

# Innovazione tecnologica, scarsità relativa, investimenti

## 1.2.1 Innovazione ed efficienza d'uso delle risorse: fatti stilizzati

Sul piano empirico, l'operare dell'innovazione tecnologica per l'uso e lo stoccaggio delle risorse viene generalmente rappresentato attraverso indicatori di intensità o efficienza, che esprimono l'evoluzione dell'uso delle risorse in rapporto a variabili quali popolazione e PIL. L'evoluzione temporale di tali indicatori tende a segnalare un disaccoppiamento, vale a dire una decrescente intensità di energia/emissioni dell'attività economica, ossia una crescente efficienza/produttività nell'uso delle risorse.

Tali regolarità hanno portato alla definizione di fatti stilizzati sulle relazioni tra efficienza e crescita economica che sono noti come *curve di Kuznets ambientali* (Stern, 2004), a causa della loro somiglianza con le regolarità individuate da Simon Kuznets (1955) nelle relazioni di lungo periodo tra crescita economica e distribuzione del reddito.

L'importanza di tali indicatori risiede altresì nel fatto che organismi internazionali e alcune istituzioni nazionali li utilizzano anche per valutare l'efficacia delle politiche energetico-ambientali e delle strategie di sostenibilità (IEA, 1997, 2001a,b; OECD, 2002; DEFRA/DTI, 2003; EEA, 2003).

Inoltre, alcuni paesi tendono ad adottare target di intensità/efficienza per importanti politiche, ad esempio il target di intensità di emissioni in rapporto al PIL, adottato dagli Stati Uniti nella propria politica del clima in alternativa al target sui livelli di emissione adottato dal Protocollo di Kyoto.

Le interpretazioni economiche dei meccanismi di innovazione sottostanti i progressi sintetizzati dagli indicatori di efficienza rimangono comunque aperte e complesse, proprio mentre cresce la domanda di ulteriori sostanziali progressi nell'efficienza stessa. In questo capitolo si indagherà sulle evidenze empiriche nella

dinamica di medio e lungo periodo di questi indicatori e ne sarà discusso il loro significato; verranno sviluppate alcune analisi sul possibile ruolo dei fattori economici, in particolare i prezzi e i mercati delle risorse, e di quelli istituzionali, in particolare le politiche del clima, nell'innescare e sostenere progressi di efficienza d'uso delle risorse energetiche.

### Indicatori di disaccoppiamento e curve di Kuznets ambientali: significato e limiti

Facendo riferimento a uno schema di tipo  $I=P \cdot A \cdot T$ ,<sup>1</sup> l'impatto totale (per es., il consumo di energia) rappresentato dalla variabile  $I$ , può essere espresso come il risultato (assunto moltiplicativo) degli impatti della popolazione  $P$ , della *affluence*  $A$ , ossia del livello di sviluppo misurato dal PIL *pro capite*, e dell'impatto per unità di attività economica, vale a dire  $I/PIL$ , come indicatore della tecnologia del sistema,  $T$ . In tale formulazione, il modello è un'identità contabile, utile per analisi di scomposizione del ruolo relativo di  $P$ ,  $A$ , e  $T$  per l'evoluzione di  $I$  nel tempo o per il suo diverso livello tra paesi.

Il significato di  $P$  e  $A$  come fattori, generalmente crescenti, di pressione sugli impatti è immediato, mentre  $T$  è un indicatore di intensità, che misura quante 'unità di impatto' sono richieste da un sistema economico (o da un settore) per produrre un'unità (un euro) di PIL. È quindi un coefficiente tecnico che, se riferito al sistema, rappresenta l'efficienza di quest'ultimo nell'utilizzo di una data risorsa ed esprime lo stato medio della tecnologia. Se  $T$  decresce nel tempo indica un guadagno di efficienza, e può essere direttamente considerato come un indicatore di disaccoppiamento tra attività economica e uso delle risorse.

<sup>1</sup> A partire dalla formulazione di Ehrlich (1971), molte varianti dello schema sono state utilizzate per studiare la dinamica delle risorse globali, in particolare in relazione alla popolazione.

In uno schema di tipo *IPAT*, tre aspetti dell'analisi di disaccoppiamento e delle curve di Kuznets emergono con chiarezza. Innanzitutto, guardare solo alla dinamica di  $T$  può dare indicazioni fuorvianti sul ruolo risolutivo dell'innovazione tecnologica per i problemi delle risorse. La diminuzione di  $T$  può essere forte, ma  $I$  può essere stabile o aumentare se la crescente efficienza non è sufficiente a compensare l'effetto di scala determinato dall'aumento di  $P$  e di  $A$ . Può verificarsi anche il contrario in fasi in cui la debolezza della crescita economica (diminuzione di  $A$ ) comporta una diminuzione di  $I$  ma non di  $T$ , come è accaduto nell'Europa dell'Est e in Russia all'avvio della 'transizione al mercato' negli anni Novanta. Quindi, una diminuzione di  $I$  è sempre un segnale positivo per le risorse, ma può non essere il risultato di un guadagno strutturale di efficienza specifica nell'uso delle risorse (cioè in  $T$ ), mentre una diminuzione di  $T$  indica sempre un guadagno strutturale di efficienza, ma non significa necessariamente che l'utilizzo totale delle risorse (cioè  $I$ ) sia in diminuzione. L'ambiguo significato delle diminuzioni di  $T$  è rilevante nel caso delle emissioni globali di gas serra, per le quali  $T$  diminuisce (aumenta l'efficienza) ma  $I$  continua ad aumentare. Per esempio la politica del clima degli Stati Uniti adotta un target sull'intensità di emissioni del PIL, cioè un target su  $T$ , a differenza del target sul livello di emissioni, cioè  $I$ , adottato dal Protocollo di Kyoto, ma una politica efficace per la diminuzione di  $T$  non garantirà anche la diminuzione di  $I$ , cioè la variabile più importante dal punto di vista ambientale.

In secondo luogo, anche se una riduzione di  $T$  indica che qualcosa di positivo avviene nel sistema, essa deve essere spiegata in termini tecnologici ed economici. Nello schema *IPAT*, si assume che le variabili  $P$ ,  $A$  e  $T$  siano indipendenti tra loro. In realtà, la dinamica dei sistemi economici mostra che le tre variabili sono interdipendenti, attraverso un insieme di causazioni dirette e indirette e, nel medio-lungo periodo, di retroazioni dinamiche. Per esempio, l'evidenza suggerisce che la dinamica della popolazione ( $P$ ) dipende in parte dalla dinamica del reddito *pro capite* ( $A$ ) e, in un certo grado, viceversa.<sup>2</sup> Relazioni e retroazioni simili emergono anche per  $T$ , la cui dinamica può dipendere dal PIL (*pro capite*) e viceversa, se  $T$  è riferito a una risorsa chiave come l'energia. Inoltre, la dinamica di  $I$  stesso può influenzare quella di  $T$ , se la scarsità segnalata dall'impatto stimola, attraverso i mercati (prezzi relativi) o le politiche, processi di invenzione, innovazione tecnologica, diffusione di tecnologie che si riflettono in efficienza specifica per l'uso della risorsa. In pratica, una diminuzione di  $T$  riflette una complessa combinazione di micro e macro processi economici e tecnologici, inclusi feedback dinamici, che sono di natura eterogenea, non deterministica e parzialmente endogena, sulla cui spiegazione ci soffermeremo nel resto di questa analisi.

In terzo luogo, le curve di Kuznets ambientali (EKC, Environmental Kuznets Curves) riguardano esattamente alcune delle relazioni che abbiamo ora segnalato, per esempio, tra  $I$  e PIL o tra  $T$  e PIL (*pro capite*), ma, sebbene possano fornire regolarità empiriche di grande interesse euristico, esse non esauriscono il problema di una soddisfacente spiegazione economica. L'ipotesi suggerita dalle EKC è, in breve, che una relazione a U rovesciata tra consumo di risorse e PIL *pro capite* può essere documentata per un certo numero di risorse, inquinanti e fonti di energia. Il consumo (di energia) o le emissioni (di inquinanti) dapprima crescono in corrispondenza di livelli di sviluppo economico relativamente bassi, poiché prevale un effetto di scala determinato da  $P$  e  $A$ , e quindi tendono a diminuire in modo più o meno proporzionale a più elevati livelli di sviluppo economico, disaccoppiandosi dal PIL *pro capite*, per il prevalere di un effetto di efficienza determinato da  $T$ .<sup>3</sup> In modo simile al suo riferimento kuznetsiano per la distribuzione del reddito, l'ipotesi non deriva da un modello teorico, ma da una intuizione originata e supportata dall'indagine empirica. Solo recentemente alcuni contributi hanno cercato di collocare l'ipotesi EKC in modelli formalizzati (Andreoni e Levinson, 2001; Chimeli e Braden, 2005).

Non siamo interessati in questa sede alla formalizzazione teorica e alle diverse formulazioni delle EKC. Notiamo solamente che se la formulazione riguarda una relazione tra  $I$  e PIL (*pro capite*), allora l'analisi delle EKC fornisce le stesse informazioni dell'analisi di  $T$ . Inoltre, se vi è una formulazione EKC tra  $I$  e PIL (*pro capite*), occorre che ve ne sia una anche tra  $T$  e PIL, poiché  $P$  e PIL sono, con qualche eccezione, sempre crescenti nel medio-lungo periodo, e quindi deve esservi stato disaccoppiamento a qualche livello del PIL. Invece, se vi è una formulazione delle EKC tra  $T$  e PIL (*pro capite*), non necessariamente ve n'è una tra  $I$  e PIL, poiché  $P$  e PIL possono avere spinto  $I$  più di quanto la diminuzione di  $T$  è stata capace di compensare. È questo il caso, per esempio, delle emissioni globali di CO<sub>2</sub> (v. oltre).

Il limite principale rimane che, individuando solo il PIL (*pro capite*) come principale variabile esplicativa, l'analisi delle EKC soffre delle stesse limitazioni dell'analisi del disaccoppiamento, o di  $T$ , ma con un rischio addizionale. L'evidenza empirica derivante dalle EKC potrebbe infatti fornire la fuorviante indicazione che una

<sup>2</sup> Per un rassegna delle differenti posizioni degli economisti circa l'effetto positivo o negativo della popolazione sulla crescita economica: Zoboli, 1996.

<sup>3</sup> Per una presentazione delle EKC con una discussione delle principali ipotesi ed evidenze empiriche: De Bruyn *et al.*, 1998. Estese rassegne della letteratura sono presentate in: Dasgupta *et al.*, 2002; Dinda, 2004; Stern, 2004.

rapida crescita verso livelli elevati di PIL *pro capite* conduce automaticamente all'efficienza nell'uso delle risorse, e quindi la migliore politica per ridurre l'impatto sull'ambiente è la crescita economica. Tuttavia, lo schema *IPAT* indica che la crescita del PIL (*pro capite*) comporta, di per se stessa, un effetto di scala sul consumo di risorse e sulle emissioni per ogni livello di  $T$  e  $P$ .

In generale, solo se l'effetto negativo della crescita del PIL (*pro capite*) su  $T$  è stabilmente più elevato del suo effetto positivo su  $I$ , il processo di crescita economica può condurre a una diminuzione assoluta di  $I$ , assumendo come dato l'effetto della crescita di popolazione.<sup>4</sup> Ciò è di rilievo per il consumo di energia e le emissioni di gas serra a livello globale, in presenza di una rapida crescita di popolazione e reddito nei paesi in via di sviluppo. L'elasticità negativa di  $T$  rispetto alla crescita del PIL *pro capite* dovrebbe essere molto elevata nel prossimo futuro, data l'esperienza di un  $T$  stazionario o addirittura crescente in molti di questi paesi, al fine di evitare una possibile *catastrofe di scala* dovuta alla dinamica del reddito e della popolazione. In definitiva, anche se la relazione tra crescita economica ed efficienza è un importante fatto stilizzato, la crescita economica rimane solo una spiegazione implicita dell'efficienza ambientale e non elimina la necessità di esplicite strategie di miglioramento di  $T$  attraverso specifiche innovazioni.

### Tendenza degli indicatori e analisi empiriche

Gli indicatori di intensità/efficienza energetica e di emissioni da fonti energetiche (ovvero  $T$  nello schema precedente) sono monitorati da anni da diversi organismi internazionali (come la IEA, International Energy Agency), agenzie nazionali (come il DOE, Department of Energy, statunitense) e altre fonti. Le tendenze che emergono sono, a fronte di un consumo di energia in continuo aumento, quelle di una intensità energetica sul PIL (fonti primarie) ancora crescente solo nei paesi a basso sviluppo ma in rapida crescita, e decrescente invece nella generalità degli altri paesi.

In prospettiva storica, il consumo di energia primaria per unità di PIL era già decrescente alla fine del 19° secolo nel Regno Unito, e dagli anni Venti e Trenta del 20° secolo negli Stati Uniti, in Germania e in Francia. Nel caso dell'Italia, il ritardo di industrializzazione ha condotto a una intensità energetica sul PIL crescente, anche se strutturalmente bassa rispetto ad altri paesi, fino agli anni Cinquanta e quindi a un'intensità decrescente da allora a oggi. A partire dagli anni Settanta, in concomitanza con gli *oil shocks*, tali tendenze si sono ulteriormente rafforzate e diffuse a tutti i paesi avanzati. In Germania, per esempio, il PIL reale è cresciuto del 50% tra il 1970 e i primi anni Novanta, mentre il consumo di energia primaria è rimasto pressoché costante.

Il declino delle intensità energetiche per le fonti primarie coinvolge da tempo anche numerosi paesi in via

di sviluppo ancora nelle prime fasi di industrializzazione. In Cina, per esempio, nonostante una formidabile crescita della domanda di energia, le riforme della fine degli anni Settanta, orientate verso un aumento dei prezzi energetici, hanno condotto l'intensità energetica del prodotto nazionale a diminuire del 50% tra il 1980 e la fine degli anni Novanta (Zhang, 2000).

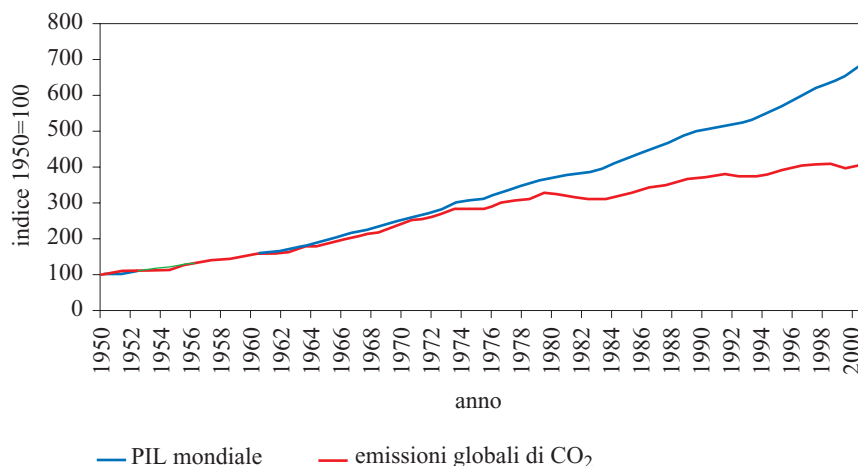
Numerosi lavori hanno indagato i fattori generali e specifici della diminuzione nel tempo delle intensità energetiche. In generale, la diminuzione nei singoli paesi avanzati è da attribuire alla combinazione di: cambiamenti del mix settoriale della struttura produttiva, in particolare un peso relativo decrescente di settori intensivi di energia, che riflette anche il mutamento nella divisione del lavoro tra paesi su scala globale; sostituzione tra fonti e cambiamento del mix energetico con effetti di maggior rendimento economico per un dato consumo energetico complessivo; innovazioni tecnologiche specifiche di risparmio ed efficienza energetica.

Il declino dell'intensità energetica dell'output ha comportato una parallela diminuzione dell'intensità di emissioni di CO<sub>2</sub> in rapporto al PIL, che è stata amplificata da una *decarbonizzazione* del consumo di energia con il passaggio continuo a fonti con minori emissioni specifiche. Negli Stati Uniti, l'intensità di carbonio del consumo di energia primaria è diminuito dello 0,25% annuo dal 1800, mentre la corrispondente diminuzione è stata dello 0,3% su scala globale dal 1850 (Gruebler *et al.*, 1999).

Tali processi di efficienza si sono accentuati decisamente dopo gli anni Settanta, quando il forte aumento dei prezzi, determinando una diffusa percezione di scarsità energetica, ha portato all'adozione di strategie tecnologiche e di politiche favorevoli al risparmio di energia (Martin, 1990; Casler e Afrasiabi, 1993; Rosenberg, 1994, 1996). In alcuni casi, la decrescente intensità e la maggiore efficienza energetica derivano da innovazioni non specifiche, come il cambiamento del regime dei materiali in alcuni settori che, attraverso la leggerezza e la dematerializzazione, comporta minori fabbisogni energetici a parità di funzione. A tale riguardo, sviluppi simili verso una maggiore efficienza d'uso in rapporto al PIL si sono manifestati per la maggior parte dei materiali industriali. Nel caso dei minerali e dei metalli, per esempio, per i quali storicamente coesistevano materiali con intensità d'uso crescenti e decrescenti rispetto al PIL, gli anni Settanta hanno rappresentato un punto di svolta e il declino dell'intensità d'uso

<sup>4</sup> Più precisamente, se  $I=f(P,A,T)$ , dove  $A$  è un indicatore di sviluppo economico, con  $\partial I/\partial A$ ,  $\partial I/\partial P$ ,  $\partial I/\partial T > 0$ , e  $T=g(A)$ , con  $dT/dA < 0$ , allora la derivata totale di  $I$  rispetto ad  $A$  sarà negativa se  $\partial I/\partial A < \partial I/\partial T \cdot dT/dA$ , ovvero se l'effetto diretto positivo di  $A$  su  $I$  è minore dell'effetto negativo di  $A$  su  $T$ , dato l'effetto di  $T$  su  $I$ .

**fig. 1.** Dinamica del PIL reale mondiale e delle emissioni di CO<sub>2</sub> da fonti fossili.



su scala globale si è esteso a quasi tutti i metalli (Tilton, 1989; Considine, 1991; Labson e Cropton, 1993; Fortis, 1994). Verso la fine degli anni Novanta vi è stato un rallentamento del declino dell'intensità energetica in numerosi paesi, riconducibile in prima approssimazione al declino dei prezzi reali delle fonti fossili, ma senza un rovesciamento delle tendenze di fondo verso una maggiore efficienza (v. oltre).

Anche se tali evidenze stimolano l'idea che esista una curva di Kuznets per l'energia, le analisi sulle EKC sono state indirizzate soprattutto alle emissioni inquinanti e all'effetto serra, in connessione con le politiche per il cambiamento climatico. Le prime ricerche sulle relazioni tra emissioni atmosferiche e reddito, in cerca di una curva di Kuznets, sono dei primi anni Novanta (Holtz-Eakin e Selden, 1992; Ten Kate, 1993; Grossman e Krueger, 1994; Selden e Song, 1994). Sono seguiti numerosi lavori che hanno dibattuto gli aspetti statistico-econometrici e di interpretazione economica delle curve di Kuznets ambientali (Yandle *et al.*, 2002), mettendo progressivamente in discussione la solidità delle evidenze empiriche.<sup>5</sup>

Nel caso delle emissioni di CO<sub>2</sub> da fonti fossili, le tendenze di disaccoppiamento derivanti dallo sviluppo economico sono state studiate per molti singoli paesi e su scala globale, fornendo tuttavia risultati non univoci a causa del ridotto orizzonte temporale considerato, o del fatto che si tratta di dati *cross country* per un numero limitato di anni. Una prospettiva di lungo o lunghissimo periodo, come quella presentata nella **fig. 1**, offre invece indicazioni chiare, almeno su scala globale. Essa mostra che le emissioni di CO<sub>2</sub> da fonti fossili sono disaccoppiate dal PIL globale a partire dagli anni Settanta, riflettendo i cambiamenti strutturali avvenuti per l'energia. Le emissioni continuano tuttavia a crescere e si tratta quindi di un 'disaccoppiamento relativo', vale a dire una diminuzione di intensità invece che una diminuzione assoluta, a causa dell'operare degli altri macrofattori, cioè popolazione e reddito reale *pro capite*, che

l'aumento di efficienza non riesce a compensare. Seppure in modo differenziato, è quello che sta accadendo nella maggior parte dei singoli paesi.

Le **figg. 2 e 3** mostrano gli stessi fenomeni in una prospettiva di lunghissimo periodo, dal 1870 al 2000, in termini di curve di Kuznets.<sup>6</sup> Le emissioni continuano a crescere all'aumentare del PIL reale mondiale, seppure in modo decrescente, e quindi non esiste una curva di Kuznets per i livelli di emissione. Tale curva sembra esistere invece per l'intensità di emissione che presenta un andamento approssimativamente a U rovesciata rispetto al PIL reale, come predetto dalla teoria. Se l'efficienza rappresenta lo stato della tecnologia, le innovazioni e i cambiamenti strutturali dei sistemi economici hanno avuto negli ultimi cinquanta anni effetti continui e potenti, ma questi ultimi sono ancora inadeguati rispetto alla domanda di innovazione necessaria alla stabilizzazione o alla diminuzione delle emissioni.

<sup>5</sup> Per alcuni fenomeni ambientali, come la produzione di rifiuti, non vi è evidenza di progressi in linea con una curva di Kuznets (Mazzanti e Zoboli, 2005a).

<sup>6</sup> Nelle figg. 2 e 3, i dati sulle emissioni da fonti fossili sono quelli prodotti dal CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center). I dati sul PIL sono tratti dal database dell'OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). I dati resi disponibili dall'OECD sul PIL reale mondiale sono stime puntuali di Angus Maddison per gli anni 1870, 1900, 1913 e serie temporali dal 1950 al 2000. I dati negli intervalli 1871-1899 e 1901-1912 sono nostre estrapolazioni basate sull'assunzione di un tasso annuo di crescita medio costante tra i due anni disponibili. I dati per il periodo 1914-1949, data l'instabilità dell'economia mondiale nel periodo e quindi il non realismo di un tasso di crescita costante, sono nostre stime. È stato in tal sede assunto che il PIL mondiale sia proporzionale, in ogni anno dell'intervallo, al PIL totale di un insieme di 44 paesi nel database di Maddison che rappresentano il 68% del PIL mondiale nel 1913 e il 71% nel 1950. Si noti che gli stessi paesi, tra cui tutti i maggiori industrializzati, rappresentano tra il 68% e il 71% del PIL mondiale anche per tutto il periodo 1950-2000.

## 1.2.2 I meccanismi dell'innovazione tecnologica per l'energia e l'ambiente

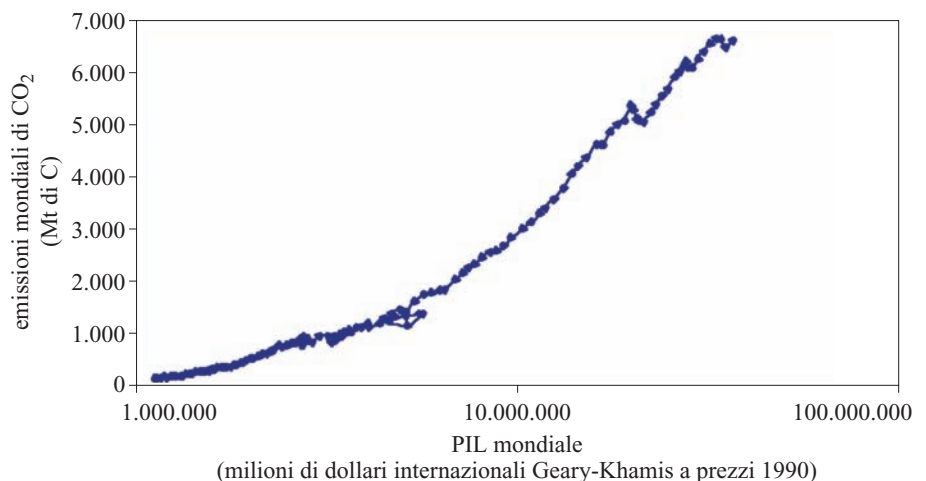
Le tendenze degli indicatori sopra considerati segnalano l'operare dell'innovazione per le risorse naturali, ma offrono una spiegazione solo implicita dei meccanismi con cui l'innovazione stessa emerge e opera. Se, da un lato, anche l'innovazione per l'energia e le emissioni risponde ai normali meccanismi dell'innovazione (Malerba, 2000), dall'altro lato essa riguarda l'uso di risorse scarse, e risponde quindi al modello di *scarsità innovativa* delineato nel cap. 1.2. In particolare, essa è influenzata da: *a*) segnali specifici di scarsità relativa emergenti dai mercati e dai prezzi che possono condurre a innovazioni; *b*) le numerose politiche pubbliche adottate da tutti i paesi per questi settori; *c*) dinamiche macroeconomiche e cambiamenti strutturali dei sistemi economici; *d*) innovazioni generali in altri campi. A loro volta, i processi innovativi per le risorse influenzano, in qualche misura, tutti questi ambiti.

Sul ruolo dei mercati e prezzi nell'innovazione è in corso una riscoperta dell'ipotesi di *innovazione indotta*, originariamente formulata da John Hicks negli anni Trenta in ambito di macrodinamica economica.<sup>7</sup> In breve, essa suggerisce che un cambiamento dei prezzi relativi dei fattori produttivi tende a generare innovazione tecnologica che riduce l'uso del fattore produttivo il cui prezzo è cresciuto rispetto a quello degli altri fattori.

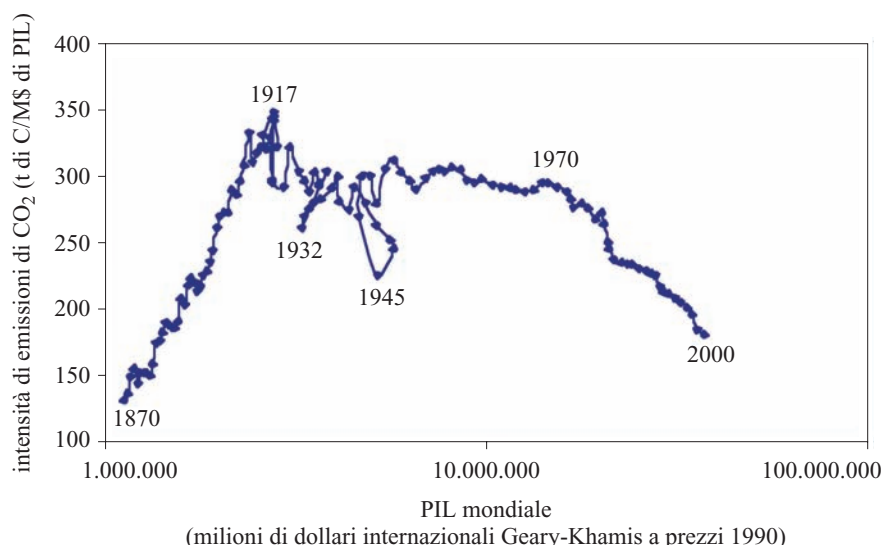
Si tratta di un'ipotesi che conduce a risultati non dissimili da quelli dei modelli multisettoriali di rendita, crescita e distribuzione del reddito illustrati nel cap. 1.2, sebbene le variabili di quantità assumano un ruolo centrale nella dinamica teorizzata da questi ultimi (Quadrio Curzio e Pellizzari, 1996, 1999). L'ipotesi hicksiana di innovazione indotta ha avuto in passato numerosi sviluppi teorici e applicativi (Ruttan e Hayami, 1985; Kemp, 1997; Ruttan, 2002; Mazzanti e Zoboli, 2005b, 2006) ed

<sup>7</sup> Più esattamente l'ipotesi hicksiana si riferisce alla *invenzione indotta* (Hicks, 1985).

**fig. 2.** Emissioni mondiali di CO<sub>2</sub> da fonti fossili in relazione al livello del PIL mondiale tra il 1870 e il 2000.



**fig. 3.** Intensità di emissioni di CO<sub>2</sub> da fonti fossili in relazione al livello del PIL mondiale tra il 1870 e il 2000.





è riproposta da numerosi recenti modelli di *innovazione endogena* applicati a energia e politiche del clima (Carraro *et al.*, 2003).

Svilupperemo nel seguito due specifici ambiti di possibile validità delle ipotesi di innovazione indotta: il ruolo dei prezzi per l'efficienza energetica e il ruolo delle politiche pubbliche (in particolare quelle per il cambiamento climatico) per l'efficienza di emissioni.

### Prezzi relativi e innovazione tecnologica

Gli eccezionali aumenti dei prezzi di energia e materie prime degli anni Settanta hanno avuto effetti nello stimolare sia cambiamenti strutturali delle economie, sia processi innovativi di carattere sistemico con rilievo sull'efficienza complessiva di uso delle risorse, sia specifiche innovazioni indotte volte a risparmiare le risorse che i mercati segnalavano come scarse (Quadrio Curzio, 1983; Sylos Labini, 1984; Quadrio Curzio *et al.*, 1994; Mokyr, 1995; Quadrio Curzio e Zoboli, 1995a,b; Rosenberg, 1996; Quadrio Curzio e Zoboli, 1997; Popp, 2002).

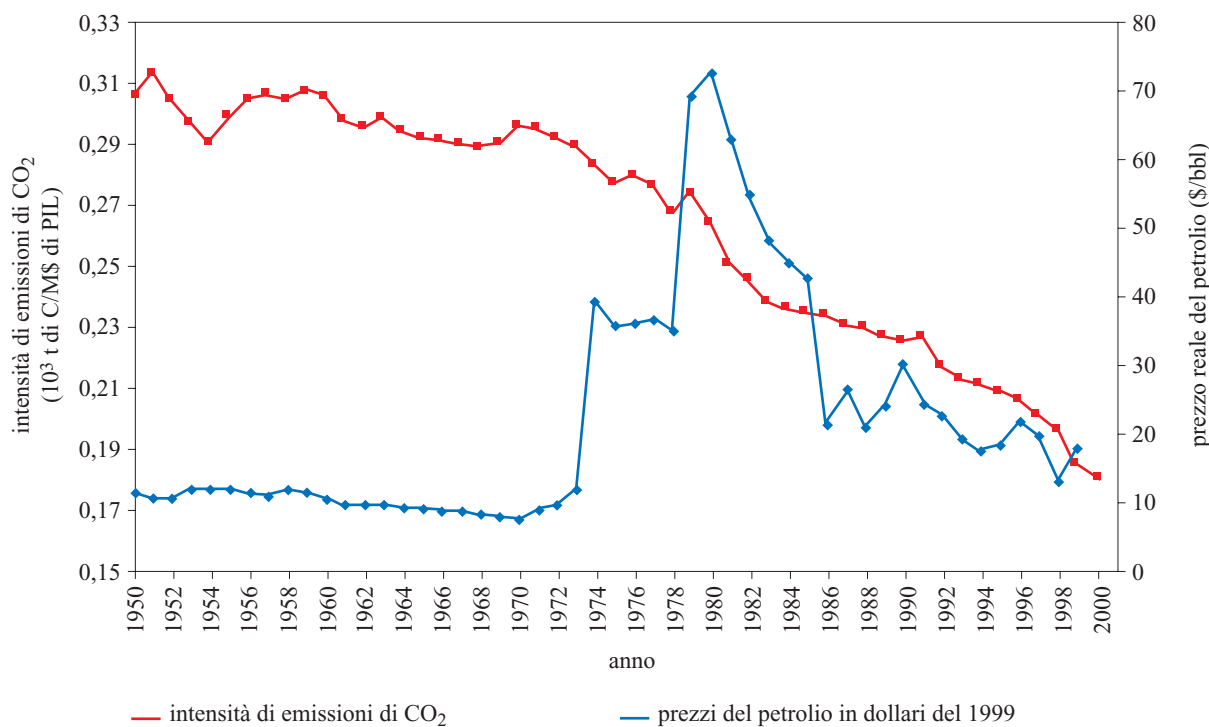
L'interpretazione dei prezzi relativi dell'energia come principale stimolo all'innovazione sembra tuttavia indebolita da quanto accaduto nel corso degli ultimi due decenni, quando una caduta dei prezzi reali dell'energia, dopo la metà degli anni Ottanta, non ha causato un processo inverso di innovazioni che sostituiscono energia, divenuta meno scarsa, ad altri fattori produttivi. Sempre utilizzando indicatori generali, la **fig. 4** mostra come il forte incremento dei prezzi verificatosi negli anni

Settanta abbia determinato un declino dell'intensità delle emissioni di CO<sub>2</sub> da fonti fossili, strettamente collegate al consumo di energia primaria, ma mostra anche come la caduta successiva dei prezzi reali non abbia cambiato il trend declinante, che prosegue.

Anche se tale andamento può essere influenzato da aspettative sulle politiche per il clima, l'inerzia tendenziale dell'efficienza è troppo forte per non avere spiegazioni più strutturali. Mentre infatti in una visione di economia neoclassica tale assenza di simmetria giocherebbe contro un ruolo decisivo dei prezzi relativi, in una visione di dinamica strutturale ed evolutivista essa può essere un importante suggerimento circa la natura dei processi di innovazione indotta in presenza di capitale fisso.

La maggior parte delle innovazioni che risparmiano energia e materie prime sono incorporate in beni capitali di media e lunga durata (per esempio, impianti industriali, automobili e abitazioni), e ciò può spiegare sia una certa lentezza nell'adozione e diffusione di soluzioni di efficienza energetica già disponibili, sia la scarsa reversibilità per un lungo tempo dei guadagni di efficienza acquisiti.

Analizzando i meccanismi di efficienza energetica nel lungo periodo, Rosenberg (1994) suggerisce che, nonostante la sostituibilità tra diverse fonti energetiche possa essere alta e sia possibile risparmiare energia senza cambiamenti rilevanti dei processi e prodotti, il raggiungimento di maggiore efficienza richiede sempre



**fig. 4.** Prezzi reali dell'energia e intensità di emissioni di CO<sub>2</sub> tra il 1950 e il 2000.

qualche investimento in capitale. Di conseguenza, l'efficienza tende ad avere tempi lenti anche se le tecnologie di risparmio sono disponibili e anche se i mercati e i prezzi stanno esercitando forti stimoli di risparmio. La ragione è che tali tecnologie, sebbene soddisfino il criterio di abbassare i costi specifici degli input energetici, non abbassano i costi totali perché comportano costi di investimento. Solo quando si è in prossimità di cicli di rinnovo del capitale e/o quando i prezzi dell'energia sono estremamente alti, e attesi così per lungo tempo, l'adozione di tali tecnologie sarà favorevole in termini di costi totali.

Meccanismi di questo tipo si manifestano con grande complessità nel settore dell'edilizia i cui consumi energetici rappresentano circa il 40% del totale dell'Unione Europea (UE). In tale settore, l'adozione di tecnologie disponibili potrebbe portare alla riduzione di un quinto del consumo di energia rispetto ai livelli attuali.<sup>8</sup> Tuttavia, le variabili che guidano le decisioni di investimento in efficienza energetica in edilizia sono molto numerose, i soggetti che prendono tali decisioni sono eterogenei e vi è difficoltà di misurazione dell'efficienza rispetto ad altri settori. Per le nuove costruzioni, la decisione di incorporare efficienza energetica è presa dal costruttore o dal proprietario. In entrambi i casi, il problema economico fondamentale è far riconoscere al mercato, attraverso il valore incrementale dell'immobile, il proprio investimento in efficienza che determina un più basso consumo e un risparmio di costi lungo la vita utile dell'immobile stesso.

L'investimento in retrofitting costituisce un problema sostanzialmente diverso dal punto di vista economico, poiché riguarda la scelta del tempo in cui fare l'investimento, nel caso valga la pena farlo. In generale, nell'investimento in questione, i prezzi attuali dell'energia sono più importanti di quelli attesi per il futuro, poiché essi influenzano il costo totale nel possibile tempo di non adozione, che è quello più vicino al presente e quindi più pesato essendo i costi in valore attuale. L'aspetto interessante dei costi di adozione di retrofitting è che, se sono attesi decrescenti nel futuro a un tasso adeguato, l'adozione si rinvierà al futuro. Quindi, anche se il valore attuale dei risparmi di energia attesi è superiore al costo di adozione presente, cioè il beneficio netto è positivo, la tecnologia può non essere adottata se c'è innovazione tecnologica continua e abbastanza rapida, o se sono attesi degli incentivi pubblici futuri (che riducono il costo di adozione) maggiori di quelli presenti (Jaffe e Stavins, 1994).

Questo esempio mostra anche come le aspettative sui prezzi possano avere un ruolo rilevante per la sostituzione di capitali con altri che incorporano maggiore efficienza. Anche se tali aspettative si rivelassero sbagliate *a posteriori*, con un risparmio di costi inferiore a quello atteso a causa di prezzi declinanti, una volta raggiunta

una maggiore efficienza è comunque più costoso tornare a una minore efficienza che mantenere quella acquisita, poiché l'energia risparmiata ha comunque un valore positivo, a prescindere dal suo prezzo. Se forti aumenti dei prezzi hanno indotto investimenti in capitali che incorporano efficienza, il cambiamento che produce minori segnali di scarsità (cioè una diminuzione dei prezzi) può rallentare l'adozione e la diffusione di tecnologie efficienti, ma difficilmente può portare all'indietro verso minore efficienza. Ciò vale a maggior ragione per cambiamenti, come quelli avvenuti dopo gli anni Settanta, che hanno radicalmente riconfigurato i sistemi tecnologici ed economici avanzati. In particolare, sono i capitali di più lunga durata e più interconnessi attraverso i sistemi infrastrutturali a mostrare la maggiore inerzia in termini di efficienza (Gruebler *et al.*, 1999). Nel determinare l'inerzia, e quindi anche la scarsa reversibilità dei miglioramenti di efficienza, vanno aggiunti i processi cumulativi di apprendimento associati all'ampliamento del mercato delle nuove tecnologie, che riducono i loro costi e ne consolidano i ritorni economici positivi, anche con rovesciamenti dei prezzi relativi.

Gli investimenti espliciti in ricerca e sviluppo e nuove innovazioni seguono percorsi simili. Solo in condizioni stabilmente favorevoli, per esempio aumenti dei prezzi dell'energia ritenuti duraturi, si mette in moto il processo di investimento in ricerca e sviluppo fino allo stadio commerciale delle nuove tecnologie e, quindi, un processo di diffusione che, come per la generalità delle tecnologie, è graduale secondo modelli di tipo logistico (decollo, maturità, saturazione e declino). In questo modo, i prezzi relativi dell'energia possono operare, nella terminologia di Rosenberg, come *focusing device*, meccanismi di puntamento delle aree di ricerca e sviluppo e innovazione di maggior valore. Salvo condizioni estreme di cambiamento delle variabili, ogni cluster di innovazioni tende a partire dagli standard di efficienza precedenti e a innalzarli, anche per effetto di trascinamento di programmi di ricerca e sviluppo, come per esempio quelli della ricerca europea, che sono di lunga durata e non rispondono subito a cambiamenti delle variabili economiche. È piuttosto nei nuovi programmi di ricerca e innovazione che entra lo stato attuale dei mercati dell'energia, determinando un diverso grado di priorità nell'allocazione delle risorse finanziarie, come è evidente per la storia di scarsa attenzione ai programmi sull'energia da fonti rinnovabili con bassi prezzi del petrolio (prescindendo dalle pressioni ambientali).

Tale interpretazione degli effetti irreversibili e delle inerzie innovative associate a forti o non momentanei

<sup>8</sup> Ciò equivarrebbe a un risparmio del 10% delle importazioni nette di prodotti petroliferi e a una riduzione di emissioni di gas serra pari al 20% dell'impegno della UE nell'ambito del Protocollo di Kyoto.

cambiamenti dei prezzi relativi è sostenuta anche dall'evidenza su trend storici dei prezzi in termini reali. Sebbene il dibattito sembri ancora aperto, vi è crescente evidenza in favore di trend secolari declinanti, o non crescenti, dei prezzi reali della maggior parte delle materie prime e delle fonti energetiche. Contrariamente all'ipotesi di una crescente scarsità di risorse, il declino dei prezzi reali nel lungo periodo suggerisce una relativa abbondanza. Quest'ultima, combinata con guadagni continui di efficienza d'uso, può sostenere l'ipotesi di una dinamica tecnologica unidirezionale del tipo descritto. Infatti, forti segnali di scarsità, attraverso fasi di alti prezzi reali, inducono aumenti di efficienza, mentre il successivo declino dei prezzi reali non stimola un aumento delle intensità d'uso di energia e materiali, dati i meccanismi di inerzia del capitale fisso e dei programmi di investimento in innovazione. L'efficienza tende quindi a muoversi unidirezionalmente verso la parte bassa più avanzata della curva di Kuznets, secondo meccanismi simili a quelli suggeriti dalle teorie degli stadi della crescita, delle onde lunghe, dell'alternanza tra tecnologie dominanti (Vasco, 1987; Rostow, 1990; Marchetti, 1991; Gruebler *et al.*, 1999).

Meccanismi paralleli di innovazione efficiente operano anche per l'offerta di risorse. L'offerta di energia e materie prime, pure con prezzi reali declinanti, continua a crescere sostenuta dal bisogno di compensare con più alte quantità i prezzi in declino e dalle innovazioni che riducono i costi di estrazione e permettono quindi di mantenere le rendite dei produttori. Il ruolo delle innovazioni *cost saving* per il mantenimento di alta offerta nel settore petrolifero è del resto noto (IEA, 2001b).

In altri termini, i prezzi relativi dell'energia e dei materiali possono operare come stimoli iniziali di processi dinamici di lunga durata che comportano cambiamenti dei sistemi tecnologici e produttivi tali da mutare definitivamente le condizioni di partenza, tanto che successivi cambiamenti inversi dei prezzi relativi non hanno effetto simmetrico rispetto a quello degli aumenti. La particolare intensità dei cambiamenti dei prezzi negli anni Settanta può contribuire a spiegare sia l'accelerata diminuzione tendenziale delle intensità energetiche, sia la loro scarsa reattività al declino dei prezzi reali degli anni Ottanta e Novanta. Quest'ultimo tuttavia ha decelerato i processi di innovazione per l'efficienza e ciò rappresenta un'importante questione per le politiche energetiche e per quelle del cambiamento climatico.

### **Politiche del clima e innovazione tecnologica**

I cambiamenti dei prezzi relativi non possono costituire la spiegazione unica delle innovazioni osservabili. Le risorse e l'ambiente sono infatti oggetto di numerose politiche pubbliche che influenzano i prezzi stessi, le quantità offerte e domandate, gli investimenti in ricerca e sviluppo e altre variabili.

In particolare, le politiche fiscali e di regolazione hanno svolto tradizionalmente un grande ruolo nel filtrare i cambiamenti dei prezzi energetici, mutandoli sia in senso amplificativo, sia in senso compensativo. Inoltre, i livelli medi e la struttura dei prezzi dell'energia sono molto differenziati nei diversi paesi, essendo i prodotti energetici soggetti a una varietà di interventi fiscali che non trova riscontro in altri settori. Poiché la domanda di energia è relativamente inelastica nel breve periodo, lo scopo prevalente della tassazione energetica è il gettito. Tuttavia, la struttura e il livello dei prezzi modificati dal carico fiscale possono avere oggettivamente effetti incentivanti su risparmio e tecnologie efficienti nel medio-lungo periodo, oppure, nel caso opposto, possono operare come sussidio implicito che incentiva stabilmente un elevato consumo. Negli ultimi anni, l'emergere delle preoccupazioni collegate al clima si è manifestato con l'introduzione di strumenti di fiscalità energetico-ambientale (CET, Carbon-Energy Tax) in vari paesi europei. In tal modo, le politiche possono introdurre segnali di scarsità che, nel caso di risorse ambientali come il clima, il mercato non può dare e possono quindi incentivare anche l'innovazione tecnologica.

In realtà, l'attuale dibattito vede posizioni diverse sugli impatti economici e tecnologici delle politiche energetico-ambientali (Jaffe *et al.*, 2003). Da un lato, l'ipotesi della *perdita di produttività/competitività* sostiene che: le politiche di risparmio energetico e riduzione delle emissioni creano dei costi di opportunità per il sistema produttivo; tali politiche deprimono la crescita e la competitività dei paesi più ambientalmente avanzati; le innovazioni per adempiere alle politiche spiazzano l'innovazione in altre e più produttive aree tecnologiche. Dall'altro lato, l'*ipotesi di Porter* (Porter e van der Linde, 1995) afferma che: gli investimenti indotti dalle politiche energetico-ambientali non spiazzano altri investimenti; le innovazioni ottenute compensano pienamente i costi sostenuti riducendo i costi di compliance; gli investimenti in innovazione ambientale possono generare dei vantaggi competitivi per le tecnologie e i prodotti delle imprese che li intraprendono.

In sostanza, l'intero dibattito ruota intorno al fatto che le politiche energetico-ambientali stimolino o meno l'innovazione, che quest'ultima sia economicamente vantaggiosa in termini di costi netti sociali e che possa generare nuove aree di mercato per gli investitori.

Anche se su ciò permangono aree di consenso e di dissenso, il dibattito di policy degli anni Ottanta e Novanta ha focalizzato l'attenzione sui costi e gli effetti di innovazione (vale a dire sulla efficienza dinamica) degli obiettivi e degli strumenti delle politiche. La teoria e le evidenze empiriche suggeriscono che gli strumenti economici sono di minor costo sociale rispetto agli strumenti tradizionali (limitazioni quantitative, standard, controlli, ecc.) e possono essere più efficaci nello stimolare



innovazione. Nel caso dell'energia e del clima, ciò ha portato dapprima alle proposte di utilizzare la tassazione ambientale dell'energia attraverso la CET e, in seguito, alle proposte di creare mercati dei permessi commerciabili di emissioni (ET, Emissions Trading).

Le proposte di CET in Europa risalgono agli anni Ottanta e hanno trovato una ferma resistenza da parte di alcuni paesi e attori economici, basata sulla tesi della perdita di produttività/competitività. Esse sono state accantonate dopo che, alla Conferenza di Rio del 1992, la proposta europea di una *carbon tax* globale non ha avuto seguito per la resistenza americana. Alcuni paesi europei hanno tuttavia dato luogo a esperienze di CET nazionali. Le analisi *ex post* del loro impatto sono scarse, in contrasto con l'enorme numero di simulazioni *ex ante* delle CET sul sistema economico e tecnologico, e poco dicono sugli effetti di innovazione nella pratica (Baranzini *et al.*, 2000; Mazzanti e Zoboli, 2000). In generale, emerge che l'effetto dello strumento è stato principalmente quello di una correzione del complesso sistema di tassazione energetica, con esiti incerti, probabilmente trascurabili, sia sull'innovazione indotta che sulla competitività.

Con il Protocollo di Kyoto, l'accento si è spostato sull'altro principale strumento economico in politica ambientale, vale a dire la creazione di mercati dei permessi negoziabili (nelle due principali forme, *cap and trade* e *baseline and credit*). Inizialmente proposti dagli Stati Uniti sulla scorta delle numerose applicazioni nazionali agli inquinanti atmosferici, tali strumenti sono divenuti caratterizzanti per il Protocollo di Kyoto e hanno generato un ampio dibattito ancora aperto. Con la mancata ratifica statunitense del Protocollo nel 2001, la UE

ha preso la testa nello sviluppo di tali strumenti, dando luogo all'European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS), lo schema di emission trading europeo per la CO<sub>2</sub> (direttiva 2003/87/EC). La connessa 'direttiva Linking' consente l'utilizzo di crediti di biossido di carbonio derivanti da *Joint Implementation* (investimenti nei paesi di cui all'Allegato I, cioè in paesi industrializzati e in transizione) e *Clean Development Mechanism* (investimenti nei paesi non inclusi nell'Allegato I, cioè in paesi in via di sviluppo) da parte degli operatori dell'EU ETS.

Lo schema europeo, avviato nel 2005, coinvolge circa 12.000 imprese dei settori caratterizzati dalle emissioni più intense (dalla produzione di energia termoelettrica fino all'industria cartaria) che producono il 40% circa delle emissioni totali dell'Unione, e rappresenta la maggiore esperienza di mercato dei permessi di emissione esistente al mondo. Con l'EU ETS decolla il finora piccolo mercato mondiale della CO<sub>2</sub>, che genera un prezzo per essa e quindi un costo di opportunità delle emissioni. Quest'ultimo rende vantaggiosa l'adozione di tecnologie di abbattimento o innovazioni che risparmiano energia ed emissioni.

Anche in tali applicazioni degli strumenti di Kyoto l'innovazione attesa indotta assume un ruolo centrale sia per la riduzione dei costi di raggiungimento degli obiettivi di Kyoto (**tab. 1**), sia per un possibile ruolo dell'Europa nel fornire tecnologie efficienti al mercato mondiale.

In generale, ci si attende che l'EU ETS sia costo-efficace poiché comporta riduzioni di costi (questi ultimi rappresentati da perdite di PIL) rispetto ad altri strumenti di politica energetica per gli stessi obiettivi. Tuttavia non

**tab. 1.** Costo del Protocollo di Kyoto: valori (%) del PIL rispetto allo scenario di riferimento con e senza innovazione indotta (Criqui e Kitous, 2003)

PAESI	KYOTO (ET E STRUMENTI FLESSIBILI) SENZA INNOVAZIONE INDOTTA		KYOTO (ET E STRUMENTI FLESSIBILI) CON INNOVAZIONE INDOTTA	
	2010	2015	2010	2015
Australia	-0,18	-0,55	-0,15	-0,37
Giappone	-0,15	-0,25	-0,11	-0,19
Unione Europea	-0,25	-0,44	-0,21	-0,36
Europa dell'Est e Federazione Russa	0,34	1,73	0,09	1,11
Altri paesi Allegato I	-0,52	-0,87	-0,42	-0,69
Stati Uniti	-0,03	-0,05	-0,01	-0,03
Paesi non Allegato I	0,00	0,01	0,00	0,00
Totale mondiale	-0,14	-0,18	-0,12	-0,16

è certo come e in che modo produca elevati incentivi all'innovazione. Il compito di allocare le quote di emissione è stato lasciato ai singoli paesi della UE, seppure con approvazione della commissione. I paesi hanno attuato le allocazioni, in generale, in modo non particolarmente restrittivo, cioè a basso costo per le industrie nazionali (in linea con l'ipotesi della perdita di produttività/competitività), e con allocazioni discrezionali tra i settori nazionali coinvolti.

Il risultato è una certa abbondanza globale di quote rispetto al *sentiero di Kyoto* che, combinata in prospettiva con un flusso di crediti di carbonio a basso costo da paesi in via di sviluppo (direttiva Linking) e da Est Europa/Russia (cosiddetta *hot air*), prospetta un mercato a bassi prezzi della CO<sub>2</sub> (da 6 a 15 €/tCO<sub>2</sub>eq secondo le simulazioni<sup>9</sup>). Tali bassi prezzi non possono stimolare importanti innovazioni di riduzione delle emissioni, poiché inducono gli operatori a porsi sul mercato come acquirenti di riduzioni realizzate da altri a un costo minore rispetto a quello dei propri abbattimenti. Ciò induce a prospettare che i principali effetti innovativi possano limitarsi a processi di adozione di tecnologie esistenti e alla loro diffusione, anche a livello internazionale attraverso investimenti in *joint implementation* e *clean development mechanism*. Solo quando le opportunità di riduzione a basso costo saranno esaurite allora i prezzi della CO<sub>2</sub> potranno crescere e segnalare scarsità, inducendo impulsi innovativi più forti.

È perciò incerto se e quanto lo sviluppo del mercato dei permessi indurrà innovazioni per l'energia e l'ambiente in Europa, anche rispetto agli Stati Uniti, il cui programma per il clima è esplicitamente rivolto ai programmi tecnologici e agli obiettivi di intensità di emissioni, sebbene questi ultimi siano poco impegnativi e quindi, di per sé, poco incentivanti.

L'importanza delle capacità di *incentivo dinamico* delle politiche energia-clima è sottolineata dai numerosi modelli di analisi degli impatti di Kyoto che adottano ipotesi di 'innovazione endogena'. Tali modelli sottolineano tuttavia le numerose difficoltà di comprendere i meccanismi effettivi dell'innovazione (Carraro *et al.*, 2003). Per questo motivo, se gli strumenti delle politiche non sono sufficienti a generare le innovazioni necessarie, dovrebbero essere attuate nuove esplicite politiche di ricerca e sviluppo per energia e clima o essere potenziati i consistenti programmi di ricerca già in campo nella ricerca europea e nazionale (Popp, 2004).

Da questo punto di vista, è da notare che energia e ambiente assumono già un certo peso diretto nei programmi di ricerca dell'Unione Europea, in particolare attraverso un budget specifico di 4,8 miliardi di euro (10% del totale) nel VII Programma Quadro per la ricerca, e possono ricevere importanti influenze da altre aree di innovazione, per esempio i materiali e le nanotecnologie. Rappresentano inoltre una componente di un certo

rilievo nel Programma Nazionale della Ricerca 2005-2007, lanciato recentemente in Italia.

La possibilità che l'innovazione per energia-ambiente possa avere un ruolo nella Strategia di Lisbona per l'innovatività dell'economia dell'Unione è d'altro canto segnalata dal lancio dell'Environmental Technologies Action Plan (ETAP). L'ETAP è stato adottato dal Consiglio Europeo del marzo 2004 (European Commission, 2005) e sposa chiaramente una prospettiva che abbiamo definito ipotesi di Porter, quando sottolinea che: *a*) le tecnologie cosiddette ambientali occupano oltre 2 milioni di persone nell'UE; *b*) l'impatto delle politiche ambientali sull'occupazione è neutrale o positivo; *c*) gli effetti negativi di competitività delle politiche di controllo dell'inquinamento sono limitati; *d*) le innovazioni ambientali possono generare opportunità di mercato internazionale, dato il crescente coinvolgimento dei grandi paesi in rapida crescita, come la Cina, nelle politiche globali energia-ambiente, in particolare nel dopo-Kyoto.

## Bibliografia citata

- ANDREONI J., LEVINSON A. (2001) *The simple analytics of the Environmental Kuznets Curve*, «Journal of Public Economics», 80, 269-286.
- BARANZINI A. *et al.* (2000) *A future for carbon taxes*, «Ecological Economics», 32, 395-412.
- CARRARO C. *et al.* (2003) *Endogenous technical change in environmental macroeconomics*, «Resource and Energy Economics», 25, 1-10.
- CASLER S.D., AFRASIABI A. (1993) *Input composition and the energy-output ratio*, «Structural Change and Economic Dynamics», 4, 267-277.
- CHIMELI A., BRADEN J. (2005) *Total factor productivity and the Environmental Kuznets Curve*, «Journal of Environmental Economics and Management», 49, 366-380.
- CONSIDINE T.J. (1991) *Economic and technological determinants of material intensity of use*, «Land Economics», 67, 99-115.
- CRICQUI P., KITOUS A. (2003) *Kyoto protocol implementation: impact JI and CDM credits to the European emission allowance trading scheme*, Bruxelles, Directorate General Environment of the European Commission.
- DASGUPTA P.S. *et al.* (2002) *Confronting the Environmental Kuznets Curve*, «Journal of Economic Perspectives», 16, 147-168.
- DE BRUYN S. *et al.* (1998) *Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of EKC*, «Ecological Economics», 25, 161-175.
- DEFRA (UK Department for Environment Food and Rural Affairs)/DTI (UK Department of Trade and Industry) (2003) *Sustainable consumption and production indicators*, London, DEFRA.
- DINDA S. (2004) *Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey*, «Ecological Economics», 49, 431-455.

<sup>9</sup> tCO<sub>2</sub>eq: tonnellate di biossido di carbonio equivalente.

- EEA (European Environment Agency) (2003) *Europe's environment. The third assessment*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, EEA Report 10.
- EHRlich P.R. (1971) *The population bomb*, London, Ballantine.
- EUROPEAN COMMISSION (2005) *Report on the implementation of the environmental technologies action plan in 2004*, 27 January, COM2005.
- FORTIS M. (1994) *Economic growth and the intensity of use of industrial materials*, in: Quadrio Curzio A. et al. (editors) *Innovation resources and economic growth*, Berlin, Springer.
- GROSSMAN G.M., KRUEGER A.B. (1994) *Economic growth and the environment*, NBER (National Bureau of Economic Research), Working Papers 4634.
- GRUEBLER A. et al. (1999) *Dynamics of energy technologies and global change*, «Energy Policy», 27, 247-280.
- HICKS J. (1985) *Methods of dynamic economics*, Oxford, Clarendon.
- HOLTZ-EAKIN D., SELDEN T.M. (1992) *Stoking the fires? CO<sub>2</sub> emissions and economic growth*, NBER (National Bureau of Economic Research), Working Papers 4248.
- IEA (International Energy Agency) (1997) *Indicators of energy use and efficiency*, Paris, Organization for Economic Cooperation and Development/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2001a) *Energy indicators and sustainable development*, Paris, Organization for Economic Cooperation and Development/IEA.
- IEA (International Energy Agency) (2001b) *World energy outlook. Assessing today's supplies to fuel tomorrow's growth*.
- JAFFE A.B., STAVINS R.N. (1994) *The energy paradox and the diffusion of conservation technology*, «Resource and Energy Economics», 16, 91-122.
- JAFFE A.B. et al. (2003) *Technological change and the environment*, in: Mäler K.-G., Vincent J.R. (edited by) *Handbook of environmental economics*. Amsterdam, Elsevier, 3v.; v.I: *Environmental degradation and institutional*.
- KEMP R. (1997) *Environmental policy and technical change: a comparison of the technological impact of policy instruments*, Cheltenham, Elgar.
- KUZNETS S. (1955) *Economic growth and income inequality*, «The American Economic Review», 45, 1-28.
- LABSON B.S., CROPTON P.L. (1993) *Common trends in economic activity and metals demand: cointegration and the intensity of use debate*, «Journal of Environmental Economics and Management», 25, 147-161.
- MALERBA F. (a cura di) (2000) *Economia dell'innovazione*, Roma, Carocci.
- MARCHETTI C. (1991) *The future*, International Institute for Applied Systems Analysis, RP-91-5, May.
- MARTIN J.M. (1990) *Energy and technological change. Lessons from the last fifteen years*, «Science, Technology and Industry Review», July.
- MAZZANTI M., ZOBOLI R. (2000) *The application of carbon-energy tax in Italy and other European countries*, in: Confindustria-IPA-IRS, *Rapporto energia*, Roma.
- MAZZANTI M., ZOBOLI R. (2005a) *Delinking and Environmental Kuznets Curves for waste indicators in Europe*, «Environmental Sciences», December, 409-425.
- MAZZANTI M., ZOBOLI R. (2005b) *The drivers of environmental innovation in local manufacturing systems*, «Economia Politica», 3, 399-438.
- MAZZANTI M., ZOBOLI R. (2006) *Economic instruments and induced innovation. The European policies on end-of-life vehicles*, «Ecological Economics», 58, 318-337.
- MOKYR J. (1995) *Environmental crises and technological change*, in: Quadrio Curzio A., Zoboli R. (editors) *Science, economics, and technology for the environment*, Milano, Cariplo Foundation for Scientific Research.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (2002) *Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth*, Paris, OECD.
- POPP D. (2002) *Induced innovation and energy prices*, «The American Economic Review», 92, 160-180.
- POPP D. (2004) *R&D subsidies and climate policy: is there a "free lunch"?*, National Bureau of Economic Research, Working Papers 10880.
- PORTER M.E., LINDE C. VAN DER (1995) *Towards a new conception of the environment-competitiveness relationships*, «Journal of Economic Perspectives», 9, 97-118.
- QUADRIO CURZIO A. (1983) *Primary commodity prices, exhaustible resources and international monetary relations: alternative explanations*, in: *Distribution, effective demand and international economic relations. Proceedings of a conference held by the Centro di studi economici avanzati, Trieste*, London, MacMillan.
- QUADRIO CURZIO A., PELLIZZARI F. (1996) *Risorse, tecnologie, rendita*, Bologna, Il Mulino.
- QUADRIO CURZIO A., PELLIZZARI F. (1999) *Rents, resources, technology*, Berlin, Springer.
- QUADRIO CURZIO A., ZOBOLI R. (a cura di) (1995a) *Ambiente e dinamica globale. Scienza, economia e tecnologie a confronto*, Bologna, Il Mulino.
- QUADRIO CURZIO A., ZOBOLI R. (editors) (1995b) *Science, economics and technology for the environment*, Milano, Quaderni della Fondazione Cariplo per la Ricerca Scientifica.
- QUADRIO CURZIO A., ZOBOLI R. (1997) *The costs of sustainability*, in: *The 50<sup>th</sup> anniversary of the United Nations and the Italian contribution toward the realization of the "Earth Charter"*. *Proceedings of the conference*, Rome (Italy), Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, May 1996.
- QUADRIO CURZIO A. et al. (editors) (1994) *Innovation, resources and economic growth*, Berlin, Springer.
- ROSENBERG N. (1994) *Energy efficient technologies, past and future perspectives*, in: Quadrio Curzio A. et al. (editors) *Innovation, resources and economic growth*, Berlin, Springer.
- ROSENBERG N. (1996) *The impact of technological change on resources for growing population*, in: Colombo B. et al. (editors) *Resources and population*, Oxford, Clarendon.
- ROSTOW W.W. (1990) *Theorists of economic growth from David Hume to the present with a perspective on the next century*, New York, Oxford University Press.
- RUTTAN V.W. (2002) *Sources of technical change: induced innovation, evolutionary theory and path dependence*, in: Gruebler A. et al. (editors) *Technological change and the environment*, Washington (D.C.), Resources for the Future, 9-39.

- RUTTAN V.W., HAYAMI Y. (1985) *Agricultural development: an international perspective*, Baltimore (MD), The Johns Hopkins University Press.
- SELDEN D.H., SONG D. (1994) *Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emission?*, «Journal of Environmental Economics and Management», 27.
- STERN D. (2004) *The rise and fall of the Environmental Kuznets Curve*, «World Development», 32, 1419-1439.
- SYLOS LABINI P. (1984) *The forces of economic growth and decline*, Cambridge (MA), MIT Press.
- TEN KATE A. (1993) *Industrial development and environment in Mexico*, The World Bank, Washington (D.C), Policy Research Working Papers 1125.
- TILTON J.E. (1989) *The new view on minerals and economic growth*, «The Economic Record», 65, 265-278.
- VASCO T. (editor) (1987) *The long-wave debate*, Berlin, Springer.
- YANDLE B. et al. (2002) *The Environmental Kuznets Curve. A primer*, Bozeman (MT), PERC Research Study 02-01.
- ZHANG Z. (2000) *Decoupling China's carbon emissions increase from economic growth: an economic analysis and policy implications*, «World Development», 28, 739-752.
- ZOBOLI R. (1996) *Technology and changing population structure: environmental implications for the advanced countries*, «Dynamis-Quaderni», 6.

ALBERTO QUADRIO CURZIO

FAUSTA PELLIZZARI

ROBERTO ZOBOLI

Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano  
Milano, Italia