 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

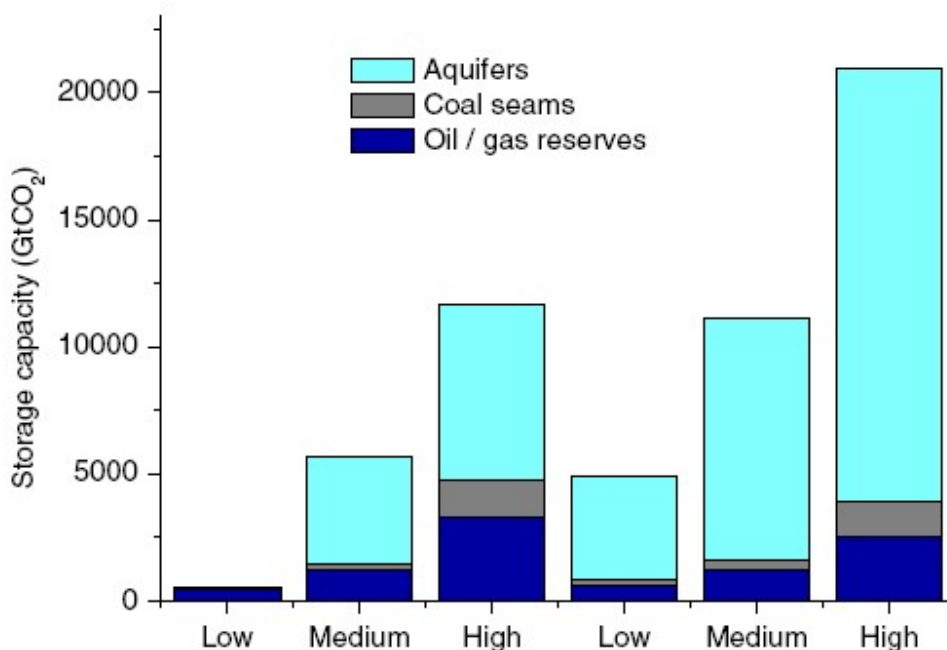
Ci sono anche da fare i conti con la tecnologia CCS, ed in particolare con lo stoccaggio, la cui criticità può risultare determinante. Prima di tutto, la capacità di stoccaggio della CO₂ è incerta: mentre c'è qualche dato attendibile circa la sicurezza dello stoccaggio della CO₂ nei serbatoi depleti di combustibili fossili, è più incerto il potenziale di stoccaggio in sicurezza in altre categorie,

⁴⁶ 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.4)



come il *coal-bed*, gli acquiferi salini o addirittura l'oceano, essendo quest'ultima un'opzione praticamente improponibile dal punto di vista ecologico. In secondo luogo, l'accettazione sociale è quanto meno un vincolo importante. Le comunità locali si sono opposte molto spesso 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 (Fig.5).

Figura 5. Capacità di stoccaggio della CO₂ stimata (fonte: Hendriks and IEAGHG47)



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 fossili è stata stimata in 600-2500 GtCO₂.

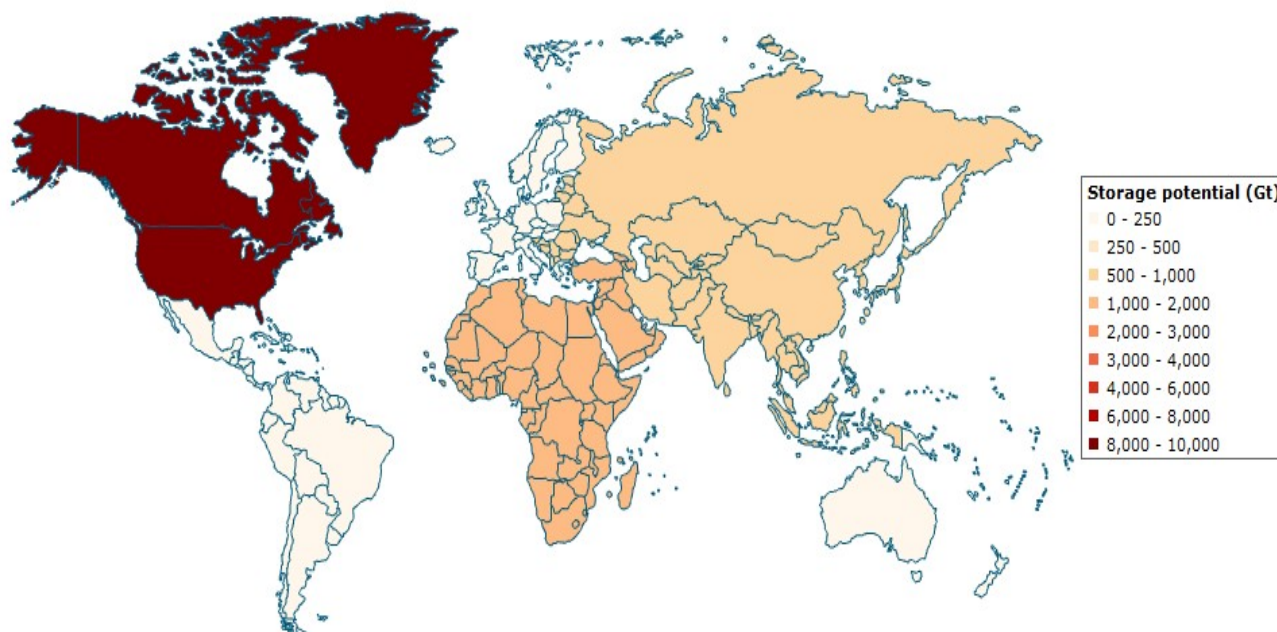
Supponendo che la CCS sia chiamata in campo soprattutto nella seconda metà del secolo, l'uso della capacità totale dei giacimenti di petrolio e di gas vuoti permette un tasso medio annuale di stoccaggio da 10 a più di 65 GtCO₂. L'uso dei giacimenti di carbone e degli acquiferi salini sposterebbe notevolmente verso l'alto il limite di gamma superiore. Gli stessi serbatoi potenzialmente utilizzati per stoccare la CO₂ generata dai combustibili fossili, devono però 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

⁴⁷ IPCC, 2005, *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, UK e GCCSI, 2011, *Economic assessment of carbon capture and storage technologies 2011 update*. Global CCS Institute, Canberra



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 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 accettabile 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. Nelle condizioni peggiori, tuttavia, non ci sarebbe alcun potenziale realistico. Questi



numeri sono ragionevolmente coerenti con la stima di 1,3 - 4,2 GtCO₂eq/anno riportato dal quarto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR4)⁴⁸.

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 il 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 il 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
(font: Hendricks, Geocapacity (EU), NETL/DOE (US)⁴⁹)

	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

⁴⁸ 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

⁴⁹ 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



realistiche, tuttavia, sono suscettibili di ridurre questo potenziale alla metà o a meno.

Il problema dei costi della CCS

Gli ostacoli alla operatività della BECCS non possono che essere diretta conseguenza dello stato di sviluppo della CCS, ed in particolare della sua evoluzione tecnologica e dei suoi costi. Quest'ultimo fattore e l'andamento del mercato del carbonio, così come si andrà determinando a livello mondiale e regionale nel quadro del negoziato internazionale sui cambiamenti climatici, determineranno il possibile successo della BECCS come fattore determinante di mitigazione delle emissioni climalteranti.

Il problema dei costi della CCS è stato oggetto di grande attenzione negli anni recenti ed ha determinato un generale calo degli investimenti per i nuovi impianti dimostrativi in proporzione diretta con la crisi economica ed in misura maggiore per quei paesi, l'Europa e l'Italia tra questi, che ne hanno subito le conseguenze maggiori e più prolungate. Gli studi di maggior portata tecnico scientifica possono essere collocati nel 2008 (McKinsey⁵⁰), nel 2011 (OECD IEA⁵¹ e lo ZEP con particolare riferimento all'Europa⁵²). Di recente uno studio italiano (Sotacarbo, 2011⁵³) ha contribuito a dimensionare il problema della fattibilità tecnico-economica della CCS con una parametrizzazione dei fattori corrispondente al programma tecnologico per il Sulcis. La ricchezza di dati delle valutazioni economiche va anche oltre gli studi citati e costituisce un patrimonio conoscitivo imprescindibile al quale si deve fare riferimento.

Di particolare rilievo negli studi della McKinsey sono la curva dei costi di abbattimento della CO₂ aggiornata alla versione 2.1 per tener conto della crisi economica (Fig. 11) e la stima della pendenza della curva di apprendimento per la CCS. Per quanto riguarda i costi delle diverse opzioni di abbattimento occorre dire che le valutazioni non solo sono molte e diverse ma soprattutto sono in divenire. Il valore della curva McKinsey non sta dunque nei valori assoluti dei costi per tonnellata di CO₂ abbattuta, quanto nei valori relativi alle diverse opzioni. Questi ultimi hanno ragionevolmente una dinamica inferiore e, pertanto, i rapporti tra i costi delle diverse opzioni sono da ritenersi ancora significativi a distanza di oltre quattro anni. Va anche detto però che le

⁵⁰ Il Rapporto è il McKinsey, 2008, *Carbon Capture & Storage: Assessing the Economics*, a cui fa seguito un Rapporto generale sui costi di abbattimento della CO₂: McKinsey, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*, aggiornato dal Rapporto McKinsey, 2010, *Impact of the financial crisis on carbon economics Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*

⁵¹ OECD IEA, 2011, *Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation*

⁵² Zero Emission Platform – ZEP, 2011, *The Costs of CO₂ Capture, Transport and Storage*

⁵³ Sotacarbo, 2011, *Techno-economic feasibility study and environmental performance analysis of a power generation plant with CCS system*

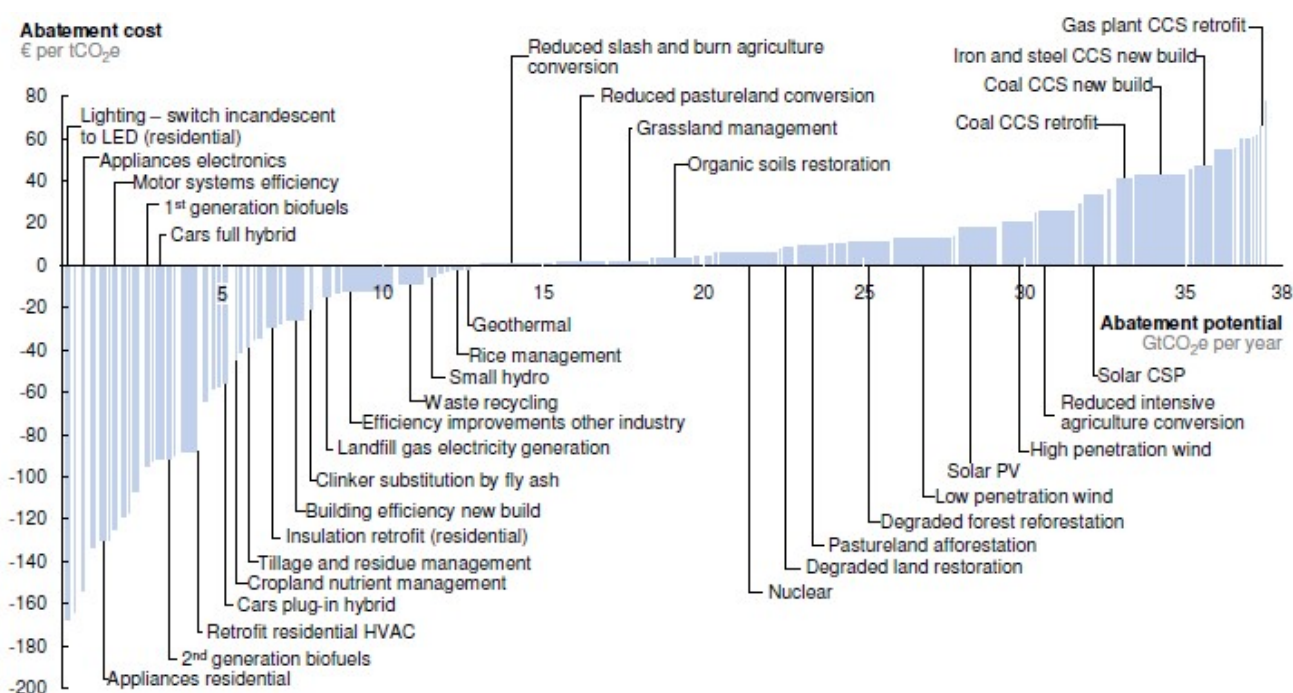


tecnologie più moderne ed innovative, se premiate dal mercato, sono quelle che evidenziano costi unitari decrescenti in maniera più marcata. Nella Fig. 7 le tecnologie CCS sono quelle con maggior potenziale di abbattimento del carbonio su base annua, ma sono anche quelle di costo unitario maggiore.

La curva dei costi presenta un elevato grado di frammentazione tra le singole opzioni di abbattimento, ma le conclusioni della McKinsey nel Rapporto 2009 (cit.) individuano tre grandi categorie di provvedimenti:

L'efficienza energetica, che ha una potenzialità di abbattimento di 14 GtCO₂eq per anno nel 2030, ha campo di applicazione ai veicoli, agli edifici e alle attrezzature industriali. Nel modello presentato, a pieno potenziale la crescita globale annua di domanda di energia elettrica si ridurrebbe in media nel periodo del 2,7% rispetto ad una *baseline* dell'1,5% circa.

Figura 7. Curva dei costi al 2030 di abbattimento della CO₂ al di sotto della tendenza business as usual. Versione 2.1 (fonte: McKinsey 2010)



Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €80 per tCO₂e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.
Source: Global GHG Abatement Cost Curve v2.1

La produzione di *energia a basso tenore di carbonio* ha una potenzialità di 12 GtCO₂eq all'anno nel 2030. Si tratta delle energie rinnovabili, dell'energia nucleare (peraltro ormai senza prospettive strategiche), della CCS e della sostituzione dei carburanti convenzionali per il trasporto con biocarburanti. A piena scala queste opzioni possono dare il 70% circa del consumo di elettricità entro il 2030 rispetto al solo 30% nel 2005 e i biocarburanti potrebbero alimentare fino al 25% dei consumi del trasporto globale.



Carbonio nei suoli, silvicoltura e agricoltura hanno una potenzialità di 12 GtCO₂eq all'anno nel 2030) arrestando la continua deforestazione tropicale, attuando il rimboschimento nelle aree marginali e sequestrando più CO₂ nei terreni attraverso la modifica delle pratiche agricole. Come abbiamo visto, si tratta anche di una opzione *carbon negative*. Le opportunità di sequestro del carbonio nei terreni sono però di natura temporanea, perché i pozzi potrebbero saturare entro il 2030 con l'esaurimento delle aree disponibili per la riforestazione.

Carbon Capture and Storage - CCS. La modellazione Mc Kinsey presuppone che questa tecnologia - in fase oggi di sviluppo precompetitivo - si rivelerà fattibile su larga scala, e scenderà a un costo da € 30 a € 45 per tCO₂eq in una prospettiva 2030. La CCS potrebbe avere un impatto significativo sulle emissioni, in quanto è l'unica tecnologia attualmente possibile che consente l'uso continuato di combustibili fossili per la generazione di potenza, mentre allo stesso tempo riduce le emissioni sostanzialmente. La CCS può essere utilizzato anche per abbattere le emissioni provenienti da fonti industriali puntuali di grandi dimensioni per ferro ed acciaio, prodotti chimici, cemento e raffinerie. Il Rapporto stima un potenziale combinato della CCS nella generazione elettrica e in questi settori industriali fino a 3,3-4,1 GtCO₂eq all'anno entro il 2030.

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*): include quindi approcci come la afforestazione e riforestazione a grande scala (AR), la 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 metodi 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 oceani⁵⁴.

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

Riforestazione ed afforestazione (AR). Sfrutta la fotosintesi clorofilliana, l'energia solare e l'acqua. Rimuove CO₂ dall'atmosfera per farne materiale da

⁵⁴ 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)



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 pressoché *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'altra opzione potrebbe essere quella di seppellire la biomassa in condizioni che impediscano 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 resta ancora 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 e tra tutti 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 dei quali



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 razionalizzazione⁵⁵ 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 che già assorbono grandi quantità di CO₂. Per di più, la conoscenza scientifica in materia è in sensibile 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 guida 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'anno⁵⁶.

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 sensibili alle ipotesi iniziali - alla praticabilità del percorso, ai fattori limitanti, ai costi e così via. Uno studio abbastanza recente⁵⁷ 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

⁵⁵ Royal Society, 2009, *Geoengineering the Climate*, The Royal Society, London

⁵⁶ N. Harris et al., 2012, *Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions*, *Science* 336 (6088):1573-1576

⁵⁷ T. Lenton, 2010, *The potential for land-based biological CO₂ removal to lower future atmospheric CO₂ concentration*, *Carbon Management*, 1:145-160



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 il flusso di CO₂ emessi annualmente per combustione di combustibili fossili su scala globale 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'anno⁵⁸. 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, devono essere considerata con cautela.

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 tutto il resto, comprese le interconnessioni tra i processi biologici in profondità e la biosfera.

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 limitato 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

⁵⁸ Si veda Socolow nel lavoro citato all'inizio di questa seconda parte



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, si può ottenere un ulteriore sequestro del carbonio, ma si potrebbe trattare di effetti a breve termine. Le emissioni indirette riguardano più direttamente l'uso di colture alimentari per fini energetici rispetto all'uso di biomassa lignocellulosica. Specie a rotazione breve (piante erbacee) e rifiuti hanno cicli di emissioni nette quasi-zero⁵⁹.

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 distanza⁶⁰.

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 particolare nello scenario *RCP 2.56*⁶¹

I rischi potenziali associati con la tecnologia BECCS sono legati a quelli connessi con la fornitura a monte della biomassa utilizzata, così come quelli derivanti dalla cattura, il trasporto e lo stoccaggio a lungo termine della CO₂ (*leakage*), che peraltro verrebbe, in caso di perdita, riconsegnata 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 biogeniche⁶².

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 successo⁶³. La BECCS ha un posto di rilievo negli

⁵⁹ I materiali qui discussi sono referenziati nell'IPCC AR5 WKG III, in particolare ai capitoli 7, 11, in particolare la sezione 11.13

⁶⁰ Di Pietro e Balash, 2012, *A Note on Sources of CO₂ Supply for Enhanced-Oil-Recovery Operations*, SPE Economics & Management, April 2012

⁶¹ Cfr. il Capitolo 6 e la Sezione 7.11 dell'IPCC AR5 WKG III (cit.)

⁶² Cfr. il paragrafo 11.13.3 dell'IPCC AR5 WKG III (cit.)

⁶³ Si vedano: Cao, Caldeira, 2012, *Atmospheric carbon dioxide removal: long-term consequences and commitment*, Environ. Res. Lett. 5 (2010) 024011 e Lenton, Vaughan,



scenari di mitigazione nel lungo periodo 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, le emissioni negative da BECCS possono compensare le emissioni residue in altri settori (soprattutto trasporti, ma anche agricoltura) nella seconda metà del 21° secolo⁶⁴.

Come illustra la Fig. 8, 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 dimensionato per iniettare 1 Mt CO₂/anno⁶⁵. Negli Stati Uniti abbiamo già citato che due impianti di produzione per fermentazione di etanolo sono attualmente integrati con la cattura di anidride carbonica, sono dotati di *pipeline* di trasporto, e la commerciano per l'EOR petrolifero in pozzi vicini ad una portata di circa 0,2 Mt CO₂/anno. In totale, ci sono 16 progetti globali BECCS in fase di esplorazione⁶⁶.

Il potenziale tecnico complessivo di stoccaggio è stimato dall'IPCC a circa 10 GtCO₂ all'anno sia per la gassificazione integrata a ciclo combinato (IGCC), che per la co-combustione (IGCC con co-gassificazione di biomassa), che per la gassificazione integrata della biomassa a ciclo combinato (BIGCC). Circa 6 GtCO₂ di stoccaggio di biodiesel sono basati sulla gassificazione e sintesi di Fischer-Tropsch (FT diesel), e 2,7 GtCO₂ per la produzione di biometano⁶⁷. Un altro studio stima che la capacità potenziale (simile al potenziale tecnico) può essere allocabile tra 2.4 e 10 GtCO₂ all'anno per il 2030–2050⁶⁸. Il potenziale economico, ad un prezzo di mercato della CO₂ di circa 70\$/t, è stimato essere da 3,3 a 0,8 GtCO₂ nei casi giudicati con più alto potenziale economico (Koornneef, cit.). I potenziali sono valutati su uno specifico percorso e non si

2009, *The radiative forcing potential of different climate geoengineering options*, Atmos. Chem. Phys., 9, 5539–5561

⁶⁴ Cfr. il Capitolo 6, Sezioni 6.3.2 e 6.3.5, dell'IPCC AR5 WKG III (cit.)

⁶⁵ Si vedano: Gollakota, McDonald, 2012, *CO₂ capture from ethanol production and storage into the Mt Simon Sandstone*, Greenhouse Gases: Science and Technology, Volume 2, Issue 5, pagg.346–351; e Chugunova et al. , 2013, *Reducing Uncertainty in Reservoir Model Predictions: from Plume Evolution to Tool Response*, Energy Procedia, Volume 37, 2013, pagg. 3687–3698

⁶⁶ Biorecro, *Global Status of BECCS Projects 2010*

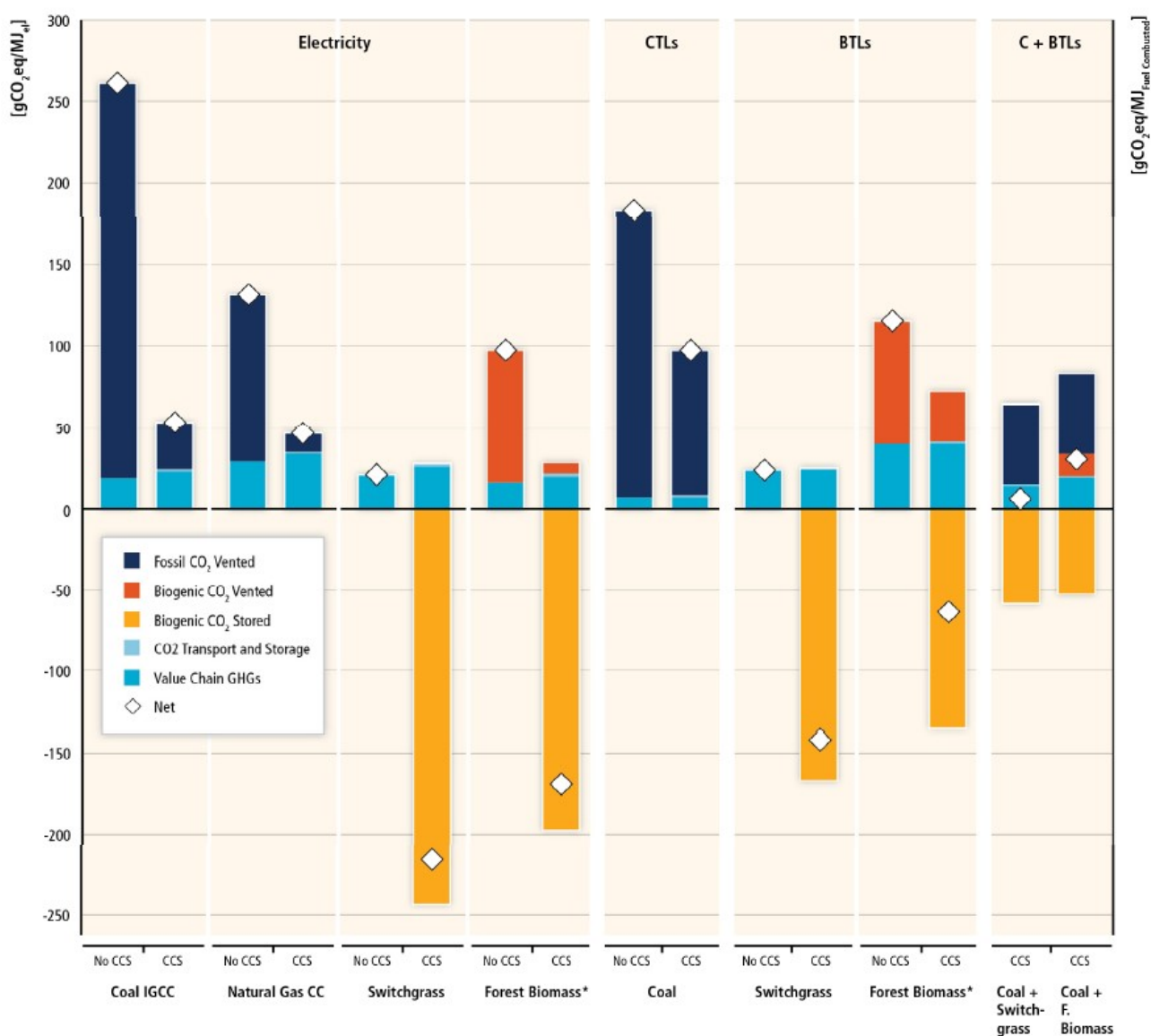
⁶⁷ Koornneef J. et al., 2012, *Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050*, International Journal of Greenhouse Gas Control 11, 117–132.; e 2013, *Global Potential for Biomethane Production with Carbon Capture, Transport and Storage up to 2050*, GHGT-11 37, 6043–6052

⁶⁸ McLaren D., 2012, *A comparative global assessment of potential negative emissions technologies*, Special Issue: Negative emissions technology, 90, 489–500 pp.



possono semplicemente sommare, in quanto i relativi scenari sono in alternativa e possono sovrapporsi l'un l'altro.

Figura 8. Illustrazione della somma delle emissioni in CO₂eq che si generano nella 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 ed erbacea, 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. Le unità usate sono gCO₂eq/MJ_{el} (energia elettrica a sx); gCO₂eq/MJ bruciata (trasporti combustibili a dx). Le emissioni di CO₂ dirette da conversione dell'energia ('ventilato' e 'conservato') sono ricavate 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 estrazione mineraria e coltivazione, dai trasporti, ecc) sono ricavati dalla letteratura (fonte: IPCC AR5 WKG III Sezione 11.13.4)



Una misura di valore concreto e pratico potrebbe non superare di molto i 2,4 GtCO₂ ogni anno per un mercato del carbonio di 70–250 US\$/t CO₂ (McLaren, cit.). Complessivamente, fino al 2050, il potenziale economico è ovunque tra 2



e 10 GtCO₂ all'anno. Alcuni scenari di stabilizzazione climatica prevedono uno spiegamento notevolmente maggiore della tecnologia verso la fine del secolo, anche in alcuni scenari intermedi di 580–650 ppm, che sono calcolati con diverse scale temporali, ipotesi socio-economico, portafogli tecnologici, prezzi della CO₂ e la BECCS pianificata come parte di un generale quadro di mitigazione (IPCC AR5 WG3, cit.).

I possibili rischi climatici della BECCS riguardano la riduzione degli *stock* di carbonio nei suoli, gli importi possibili di produzione di biomassa, l'aumento delle emissioni di N₂O e, ovviamente, le potenziali perdite della CO₂ stoccata in serbatoi geologici profondi. Inoltre le ipotesi di disponibilità di spazi sufficienti, adatti alla cattura CCS, di reti di gasdotti e di infrastrutture per lo stoccaggio della CO₂ sono ancora oggetto di indagine. C'è un generale accordo nella letteratura tecnica sul fatto che tanto la BECCS quanto la stessa CCS sono fortemente dipendenti dagli incentivi finanziari, senza i quali non sono costo competitive, particolarmente nelle fasi iniziali.

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 bioenergie⁶⁹. Tuttavia, l'AR5 ritiene di dover reintervenire sulla questione proprio perché molti degli scenari di mitigazione più stringenti, mirati alle concentrazioni da 450 ppm fino anche a 550 ppm di CO₂eq a fine secolo, 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 importanti 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, dai ritmi di produzione, dal tipo di terreni utilizzati (foreste, praterie, terreni marginali o *set-aside*, terreni a coltura agricola), dai *modelli di business* e dalle pratiche adottate – a seconda che esse si integrino o modifichino sostanzialmente l'utilizzazione tradizionale del suolo.

⁶⁹ IPCC, 2011, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, SRREN, cap. 2, Bioenergy



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 ambientali⁷⁰. Studi pubblicati 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. A titolo di esempio, il Rapporto IPCC SRREN 2011 riferiva potenzialità tecniche globali bioenergetiche di 50-500 EJ/anno per l'anno 2050. La valutazione dello IIASA nel *Global Energy Assessment* ha stimato un intervallo tra 160 e 270 EJ/anno⁷¹. La discussione che ha fatto seguito alla pubblicazione di questi studi globali non ha però 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.

Quanta biomassa per usi energetici sarebbe (tecnicamente) disponibile in futuro dipende da una pluralità di fattori sociali, politici ed economici, ad esempio, la regolamentazione del possesso della terra, il commercio, e la tecnologia adottata⁷². La Fig. 9 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, 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. Fanno eccezione alcuni modelli che portano a stime superiori ai 500 EJ/anno.

Il Rapporto IPCC AR5 (cit.) 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 9, il

⁷⁰ Batidzirai, Smeets and Faaij, 2012, *Harmonising bioenergy resource potentials – Methodological lessons from review of state of the art bioenergy potential assessments*, Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, Issue 9, pagg. 6598–6630

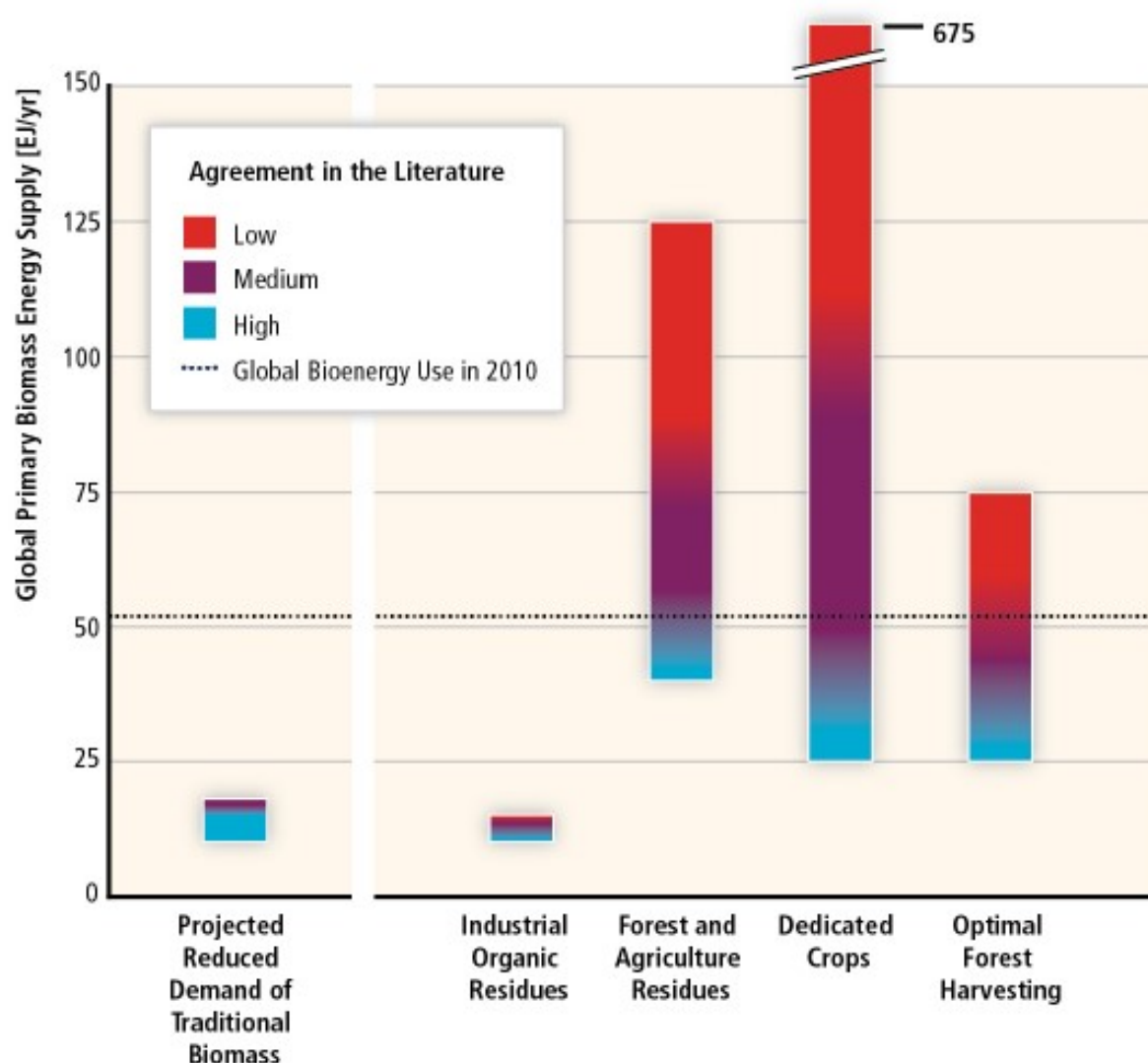
⁷¹ IIASA, 2012, *Global Energy Assessment Toward a Sustainable Future*

⁷² Dornburg et al., 2010, *Bioenergy Revisited: Key Factors in Global Potentials of Bioenergy*, Energy Environ. Sci., 2010, 3, pagg. 258-267



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.

Figura 9. 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, ridurre la domanda di biomassa tradizionale e aumentarne l'efficienza d'uso potrebbe risparmiare le biomasse per altri scopi energetici con grandi benefici secondo una prospettiva di sviluppo sostenibile (Fonte: IPCC AR5 WKG III)



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.

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 causato 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 e lo stoccaggio del carbonio in risposta ai cambiamenti nella gestione e nella raccolta forestale dipendono dalla natura dell'ecosistema forestale, come dalla forma storica della gestione della foresta e da 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 i 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 assorbitori (*sink*) del carbonio in molte regioni OCSE, purtroppo temporanei 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 **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.

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, i rifiuti e i liquami adatti 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 può limitare il potenziale di queste risorse.

Piantagioni di biomassa dedicate sono specie annuali (cereali, olio, zucchero) e colture a piante perenni (il *Panicum virgatum*, 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.

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%

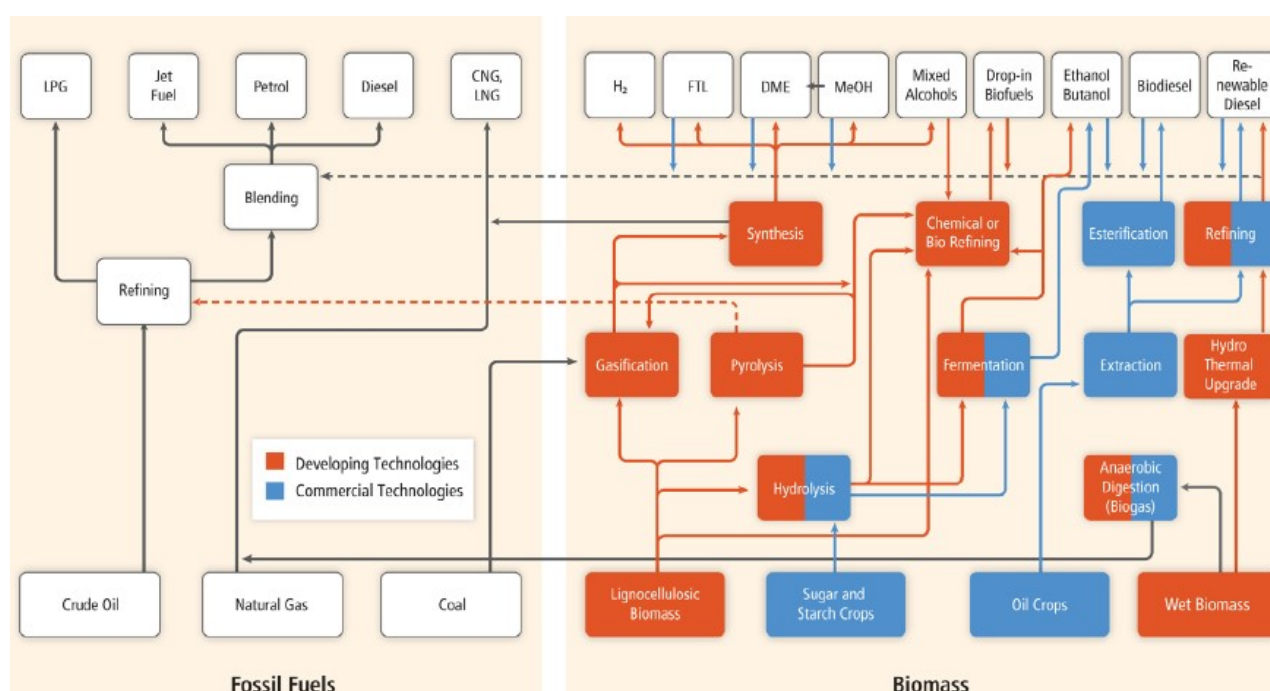


dell'uso corrente di bioenergia (≈ 35 EJ/anno) per soddisfare le esigenze di cottura di circa 2,6 miliardi di persone. L'uso tradizionale della bioenergia copre diversi usi finali, tra cui la cucina, l'acqua, il riscaldamento degli ambienti, e le piccole industrie (come mattoni e ceramica forni, panetterie, 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 possono 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 raggiungano 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 consumata in modalità non sostenibili con il degrado delle foreste e la deforestazione. Studi nazionali dettagliati hanno stimato una frazione di biomassa non rinnovabile da 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 utilizzata per altri scopi energetici, ma semplicemente non consumata per contribuire a ripristinare gli ecosistemi locali.

Figura 10. Modalità a confronto di produzione energetica fossile e da biomassa

(fonte: IIASA GEA, cit.)





CONCLUSIONI

L'adozione di una qualche forma di emissioni negative CO₂ negli scenari di mitigazione massima, soprattutto quelli che portano le concentrazioni dei GHG al 2100 intorno alle 450 ppmv equivalenti di CO₂, può effettivamente svolgere un ruolo utile nei percorsi di trasformazione del modello di sviluppo.

Le tecniche CDR (*Carbon Direct Removal*) mirano a ridurre le concentrazioni di CO₂, e potenzialmente di altri gas a effetto serra. Una definizione ampia di CDR comprende l'afforestazione e la BECCS (*Bio Energy CCS*), che a volte sono classificate come tecniche di mitigazione, ma anche altre tecniche che sono molto distanti dalla maturità tecnica, abbisognano di ulteriore conoscenza scientifica, e comportano rischi ambientali come nel caso della fertilizzazione dell'oceano con il ferro. Le prime sono spesso incluse nei modelli climatici integrati attuali e negli scenari da essi derivati e sono, in termini di impatto sul clima, direttamente confrontabile con le tecniche di mitigazione convenzionali, in particolare la CCS e l'uso della bio-energia. Sia la BECCS che il rimboschimento possono giocare un ruolo fondamentale nel raggiungimento di concentrazioni basse di gas serra, ma su larga scala hanno notevoli esigenze di utilizzazione del territorio che possono entrare in conflitto con altre strategie di mitigazione e con esigenze imprescindibili della società come la produzione alimentare.

Se altre tecniche CDR saranno in grado di dare contributi alla mitigazione a qualsiasi scala significativa in futuro dipende dall'efficacia, dai costi e dai rischi di queste tecniche, che restano incerti. Gli impatti del CDR sono comunque relativamente lenti e gli effetti sul clima si evidenzerebbero nel corso dei decenni.

A differenza del CDR, le tecniche di georingegneria SRM (*Solar Radiation Management*) avrebbero lo scopo di raffreddare il clima schermando la luce del sole senza ridurre le concentrazioni di gas serra, e quindi senza porre rimedio alle conseguenze come l'acidificazione degli oceani. Alcune proposte SRM potrebbero potenzialmente assicurare un raffreddamento molto più rapido della mitigazione convenzionale o del CDR, ed alcuni studi suggeriscono che i costi potrebbero essere notevolmente inferiori SRM. Ma gli SRM possono indebolire il ciclo idrologico globale con conseguenze sulle precipitazioni regionali e l'idrologia superficiale, modificare la stagionalità e la variabilità del clima. Gli approcci SRM possono anche portare significativi effetti collaterali nonclimatici. Ad esempio, l'iniezione di aerosol di solfato modificherebbe la chimica della stratosfera, ridurrebbe i livelli di ozono e cambierebbe l'aspetto del cielo. I rischi sollevano una serie di questioni etiche e politiche che al momento è difficile pensare di poter affrontare.



Queste brevi conclusioni, connesse alle argomentazioni comuni a tutti gli scenari più autorevoli riproposti in questo studio ci portano a conclusioni incontrovertibili. La popolazione terrestre e la domanda di energia continueranno a crescere. Tecnologie non più avveniristiche come la produzione di energia elettronucleare sono ormai tramontate. Il cambiamento climatico, è ormai dimostrato ed accettato, ha origini antropogeniche ed in particolare energetiche. I combustibili fossili continuano ad essere la fonte principale delle emissioni di gas serra. La soluzione va dunque trovata nel risparmio energetico, nelle fonti rinnovabili e nelle pratiche agricole corrette e sostenibili.

C'è un periodo di sovrapposizione futura tra il *phase-out* dei combustibili fossili e il consolidamento della transizione verso il nuovo modello di sviluppo sostenibile. Un periodo che impegna proprio gli anni centrali di questo secolo. Per questo periodo la tecnologia CCS si propone come opzione sicura per l'abbattimento delle emissioni di gas serra da combustibili fossili. Con una affermazione *cost-effective* della CCS, delle energie rinnovabili, e delle bioenergie si potrà porre beneficamente mano all'integrazione di queste tecniche, sequestrando e stoccando il carbonio prodotto dai biocombustibili (BECCS). Si potrà così combattere l'ultima fase della lotta ai cambiamenti climatici sottraendo carbonio dall'atmosfera e dagli oceani, in vista della agognata stabilizzazione delle concentrazioni di GHG in atmosfera e della temperatura della terra a fine secolo.