

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Economia, Statistica e Finanza (DESF)

Dottorato di Ricerca in
Scienze Economiche e Aziendali

CICLO

XXXI

TITOLO TESI

“Impatto ambientale, energie rinnovabili e politiche di supporto nei paesi europei”

Settore Scientifico Disciplinare SECS-P/01

Coordinatore: Ch.mo Prof. Franco Ernesto Rubino

Firma *Francesco Ernesto Rubino*

Supervisore: Ch.mo Prof. Davide Infante

Firma *David Infante*

Tutor: Ch.ma Prof.ssa Bernardina Algieri

Firma *Bernardina Algieri*

Dottorando: Dott. Matteo Abbruzzese

Firma *Matteo Abbruzzese*

SOMMARIO

Introduzione.....	1
-------------------	---

CAPITOLO 1

<i>Energie rinnovabili ed emissioni di gas serra in Europa: una rivisitazione della Environmental Kuznets Curve</i>	5
1.0- Introduzione	6
1.1- Rivisitazione della letteratura: la genesi dell'EKC	9
1.1.1- <i>Environmental Kuznets Curve Hypothesis</i> : aspetti teorici.....	13
1.1.2- Effetti scala, composizione e della tecnica	14
1.1.3- Il commercio internazionale: la <i>Pollution Heaven Hypothesis</i> (PHH)	15
1.1.4- Aspetti normativi ed istituzionali.....	17
1.1.5- L'elasticità del reddito alla qualità ambientale	18
1.1.6- Aspetti controversi: critiche all'EKC	19
1.2- La letteratura sul legame esistente tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici	21
1.2.1- La letteratura sul legame esistente tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici da fonti rinnovabili	25
1.2.2- I consumi da RES: strategie investigative	36
1.3- Metodologia: specificazioni econometriche	39
1.3.1- Specificazione del modello	42
1.4- Fonte dei dati e variabili analizzate.....	46
1.4.1- Variabile dipendente	46
1.4.2- Variabili esplicative	48
1.4.3- Statistiche descrittive	51
1.5- Analisi dei risultati ottenuti per l'EKC: <i>Modello 1</i>	56

1.5.1- <i>Extended Kuznes Curve model</i> : il ruolo delle fonti energetiche rinnovabili	64
1.5.2- Controlli diagnostici	70
1.6- Stime robuste: risultati per tutti i modelli	75
1.7- Test di endogeneità	84
1.7.1- Stime con variabili strumentali	88
Conclusioni.....	97

CAPITOLO 2

<i>L'inquinamento atmosferico in Europa: un'analisi empirica dell'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche</i>	103
2.0- Introduzione	104
2.1- Una breve disamina delle fonti energetiche e delle tecnologie di sfruttamento....	107
2.2- Rassegna della letteratura.....	111
2.2.1- La letteratura sul legame esistente tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici aggregati	112
2.2.2- La letteratura sull'effetto ambientale delle fonti energetiche disaggregate	118
2.2.3- L'effetto ambientale disaggregato delle fonti energetiche: strategie investigative	135
2.3- Metodologia: specificazioni econometriche.....	138
2.3.1- Specificazione funzionali: modelli per la valutazione dell'effetto ambientale delle RES-E	141
2.4- Fonte dei dati e variabili analizzate.....	147
2.4.1- Variabile dipendente	147
2.4.2- Variabili esplicative	149
2.4.3- Statistiche descrittive	152
2.5- Analisi dei risultati ottenuti: <i>Modello 1</i>	161

2.5.1- Analisi dei risultati ottenuti: <i>Modello 2</i>	168
2.5.2- Analisi dei risultati ottenuti: <i>Modello 3</i>	175
2.5.3- Controlli diagnostici	181
2.6- Interpretazione dei risultati.....	192
Conclusioni.....	195

CAPITOLO 3

<i>Le determinanti delle rinnovabili elettriche in Europa: un'analisi esplorativa sull'utilizzo degli incentivi</i>	199
3.0- Introduzione	200
3.1- Una breve disamina degli strumenti di politica energetica negli stati europei	203
3.2- Revisione della letteratura.....	211
3.2.1- La letteratura sulla valutazione congiunta dei <i>support schemes</i> alle RES-E	219
3.2.2- I <i>drivers</i> delle RES-E: strategie investigative.....	225
3.3- Metodologia: specificazioni econometriche.....	228
3.3.1- Specificazioni funzionali: modelli per la valutazione del processo di diffusione delle RES-E.....	230
3.4- Fonte dei dati e variabili analizzate.....	234
3.4.1- Variabile dipendente	234
3.4.2 - Variabili esplicative	236
3.4.3- Statistiche descrittive	244
3.5- Analisi dei risultati ottenuti	248
3.5.1- Controlli diagnostici e stime robuste	255
3.6- Una verifica supplementare sull'effetto causale dei principali meccanismi di supporto alle rinnovabili.....	265
3.6.1- Analisi dei risultati ottenuti: <i>time-variant policy variables</i>	269

Conclusioni.....	280
Bigliografia.....	287

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1- Contributi analizzati	37
Tabella 1.2.- Modelli quadratici in base ai coefficienti di regressione.....	44
Tabella 1.3 - Definizione delle variabili e fonte dei dati	51
Tabella 1.3.1- Statistiche descrittive	52
Tabella 1.4- <i>Environmental Kuznets Curve Hypothesis</i> : risultati per il Kyoto basket (GHG)	57
Tabella 1.4.1- <i>Environmental Kuznets Curve Hypothesis</i> : risultati per il biossido di carbonio (CO ₂)	58
Tabella 1.4.2- <i>Environmental Kuznets Curve Hypothesis</i> : risultati per il biossido di metano (CH ₄)	59
Tabella 1.4.3- <i>Environmental Kuznets Curve Hypothesis</i> : risultati per il protossido di azoto (N ₂ O)	60
Tabella 1.6- <i>Extended Kuznets Curve model</i> : risultati per il Kyoto basket (GHG)	66
Tabella 1.6.1- <i>Extended Kuznets Curve model</i> : risultati per il biossido di carbonio (CO ₂)	67
Tabella 1.6.2- <i>Extended Kuznets Curve model</i> : risultati per il biossido di metano (CH ₄)..	68
Tabella 1.6.3- <i>Extended Kuznets Curve model</i> : risultati per il protossido di azoto (N ₂ O)..	69
Tabella 1.7- Matrice di correlazione per il Kyoto basket (GHG)	70
Tabella 1.7.1- Matrice di correlazione per il biossido di carbonio (CO ₂)	71
Tabella 1.7.2- Matrice di correlazione per il biossido di metano (CH ₄)	71
Tabella 1.7.3- Matrice di correlazione per il protossido di azoto (N ₂ O)	72

Tabella 1.8- Risultati dei test diagnostici per tutti i modelli stimati.....	74
Tabella 1.9- <i>Robustness check</i> delle stime per il Kyoto <i>basket</i> (GHG)	78
Tabella 1.9.1- <i>Robustness check</i> delle stime per il biossido di carbonio (CO ₂)	79
Tabella 1.9.2- <i>Robustness check</i> delle stime per il biossido di metano (CH ₄)	80
Tabella 1.9.3- <i>Robustness check</i> delle stime per il protossido di azoto (N ₂ O)	81
Tabella 1.10- Statistiche descrittive variabili strumentali	88
Tabella 1.11- Risultati delle stime al primo stadio per il logaritmo naturale del GDP pro capite in forma lineare e quadratica.....	90
Tabella 1.12- Risultati del test delle restrizioni di sovra identificazione... ..	92
Tabella 1.13 - <i>Two Stage Least Square (2SLS)</i> risultati per il Kyoto <i>basket</i> (GHG) e il biossido di carbonio (CO ₂)	94
Tabella 1.13.1 - <i>Two Stage Least Square (2SLS)</i> risultati per il biossido di metano (CH ₄) e il protossido di azoto (N ₂ O)	95
Tabella 2.1- Contributi analizzati	136
Tabella 2.2- Definizione delle variabili e fonte dei dati	152
Tabella 2.3- Statistiche descrittive	153
Tabella 2.4.1- Risultati delle stime del Modello 1 per il Kyoto <i>basket</i> (GHG)	163
Tabella 2.4.2- Risultati delle stime del Modello 1 per gli ossidi di azoto (NO _x)	164
Tabella 2.4.3- Risultati delle stime del Modello 1 per gli ossidi di zolfo (SO _x)	165
Tabella 2.4.4- Risultati delle stime del Modello 1 per i particolati sospesi (PM _{2.5}) ..	166
Tabella 2.5.1- Risultati delle stime del Modello 2 per il Kyoto <i>basket</i> (GHG)	170
Tabella 2.5.2- Risultati delle stime del Modello 2 per gli ossidi di azoto (NO _x)	171
Tabella 2.5.3- Risultati delle stime del Modello 2 per gli ossidi di zolfo (SO _x)	172
Tabella 2.5.4- Risultati delle stime del Modello 2 per i particolati sospesi (PM _{2.5}) ...	173
Tabella 2.6.1- Risultati delle stime del Modello 3 per il Kyoto <i>basket</i> (GHG) e per gli ossidi di azoto (NO _x)	177

Tabella 2.6.2- Risultati delle stime del Modello 3 per gli ossidi di zolfo (SO _x) e i particolati sospesi (PM 2.5)	178
Tabella 2.7.1- Matrice di correlazione per il Kyoto <i>basket</i> (GHG)	181
Tabella 2.7.2- Matrice di correlazione per gli ossidi di azoto (NO _x)	181
Tabella 2.7.3- Matrice di correlazione per gli ossidi di zolfo (SO _x)	181
Tabella 2.7.4- Matrice di correlazione per i particolati sospesi (PM 2.5)	182
Tabella 2.8- Risultati test diagnostici per tutti i modelli stimati	184
Tabella 2.9.1- <i>Robustness check</i> delle stime per il Kyoto <i>basket</i> (GHG)	188
Tabella 2.9.2- <i>Robustness check</i> delle stime per gli ossidi di azoto (NO _x)	189
Tabella 2.9.3- <i>Robustness check</i> delle stime per gli ossidi di zolfo (SO _x)	190
Tabella 2.9.4- <i>Robustness check</i> delle stime per i particolati sospesi (PM 2.5)	191
Tabella 3.1- Contributi empirici analizzati	226
Tabella 3.2- <i>Support instruments</i> per le rinnovabili elettriche (RES-E)	237
Tabella 3.3- Definizione delle variabili e fonte dei dati	243
Tabella 3.4- Statistiche descrittive delle variabili utilizzate nelle stime	244
Tabella 3.5- Risultati delle stime dei modelli 1-3 per l'indicatore energetico di produzione (<i>Gen-non idro</i>)	251
Tabella 3.5.1- Risultati delle stime dei modelli 1-3 per l'indicatore energetico di produzione (<i>Cap-non idro</i>)	252
Tabella 3.6- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con <i>Gen-non idro</i> come variabile dipendente	255
Tabella 3.6.1- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con <i>Cap-non idro</i> come variabile dipendente	256
Tabella 3.7- Risultati test diagnostici per tutti i modelli stimati	257
Tabella 3.8- <i>Robustness check</i> delle stime per l'indicatore energetico di produzione (<i>Gen-non idro</i>)	260

Tabella 3.8.1- <i>Robustness check</i> delle stime per l'indicatore energetico di capacità (<i>Cap-non idro</i>)	261
Tabella 3.8.2- Statistiche descrittive delle <i>energy policy variables time-variant</i>	269
Tabella 3.9- Risultati delle stime del <i>Modello 4</i> per l'indicatore energetico di produzione (<i>Gen-non idro</i>)	270
Tabella 3.9.1- Risultati delle stime del <i>Modello 4</i> per l'indicatore energetico di capacità (<i>Cap-non idro</i>)	271
Tabella 3.10- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con <i>Gen-non idro</i> come variabile dipendente	272
Tabella 3.10.1- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con <i>Cap-non idro</i> come variabile dipendente	272
Tabella 3.11- <i>Fixed effects regression</i> per l'indicatore energetico di produzione (<i>Gen-non idro</i>)	275
Tabella 3.11.1- <i>Fixed effects regression</i> per l'indicatore energetico di capacità (<i>Cap-non idro</i>)	276

INDICE DEI GRAFICI

Figura 1.1 – Rappresentazione grafica dell'EKC: relazione inquinamento-reddito	14
Figura 1.2- Specificazioni quadratiche: rappresentazione grafica relazione crescita economica-inquinamento	45
Figura 1.3- Andamento medio delle emissioni di gas serra per il campione oggetto di studio, anni 1995-2015	53
Figura 1.4- Andamento medio del GDP pro capite per il campione oggetto di studio, anni 1995-2015	54
Figura 1.5- Andamento dei consumi interni lordi di fonti rinnovabili per il campione oggetto di studio, anni 1995-2015	55
Figura 1.6- EKC per il Kyoto <i>basket</i> (GHG)	62
Figura 1.6.1- EKC per il biossido di carbonio (CO ₂)	62

Figura 1.6.2- EKC per il biossido di metano (CH ₄)	63
Figura 1.6.3- EKC per il protossido di azoto (N ₂ O)	63
Figura 2.1- Andamento degli indicatori ambientali, UE-28, anni 1995-2015, (indice 1995=100)	154
Figura 2.2- Andamento delle rinnovabili elettriche totali in UE, anni 1995-2015.....	156
Figura 2.2.1- Andamento medio delle rinnovabili elettriche per tutto il campione, anni 1995-2015.....	157
Figura 2.3- Confronto tra rinnovabili elettriche nei paesi UE, anno 2015	158
Figura 2.4- Andamento importazioni ed esportazioni di energia elettrica nell'Unione Europea, in Mtoe, anni 1995-2015	160
Figura 2.5 – Andamento dei consumi energetici pro capite (Mwh per abitante) e densità demografica (centinaia di persone per km ²) UE-28, anni 1995-2015	161
Figura 3.0- <i>Payment structure</i> : confronto tra <i>Fixed-price model</i> e <i>Premium-price model</i>	208
Figura 3.1- <i>Directed Acyclic Graph</i> (DAG) per lo sviluppo delle rinnovabili elettriche.....	231
Figura 3.2- Meccanismi di supporto alle RES-E e percentuale di paesi che li hanno introdotti	239
Figura 3.3- Andamento della quota di capacità e produzione elettrica da biomassa, geotermico, fotovoltaico ed eolico, in percentuale a quella totale, anni 1995-2015	245
Figura 3.4- Andamento medio delle importazioni nette di energia elettrica in Mtoe, anni 1995-2015.....	247
Figura 3.4- Andamento della quota della capacità e della produzione elettrica da fonti fossili in Megawattora e in percentuale a quella totale, anni 1995-2015	248

Abstract: La presente tesi di dottorato, articolata in tre capitoli autonomi, si pone come obiettivo primario lo studio, teorico ed empirico, della relazione intercorrente tra crescita economica, l'inquinamento ambientale e la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili nei paesi europei. L'elemento centrale del lavoro è rappresentato dal fenomeno della diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. L'evoluzione di queste nuove tecnologie energetiche sta, infatti, generando diversi effetti in grado di sconvolgere i paradigmi energetici preesistenti dominati dai combustibili fossili. Gli esempi sono molteplici: la decentralizzazione dei sistemi di produzione, la convergenza dal basso nei sistemi di incentivazione, il coinvolgimento delle risorse locali, la crescita e la diversificazione negli investimenti e, soprattutto, la capacità di ridurre le emissioni inquinanti. Nella letteratura, nonostante sia largamente riconosciuta la valenza ecologica di tali fonti energetiche, gli studi che analizzano gli effetti della loro diffusione sono contraddistinti da alcune criticità legate, soprattutto, all'evoluzione del progresso tecnologico nel campo delle fonti energetiche rinnovabili e all'individuazione degli schemi di supporto ottimali. I capitoli che compongono il lavoro affrontano tre aspetti distinti ed altamente correlati. Il primo capitolo, analizzando un panel di trenta paesi europei per gli anni 1995-2015, si propone di riesaminare la relazione intercorrente tra le emissioni di gas serra, il GDP pro capite e i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili per quattro differenti indicatori dell'inquinamento atmosferico: il Kyoto *basket* (GHG), il biossido di carbonio (CO₂), il biossido di metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O). Il quadro teorico di base è rappresentato dall'*Environmental Kuznets Curve* (EKC) e l'obiettivo primario consiste nel differenziare l'effetto ambientale del reddito, ampiamente studiato in letteratura, da quello associato ai consumi energetici rinnovabili (il *dampening effect*). Nel secondo capitolo, analizzando i ventotto paesi dell'Unione Europea per il periodo 1995-2015, l'obiettivo è di indagare l'effetto ambientale disaggregato della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (RES-E) per le emissioni di gas serra (GHG), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x) e particolati sospesi (PM 2.5). In tal caso, l'obiettivo è di individuare quale sub-categoria di rinnovabili elettriche (*Non-combustible renewables* o *Combustible renewables*) abbia una maggiore produttività ambientale. La scomposizione energetica esaminata, sulla base dei dati contenuti nei Bilanci Energetici Nazionali, procede, infatti, in due differenti direzioni: da un lato, si analizza separatamente l'effetto ambientale associato

alle due principali categorie di tecnologie energetiche (rinnovabili e fossili), dall'altro, si distingue tra *Non-combustible renewables* (idroelettrico, eolico, solare e geotermico) e *Combustible renewables* (biomassa), una disaggregazione scarsamente analizzata nella letteratura. Il terzo capitolo è incentrato sulla valutazione delle principali politiche energetiche di incentivazione delle rinnovabili elettriche. Sulla base di un panel di dati relativo a ventotto paesi dell'Unione Europea e agli anni 1995-2015, viene indagata l'eterogeneità *cross-country* che caratterizza gli strumenti di supporto alle RES-E non idroelettriche (solare, eolico, geotermico e biomassa) nei paesi europei. Per mezzo di variabili dicotomiche opportunamente costruite, si è analizzata l'efficacia relativa degli incentivi a prezzo fisso (FIT), a premio (FIP) e obbligazionari (RPS) nel promuovere lo sviluppo della capacità (*Cap-non idro*) e della produzione (*Gen-non idro*) di energia elettrica da rinnovabili non idroelettriche. I risultati della ricerca permettono di individuare le variabili strategiche su cui far leva per contribuire a realizzare un modello di sviluppo ecologicamente ed economicamente sostenibile. Le tecnologie di sfruttamento delle fonti rinnovabili costituiscono un'opportunità di sviluppo per intere aree geografiche e per interi comparti industriali oggi in forte crisi di competitività, anche a causa di produzioni fortemente inquinanti.

Abstract: The present doctoral thesis, divided into three autonomous chapters, has as its primary objective the theoretical and empirical study of economic growth, environmental pollution and the diffusion of renewable energy sources in the European countries. The central element is the phenomenon of the diffusion of renewable energy sources. The evolution of these new energy technologies is, in fact, generating different effects that can upset the existing energy paradigms dominated by fossil fuels. There are many examples: decentralization of production systems, bottom-up convergence in European support scheme systems, involvement of local resources, growth and diversification in investments and, above all, the ability to reduce emissions. In the literature, although the ecological value of these energy sources is widely recognized, the studies that analyze the effects of their diffusion are characterized by some critical issues. The problems to be addressed are numerous and linked to the evolution of technological progress in the field of renewable energy sources, and to the identification of optimal energy support schemes. The chapters address three distinct and highly correlated aspects. The first chapter, analyzing a panel of thirty European countries for the years 1995-2015, aims to review the relationship between greenhouse gas emissions, per capita GDP and final consumption of renewable energy sources, using four different pollutants: Kyoto basket (GHG), carbon dioxide (CO₂), methane dioxide (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). The basic theoretical framework is represented by the *Environmental Kuznets Curve* (EKC). The objective is to differentiate the environmental effect of income, widely studied in the literature, from the environmental effect of renewable energy consumption (the *dampening effect*). In the second chapter, analyzing the twenty-eight countries of the European Union for the period 1995-2015, the objective is to investigate the disaggregated environmental effects of electricity production from renewable sources (RES-E) for greenhouse gas (GHG) emissions, oxides of nitrogen (NO_x), sulfur oxides (SO_x) and suspended particulates (PM 2.5). In this case, the objective is to identify which sub-category of electrical renewables (*Non-combustible renewables* or *Combustible renewables*) has the higher environmental impact. The energy breakdown examined, on the basis of the National Energy Balances data, proceeds, in fact, in two different directions: on the one hand, we analyze the environmental effect associated with the two main categories of energy technologies (renewable and fossil), on the other hand, we investigate the environmental effect of

Non-combustible renewables (hydroelectric, wind, solar and geothermal) and *Combustible renewables* (biomass), a breakdown that has been scarcely addressed by the literature. The third chapter focuses on the evaluation of the main energy support scheme policies for electric renewable energy sources. In particular, analyzing the twenty-eight European Union countries for the years 1995-2015, the objective is to investigate the cross-country heterogeneity that characterizes the RES-E non-hydroelectric (solar, wind, geothermal and biomass) support scheme policies in European countries. To this end, by means of appropriately dichotomous variables, we investigate the relative effectiveness of fixed-price (FIT), premium (FIP) and bond (RPS) incentives in promoting capacity (*Cap-non idro*) and production (*Gen-non idro*) of electricity from non-hydroelectric renewables. The relevance of the research consists in identifying the strategic variables that could contribute to creating a model of sustainable development where renewable energy sources represent an opportunity for geographical areas and industrial sectors today in a severe crisis of competitiveness, also due to highly polluting productions.

Introduzione

Le attività economiche esercitate dagli uomini hanno da sempre contribuito ad alterare la natura e l'ambiente che ci circonda causando varie forme di degrado ambientale. Per capire come l'economia e l'ambiente siano correlate in un rapporto di reciproca interdipendenza e vadano considerati insieme in un senso di integrazione, interazione e sostenibilità, basta consultare gli scenari che emergono da alcuni studi sul futuro del pianeta (Cook *et al.*, 2013; Intergovernmental Panel On Climate Change, 2014; World Meteorological Organization, 2017). I dati che affiorano sono molto preoccupanti ed evidenziano come l'umanità stia degradando le sue stesse basi di sostentamento. Negli ultimi anni si sono, infatti, aggravati numerosi problemi ambientali tra cui l'inquinamento acquifero, atmosferico e del suolo. Se da un lato, la realtà empirica ci mostra che le principali cause di questo depauperamento delle risorse naturali vanno ricollegate ai processi industriali, all'agricoltura intensiva, al traffico veicolare e alla produzione di energia elettrica e/o termica, dall'altro, grazie all'interesse della comunità internazionale e all'introduzione di nuove tecnologie, emergono concrete possibilità affinché il fenomeno dell'inquinamento globale sia ostacolato efficacemente.

La questione legata alla tutela degli ecosistemi e, soprattutto, alla ricerca di soluzioni sostenibili che possano assicurare anche un importante volano di sviluppo, è divenuta un tema di interesse globale. Considerando la molteplicità e la variabilità di elementi che potrebbero influenzare il complicato rapporto ambiente-economia, lo studio sistematico di quest'ultimo non rappresenta una strada semplice da percorrere. La strategia seguita nella letteratura è di circoscrivere il campo di ricerca a quei fattori che, più di altri, incidono considerevolmente sullo stato attuale dell'ecosistema e che rivestono una posizione fondamentale nella promozione di un paradigma di sviluppo sempre più sostenibile. In tale contesto, un ruolo cruciale è certamente svolto dal contesto normativo-istituzionale e dal progresso tecnologico in quei settori industriali, tra cui il comparto energetico, ormai divenuti strutturalmente necessari al sostentamento dell'uomo e alla stabilità dei processi di crescita.

Nel settore energetico, elemento centrale della presente ricerca, ciò che preoccupa maggiormente gli ambientalisti e gli economisti è l'elevato grado di sfruttamento dei combustibili fossili (gas e petrolio) dalla cui combustione vengono rilasciati i maggiori

quantitativi di sostanze inquinanti. Numerosi sono stati i cambiamenti tecnologici che hanno interessato il comparto energetico e che hanno migliorato la qualità della vita e dell'ambiente: il riferimento è al fenomeno della diffusione delle fonti energetiche rinnovabili (RES). L'irruzione di queste nuove tecnologie energetiche costituisce un fenomeno in grado di incidere profondamente sull'economia e, soprattutto, sull'ambiente. Si tratta di un processo di distruzione creativa destinato a rivoluzionare i paradigmi tecnologici preesistenti, dato che presenta un'elevata valenza ecologica nella sua capacità di ridurre le emissioni inquinanti.

La presente tesi di dottorato si pone come obiettivo primario lo studio, teorico ed empirico, della relazione intercorrente tra crescita economica, inquinamento ambientale e diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. Il lavoro è, infatti, basato sul principio secondo cui il progresso tecnologico in campo energetico, associato all'introduzione di sistemi di supporto efficaci da parte delle istituzioni, possa costituire la variabile fondamentale su cui far leva per contrastare efficacemente l'inquinamento ambientale. La ricerca si focalizza sul comparto energetico europeo in cui stiamo assistendo ad alcuni cambiamenti epocali nei processi di produzione e nelle attività di consumo. Tali rinnovamenti stanno evidenziando un effetto altamente destrutturante che lascia intuire importanti evoluzioni per il contrasto alle emergenze ambientali, per l'implementazione di politiche energetiche efficienti e per un consistente sviluppo territoriale di medio-lungo termine.

Il lavoro di tesi è articolato in tre capitoli autonomi. Nel primo capitolo la trattazione è incentrata sulla relazione esistente tra le emissioni di gas serra, la crescita economica e i consumi di fonti energetiche rinnovabili. Utilizzando un panel di trenta paesi europei, valutati per il periodo temporale 1995-2015, il quadro teorico di riferimento è rappresentato da un modello molto ricorrente nell'economia ambientale: il modello di Kuznets, noto in letteratura come *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Partendo dall'analisi della relazione che collega l'incremento del reddito procapite alle emissioni di gas serra, nella prima parte del capitolo è verificata l'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve* (EKC) per quattro diverse sostanze inquinanti (*Kyoto basket*, biossido di carbonio, biossido di metano, protossido di azoto) che sono ritenute alla base degli odierni cambiamenti climatici. Successivamente, al fine di studiare empiricamente le potenzialità ambientali dalle fonti energetiche rinnovabili, il quadro

analitico passa allo studio di un *Extended Kuznets Curve model* per tutti i *polluters* esaminati. Oltre ai consumi energetici da fonti rinnovabili, sono valutate alcune variabili suppletive di controllo che potrebbero influenzare la qualità ambientale come il grado di apertura commerciale, la densità demografica e la produzione di energia elettrica da fonti fossili.

Il secondo capitolo si focalizza, invece, sull'effetto ambientale disaggregato delle tecnologie per la produzione di energia elettrica. Lo scopo del lavoro è di analizzare empiricamente la risposta ambientale, in termini di minori emissioni di gas serra (GHG), ossidi di azoto (N₂O), ossidi di zolfo (SO_x) e particolati sospesi (PM 2.5), di alcune sub-categorie di tecnologie elettriche opportunamente selezionate. Una prima distinzione, molto ricorrente nella *Environment-Energy-Growth literature*, riguarda le due principali categorie di tecnologie elettriche: rinnovabili e fossili. Una seconda classificazione, poco discussa in letteratura, riguarda le rinnovabili elettriche che, note con l'acronimo RES-E, si differenziano in *Non-combustible renewables* (idroelettrico, eolico, solare e geotermico) e *Combustible renewables* (biomassa). Quest'ultima bipartizione è di fondamentale interesse poiché ci consente di valutare distintamente l'effetto ambientale delle tecnologie esaminate e di comprendere le dinamiche ambientali sottese a un processo di transizione energetica. Il focus riguarda i ventotto paesi dell'Unione Europea valutati per gli anni 1995-2015.

Sulla base delle medesime unità osservazionali e temporali del secondo capitolo, nella terza parte del lavoro si studiano le determinanti del processo di diffusione delle rinnovabili elettriche. Al fine di promuovere la diffusione su vasta scala delle RES-E, i paesi europei hanno, infatti, implementato una vasta gamma di misure economiche e normative, denominati *support schemes*, che si distinguono in due macro-categorie. La prima categoria di politiche di supporto (*major support instruments*) include strumenti finanziari, denominati *feed-in tariff* (FIT) e *feed-in premium* (FIP), e obbligazionari, noti come *renewable portfolio standards* (RPS) o *quota system*. Rientrano nella seconda categoria (*supplementary support instruments*) alcuni strumenti di politica energetica come incentivi fiscali, sussidi, prestiti, *net-metering* e quote d'asta, caratterizzate da un'elevata eterogeneità spaziale e temporale. In tal caso, un elemento di fondamentale importanza riguarda l'eterogeneità *cross-country* che caratterizza gli schemi di supporto alle rinnovabili non idroelettriche. In particolare, gli scenari analizzati sono orientati a

verificare se la diversificazione delle politiche energetiche, caratteristica distintiva dei paesi europei, abbia avuto un effetto dissimile sulla diffusione delle RES-E non idroelettriche (biomassa, eolica, solare e geotermica) in termini di capacità elettrica installata (effetto tecnologico) e elettricità generata (effetto produzione). Oltre agli strumenti di politica energetica, nel lavoro sono considerate anche variabili di natura economica, ambientale ed energetica che potrebbero incidere sulla diffusione delle tecnologie elettriche da fonti rinnovabili.

CAPITOLO 1

Energie rinnovabili ed emissioni di gas serra in Europa:

una rivisitazione della Environmental Kuznets Curve

Abstract: Il processo di transizione energetica è divenuto uno dei temi predominanti nella *Environment-Energy-Growth literature*. A causa della crescente disponibilità di dati, un certo numero di autori ha cercato di analizzare empiricamente l'effetto ambientale associato alla diffusione su vasta scala delle fonti energetiche rinnovabili. Il quadro teorico predominante prevede la stima di modelli ambientali estesi di Kuznets poiché consentono di differenziare l'effetto ambientale del reddito da quello associato ai consumi energetici rinnovabili, comunemente chiamato *dampening effect*. Le principali critiche mosse nei confronti della letteratura esistente riguardano la selezione delle variabili (sono analizzate prevalentemente le emissioni di CO₂) e la metodologia di stima (sono tralasciati gli effetti temporali, la *cross-sectional dependence* e la potenziale endogeneità del GDP pro capite). Al fine di superare queste lacune, il presente lavoro si propone di riesaminare la relazione intercorrente tra le emissioni di gas serra, il GDP pro capite e i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili attraverso lo studio empirico di un modello di EKC esteso. Analizzando un panel di trenta paesi europei, valutati per gli anni 1995-2015, sono stati stimati dei modelli multivariati che analizzano il *dampening effect* per quattro indicatori di inquinamento atmosferico: *Kyoto basket* (GHG), biossido di carbonio (CO₂), biossido di metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O). I risultati delle stime, ottenute per mezzo di un panel con *fixed* e *random effects* e l'utilizzo dei Driscoll-Kraay *standard errors* di Hoelche (2007), confermano la presenza di una relazione *inverted U shaped* tra il GDP pro capite e l'inquinamento ambientale per tutte e quattro le tipologie di *polluters*. La relazione dapprima crescente e poi decrescente tra reddito e inquinamento viene rinsaldata da un'ulteriore analisi per mezzo dello stimatore dei minimi quadrati a due stadi (2SLS) che conferma la natura endogena del GDP pro capite. Inoltre, per tutti i *polluters* esaminati si riscontra una relazione sostenibile tra consumi finali di fonti energetiche rinnovabili ed emissioni di gas serra: il valore delle elasticità ambientali delle rinnovabili è negativo e statisticamente significativo, confermando il ruolo strategico delle risorse energetiche rinnovabili per la riduzione dei gas serra.

Keywords: *economic growth; greenhouse gas emission; renewable energies; European countries; Environmental Kuznets Curve; panel data analysis.*

JEL classification: O44; Q42; Q56; Q53; O52

1.0- Introduzione

Tradizionalmente siamo portati a ritenere che la crescita economica, intesa come l'aumento continuo del GDP pro capite, abbia un effetto unicamente positivo sulla qualità della vita all'interno di una società. Tuttavia, se prendiamo in considerazione alcune caratteristiche fisiologiche associate ai processi di crescita, come l'eccessiva industrializzazione o l'intensificazione dei consumi energetici, emergono ingenti costi sociali che alimentano, sempre con maggiore frequenza, una serie di preoccupazioni sulle possibili implicazioni negative dello sviluppo economico. Una di queste preoccupazioni, ormai divenuta di interesse mondiale, riguarda gli effetti della crescita economica sull'inquinamento ambientale. Essa deriva da una considerazione molto semplice: poiché ogni attività economica comporta un certo flusso di emissioni inquinanti, l'espansione della produzione e del consumo, consentiti dalla crescita economica, genera un aumento continuo delle emissioni inquinanti che, certamente, non migliorano il benessere della collettività. È, infatti, noto che gli incrementi consistenti nelle attività di produzione e di consumo, associati ad un aumento della popolazione mondiale, si configurino come la causa principale dell'odierno inquinamento acquifero, atmosferico e del suolo terrestre (Musu, 2007).

Generalmente, la metodologia analitica per analizzare il legame intercorrente tra la crescita economica e l'inquinamento ambientale è rappresentata dal cosiddetto modello ambientale di Kuznets (Grossman e Krueger, 1991; Shafik e Bandyopadhyay, 1992; Panayotou, 1997), noto nella letteratura come *Environmental Kuznets Curve* (EKC). Quest'analisi, effettuata per la prima volta da Grossman e Krueger (1991), rappresenta una metodologia investigativa molto diffusa in letteratura la cui denominazione, coniata da Panayotou (1993), deriva dal lavoro di Simon Kuznets (1955) sulla relazione tra crescita economica e disuguaglianze reddituali. Secondo le ipotesi classiche del modello, la relazione crescita economica-ambiente assume un andamento parabolico, cosiddetto "*inverted U shaped*", che può avere trend più o meno ripidi a seconda della tipologia di sostanza inquinante considerata. In particolare, l'andamento campanulare riflette la congettura secondo cui, partendo da bassi livelli di reddito pro capite, all'aumentare di quest'ultimo è associato un aumento dell'inquinamento ambientale. Successivamente, quando si raggiunge un alto livello di reddito, corrispondente al punto di flesso della curva (*turning point*), l'andamento della

curva cambia e la relazione diviene inversa, nel senso che le emissioni inquinanti tendono a ridursi nel tempo. L'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve* è, tuttavia, molto controversa. Tale dibattito ha, infatti, generato lo sviluppo di numerose meta-analisi (Dinda, 2004; Bo, 2011; Koirala *et al.*, 2011) che, come affermato da Lopez-Menenez *et al.* (2014), «*detect a wide variety of findings as a consequence of the diversity of environmental indicators, data, models and methods*».

Studi più recenti, denominati *Expanded Environmental Kuznets models* (Lapinskienė *et al.*, 2015), hanno cercato di arricchire ulteriormente il modello in questione. In particolare, si riscontrano alcuni studi, anche molto eterogenei, nei quali sono stati inseriti una molteplicità di indicatori di varia natura. L'interesse si è principalmente esteso nei riguardi del grado di apertura commerciale (Cole, 2004; Atici, 2009; Al-Mulali *et al.* 2016), dei fattori normativi ed istituzionali (Lopez e Mitra, 2000; Leitao, 2010; Castiglione *et al.* 2012), del grado di urbanizzazione (Hossain, 2011; Shahbaz *et al.* 2014, Kasman e Duman, 2015) e, in modo particolare, dei consumi energetici (Ang, 2008; Zhang e Cheng, 2009; Ozokcu e Ozdemir, 2017). Già nel 1999, Sun ipotizzò che, quando si considerano le emissioni di anidride carbonica come indicatore del degrado ambientale, il trend della *Environmental Kuznets Curve* andava ricollegato alla cosiddetta *Peak-Theory of Energy Intensity* che conduce l'autore a sostenere un'importante affermazione: «*the CO₂ EKC exists in some countries which have had an energy intensity peak*» (Sun, 1999).

La diffusa consapevolezza del ruolo altamente degradante dell'industria energetica, testimoniata anche dai numerosi interventi normativi da parte delle istituzioni nazionali e/o internazionali, ha generato un importante filone di letteratura denominato *Environment-Energy-Growth literature* (Dogan e Seker, 2016). Nello studio sistematico del rapporto intercorrente tra la crescita economica e l'inquinamento ambientale, un elevato numero di ricercatori ha, infatti, cercato di studiare l'impatto ambientale associato ad un aumento dei consumi energetici (Luzzati e Orsini, 2009; Iwata *et al.*, 2010; Bildirici, 2012; Zhang e Zhao, 2014). Inoltre, grazie alla crescente disponibilità di dati, il focus della ricerca scientifica si è particolarmente incentrato sulle potenzialità ambientali delle cosiddette fonti energetiche rinnovabili (RES). In quest'ottica, una questione di primaria importanza, sviluppatasi soprattutto negli ultimi

anni, riguarda gli effetti di tali fonti energetiche sulle dinamiche di sostenibilità dei singoli territori (Adewuyi e Awodumi, 2017).

Nel contesto appena delineato, il presente lavoro si pone come obiettivo primario lo studio della relazione intercorrente tra la crescita economica, l'inquinamento ambientale e la diffusione delle energie rinnovabili. In accordo con Lopez-Menendez *et al.* (2014), Boluk e Mert (2015) e Alvarez-Herranz *et al.* (2017) la ricerca è basata sul principio secondo cui la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili possa costituire la variabile fondamentale su cui far leva per promuovere uno sviluppo ambientalmente ed economicamente sostenibile. Specificatamente, la finalità della ricerca può essere suddivisa in due aspetti distinti ed altamente correlati. Partendo, infatti, dall'analisi della relazione che collega il reddito pro capite all'inquinamento atmosferico, si cercherà di valutare il ruolo assunto dai consumi di energie rinnovabili nel contrastare l'aumento delle emissioni inquinanti. Tale effetto, denominato *dampening effect* (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017), verrà valutato in un quadro analitico che prevede lo studio empirico di un *Extended Kuznets Curve model*. Ci si attende, infatti, che un aumento dei consumi da RES abbia un effetto negativo sulle emissioni inquinanti. Questo perché le energie rinnovabili sono considerate delle fonti di energia pulita rispetto alle cosiddette fonti energetiche tradizionali (o fossili). Pertanto, all'aumentare dei consumi energetici da fonti rinnovabili dovrebbe corrispondere una riduzione dell'inquinamento atmosferico (Bilgili *et al.*, 2016).

Per realizzare un simile studio, l'attenzione si concentrerà su un panel di trenta paesi europei valutati per il periodo temporale 1995-2015. Specificatamente, nella fase iniziale del lavoro sarà esaminata l'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve* per il periodo temporale in esame. L'elemento di innovatività consiste nel valutare quattro diverse sostanze inquinanti. Quest'ultime, oltre a comprendere il cosiddetto *Kyoto basket* (GHG), includono le emissioni di biossido di carbonio (CO₂), biossido di metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O). Inoltre, considerando il medesimo periodo temporale, si procederà allo studio di un *Extended Kuznets Curve model* in cui, oltre ai consumi energetici da fonti rinnovabili, saranno valutate alcune variabili suppletive di controllo che potrebbero influenzare la qualità ambientale. Tra quest'ultime assumono particolare rilevanza il grado di apertura commerciale (Kasman e Duman, 2015), la densità demografica (Castiglione *et al.*, 2012) e la produzione di energia elettrica da

fonti fossili (Dogan e Seker, 2016). La metodologia empirica adottata prevede, nella prima fase, l'utilizzo delle convenzionali *panel data techniques* con *fixed* e *random effects*. Successivamente, nell'ambito di esercizi di robustezza, a causa della natura endogena del GDP pro capite sarà utilizzato il metodo delle variabili strumentali (2SLS).

Il lavoro, articolato in quattro diverse sezioni, è organizzato nel modo seguente. La fase iniziale contiene una rivisitazione della letteratura riguardante la relazione tra inquinamento ambientale, crescita economica e consumi energetici da fonti rinnovabili. Nella parte centrale del lavoro, dopo aver delineato la metodologia empirica utilizzata, viene descritto il campione analizzato. La sezione finale contiene, invece, i risultati delle stime econometriche.

1.1- *Rivisitazione della letteratura: la genesi dell'EKC*

Nella letteratura economica, la *Enviromental Kuznets Curve* (EKC) assume un percorso ben definito che, caratterizzato da molteplici rivisitazioni di carattere teorico ed empirico (Dinda, 2004; Stern, 2004; Tsurumi e Managi, 2010; Bo, 2011), ha avuto inizio nei primi anni novanta. Oltre al già menzionato lavoro di Grossman e Krueger (1991), la genesi della EKC è da ricollegare ad altri due *working papers* realizzati da Shafik e Bandyoparhyay (1992) e da Panayotou (1993).

Grossman e Krueger (1991), nel loro articolo seminale, analizzarono i possibili effetti ambientali derivanti dal trattato commerciale tra Stati Uniti, Canada e Messico, meglio noto come North American Free Trade Agreement (NAFTA). Secondo le ipotesi degli autori, un incremento del reddito pro capite avrebbe influenzato la qualità ambientale attraverso tre meccanismi differenti denominati effetto scala, effetto composizione ed effetto della tecnica. Per verificare tale ipotesi, sono state eseguite alcune indagini empiriche con l'obiettivo di pervenire ad una stima della relazione causale tra il GDP pro capite ed alcuni indicatori dell'inquinamento atmosferico tratti dal GEMS (Global Environmental Monitoring System). Questi ultimi, rappresentati dalla concentrazione di anidride solforosa (SO₂), materie oscure (*fine smoke*) e particolati sospesi (SPM), furono analizzati per un panel di alcune città dislocate in tutto

il mondo e valutate per gli anni 1977, 1982 e 1988¹. Le equazioni proposte dagli autori, stimate mediante lo stimatore con *fixed* e *random effects*, prevedevano di modellare le emissioni inquinanti come funzione cubica del GDP pro capite, espresso in *Purchasing Power Parity* (PPP). Già in questo contributo iniziale, gli autori ponevano particolare attenzione alle fonti energetiche utilizzate all'interno dei processi produttivi affermando che: «*the major anthropogenic sources of SO₂ are the burning of fossil fuels in electricity generation and domestic heating*» (Grossman e Krueger, 1991). In uno studio successivo, Grossman e Krueger (1995) perfezionarono il modello, considerando nuovi indicatori ambientali espressione dell'inquinamento atmosferico e acquifero². Le unità osservazionali e temporali, così come la metodologia d'indagine, sono le medesime rispetto all'articolo seminale. In particolare, le equazioni stimate dagli autori, con le variabili espresse in livelli, si presentano secondo la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = G_{it}\beta_1 + G_{it}^2\beta_2 + G_{it}^3\beta_3 + \bar{G}_{it-1}\beta_4 + \bar{G}_{it-2}\beta_5 + \bar{G}_{it-3}\beta_6 + \bar{X}_{it}\beta_7 + \varepsilon_{it}$$

dove la concentrazione media giornaliera dell'inquinante *i*-esimo (*Y*) è analizzata in funzione del GDP pro capite (*G*), del GDP medio pro capite nei tre anni precedenti (\bar{G}) e di alcune *proxy* supplementari (*X*) espressione della densità abitativa e della posizione geografica delle unità osservazionali. I risultati delle stime testimoniano la presenza di una relazione ad "N" tra le emissioni inquinanti di anidride solforosa e il GDP pro capite con un *turning point* che si assesta in un intervallo tra i 4000 e i 5000 dollari. Discorso simile, ad eccezione dell'ossigeno disciolto, vale per gli indicatori dell'inquinamento acquifero: i *turning point* stimati, a seconda della sostanza inquinante considerata, oscillano tra i 2.000 (piombo) e gli 11.500 (cadmio) dollari pro capite.

Oltre al lavoro seminale di Grossman e Krueger (1991) si registra la presenza di due altri lavori in cui è possibile collocare la genesi dell'EKC. Un primo studio è quello realizzato da Shafik e Bandyoparhyay (1992) in cui, utilizzando come fonte informativa il database fornito dalla *World Bank*, si analizza la relazione tra il GDP pro capite (*Y*) e

¹ In modo particolare, per le emissioni di anidride solforosa sono stati considerati 42 paesi, per quelle di particolato sospeso 29, mentre per quelle di materie oscure 19. Gli indicatori, misurati in termini di microgrammi per metro cubico, riguardavano città allocate sia in paesi sviluppati che in via di sviluppo.

² Gli indicatori risultano essere: smog, particelle pesanti, ossigeno disciolto, BOD, COD, nitrati, coliformi fecali, coliformi totali, piombo, cadmio, arsenico, mercurio, nichel.

dieci diversi indicatori dell'inquinamento terrestre, atmosferico ed acquifero (e)³. A tal fine sono proposti dei modelli econometrici espressi in tre differenti forme funzionali (lineari, quadratici e cubici) per un panel di 149 paesi valutati per il periodo temporale 1960-1990. Utilizzando dei modelli di regressioni con *fixed effects*, gli autori ottengono risultati alquanto eterogenei: «*some environmental indicators improve with rising incomes (like water and sanitation), others worsen and then improve (particulateas and sulfur oxides) and others worsens steadily (dissolved oxygen in rivers, municipal solid wastes, and carbon emissions)*» (Shafik e Bandyoparhyay, 1992). In particolare, l'ipotesi di una EKC viene verificata esclusivamente per gli inquinanti atmosferici (particolati e ossidi di zolfo), i quali registrano dei *turning poinst* compresi tra i 3.000 e i 4.000 dollari pro capite. Le forme funzionali stimate, dove i parametri β_i sono i coefficienti associati al reddito pro capite, assumono le seguenti forme funzionali:

$$e = \beta_1 \text{ (lineare)}$$

$$e = \beta_1 + 2\beta_2 \log Y \text{ (quadratica)}$$

$$e = \beta_1 + 2\beta_2 \log Y + 3\beta_3 \log Y^2 \text{ (cubica)}$$

Occorre sottolineare che, anche in questo articolo, viene messo in risalto il ruolo ambientale dei consumi energetici: «*suspended particulate matter (SPM), which cause respiratory illness and mortality, are largely the result of energy use*» (Shafik e Bandyoparhyay, 1992).

Panayotou (1993) fu il primo a coniare la terminologia *Environmental Kuznets Curve* ma, a differenza dei lavori precedentemente citati, egli utilizzò dati di tipo *cross-section*. Nei modelli econometrici proposti dall'autore, stimati per due differenti categorie di paesi (sviluppati ed in via di sviluppo), vengono modellati quattro differenti indicatori di degrado ambientale (e)⁴ in funzione quadratica del GDP nominale (INC).

³ Gli indicatori dell'inquinamento ambientale sono rappresentati dalla mancanza di acqua pulita e igiene urbana, dai livelli di particolato sospeso (SPM), dagli ossidi di zolfo (SO₂), dalla variazione delle aree boschive tra il 1961 e il 1986, dal tasso annuo di deforestazione, dall'ossigeno disciolto e dai coliformi fecali nei fiumi, dai rifiuti solidi urbani pro capite e dalle emissioni di CO₂ pro capite.

⁴ Gli indicatori di degrado ambientale riguardano il grado di deforestazione e le emissioni di anidride solforosa, di ossidi di azoto e di particolato solido.

Le equazioni proposte dall'autore sono riconducibili a un modello quadratico che assume la seguente forma funzionale:

$$\ln(e)_{it} = \beta_1 \ln(INC)_{it} + \beta_2 \ln(INC)_{it}^2$$

I risultati ottenuti dall'autore supportano l'ipotesi di una relazione ad U invertita tra il GDP e la deforestazione con dei *turning points* che variano, a seconda della tipologia di paesi, da 823 (*developing countries*) a 1.200 (*developed countries*) dollari pro capite. Per quanto attiene l'inquinamento atmosferico, i modelli di regressione confermano ulteriormente la presenza di una EKC, con dei *turning points* che oscillano tra 3.000 e 5.000 dollari pro capite. Come afferma lo stesso autore: «*our analysis, both theoretical and empirical, suggests an inverted U-shape relationship between at least two forms of environmental degradation and economic development*» (Panayotou, 1993). Successivamente, Panayotou (1997), utilizzando delle specificazioni funzionali cubiche e un panel sbilanciato di trenta paesi valutati per gli anni 1982-1994, ha cercato di perfezionare il modello in questione aggiungendo numerose variabili addizionali di controllo⁵. Le stime, effettuate attraverso un panel con *random* e *fixed effects*, testimoniano la presenza di una curva ad "N" tale per cui, in corrispondenza di un livello di reddito inferiori a 5.000 dollari, l'inquinamento tende a crescere con l'aumento del reddito. Successivamente, per livelli di reddito compresi tra i 5.000 e i 15.000 dollari pro capite, la qualità ambientale aumenta ma, per livelli di reddito compresi tra 15.000 e 20.000 dollari pro capite, la relazione tra inquinamento e reddito diviene nuovamente positiva.

In seguito agli studi pionieristici, data la rilevanza e l'ambiguità delle tematiche affrontate, molti altri autori hanno cercato di perfezionare il modello aggiungendo, molto spesso, alcune variabili suppletive di controllo (si vedano, in particolare, Dinda, 2004; Kijima *et al.*, 2010; Bo, 2011). D'altronde, non sempre sono state confermate le ipotesi riguardanti il trend della curva ambientale di Kuznets, anzi, quest'ultima è stata assoggettata a numerose critiche di carattere empirico e teorico (si veda, in particolare,

⁵ Le variabili addizionali, oltre al GDP pro capite, ricomprendono la densità demografica, il tasso di crescita del GDP, la qualità delle istituzioni, il GDP per chilometro quadrato (effetto scala) e la quota relativa del settore industriale (effetto composizione).

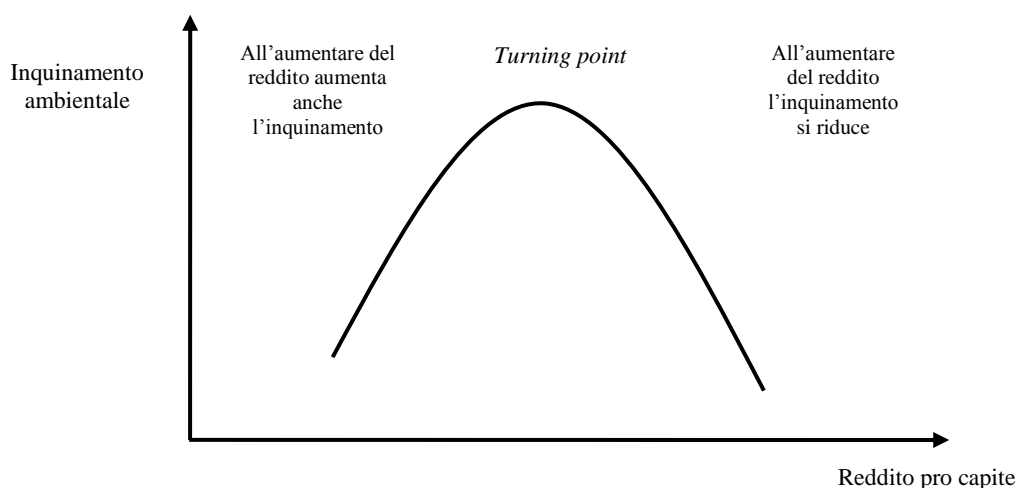
Stern, 2004). Tali critiche risultano accumulate da un giudizio fortemente critico nei riguardi del concetto di economia sostenibile postulato da Grossman e Krueger (1991) che prevedeva l'instaurarsi di una relazione virtuosa tra l'aumento del benessere individuale ed il miglioramento qualitativo dell'ambiente. Invero, è stato più volte verificato che la relazione crescita economica-inquinamento non sempre assume un andamento ad U invertito, ma, a seconda della sostanza considerata, potrebbero sussistere delle relazioni monotone crescenti (Akbostanci *et al.*, 2009) o, addirittura, decrescenti (Tsuzeiki, 2009). Pertanto, se da un lato, alcuni studi (tra cui, Selden e Song, 1994; Unruh e Moomaw, 1998; Cole, 2004; Dutt, 2009; Alvarado *et al.*, 2018) hanno riscontrato un andamento *inverted U shaped* della curva ambientale di Kuznets, dall'altro, molteplici autori (tra cui, Suri e Chapman, 1998; Dasgupta *et al.*, 2002; Tsurumi e Managi, 2010), non hanno riconosciuto un'applicabilità generale del modello: «*a large number of studies have investigated whether the EKC exists both empirically and theoretically. Studies in the literature find an inverted U-shaped relationship, a U-shaped relationship, or a monotonically increasing or decreasing relationship between pollution and rising per capita income levels. Whether greater economic growth hurts the environment or eventually reduces pollution depends on the pollutant*» (Tsurumi e Managi 2010). Conseguentemente, la relazione causale *inverted U shaped* tra reddito ed inquinamento, postulata all'interno della curva ambientale di Kuznets, non può essere generalizzata in quanto è un fenomeno settoriale che varia in funzione dei paesi e delle sostanze inquinanti analizzate (Stern, 2004).

1.1.1-Environmental Kuznets Curve Hypothesis: aspetti teorici

Come anticipato in precedenza, l'ipotesi contenuta nel modello ambientale di Kuznets postula una relazione ad U invertita tra crescita economica ed inquinamento ambientale. In altri termini, all'aumentare del livello di benessere nella società il degrado ambientale tende a decrescere nel lungo periodo. I sostenitori dell'*Environmental Kuznets Curve Hypothesis* affermano che la relazione crescita-inquinamento non sia costante ma, in funzione degli indicatori ambientali analizzati, le emissioni inquinanti tendono dapprima ad aumentare e successivamente, una volta raggiunto il cosiddetto *turning point* della curva, a decrescere. La figura sottostante

costituisce una classica rappresentazione grafica dell'*Environmental Kuznets Curve Hypothesis* molto ricorrente in letteratura (si vedano, in particolare, i contributi di Boluk e Mert 2014; Bilgili *et al.*, 2016; Brown e McDonough, 2016; Alvarez-Herranz *et al.* 2017, Zoundi, 2017; Ozokcu e Ozdemir, 2017).

Fig. 1.1 – Rappresentazione grafica dell'EKC: relazione inquinamento-reddito



L'andamento dapprima crescente e poi decrescente della EKC, riflette una serie di fenomeni multipli (si veda, in particolare, Dinda, 2004) di seguito brevemente analizzati.

1.1.2- Effetti scala, composizione e della tecnica

In accordo con numerosi autori (Luzzati e Orsini, 2009; Bo, 2011; Sulaiman *et al.* 2013; Boluk e Mert, 2014; Bilgili *et al.* 2016; Alvarez-Herranz *et al.* 2017; Ozokcu e Ozdemir, 2017), le principali forze economiche che spiegano l'andamento della EKC sono ascrivibili all'effetto scala, all'effetto composizione e, infine, all'effetto tecnico.

Il primo (*scale effect*) è dato dall'aumento congiunto della popolazione e del reddito pro capite (Grossman e Krueger, 1991). In altre parole, per un dato livello della tecnologia, in una fase iniziale del processo di crescita a un aumento del GDP è associato un incremento dell'inquinamento ambientale come conseguenza del fatto che, per ottenere un aumento dell'output, occorre un maggior utilizzo di risorse all'interno

dei processi produttivi. Se considerassimo esclusivamente l'effetto scala, la crescita economica avrebbe un effetto esclusivamente negativo sulla qualità ambiente.

Il secondo meccanismo sottostante alla EKC, riguarda il cosiddetto *composition effect* (Grossman e Krueger, 1991). Quest'ultimo va inteso come una transizione strutturale dell'economia, nel senso che, nelle fasi più avanzate del processo di crescita, la quota dei settori industriali ad alta intensità di capitale, tipicamente inquinanti, tende a diminuire a favore di settori ad alta intensità di conoscenza che, generalmente, sono contraddistinti da un minore impatto ambientale.

L'ultimo processo che interviene nella relazione ambiente-crescita è il cosiddetto *technique effect* (Grossman e Krueger, 1991). L'intuizione è abbastanza semplice: ad aumenti sempre più consistenti del reddito corrisponde una presa di coscienza per i problemi da parte degli agenti economici. Tale effetto si concretizza attraverso un mutamento dei paradigmi tecnologici preesistenti: l'introduzione su vasta scala di nuove tecnologie a basso impatto ambientale che causano un miglioramento dell'ambiente.

1.1.3- Il commercio internazionale: la Pollution Haven Hypothesis (PHH)

Nella meta-analisi di Dinda (2004), l'autore pone un'enfasi particolare nei riguardi del commercio internazionale. Egli afferma, infatti, che il grado di apertura commerciale può influenzare la qualità dell'ambiente secondo diverse dimensioni. Tra i meccanismi più discussi in letteratura assume particolare rilevanza la cosiddetta *Pollution Haven Hypothesis* (oppure *Displacement Hypothesis*) coniata da Cole (2004). Quest'ultimo discorre di *Pollution Haven Hypothesis* (PHH) per indicare che, nel rapporto che lega la crescita economica all'inquinamento ambientale, un ruolo preminente viene svolto dai flussi commerciali di beni e/o servizi tra paesi. Egli affermava che «*the pollution haven hypothesis states that differences in environmental regulations between developed and developing countries may be compounding this general shift away from manufacturing in the developed world and causing developing countries to specialize in the most pollution intensive manufacturing sectors*» (Cole, 2004). Dalle assunzioni di Cole (2004) emerge una stretta correlazione tra l'incremento degli scambi internazionali, la delocalizzazione della produzione e le normative ambientali. Specificatamente, il libero scambio è visto come un mezzo attraverso cui i

paesi sviluppati, con normative ambientali stringenti, delocalizzano le attività di produzione, ad alto impatto ambientale, nei paesi in via di sviluppo che sono caratterizzati da bassi standard ambientali. «*Under certain circumstances, the pollution intensive industries migrate from countries with stronger environmental regulations to those with weaker regulations. [...] the pollution from the production of pollution-intensive good declines in one country as it increases in other country via international trade*» (Dinda, 2004).

Nella letteratura, numerosi autori (Atici, 2009; Jebli e Youssef, 2015; Dogan e Seker, 2016; Al-Mulali *et al.*, 2016) hanno ravvisato nel commercio internazionale una delle determinanti macroeconomiche più significative che possano chiarire l'andamento della EKC. L'idea di base è che il commercio internazionale influenzi la qualità ambientale attraverso la sua influenza sugli effetti scala, composizione e tecnologico. In particolare, l'aumento degli scambi internazionali conduce a un aumento della produzione aggregata con un conseguente effetto negativo per l'ambiente. La correlazione con l'effetto scala è evidente: «*ceteris paribus, trade leads to increase in size of the economy that increases pollution*» (Dinda, 2004). L'effetto inquinante dell'aumento dei flussi commerciali verrebbe, tuttavia, controbilanciato da un miglioramento dei paradigmi tecnologici (effetto tecnologico) e da una transizione strutturale dell'economia (effetto composizione). In tale contesto, molto interessanti sono le assunzioni di Jebli e Youssef (2015): «*international trade can be used as a channel for diffusing technologies, especially from developed to developing countries, to combat climate change. International trade can increase the availability of goods and services that are more energy efficient. The increase in income made possible by trade openness can lead to a demand for better environmental quality and a reduction in greenhouse gas emissions*». La differenza nelle normative ambientali e il libero scambio, potrebbero, dunque, spiegare l'andamento ad U invertito della curva ambientale di Kuznets.

La PHH ci suggerisce che i cambiamenti strutturali dell'economia, innescati dal libero scambio, causerebbero un miglioramento della qualità ambientale per i paesi con elevati livelli di reddito poiché «*low environmental standards become a source of comparative advantage*» (Dinda, 2004). Tuttavia, Stern (2004) critica fortemente l'idea secondo cui il commercio internazionale possa rappresentare uno strumento di eco-

innovazione: «*there is no clear evidence that trade liberalization results in a shift in polluting activities to lessregulated countries*» (Stern, 2004). L'autore sostiene, infatti, che, in conformità con il principio del vantaggio comparato, l'incremento del commercio internazionale può generare un effetto ambientale incerto: la specializzazione nella produzione di beni e/o servizi in cui si possiede un vantaggio comparato può generare un aumento oppure una riduzione dell'inquinamento in funzione della tipologia di produzione dominante. Inoltre, a causa della PHH, non ci sarebbe un declino globale dell'inquinamento ma, piuttosto, locale poiché le industrie ambientalmente degradanti continueranno a produrre in altri paesi. Pertanto, l'effetto ambientale finale dell'apertura commerciale, o effetto ambientale netto, può essere negativo (Dogan e Seker, 2016), positivo (Balsalobre-Lorente e Shahbaz, 2017) o neutro (Atici, 2009) in funzione di quale dei tre fattori (scala, composizione o tecnologico) sarà dominante nel campione di paesi (*developed* o *developing*) analizzato.

1.1.4-Aspetti normativi ed istituzionali

Tra i fattori macroeconomici che incidono fortemente sull'andamento ad U invertito della EKC rientrano gli aspetti normativi ed istituzionali (Lopez e Mitra, 2000; Leitao, 2010; Castiglione *et al.*, 2012). La considerazione per tali fattori nell'ambito della relazione ambiente-crescita trova, infatti, riscontro in numerosi contributi. Alcuni autori, tra cui Lopez e Mitra (2010), concentrando l'attenzione sulla relazione di causalità tra la qualità istituzionale, l'inquinamento ambientale e la crescita economica, hanno dimostrato che l'inefficienza istituzionale genera un effetto negativo sulla qualità ambientale in quanto non consente un'applicazione efficace delle normative ambientali. Di contro, un contesto istituzionale efficiente, in grado di promuovere normative ambientali valide ed efficaci, implica un miglioramento quali-quantitativo del benessere della collettività.

Altri autori, tra cui Leitao (2010) e Sahli e Ben Rejeb (2015) hanno dimostrato che la corruzione può influenzare la performance ambientale sia direttamente sia indirettamente attraverso il suo effetto endogeno sul GDP pro capite. I risultati accumulanti le due ricerche riguardano, da un lato, l'effetto diretto negativo della corruzione sulle emissioni inquinanti, dall'altro, l'effetto indiretto negativo della

corruzione sul livello del reddito pro capite. Questa causalità bidirezionale è fondamentale per comprendere come l'aumento nel livello del reddito possa influenzare la qualità ambientale dei paesi sviluppati e in via di sviluppo.

Ulteriori lavori si concentrano sui diritti di proprietà (Culas, 2007), sulla tassazione ambientale (Castiglione *et al.*, 2015; Saucedo *et al.*, 2017), sulla *rule of law* (Castiglione *et al.*, 2012) e sulla qualità della *governance* (Dutt, 2009). L'idea accumulante tali lavori è, come sostenuto anche da Dutt (2009), che *«policies specifically designed and enforced to protect the environment were ultimately responsible for the decline in emissions. It is interesting to note that in developed countries, where environmental regulations were imposed, emissions ultimately declined; however in developing countries where there haven't been strong environmental regulations, these emissions have been steadily rising over time»*. Pertanto, la qualità istituzionale, che contraddistingue tipicamente i paesi più sviluppati, è un fattore chiave per comprendere il trend della EKC: tra il livello del reddito e la qualità istituzionale si registra una relazione virtuosa. Un miglioramento della qualità istituzionale, associato all'effetto reddito, potrebbe accelerare la convergenza verso un'economia sostenibile in cui le emissioni inquinanti tendono a decrescere. La relazione positiva tra livello del reddito e qualità normativa-istituzionale rende più probabile il fatto che i paesi sviluppati dispongano di normative ambientali più rigide. *«In fact, there is a large consensus on the positive contribution of institutions to economic development and environmental quality»* (Castiglione *et al.*, 2015).

1.1.5-L'elasticità del reddito alla qualità ambientale

Dal punto di vista microeconomico esiste un importante fattore che incide sulla *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*: la cosiddetta *income elasticity of environmental quality demand* (Dinda, 2004). Tale elemento riflette la congettura secondo cui la domanda per una maggiore qualità ambientale da parte degli individui varia al variare del reddito. In altre parole, all'aumentare del reddito pro capite, gli individui perseguono uno standard di vita più elevato che si traduce in un aumento della domanda per una maggiore qualità ambientale. Questo meccanismo influenza

fortemente l'effetto composizione poiché tende ad accelerare il cambiamento strutturale dell'economia e, dunque, la riduzione dell'inquinamento.

Roca (2003), analizzando la variazione delle preferenze dei consumatori al variare del GDP pro capite, sostiene che, dopo una certa soglia di reddito, la disponibilità a pagare per ottenere un ambiente più pulito aumenta più che proporzionalmente rispetto al reddito. Anche Bo (2011) sostiene che «*people pay more attention to life quality with increasing income, wish to enjoy better environmental welfare, and be willing to consume healthy products. As a result, the government will make stricter rule of environmental protection, which improve environment level eventually*». Pertanto, una volta raggiunto un certo livello di reddito, «*the consumers with higher incomes are not only willing to spend more for green products but also create pressure for environmental protection and regulations. In most cases where emissions have declined with rising income, the reductions have been due to local and national institutional reforms, such as environmental legislation and market-based incentives to reduce environmental degradation*» (Dinda, 2004).

Non sorprende, dunque, che molti autori, tra cui Carson *et al.* (1997) e McConnel (1997), abbiano cercato di analizzare il ruolo di tale elasticità nel complesso rapporto crescita-inquinamento. Le conclusioni di tale filone di letteratura, seppur molto eterogenee, individuano nella *income elasticity of environmental quality demand* un elemento chiave che aiuta a spiegare la relazione virtuosa reddito-inquinamento.

1.1.6-Aspetti controversi: critiche all'EKC

Il dibattito controverso riferito all'*Environmental Kuznets Curve Hypothesis* ha generato lo sviluppo di numerose meta-analisi, tra cui Dinda (2004), He (2007), Bo (2011) e Koirala *et al.* (2011). Tuttavia, la curva ambientale di Kuznets è stata assoggettata a numerose critiche (si vedano, in particolare, Arrow *et al.*, 1995; Stern *et al.*, 1996; Stern, 2004). Da queste analisi emergono importanti risultati.

Stern *et al.* (1996) e successivamente Stern (2004) hanno fortemente criticato l'ideologia alla base della EKC. In entrambi gli articoli le critiche si pongono su due differenti livelli: teorici ed empirici. Per quanto attiene ai limiti teorici, Stern (2004), riprendendo le idee di Arrow *et al.* (1995), sostiene che il concetto di sostenibilità, così

come postulato nei contributi seminali di Grossman e Krueger (1991), Shafik e Bandyopadhyay (1992) e Panayotou (1993), non può essere generalmente accettato. Esso presuppone, infatti, che il reddito sia in grado di generare una maggior qualità dell'ambiente naturale. Stern (2004) sostiene invece che, per aumenti considerevoli del livello del reddito, non è detto che si registri un adeguamento automatico della qualità ambientale anzi, potrebbe addirittura sussistere una relazione monotona e crescente tra inquinamento e crescita. Difatti, prendendo in considerazione i paesi ad alto reddito, si osserva la presenza di un importante *trade-off* nelle emissioni inquinanti: se da un lato, alcune emissioni di sostanze inquinanti per unità di prodotto si sono ridotte nel corso del tempo, grazie soprattutto al contributo di innovazioni tecnologiche e normative ambientali sempre più stringenti, dall'altro, si riscontra l'incremento di nuove sostanze inquinanti, tra cui assumono particolare rilevanza i rifiuti solidi urbani.

Un'assunzione simile si registra nel contributo di Dasgupta *et al.* (2002) in cui viene fortemente criticata la possibilità di generalizzare la relazione postulata dalla curva ambientale di Kuznets a qualsiasi tipologia di sostanza inquinante. Si dimostra, infatti, che non sempre la relazione tra reddito ed inquinamento assume una forma ad U invertita ma, quando si considerano alcune sostanze, definite "*new Toxics*" (Dasgupta *et al.*, 2002), si riscontra un trend crescente nei paesi ad alto reddito. Questa osservazione, tuttavia, non inficia totalmente l'ipotesi contenuta nel modello ambientale di Kuznets poiché, anche per questi *new toxics*, potrebbe manifestarsi un *turning point* a livelli più elevati di reddito. Il controllo dell'inquinamento da piombo, cadmio, mercurio, cromo, ecc., potrebbe dare origine a *turning points* a livelli di reddito più alti, essendo contenuti nelle tecnologie dell'informazione che sono consumate dai paesi più avanzati.

Altro giudizio critico riguarda il postulato trovante fondamento nel ruolo assunto dal commercio internazionale. Quest'ultima tesi afferma che la globalizzazione e, dunque, l'aumento degli scambi tra paesi sviluppati e in via di sviluppo, possa rappresentare uno strumento di eco-innovazione. Una delle principali assunzioni del modello ambientale di Kuznets riguarda, infatti, la visione del libero scambio come un mezzo attraverso cui i paesi sviluppati esternalizzano tutte quelle attività ad alto impatto ambientale. Tuttavia, questa tesi non trova validità generale. Se da un lato, anche i paesi in via di sviluppo impongono delle restrizioni normative alle attività inquinanti,

dall'altro, non si ha alcuna prova evidente che la liberalizzazione degli scambi si traduce in un meccanismo di scambio di attività inquinanti: «*there is no clear evidence that trade liberalization results in a shift in polluting activities to lessregulated countries*» (Stern, 2004). Inoltre, le attività ad alta intensità di capitale, che si concentrano maggiormente nei paesi sviluppati, rappresentano le attività produttive maggiormente inquinanti nel panorama economico internazionale. Di conseguenza, in assenza di differenze normative, i paesi sviluppati potrebbero avere un vantaggio comparato in termini di merci inquinanti rispetto ai paesi in via di sviluppo.

1.2- La letteratura sul legame esistente tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici

Nella letteratura che si propone di analizzare l'*Environmental Kuznets Curve Hypothesis* si registra la presenza di una varietà di studi, teorici ed empirici, molto eterogenei. Tali ricerche si caratterizzano, infatti, per l'utilizzo di diversi indicatori ambientali ed economici, per l'implementazione di varie tecniche econometriche, per le differenti unità geografiche analizzate e per gli intervalli temporali considerati. Inoltre, molteplici sono le variabili addizionali di controllo valutate nei modelli. Tra quest'ultime, assumono particolare rilevanza il grado di urbanizzazione (Hossain, 2011; Zhang e Zhao, 2014), l'apertura commerciale (Atici, 2009; Kasman e Duman, 2015) e gli aspetti normativi ed istituzionali (Castiglione *et al.* 2012). Studi più recenti, denominati "*Expanded EKC Models*" (Lapinskienė *et al.*, 2015), hanno cercato di arricchire ulteriormente il modello in questione, proponendo una serie di studi empirici nei quali sono stati inseriti una molteplicità di indicatori di varia natura. Dall'analisi di questa letteratura, la particolarità che contraddistingue questi nuovi modelli è rinvenibile, come già anticipato nelle sezioni precedenti, nell'attribuzione di un'importanza crescente per l'energia fossile e/o rinnovabile, in termini di consumi, produzione ed efficienza.

Nell'ultimo ventennio, la letteratura che ha cercato di analizzare la relazione tra inquinamento ambientale e crescita economica ha, infatti, posto un'enfasi crescente nei

riguardi dei consumi energetici⁶. Già Van Ierland (1993), sosteneva che: «*it is hardly conceivable that substantial emission reductions can take place without the development of new technologies for production processes, for energy supply and for waste treatment and emission abatement. Very often environmental problems are caused by inefficient use of energy and resources, particularly through the use of inadequate and old-fashioned equipment*». Inoltre, Marrero (2010) afferma che: «*the importance of energy on greenhouse gases (GHG) emissions is reflected by the fact that about 65% of said emissions in the World are currently due to the use and production of energy (IEA, 2008)*».

Non stupisce, dunque, che la presa di coscienza per i problemi ambientali connessi ad una maggiore intensità energetica abbia generato un importante filone di ricerca. Questa letteratura, denominata *Environment-Energy-Growth literature* (Dogan e Seker, 2016), è caratterizzata dalla presenza di un vasto numero di contributi che, in relazione alle grandezze energetiche considerate, è possibile ricondurre a tre differenti filoni di ricerche su:

- ❖ *the relationship between aggregate energy consumption, economic growth and emissions;*
- ❖ *the relationship between disaggregate energy consumption, economic growth and emissions;*
- ❖ *the relationship between renewable energy consumption, economic growth and emissions;*

Ognuna di queste macroaree è, inoltre, contraddistinta da un certo grado di eterogeneità che, in funzione di una molteplicità di fattori, conduce alla presenza di varie sottocategorie. Come sostenuto da Bilgili *et al.* (2016) «*results of these studies may differ from each other in terms of dependent variable of pollution, explanatory*

⁶ Nonostante il termine consumi possa sembrare fuorviante, nella letteratura esaminata di seguito, esso va interpretato come l'impiego totale di energia, ossia la quantità totale di energia primaria consumata da un determinato paese e/o entità territoriale all'interno dei processi produttivi. Ad esempio, i consumi energetici riferiti all'energia elettrica e/o termica si riferiscono all'impiego di fonti energetiche primarie (carbone, petrolio, biomassa, ecc.) nei processi di generazione da parte dei cosiddetti *end-users*. D'altronde, l'International Energy Agency (IEA) si riferisce ai consumi energetici come "*Total primary Energy supply*". Essa, dunque, comprende gli utilizzi totali di tutte le fonti primarie di energia, sia fossili che rinnovabili.

variables, models, time periods and countries». Il riferimento ai consumi energetici ha un significato ben preciso in quanto: «*we proxy environmental pressures with energy consumption a broad encompassing indicator of human pressures on the environment*» (Luzzati e Orsini, 2009). Pertanto, in funzione delle grandezze energetiche valutate nei modelli (aggregate, disaggregate o rinnovabili), l'obiettivo dei vari autori consiste nel verificare empiricamente che tipo di relazione possa sussistere tra le varie categorie di consumi energetici e l'inquinamento ambientale.

Queste categorie di studi, in relazione alla metodologia investigativa utilizzata ed in base alle variabili analizzate, può essere suddivisa in vari sottogruppi. Da un punto di vista metodologico, la quasi totalità delle ricerche utilizza come quadro teorico di riferimento il modello ambientale di Kuznets (Atici, 2009; Zhang e Zhao, 2014; Bilgili *et al.*, 2016; Dogan e Seker, 2016; Dogan e Ozturk, 2017). In particolare, le emissioni inquinanti vengono modellate come funzione quadratica e/o cubica del GDP pro capite mentre, l'intensità energetica viene valutata come variabile addizionale di controllo. Una particolarità che emerge da questo insieme di studi è che, se da un lato, alcune ricerche supportano la validità dell'EKC, dall'altro, una molteplicità di autori, tra cui Du *et al.* (2012), la rifiuta. Molteplici sono le ricerche che forniscono evidenza favorevole all'EKC per Cina (Li *et al.*, 2016), Europa Orientale (Atici, 2009), Unione Europea (Kasman e Duman, 2015), Singapore e Thailandia (Saboori e Sulaiman, 2013), America Centrale (Apergis e Payne, 2009), Islanda (Baek, 2015), Turchia (Seker *et al.*, 2015) e Francia (Ang, 2008); mentre si riscontra un elevato numero di autori che non supporta la validità empirica dell'*Environmental Kuznets Curve Hypothesis* per USA (Dogan e Turkekul, 2015), Turchia (Halicioglu, 2009), paesi OECD (Dogan *et al.*, 2015) e Russia (Pao *et al.*, 2011). Inoltre, si presenta un certo grado di difformità in merito alle unità statistiche analizzate. Si riscontra, infatti, la presenza di un certo numero di contributi, come ad esempio Ang (2008) e Pao *et al.* (2011), che vede come ambito d'applicazione una singola unità statistica valutata per un certo periodo temporale. Di contro, un vasto numero di autori utilizza dati longitudinali riferiti a set di paesi, regioni e/o province (Zhang e Zhao, 2014; Jebli e Youssef, 2015; Kasman e Duman, 2015).

Sempre nella medesima categoria di studi, un certo numero di autori si propone di investigare la suddetta relazione attraverso delle specificazioni analitiche differenti dal

modello ambientale di Kuznets (Say e Yucel, 2006; Alam *et al.*, 2012). Le strategie adottate sono molto varie e, molto spesso, sono orientate a fornire delle stime previsionali di breve e lungo periodo tra i consumi energetici e le emissioni inquinanti di CO₂. Questa tipologia di studi è principalmente orientata ad analizzare la direzione della causalità tra le variabili sopra indicate⁷. Nello specifico, vengono verificate quattro differenti ipotesi: crescita, conservazione, feedback e neutralità (Payne, 2010; Ozturk, 2010; Omri, 2014). Le prime due congetture (*growth and conservation hypotheses*) postulano una causalità unidirezionale tra i consumi energetici e la crescita economica. Nel primo caso, la causalità procede dai consumi energetici verso la crescita (*growth hypothesis*), ciò implica che i primi svolgono un ruolo cruciale nel promuovere la crescita economica. Nel secondo caso (*conservation hypothesis*), invece, la causalità procede nella direzione inversa: è la crescita economica a generare un aumento dei consumi energetici. La *feedback hypothesis*, invece, postula una causalità bidirezionale tra i consumi energetici e la crescita economica. Infine, l'ipotesi di neutralità racchiude il concetto secondo cui non sussiste alcuna relazione causale tra consumi energetici e crescita economica poiché l'effetto è trascurabile. Tuttavia, Adewuyi e Awodumi (2017) sostengono che «*generally, findings on the causal relationship among renewable energy consumption, economic growth and carbon emissions remain inconclusive both at single-country and multi-country levels given the various methodologies adopted as well as the specific nature of countries and regions analysed*».

Occorre comunque notare che, nonostante le molteplici difformità che contraddistinguono tali ricerche, vi è un certo grado di omogeneità nella valutazione dell'effetto ambientale associato ai consumi energetici. In particolare, così come evidenziato anche da Dogan e Seker (2016), i risultati di questo filone di letteratura testimoniano la presenza di alcuni problemi ambientali associati ad una maggiore intensità energetica aggregata: all'aumentare dei consumi energetici totali corrisponde un maggior inquinamento ambientale (Atici, 2009; Zhang e Zhao, 2014; Kasman e Duman, 2015; Ozokcu e Ozdemir, 2017). Di contro, i consumi energetici da fonti rinnovabili registrano un effetto positivo sulla qualità ambientale (Lopez-Menendez *et al.*, 2014; Bilgili *et al.*, 2016; York e McGee, 2017) che verrà di seguito approfondito.

⁷ In modo particolare, vengono implementati dei test inferenziali, come ad esempio il test di Toda-Yamamoto oppure il test di causalità di Granger, caratterizzati da un'elevata eterogeneità spaziale e temporale.

1.2.1-La letteratura sul legame esistente tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici da fonti rinnovabili

Di seguito sono brevemente descritte le principali strategie investigative emerse dalla revisione dei contributi presenti in letteratura che, in accordo con gli obiettivi della presente ricerca, forniscono una valutazione del legame intercorrente tra i consumi energetici da fonti rinnovabili, le emissioni inquinanti e la crescita economica.

La letteratura scientifica che si propone di analizzare la relazione causale tra inquinamento ambientale, consumi energetici e crescita economica è caratterizzata dalla presenza di un filone di ricerche scientifiche molto recente. Come affermano Dogan e Seker (2016), la diffusione su vasta scala delle fonti energetiche rinnovabili nel settore dell'elettricità, del riscaldamento e dei trasporti ha generato un interesse crescente nei ricercatori che, con approcci metodologici differenti, hanno cercato di fornire una valutazione quali-quantitativa ai consumi energetici da fonti rinnovabili nelle dinamiche di sostenibilità dei territori. Questa letteratura, di recentissima collocazione⁸, viene denominata "*literature on the relationship between renewable energy consumption, economic growth and emissions*" (Adewuyi e Awoduni, 2017).

Anche in questo caso si registra la presenza un certo grado di diversità tra i vari contributi presenti in letteratura. La direzione di una tale difformità è determinata da una molteplicità di fattori: periodi temporali, approcci analitici e metodologici ed, infine, unità statistiche di riferimento. Una prima fonte di diversità è strettamente connessa ad elementi di carattere spaziale; si distinguono, infatti, ricerche che si concentrano sulle dinamiche energetiche dei singoli paesi (Boluk e Mert, 2015) ed altre che analizzano più unità statistiche valutate per un periodo temporale medio-lungo (Lopez-Menendez *et al.*, 2014). Un secondo elemento distintivo, strettamente connesso al precedente, riguarda le metodologie investigative. Si riscontrano, infatti, indagini basate su serie storiche

⁸ Nell'articolo realizzato da Adewuyi e Awoduni (2017) si legge, infatti, «*more studies on renewable energy consumption were published in very recent time (2014-2016)*».

(Boluk e Mert, 2015, Sulaiman *et al.*, 2013) e/o dati longitudinali (Lopez-Menendez *et al.* 2014; York e McGee, 2017). Inoltre, i modelli stimati si differenziano, da un lato, per le forme funzionali utilizzate, dall'altro, per la presenza di numerose variabili addizionali di controllo. Si assiste, infatti, ad *Extended Kuznets Curve Models* in forma quadratica (Boluk e Mert, 2015; Bilgili *et al.*, 2016; York e McGee, 2017) e/o cubica (Lopez-Menendez *et al.* 2014; Alvarez-Herranz *et al.*, 2017) in cui vengono valutati, in aggiunta ai consumi energetici da fonti rinnovabili, anche il raggiungimento del target energetico europeo (Lopez-Menendez *et al.*, 2014), il grado di apertura commerciale (Sulaiman *et al.*, 2013), il grado di urbanizzazione (York e McGee, 2017), il budget pubblico per la ricerca e sviluppo in campo energetico (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017), l'efficienza energetica (Liobikiene e Butkus, 2017), il tasso di crescita della popolazione (Zoundi, 2017) e la produzione totale di energia elettrica (York e McGee, 2017).

Discorrendo in maniera più approfondita della letteratura che, avvalendosi del modello ambientale di Kuznets, fornisce un quadro analitico ben preciso, emerge un contributo pionieristico realizzato da Lopez-Menendez *et al.* (2014). L'analisi degli autori è orientata a fornire una valutazione della relazione esistente tra la crescita economica, le emissioni inquinanti di gas serra e l'intensità energetica da fonti rinnovabili (RES). Queste ultime rappresentano il nucleo centrale della ricerca. Gli stessi autori sostengono che «*in this paper we assume that, since energy is at the heart of the environmental problem it should also form the core of the solution. Therefore Renewable Energy Sources (RES) are expected to play an outstanding role in the reduction of environmental costs*» (Lopez-Menendez *et al.*, 2014). Il dataset utilizzato dagli autori, fornito da Eurostat, è rappresentato da un panel di ventisette paesi europei valutati per il periodo temporale 1996-2010. Il modello stimato, con variabili espresse sia in livelli assoluti che su base logaritmica, consiste in una funzione cubica delle emissioni totali di gas ad effetto serra, espresse in termini di tonnellate ed indicizzate al 1990, sul GDP pro capite. Vengono anche considerate due variabili suppletive di controllo rappresentate da una *dummy* (D20) che assume valore uno per gli stati che hanno raggiunto il target europeo del 20% nei consumi finali di fonti rinnovabili e da una variabile continua correlata all'intensità energetica rinnovabile, ossia la percentuale di energia elettrica generata da fonti rinnovabili (RES). L'ipotesi di base è rappresentata dal fatto che, sebbene il livello delle emissioni inquinanti possa differire in relazione

all'elemento territoriale, l'elasticità del reddito alle emissioni è la medesima in tutti i paesi. Pertanto, assumendo un certo grado di omogeneità per i parametri associati al GDP pro capite, gli autori si propongono di stimare la relazione causale tra le variabili sopraelencate per mezzo di un modello panel con *fixed* e *random effects*. Le equazioni stimate assumono le seguenti forme funzionali:

$$(1) Y_{it} = \alpha_i + \lambda_t + \beta_1 X_{it} + \beta_2 (X_{it})^2 + \beta_3 (X_{it})^3 + \varepsilon_{it}$$

$$(2) \ln Y_{it} = \alpha_i + \lambda_t + \beta_1 \ln X_{it} + \beta_2 (\ln X_{it})^2 + \beta_3 (\ln X_{it})^3 + \varepsilon_{it}$$

Per quanto riguarda il modello con variabili espresse in termini assoluti, i parametri stimati suggeriscono l'esistenza di una curva a forma di "N", il cui *turning point* è compreso tra 18.990 e 25.457 euro per abitante. Nel caso del modello con variabili espresse su base logaritmica, i termini cubici non sono statisticamente significativi ed i risultati ottenuti non supportano l'esistenza di una EKC. Essi suggeriscono, infatti, la presenza di una relazione dapprima decrescente e poi crescente (*U shaped*) in quanto i coefficienti associati alla variabile espressione del reddito pro capite hanno, rispettivamente, segno negativo e positivo. Per quanto attiene ai coefficienti associati alle variabili addizionali di controllo (RES e D20), essi presentano valori negativi e statisticamente significativi. Pertanto, gli autori ipotizzano che l'esistenza di una *Enviromental Kuznets Curve* sussista esclusivamente nei paesi ad alta intensità di fonti energetiche rinnovabili. Di contro, nei paesi che non hanno pienamente raggiunto il target del 20% si registra la presenza di relazioni ad "N", che conducono a punti di svolta più elevati nel GDP pro capite, ma anche a legami crescenti e, addirittura, decrescenti. L'ipotesi EKC è controversa: l'esistenza di una EKC viene rigettata per il modello in forma ristretta (1) e confermata per il modello esteso (2). Gli autori sostengono, dunque, che l'andamento *inverted U shaped* della curva avviene esclusivamente per i paesi ad alta intensità energetica rinnovabile.

Un ulteriore contributo è il lavoro realizzato da Bilgili *et al.* (2016) che, in relazione alla metodologia econometrica, rappresenta uno studio innovativo della Curva ambientale Kuznets (EKC). In particolare, attraverso l'utilizzo di un panel di diciassette paesi OECD valutati per il periodo temporale 1977-2010, si studia l'impatto potenziale dei consumi energetici da fonti rinnovabili sulle emissioni pro capite di biossido di carbonio. Gli stessi autori affermano: «*this paper employs a model to observe*

specifically the effect of renewable energy usage on pollution level» (Bilgili *et al.*, 2016). A tal fine, viene proposto un modello econometrico in forma funzionale quadratica dove la variabile dipendente, rappresentata dalle emissioni di CO₂ per abitante, viene modellata sul GDP pro capite, sul GDP pro capite in forma quadratica e sui consumi energetici da fonti rinnovabili. Questi ultimi consistono nella quota di energia rinnovabile in percentuale al consumo finale di energia. Le novità apportate dagli autori riguardano sia le variabili esplicative, ossia la considerazione per i consumi energetici da fonti rinnovabili, sia la metodologia applicativa, ossia una combinazione tra *time series* e *panel*. Difatti, sono effettuate delle stime *panel-based*, per il periodo 1977-2010, e stime *country-based* per il medesimo periodo. La fonte informativa è il database World Development Indicators (WDI) della World Bank. Il modello, con le variabili espresse in forma logaritmica, assume la seguente forma funzionale:

$$\ln CO_{2,it} = B_{0i} + \beta_{1i} \ln GDP_{it} + \beta_{2i} (\ln GDP_{it})^2 + \beta_{3i} \ln RE_{it} + \varepsilon_{it}$$

Per quanto attiene all'intero set di paesi, si ha evidenza empirica dell'esistenza di una EKC in quanto i coefficienti associati al GDP pro capite sono statisticamente significativi e di segno opposto. Nelle stime *country-based*, invece, si osserva che in alcuni paesi (Australia, Belgio, Grecia, Nuova Zelanda, Portogallo e Turchia) l'ipotesi EKC è verificata mentre, in altri (Francia, Lussemburgo, Paesi Bassi e Norvegia), non si evince alcuna relazione ad U rovesciata tra reddito ed inquinamento. Inoltre, il coefficiente associato ai consumi da fonti rinnovabili è negativo e conferma che all'aumentare dei consumi di energia rinnovabile le emissioni di CO₂ si riducono.

Una ricerca interessante è l'articolo realizzato da Boluk e Mert (2015) in cui si analizza la relazione tra le emissioni pro capite di CO₂, il GDP pro capite e la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (ad esclusione dell'idroelettrico) in Turchia. Tale studio rientra in quell'insieme di contributi che si focalizzano su un'unica entità statistica, in questo caso la Turchia, osservata per gli anni 1961-2010. La motivazione che ha spinto gli autori ad effettuare una simile ricerca è rinvenibile, da un lato, nella crescita esponenziale della domanda e delle importazioni di energia elettrica registrata in Turchia negli ultimi anni, dall'altro, nell'aumento sostanziale delle emissioni inquinanti. Basti pensare che *«Turkey's GHG emissions (CO₂ equivalent) increased 124% in the last decade and 72% of total emissions approximately emitted*

from energy sector in 2011» (Boluk e Mert, 2015). Utilizzando come quadro analitico di riferimento un *Extended EKC model*, gli autori analizzano l'impatto dell'elettricità generata dalle fonti rinnovabili sulle emissioni di CO₂ attraverso un modello *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL). Il modello stimato assume la seguente forma funzionale:

$$CO_{2t} = B_0 + \beta_1 GDP_t + \beta_2 (GDP_t)^2 + \beta_3 EPR_t + \varepsilon_t$$

In particolare, le emissioni di CO₂, espresse in tonnellate metriche pro capite, vengono modellate come funzione quadratica del GDP pro capite a prezzi costanti. Inoltre, come variabile addizionale di controllo è analizzata una *proxy* energetica (EPR) che indica la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, ad esclusione dell'idroelettrico, espressa in termini pro capite ed in Kilowattora. I dati sono stati forniti da World Bank. La procedura implementata dagli autori conduce alla prova dell'esistenza di una EKC in Turchia: sia nel lungo periodo che nel breve periodo, i coefficienti associati al GDP pro capite si alternano con segno positivo (GDP) e negativo (GDP al quadrato). In modo particolare, la relazione inquinamento-crescita economica diviene negativa in corrispondenza di un *turning point* pari a 9.920 dollari pro capite. Per quanto attiene al coefficiente associato all'intensità energetica da fonti rinnovabili, esso risulta statisticamente significativo ed assume segno negativo nel lungo periodo. Tuttavia, nel breve periodo, esso assume segno positivo. Questo risultato implica che la produzione di energia elettrica da RES contribuisce a migliorare l'ambiente con un certo ritardo. Pertanto, gli autori sostengono che la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili produrrà un effetto ambientalmente ed economicamente sostenibile.

Un contributo sullo studio di un singolo paese, precedente a quello di Boluk e Mert (2015), è il lavoro di Sulaiman *et al.* (2013) in cui viene studiato l'effetto della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sulle emissioni di gas serra in Malaysia. Utilizzando, infatti, un *Extended EKC model*, gli autori stimano un modello econometrico che modella le emissioni pro capite di CO₂ (E), in funzione semplice e quadratica del GDP pro capite (Y) e di due ulteriori variabili esplicative rappresentate dall'intensità energetica da fonti rinnovabili (ELP) e dal grado di apertura commerciale (TR). Il modello assume la seguente forma funzionale:

$$E_t = B_0 + \beta_1 Y_t + \beta_2 (Y_t)^2 + \beta_3 ELP_t + \beta_4 TR + \varepsilon_t$$

In particolare, la variabile dipendente del modello è rappresentata dalle emissioni di CO₂, espresse in tonnellate metriche pro capite. Le variabili indipendenti sono date dal GDP pro capite, dalla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili in Kilowattora e dal grado di apertura commerciale misurato come il valore totale delle importazioni e delle esportazioni come percentuale del GDP. I dati, riferiti al periodo temporale 1980-2009, sono stati ottenuti dal World Development Indicators Database (WDI) e, per quanto attiene ai soli dati sulla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, dalla U. S. Energy Information Administration (EIA). La tecnica econometrica utilizzata per esaminare la relazione tra le emissioni di CO₂, la crescita economica e la produzione di energia elettrica è rappresentata da un approccio *Autoregressive Distributed Lag* (ARDL) dove sono stati considerati i logaritmi naturali delle variabili oggetto di studio. I parametri stimati supportano la validità dell'ipotesi di una EKC per la Malaysia in quanto i coefficienti associati al GDP e al GDP al quadrato sono statisticamente significativi e, rispettivamente, assumono segno positivo e negativo. Il *turning point*, in corrispondenza del quale si ha una relazione virtuosa tra la crescita del GDP e le emissioni inquinanti è pari a 8.770 dollari pro capite. Inoltre, l'elasticità ambientale della produzione di energia da fonti rinnovabili assume segno negativo: ad un aumento dell'1% della produzione di energia elettrica da RES, corrisponde una riduzione dello 0,10% delle emissioni inquinanti.

Un altro contributo che fornisce alcune importanti intuizioni sull'effetto positivo delle RES nel contrastare i cambiamenti climatici è l'articolo realizzato da York e McGee (2017). La *research question*, su cui si basa questo lavoro, consiste in una valutazione del ruolo strategico assunto dalla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili nell'accelerare il processo di disaccoppiamento tra crescita economica e emissioni di anidride carbonica. Gli autori dichiarano, infatti, che «*the nature of the relationship between economic growth and emissions is transformed by the rise of renewable energy sources*» (York e McGee, 2017). Lo studio si propone di esaminare le emissioni di CO₂, espresse in tonnellate metriche pro capite e derivanti esclusivamente dal settore elettrico, in funzione del GDP pro capite, della percentuale di energia elettrica generata da fonti rinnovabili (REC), dal grado di urbanizzazione (URB), dalla quota del settore manifatturiero in percentuale del GDP (MF), dalla produzione totale di

energia elettrica (PRTOTO) e dal cosiddetto *Age dependency ratio* (ADR) definito come «*the ratio of people under 15 years of age and over 64 to those 15 to 64*» (York e McGee, 2017). Gli autori assumono, inoltre, che l'effetto della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sulle emissioni inquinanti non è costante, ma varia in funzione del livello del GDP pro capite. Per tale motivazione viene introdotta una variabile d'interazione tra il GDP e la percentuale di energia elettrica generata da fonti rinnovabili. Le variabili, espresse in forma logaritmica, sono state ottenute dal database fornito dalla World Bank. Il campione finale comprende un panel di centoventotto paesi valutati per il periodo temporale 1960-2012. Le equazioni vengono, invece, stimate per mezzo di un panel con *fixed effects* ed errori standard per dati raggruppati (*clustered standard errors*). Il modello assume la forma seguente:

$$\ln CO_{2it} = \alpha_i + \lambda_t + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 PRTOT + \beta_3 \ln REC_{it} + \beta_4 MF_{it} + \beta_5 \ln ADR_{it} + \beta_6 \ln URB_{it} + \beta_6 \ln (GDP * REC)_{it} + \varepsilon_{it}$$

Oltre a questa equazione, «*in initial models, we included a quadratic of the log of GDP per capita to assess whether there is a nonlinear relationship with emissions, such as an environmental Kuznets curve. The quadratic was not significant in any of these initial models, suggesting that the log-linear specification for GDP per capita is appropriate*» (York e McGee, 2017). I risultati delle stime, testimoniano che ad una crescita dell'1% nel GDP pro capite, è associato un aumento delle emissioni inquinanti in un intervallo compreso tra 0,126% e 0,50%. Per quanto attiene alla variabile espressione dell'intensità energetica rinnovabile, il coefficiente ad essa associato assume un valore negativo e risulta statisticamente significativo per tutte le specificazioni proposte. Molto importante è il segno assunto dal coefficiente associato alla variabile d'interazione. Quest'ultimo presenta un segno positivo e statisticamente significativo a testimonianza del fatto che l'effetto del GDP pro capite sulle emissioni varia a seconda del livello delle RES e, inoltre, l'effetto delle RES sulla qualità ambientale varia in base al livello del GDP pro capite. Questo risultato implica che nei paesi con elevati livelli di GDP pro capite, la crescita della produzione di energia elettrica da RES riduce le emissioni inquinanti di una quantità minore rispetto ai paesi più poveri. Questo risultato, secondo gli autori, è da attribuire al fatto che la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, anziché ridurre l'utilizzo di combustibili fossili, tende a sopprimere la produzione di energia nucleare.

Un altro studio interessante è quello realizzato da Alvarez-Herranz *et al.* (2017), in cui, riprendendo le assunzioni effettuate da Balsalobre-Lorente e Álvarez-Herranz (2016), viene analizzato il ruolo delle innovazioni tecnologiche in campo energetico nel complicato rapporto che lega la crescita economica alle emissioni pro capite di gas serra. A tal fine, utilizzando come modello di riferimento la curva ambientale di Kuznets, viene esaminato un panel di diciassette paesi OECD per il periodo 1990-2012. Secondo gli autori, la diffusione delle tecnologie energetiche da fonti rinnovabili, associate ad una maggiore regolamentazione da parte delle autorità centrali, presenta un effetto repressivo sulle emissioni inquinanti, nel senso che sono in grado di anticipare il *turning point* postulato nell'ipotesi EKC. In altre parole, gli autori sostengono che «*energy demand is linked to economic growth, and this connection affects air pollution levels*». (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017). La metodologia investigativa impiegata dagli autori prevede di modellare le emissioni inquinanti sul GDP pro capite e su altre variabili di controllo espressione, quest'ultime, delle dinamiche energetiche dei singoli territori. In particolare, le emissioni di gas serra (GHGs), misurate in milioni di tonnellate equivalenti di petrolio per abitante, sono regredite sul GDP pro capite, espresso in parità di potere d'acquisto, in una forma funzionale semplice, quadratica e cubica. Le novità apportate dagli autori riguardano la considerazione di alcune variabili suppletive di controllo rappresentate dal budget pubblico per la ricerca e sviluppo in campo energetico, dalla percentuale dei consumi energetici da fonti rinnovabili, da una variabile d'interazione tra il GDP pro capite e la quota dei consumi energetici da fonti rinnovabili e da una variabile espressione dell'obsolescenza tecnologica. Il modello assume la seguente forma funzionale:

$$GHG_{it} = \alpha_i + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 (GDP_{it})^2 + \beta_3 (GDP_{it})^3 + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove Z è un vettore che include le seguenti variabili supplementari di controllo:

- ✓ RDETPc_{it}: budget pubblico per gli investimenti in ricerca e sviluppo in campo energetico, espresso in dollari pro capite;
- ✓ RNW_{it}: quota dei consumi finali di energia rinnovabile in rapporto al mix energetico nazionale di ogni paese;
- ✓ GDPpc_{it}*RNW_{it}: una variabile di interazione che riflette l'intensità e/o la direzione della relazione tra la variabile indipendente (RNW_{it}) e la variabile di

risposta (GHGpc_{it}). In altre parole, si vuole valutare l'effetto sulle emissioni inquinanti di una variazione nel reddito pro capite, per un livello determinato di consumi energetici da RES;

Gli autori seguono due procedure econometriche. Inizialmente, viene stimato un modello di regressione con *random e fixed effects* e, successivamente, viene utilizzato il metodo dei minimi quadrati a due stadi (2SLS) al fine di depurare il GDP da quelle variazioni endogene correlate al termine d'errore⁹. In entrambe le procedure analitiche, il segno dei coefficienti associati ai consumi energetici da fonti rinnovabili e alle spese in ricerca e sviluppo in campo energetico assume segno negativo. Inoltre, in accordo con York e McGee (2017), il coefficiente associato alla variabile d'interazione assume segno positivo: esso implica che nelle nazioni con elevati livelli di elettricità prodotta da fonti rinnovabili, la crescita economica aumenta le emissioni inquinanti in misura maggiore rispetto alle nazioni a bassi consumi da RES. Inoltre, l'effetto ambientale delle RES è maggiore nei paesi a basso reddito rispetto ai paesi con redditi medio-alti.

Un altro lavoro è quello realizzato da Liobikiene e Butkus (2017) in cui viene proposto un *Extended Kuznets Curve model* con il quale si studia l'impatto della crescita economica e della diffusione delle fonti energetiche rinnovabili sulle emissioni di gas serra. In modo particolare, viene stimato un *Extended Kuznets Curve model* che tiene conto dell'efficienza energetica (effetto tecnologico) e dei consumi energetici da fonti rinnovabili (effetto sostituzione). La procedura analitica seguita dagli autori è molto articolata. In primo luogo, utilizzando un panel di centoottanta paesi, viene stimato un classico modello ambientale di Kuznets in cui le emissioni di gas serra (EI), espresse in Kilotoni pro capite, vengono modellate in funzione del GDP pro capite e del GDP pro capite al quadrato. Le stime, realizzate per mezzo di un panel con effetti fissi e casuali, supportano l'ipotesi dell'esistenza di una relazione a U invertita tra l'aumento del reddito e l'inquinamento. Tuttavia, se si considerano standard errori robusti all'eteroschedasticità e all'autocorrelazione (*clustered standard errors*), non si registra una forte evidenza empirica a favore della EKC. Questo perché il coefficiente associato al GDP al quadrato, seppur negativo, è statisticamente significativo ad un livello di

⁹ Gli strumenti utilizzati dagli autori consistono nella percentuale della popolazione in età lavorativa e nella percentuale della popolazione che vive in aree urbane.

significatività del 10%. Per tale motivazione, nella seconda parte dell'articolo, gli autori stimano un modello dinamico in cui sono inserite le emissioni inquinanti ritardate di un periodo come variabile di controllo aggiuntiva. Secondo gli autori, infatti, «*past GHG emissions in the country should be considered as an important independent variable to control the potential effects of unobserved historical factors on current economic performance and emissions*» (Liobikiene e Butkus, 2017). Le stime, ottenute attraverso l'applicazione del *Generalised Method of Moments* (GMM), supportano l'ipotesi di una relazione a U invertita tra GDP pro capite ed emissioni di gas serra. Nella parte finale del lavoro, gli autori analizzano l'efficienza energetica e i consumi da fonti rinnovabili per mezzo di un *Extended Kuznets Curve model* in forma lineare. In particolare, Liobikiene e Butkus (2017) sostengono che: «*classic EKC function is modified in a way to analyse technological progress and substitution effects as both proximate causes of the GHG pollution (efficiency of energy usage and share of renewable sources are included as separate RHS variables) along with economic growth, as well as underlying causes which can also have an effect via the proximate variable e economic growth (the same variables are also included as interactions with economic growth)*». Il modello proposto, con variabile espresse in forma logaritmica e con *fixed* (ρ) e *time* (μ) *effects*, assume la seguente forma funzionale:

$$EI_{it} = \alpha + \beta_1 GDPpc_{it} + \beta_2 GDPpc_{it} * REN_{it} + \beta_3 REN_{it} + \beta_4 GDPpc_{it} * EEF_{it} + \beta_5 EEF_{it} + \rho_i + \mu_t + \varepsilon_{it}$$

I risultati delle stime testimoniano che, per tutto il campione, sia il progresso tecnologico (EEF) sia l'effetto sostituzione (REN) presentano un coefficiente negativo e statisticamente significativo. L'evidenza empirica mostra che le due variabili d'interazione (l'efficienza energetica e GDP pro capite, consumi da fonti energetiche rinnovabili e GDP pro capite) fanno, tuttavia, registrare dei risultati controversi. Se il coefficiente associato alla variabile d'interazione tra i consumi da fonti energetiche rinnovabili e il GDP pro capite (β_2) assume segno negativo, il coefficiente associato alla variabile d'interazione tra l'efficienza energetica e il GDP pro capite (β_4) presenta segno positivo. Questo effetto, secondo gli autori, è da imputare all'aumento dei prezzi dell'energia finale: «*environmentally friendly energy costs more compared with energy from traditional sources, despite the fact that price of energy from renewable sources has dropped significantly over last ten years. In such case shift from traditional to*

renewable energy sources should increase energy price, production cost, reduce energy consumption and as a constraint of supply-side growth should lead to production decline and eventually to lower level of GHG emissions» (Liobikiene e Butkus, 2017).

Un più recente contributo è rinvenibile nel lavoro di Zoundi (2017) in cui viene analizzata la relazione di causalità tra i consumi energetici da fonti rinnovabili, lo sviluppo economico, la crescita della popolazione e le emissioni inquinanti di biossido di carbonio. Il campione oggetto di studio consiste in un panel di venticinque paesi africani valutati per il periodo temporale 1980-2012. A tal fine, utilizzando come base informativa la U.S. Energy Information Administration (EIA) e il database fornito dall'African Development Indicators (ADI), l'autore si propone di modellare le emissioni pro capite di CO₂, indicate con l'acronimo COE, secondo un *Extended EKC model* che assume una forma funzionale semplice e quadratica. L'equazione stimata presenta la seguente specificazione funzionale:

$$\begin{aligned} \ln(COE)_{it} = & \beta_0 + \beta_{1i} \ln(INC)_{it} + \beta_2 (\ln INC_{it})^2 + \beta_3 \ln(REC)_{it} \\ & + \beta_4 \ln(PEC)_{it} + \beta_5 \ln(POP)_{it} + \varepsilon_{it} \end{aligned}$$

In particolare, oltre al GDP pro capite (INC), sono analizzati i consumi energetici da fonti rinnovabili pro capite (REC), i consumi di energia primaria pro capite (PEC) e il tasso di crescita della popolazione (POP). L'autore si propone di stimare il modello sopraindicato attraverso una procedura econometrica molto articolata che può essere così sintetizzata: *«the preliminary investigation is a unit root test. If a series were found to be integrated, one would check the possible cointegration among variables by running a cointegration test. Finally, if variables are cointegrated, in other words if there is a long-run relationship among variables, one would estimate the long-run coefficients»* (Zoundi, 2017). Di conseguenza, all'interno della letteratura analizzata, si riscontra un'innovazione teorica connessa alla stima dei coefficienti di regressione di breve e di lungo periodo. In particolare, si rende evidente una combinazione tra la cosiddetta *panel cointegration technique* e alcuni importanti procedure che includono *«the system GMM, the Dynamic fixed effect (DFE), the Pooled mean Group (PMG) and the Mean Group (MG) estimators»* (Zoundi, 2017). I risultati delle stime testimoniano, da un lato, la strategicità ambientale assunta dalle fonti energetiche rinnovabili, dall'altro, l'effetto ambientalmente negativo associato ad un aumento dell'intensità energetica e alla crescita della popolazione. In particolare, si stima che un aumento dei

consumi energetici da fonti rinnovabili generi una riduzione dello 0,1% nelle emissioni di biossido di carbonio. Infine, non si ha evidenza empirica di una curva ambientale di Kuznets per il campione oggetto di studio. Quest'ultimo risultato è strettamente connesso alla tipologia di campione analizzato in quanto, secondo l'autore, i paesi analizzati non hanno ancora raggiunto un livello di reddito tale per cui la relazione crescita-inquinamento possa iniziare a decrescere.

1.2.2- I consumi da RES: strategie investigative

Dagli articoli analizzati, emergono alcuni importanti elementi riassunti nella tabella sottostante. In quest'ultima sono schematicamente raccolte le principali caratteristiche della letteratura esaminata in termini di strategia metodologica, variabili oggetto di studio, unità osservazionali, periodi temporali ed, infine, la validità della *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*.

Tabella 1.1- Contributi analizzati

Autori	Paesi	Periodo	Variabili	Modello	Metodo	EKC
Sulaiman <i>et al.</i> (2013)	Malesia	1980-2009	CO ₂ , Y, Y ² , RES, TR	Quadratico	ADRL, Granger causality test	Si
Lopez-Menendez <i>et al.</i> (2014)	UE 27	1996-2010	CO ₂ , Y, Y ² , RES	Cubico	FE, RE	Controversa
Boluk e Mert (2015)	Turchia	1961-2010	CO ₂ , Y, Y ² , RES	Quadratico	ADRL, Granger causality test	Si
Bilgili <i>et al.</i> (2016)	17 paesi OECD	1977-2010	CO ₂ , Y, Y ² , RES	Quadratico	DOLS, FMOLS	Si
Alvarez-Herranz <i>et al.</i> (2017)	1990-2012	17 paesi OECD	GHG, Y, Y ² , Y ³ , RES, RDET	Cubico	FE, RE, IV	Si
York e McGee (2017)	128 paesi	1960-2012	CO ₂ , Y, Y ² , RES, URB, MF, EP	Quadratico/ Lineare	FE, RE	No
Zoundi (2017)	25 paesi africani	1980-2012	CO ₂ , Y, Y ² , RES	Quadratico	DOLS, GMM, FMOLS, PMG, MG	No
Liobikiene e Butkus (2017)	180 paesi	1990-2011	GHG, Y, Y ² , Y ³ , RES, EEF	Quadratico/ Lineare	FE, RE, GMM	Controversa

Nota: CO₂= emissioni di CO₂; GHG= emissioni di gas serra; Y= GDP, RES= consumi energetici da fonti rinnovabili; MF= quota del settore manifatturiero; TR= apertura commerciale; EP= produzione elettrica totale; URB= grado di urbanizzazione; RDET= budget pubblico per gli investimenti in R&S in campo energetico; EEF= efficienza energetica; ADR= age dependency ratio; PRTOT= produzione totale di energia elettrica; PMG=Pooled Mean Group, MG=Mean Group; DOLS= Dynamic Ordinary Least Squares; FMOLS= Fully Modified Ordinary Least Squares; GMM= Generalised Method of Moments; FE= Fixed Effects; RE= Random Effects; ADRL= Autoregressive Distributed Lag; IV= Instrumental Variables.

L'effetto ambientale associato ad un maggior utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili nel rapporto inquinamento-crescita economica è stato esplorato da diversi

punti di vista. Gli elementi che contraddistinguono tale letteratura sono molteplici. In primo luogo, nella maggior parte dei casi le ricerche testimoniano la presenza di un effetto positivo sulla qualità dell'ambiente. Tuttavia, i lavori che si propongono di esaminare il ruolo dei consumi energetici da fonti rinnovabili nel rapporto ambiente-crescita, sono in numero relativamente piccolo. Inoltre, ad eccezione di Alvarez-Herranz *et al.* (2017) e di Liobikiene e Butkus (2017), la totalità di quest'ultimi si concentra esclusivamente sulle emissioni di CO₂ (Sulaiman *et al.*, 2013; Lopez-Menendez *et al.*, 2014, Boluk e Mert 2015; Bilgili *et al.*, 2016; York e McGee, 2017) per valutare il *dampening effect* delle rinnovabili. Tuttavia, sarebbe più opportuno esaminare indicatori alternativi dell'inquinamento atmosferico poiché il fenomeno delle emissioni di gas serra comprende una vasta categoria di sostanze inquinanti differenti dagli ossidi di carbonio. Il Protocollo di Kyoto (1997), infatti, disciplina il cosiddetto *Kyoto basket*, un indicatore che comprende le emissioni di sette gas serra: l'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄), il protossido di azoto (N₂O), gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC), il trifluoruro di sodio (NF₃) e l'esafluoruro di zolfo (SF₆). Tali sostanze, come varrà di seguito approfondito, sono contraddistinte da un *Global Warming Potential* (GWP) molto differente.

Per quanto riguarda invece, le unità territoriali analizzate, occorre notare che, ad esclusione di Lopez-Menendez *et al.* (2014), non si evincono ricerche che valutano l'effetto dei consumi energetici da fonti rinnovabili nelle dinamiche di sostenibilità che legano l'inquinamento atmosferico alla crescita del GDP per l'intero territorio europeo. Pertanto, valutare i consumi energetici aggregati da fonti rinnovabili, soprattutto nel contesto europeo contraddistinto da una forte dipendenza dalle importazioni di energia elettrica, potrebbe condurre a risultati molto interessanti. Storicamente, infatti, uno dei maggiori problemi che affligge la realtà energetica europea è rappresentato dalla forte dipendenza dalle importazioni di fonti primarie di energia: la domanda energetica complessiva è soddisfatta soprattutto attraverso il ricorso ai combustibili fossili, presenti in quantità esigue sul territorio comunitario (Eurostat, 2017, "*Energy production and imports*").

Dalla rassegna della letteratura emergono anche alcune importanti criticità connesse all'utilizzo di variabili esplicative di varia natura. Ad eccezione di York e McGee (2017), numerosi autori stimano dei modelli ambientali di Kuznets senza tener

conto di alcuni importanti fattori che potrebbero influenzare la qualità ambientale. Il riferimento è alle fonti energetiche tradizionali (gas, carbone e petrolio). Stimare il *dampening effect* delle rinnovabili senza tener conto della possibile relazione di causalità tra le fonti energetiche tradizionali e le emissioni di gas serra potrebbe generare ad una forma di distorsione da variabile omessa. La motivazione è da ricollegare al fatto che le fonti energetiche tradizionali rappresentano un importante predittore delle emissioni inquinanti (Boluk e Mert, 2014; Farhani e Shahbaz, 2014; Shafiei e Salim, 2014; Dogan e Seker, 2016).

1.3- Metodologia: specificazioni econometriche

Nell'ambito del quadro teorico e analitico precedentemente analizzato, sarebbe interessante verificare empiricamente se e in che misura la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili possa rappresentare uno strumento efficace per la lotta all'inquinamento ambientale sul territorio europeo. Il processo di transizione energetico potrebbe, infatti, influenzare la relazione che lega lo sviluppo economico all'inquinamento ambientale. Generalmente, gli *EKC models* consistono in funzioni quadratiche (Atici, 2009; Shahbaz *et al.* 2014; Kasman e Duman, 2015; Boluk e Mert, 2015) e/o cubiche (Zhang e Zhao, 2014; Ozokcu e Ozdemir, 2017; Alvarez-Herranz *et al.*, 2017) di un indicatore dell'inquinamento ambientale sul livello del reddito pro capite. La validità della EKC dipende, ovviamente, dalla forma polinomiale stimata. Di contro, le tecniche econometriche impiegate sono molto variegata e risultano strettamente connesse alla tipologia di dati analizzati (dati sezionali, serie storiche e/o dati panel). Nel caso di dati longitudinali, si assiste, all'utilizzo di regressioni con *fixed* e/o *random effects* (Atici, 2009; Zhang e Zhao, 2014; Lopez-Menendez *et al.*, 2014; Ozokcu e Ozdemir, 2017; York e McGee, 2017), *Fully Modified Ordinary Least Squares* (Jebli e Youssef, 2015), *Dynamic Ordinary Least Square* (Bilgili *et al.*, 2016), *Instrumental Variables* (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017) e *Generalised Method of Moments* (Zoundi, 2017). Nel caso di serie storiche, invece, è spesso impiegata la tecnica *Autoregressive Distributed Lag* (Sulaiman *et al.*, 2013; Boluk e Mert, 2015).

Se, come anticipato, l'approccio metodologico seguito nella *Environment-Energy-Growth literature*, è molto eterogeneo, va comunque notato che la maggioranza degli

autori utilizza una funzione polinomiale, con variabili espresse in termini assoluti e/o logaritmici (si veda, in particolare, Bilgili *et al.*, 2016), che assume la seguente forma funzionale:

$$E = f(Y, Y^2, Z)$$

dove E, Y, Y^2 rappresentano, rispettivamente, il livello di inquinamento pro capite, il GDP pro capite, il GDP pro capite al quadrato. Inoltre, come detto più volte in precedenza, sono esaminate altre variabili suppletive di controllo (Z) che, se omesse, potrebbero generare una forma di distorsione nei coefficienti stimati.

L'eterogeneità delle tecniche econometriche implementate trova fondamento nelle numerose critiche mosse nei riguardi della *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*. Stern (2004) ritiene, infatti, che potrebbero sussistere problemi di eteroschedasticità, simultaneità e variabili omesse. Tuttavia, occorre notare che, per ottenere una stima della curva ambientale di Kuznets, la tecnica econometrica più diffusa in letteratura segue una strategia bene precisa: «*most studies attempt to estimate both the fixed effects and random effects models, also including the Hausman test in order to select the most suitable option*» (Lopez-Menendez *et al.*, 2014). Difatti, le variabili che incidono sulle emissioni climalteranti possono essere molteplici, basti pensare al traffico automobilistico, alla tipologia di veicoli utilizzata per il trasporto pubblico urbano, all'atteggiamento degli agenti economici, alla cultura ambientale oppure alla densità di auto sulle strade urbane e/o extraurbane. Poiché tali fattori sono difficilmente quantificabili e, dunque, non possono essere inserite nel modello di regressione, si potrebbe presentare un problema di distorsione da variabili omesse. Il modello con effetti fissi e casuali, sfruttando le dimensioni temporali e longitudinali dei dati panel, ci consente di mantenere queste fonti di distorsione costanti nel tempo e/o tra le entità.

Nella letteratura si riscontra, dunque, l'utilizzo preminente di due tipologie di modelli per verificare empiricamente la *Environmental Kuznets Curve Hypothesis* quando si hanno a disposizione dati longitudinali: *panel fixed effects* e/o *random effects*. Queste ultime presentano assunzioni molto simili: ipotizzano che gli errori siano a media zero, omoschedastici e non correlati in ogni unità (Marcellino, 2006). La differenza sostanziale tra le due metodologie riguarda, invece, i coefficienti di regressione e i termini d'errore. Nel caso di modelli con *fixed effects*, infatti, i

coefficienti sono stimati con il metodo OLS o, alternativamente, mediante l'utilizzo dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* (LSDV, *Least Squares Dummy Variables*). Nel caso di modelli con *random effects*, invece, viene utilizzato il metodo dei minimi quadrati generalizzati (GLS) che assume errori stocastici (*error components model*). Entrambi i modelli sono adatti per analizzare quelle relazioni dove ci si attende che le variabili esplicative abbiano un effetto omogeneo sulla variabile dipendente, ma possano esserci alcune diversità spaziali e/o temporali che sono catturate dall'intercetta (stimatore con effetti fissi) oppure dal termine d'errore (stimatore con effetti casuali).

Tra le due metodologie si configura, però, un problema di scelta in quanto, nel caso in cui la numerosità campionaria è fissa e il periodo temporale molto grande, gli stimatori tendono ad essere identici. Tuttavia, i due differenti stimatori possono essere comparati con l'ausilio del test di Hausman (1978). Quest'ultimo «*can be used to test the inconsistency in the random effects estimate by comparing the fixed effects and random effects estimates*» (Liobikiene e Butkus, 2017). Inoltre, «*we can use a Hausman test to test the null hypothesis that the extra orthogonality condition imposed by random effects estimator are valid*» (Baum, 2006). L'idea generale del test di Hausman è basata sul confronto di due stimatori: uno consistente sia sotto l'ipotesi nulla che sotto l'ipotesi alternativa, e l'altro consistente solo sotto l'ipotesi nulla. Specificatamente, se gli effetti individuali non sono correlati con le variabili indipendenti, il modello *random effects* è più appropriato rispetto a quello *fixed effects*. Di contro, se è rilevata una certa correlazione tra gli effetti individuali e qualsiasi altra variabile esplicativa, lo stimatore *fixed effects* è più efficiente. Schematicamente, il test di Hausman può essere così riformulato:

- Ipotesi nulla (H_0): il modello *random effects* è appropriato;
- Ipotesi alternativa (H_1): il modello *fixed effects* è appropriato;

Sotto l'ipotesi nulla (H_0) il modello con *random effects* è il migliore, nel senso che la stima GLS è BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*). La stima del modello con *fixed effects* è consistente sia sotto H_0 sia sotto H_1 , ma non è efficiente sotto H_0 . Attraverso il test di Hausman è possibile, dunque, verificare l'ipotesi nulla che gli effetti casuali non siano correlati con i regressori contro l'ipotesi alternativa che tali effetti stocastici siano correlati con i regressori.

1.3.1-Specificazione del modello

Come anticipato nella sezione introduttiva, l'obiettivo primario di questo lavoro è di studiare quantitativamente la relazione esistente tra i consumi da fonti energetiche rinnovabili, il livello del reddito e le emissioni di gas serra. Al tal fine, in coerenza con la rassegna della letteratura esaminata in precedenza, viene proposto un modello econometrico che si propone di modellare le emissioni inquinanti in funzione quadratica del GDP pro capite e di ulteriori variabili addizionali di controllo. In modo particolare, vengono stimate una serie di equazioni che, seguendo un *Extended Kuznets Curve model*, assumono la seguente forma funzionale:

$$E = f(Y, Y^2, RES, Z)$$

dove E, Y, Y² e RES rappresentano, rispettivamente, il livello di inquinamento atmosferico (E), il GDP (Y), il GDP elevato al quadrato (Y²) e i consumi energetici da fonti rinnovabili (RES). In aggiunta a queste variabili vengono analizzati alcuni fattori di indiscutibile strategicità ambientale (Z): il grado di apertura commerciale, il grado di densità demografica e la generazione di energia elettrica da fonti fossili.

In particolare, indicando con P la popolazione dell'i-esima unità statistica al tempo t, vengono testate le seguenti funzioni polinomiali:

$$(1) \quad \frac{E}{P_{it}} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it} + \beta_2 * \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it}^2 + \varepsilon_{it}$$

$$(2) \quad \frac{E}{P_{it}} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it} + \beta_2 * \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it}^2 + \beta_3 * \left(\frac{RES}{P}\right)_{it} + \varepsilon_{it}$$

$$(3) \quad \frac{E}{P_{it}} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it} + \beta_2 * \left(\frac{GDP}{P}\right)_{it}^2 + \beta_3 * \left(\frac{RES}{P}\right)_{it} + \beta_3(Z)_{it} + \varepsilon_{it}$$

Riscrivendo le equazioni (1)-(3), con le variabili espresse in termini logaritmici in modo tale da interpretare i coefficienti di regressione come elasticità ed evitare problemi di inconsistenza nelle stime, il presente studio si propone di stimare le relazioni di seguito esplicitate.

$$\ln(e)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_0 + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 1)}$$

$$\ln(e)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_0 + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \beta_3 \ln(res)_{it} + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 2)}$$

$$\ln(e)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_0 + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \beta_3 \ln(res)_{it} + \ln(z)_{it} + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 3)}$$

dove:

- ✓ e : è un indicatore del livello di inquinamento ambientale in termini pro capite;
- ✓ y : è il reddito pro capite;
- ✓ res : è un indicatore dei consumi energetici pro capite da fonti rinnovabili;
- ✓ z : è un vettore che contiene variabili addizionali di controllo (il grado di apertura commerciale, la densità demografica e la percentuale di energia elettrica generata da fonti fossili);
- ✓ α, γ : rappresentano, rispettivamente, gli effetti fissi individuali e temporali;
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore;

Tali forme funzionali ci consentono di verificare empiricamente l'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve Hypothesis* per il campione oggetto di studio (*Modello 1*). In modo particolare, quando si modellano le emissioni inquinanti in una forma funzionale quadratica, l'ipotesi di una curva ambientale di Kuznets può essere verificata valutando il segno e la significatività statistica dei coefficienti associati al logaritmo naturale del GDP pro capite (β_1) e al logaritmo naturale del GDP pro capite al quadrato (β_2). L'ipotesi nulla che i coefficienti β_1 e β_2 siano congiuntamente pari a zero implica che tra il GDP pro capite e le emissioni di gas serra non vi è alcuna relazione. Nel caso in cui il coefficiente β_1 è positivo e il coefficiente β_2 è statisticamente non significativo si registra una relazione monotona e crescente tra GDP ed inquinamento. Di contro, quando β_1 è negativo e β_2 è statisticamente nullo si ha una relazione monotona e decrescente. Andamenti paraboloidi si osservano, invece, nel caso in cui entrambi i coefficienti sono statisticamente significativi. Quando i coefficienti β_1 e β_2 si alternano, rispettivamente, con segno negativo e positivo si configura una relazione dapprima

decescente e poi crescente. Infine, se tali coefficienti si alternano con segno positivo e negativo, si ha una relazione a forma di U invertita tra il GDP e l'inquinamento atmosferico. In quest'ultimo caso è possibile accettare l'ipotesi di una curva ambientale di Kuznets.

Seguendo Stern (2004) se l'EKC è rispettata, il valore del *turning point* (T) è dato dalla seguente formula:

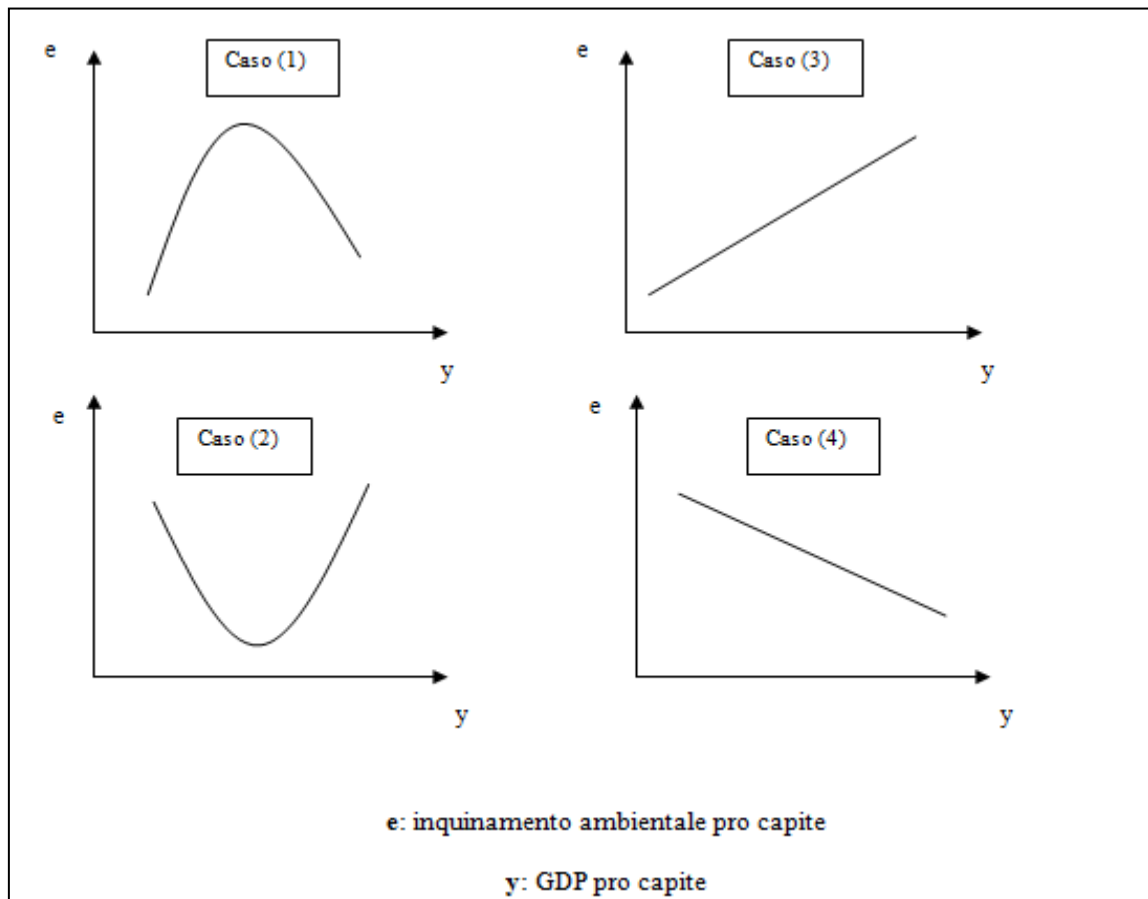
$$\text{Turning point} = \exp[-\beta_1 / (2\beta_2)]$$

La tabella sottostante riassume le ipotesi sottese all'*Environmental Kuznets Curve* in base ai coefficienti di regressione che sono rappresentate graficamente nella figura 1.2.

Tabella 1.2.- Modelli quadratici in base ai coefficienti di regressione

<i>Inverted U Shaped</i>	<i>U Shaped</i>	<i>Monotona e Crescente</i>	<i>Monotona e Decrescente</i>
$\beta_1 > 0$	$\beta_1 < 0$	$\beta_1 > 0$	$\beta_1 < 0$
$\beta_2 < 0$	$\beta_2 > 0$	$\beta_2 = 0$	$\beta_2 = 0$
Caso (1)	Caso (2)	Caso (3)	Caso (4)

Fig. 1.2- Specificazioni quadratiche: rappresentazione grafica relazione crescita economica-inquinamento



Le forme funzionali contenute nel *Modello 2* e nel *Modello 3*, ci consentono di verificare empiricamente il *dampening effect* per il campione oggetto di studio. In particolare, osservando l'elasticità dei consumi energetici da fonti rinnovabili rispetto alla sostanza inquinante analizzata (β_3), si ottiene una valutazione del ruolo qualitativo di tali fonti energetiche (*Modello 2*). Inoltre, in accordo con Sulaiman *et al.* (2013) e York e McGee (2017), il ruolo ambientale delle fonti energetiche rinnovabili viene controllato tenendo conto di ulteriori variabili che potrebbero avere un effetto potenziale, negativo o positivo, sulle emissioni inquinanti (*Modello 3*).

1.4- Fonte dei dati e variabili analizzate

I dati analizzati si riferiscono ad un panel di trenta paesi europei che include i ventotto paesi dell'Unione Europea (Austria, Belgio, Bulgaria, Croazia, Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Olanda, Polonia, Portogallo, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia, Regno Unito) e, in aggiunta, la Norvegia e l'Islanda. Il periodo temporale di riferimento, in funzione alla disponibilità dei dati, riguarda gli anni 1995-2015. Le principali fonti informative sono rappresentate dalle banche dati fornite da Eurostat, OECD e World Bank. Inoltre, per prevenire problemi di inconsistenza ed interpretare i coefficienti di regressione come elasticità, tutte le variabili sono state trasformate prendendo il loro logaritmo naturale.

1.4.1- Variabile dipendente

Nei modelli implementati di seguito, la variabile dipendente è rappresentata dalla quantità di emissioni di gas serra registrate nel campione oggetto di studio per il periodo temporale compreso tra il 1995 ed il 2015. In funzione della disponibilità dei dati, nei modelli stimati di seguito vengono analizzati i seguenti gas serra:

- ✓ Kyoto basket (GHG);
- ✓ Biossido di carbonio (CO₂);
- ✓ Biossido di Metano (CH₄);
- ✓ Protossido di azoto (N₂O);

Tali indicatori dell'inquinamento atmosferico, misurati in tonnellate per abitante, sono estratti dalla banca dati fornita da Eurostat (2017)¹⁰. È importante notare che, con cadenza annuale, i dati sono raccolti dall'European Environment Agency (EEA). Quest'ultima, all'interno del cosiddetto "*Manual For The EEA Greenhouse Gas Data Viewer*" (2016), spiega come le emissioni di gas serra sono contabilizzate e le principali *driving forces* che generano tali sostanze. Il computo delle emissioni è così esplicitato:

¹⁰ Cfr. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics.

$$\text{Total emissions} = [1. \text{Energy}] + [2. \text{Industrial Processes and product use}] + [3. \text{Agriculture}] + [5. \text{Waste}] + [6. \text{Other}]$$

Emerge, dunque, che il calcolo della quantità di gas serra è strettamente correlato alle tipologie di settori industriali dalle quali esse derivano. Tali settori sono classificati in base alla guida fornita dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e includono:

- *Energy*, che comprende tutte le emissioni di gas serra derivanti dalla combustione e dalle emissioni fuggitive di combustibili per produrre energia secondaria;
- *Product use*, che racchiude le emissioni provenienti dai processi industriali ad esclusione della combustione, estrazione, trattamento e trasporto di prodotti combustibili;
- *Agriculture*, che racchiude le emissioni provenienti dall'agricoltura ad eccezione delle acque reflue;
- *Waste*, che contempla le emissioni gas serra derivanti dallo smaltimento, dal trattamento biologico, dall'incenerimento e dalla combustione dei rifiuti solidi. Inoltre, vengono ricomprese anche le emissioni connesse al trattamento e allo scarico delle acque reflue;
- *Other*, che ricomprende tutte le emissioni di gas serra non contemplate nelle categorie precedenti;

È necessario individuare quali possano essere le *driving forces* delle emissioni di gas serra. In tale ambito, un importante documento è rappresentato dal rapporto Eurostat “*Climate change and driving forces*” (2017) nel quale si legge che le principali fonti di emissione di gas serra sono ascrivibili ai processi industriali per la produzione di energia elettrica e/o termica e all'industria dei trasporti. In particolare, «*over three-quarters of the GHG emissions are due to fuel combustion. This includes fuel combustion to generate electricity and heat, produce goods, construct buildings and infrastructure, and to move freight and persons*» (Eurostat, “*Climate change and driving forces*”, 2017).

Prendendo in considerazione i singoli gas serra è importante fare alcune importanti precisazioni. In primo luogo, l'anidride carbonica (CO₂), con un *Global Warming Potential* (GWP) pari ad 1, è il gas serra maggiormente diffuso. Esso è

principalmente prodotto dall'impiego di combustibili fossili (petrolio, gas e carbone) in tutte le attività energetiche, industriali e per i trasporti. Secondo la World Meteorological Organization (WMO, 2017) esso è generato soprattutto dalla combustione di carbone e petrolio nelle centrali termoelettriche, dai processi di deforestazione e da altri cambiamenti che interessano l'uso del suolo terrestre. Il metano (CH_4), invece, formandosi a causa della degradazione di sostanze organiche in ambienti privi di ossigeno, presenta un potenziale di riscaldamento climatico pari a 25. La WMO (2017) individua diverse fonti di tali emissioni. Tra le principali fonti antropogeniche assumono particolare rilevanza le attività di estrazione di combustibili fossili, la decomposizione di rifiuti solidi urbani, gli allevamenti zootecnici e dalle coltivazioni di riso. Il protossido di azoto (N_2O) è un gas serra che deriva principalmente da processi microbiologici e presenta un *Global Warming Potential* (GWP) pari a 298. Esso rappresenta, dunque, il più pericoloso gas serra di quelli valutati. Secondo la WMO, le principali cause delle emissioni antropogeniche di N_2O sono riconducibili all'utilizzo di fertilizzanti in agricoltura, alla combustione di biomassa, ai processi di nitrificazione e denitrificazione, ad un eccesso di deposizione di azoto atmosferico e all'impiego di prodotti chimici.

1.4.2- Variabili esplicative

La selezione delle variabili è stata ovviamente influenzata dai dati a disposizione e, in modo particolare, dalla rassegna della letteratura rilevante. Per comprendere meglio il modello è però necessario spiegare in modo più approfondito il significato delle variabili analizzate. Nei modelli stimati di seguito, le principali variabili indipendenti sono rappresentate dal GDP e dai consumi energetici da fonti rinnovabili.

Per quanto attiene al GDP pro capite, i dati su quest'ultimo sono stati ottenuti dalla banca fornita dall'OECD¹¹. Esso viene misurato in dollari ed in parità di potere d'acquisto (PPP) in modo tale da rendere i dati comparabili a livello osservazionale e temporale (OECD, 2017).

¹¹ Cfr. <https://data.oecd.org/gdp/gross-domestic-product-gdp.htm#indicator-chart>.

La variabile espressione delle fonti energetiche rinnovabili è, invece, definita come il consumo finale di fonti energetiche primarie (*Final Energy Consumption*) all'interno dei processi produttivi. Secondo l'ultimo rapporto Eurostat (2018), tale indicatore «*is the total energy consumed by end users, such as households, industry and agriculture. It is the energy which reaches the final consumer's door and excludes that which is used by the energy sector itself*» (Eurostat, "Energy Glossary", 2018). Esso, seppur con un metodo computazionale multisettoriale, rappresenta, dunque, la quantità di energia consumata da varie categorie di utenti finali (famiglie, pubblica amministrazione, servizi, trasporti, agricoltura) e risulta un indicatore ottimale della diffusione delle fonti rinnovabili (Bilgili *et al.*, 2016). I dati sui consumi finali di energie rinnovabili sono stati ottenuti dalla banca dati fornita da Eurostat e, in accordo con la *Environmental-Energy-Growth literature*, l'indicatore viene misurato in terajoule pro capite. La scelta dei consumi finali lordi è stata influenzata, oltre che dalla letteratura esaminata, dal testo della direttiva CE/2009/28 in quanto la quota di energie rinnovabili sul consumo finale lordo di energia è considerata un indicatore chiave per misurare i progressi compiuti nel quadro della strategia energetica europea 2020.

In aggiunta, al fine di ottenere stime più consistenti, sono valutate alcune variabili addizionali di controllo che potrebbero costituire dei potenziali determinanti delle emissioni di gas serra. Tali *proxy* sono rappresentate, innanzitutto, da un indice di apertura commerciale che, ottenuto dal World Development Indicators (WDI), è definito come la somma delle esportazioni e delle importazioni di beni e servizi misurata in percentuale del GDP (Kasman e Duman, 2015; Dogan e Seker, 2016). Quest'ultimo, potrebbe avere un effetto positivo o negativo sulla qualità ambientale in funzione della conformazione dell'indicatore. Nel caso in cui le importazioni prevalgono sulle esportazioni, si potrebbe registrare un miglioramento della qualità ambientale (Sulaiman *et al.*, 2013; Jebli *et al.*, 2016). Di conto, se le esportazioni tendono ad assumere un ruolo preminente, un aumento dei flussi commerciali potrebbe causare un peggioramento della qualità ambientale (Andreoni e Duriavig, 2011). In alcuni casi (Atici, 2009) tale indicatore non registra alcun effetto sull'inquinamento ambientale.

In secondo luogo, viene valutato un indicatore espressione della densità demografica. Quest'ultimo, estratto dal World Development Indicators (WDI), è

definito come la quantità di persone per chilometro quadrato di superficie terrestre. Esso può registrare effetti bidirezionali sui gas serra. Difatti, Castiglione *et al.* (2012) affermano: «*population density may also have opposing effects on pollution. A negative impact, in fact, is noted because densely populated countries use less energy for transportation per capita than more sparsely populated countries. Positive effects on pollution can, on the other hand, be due to more intense consumption of households and production sector*».

Un'ulteriore *proxy*, ritenuta alla base dell'inquinamento ambientale (Santana de Souza *et al.*, 2018), è rappresentata dalla quota di energia elettrica generata da fonti fossili (gas naturale, petrolio e carbone) rispetto alla produzione totale. Tale variabile, estratta dal database fornito da World Bank, trova un diffuso utilizzo in letteratura (Adewuyi e Awodumi, 2017). Inoltre, si registra una certa uniformità di giudizio all'interno della *Environmental-Energy-Growth literature* secondo cui ad un aumento della produzione di energia elettrica da fonti fossili è associato un aumento delle emissioni inquinanti.

La tabella sottostante riporta la fonte informativa, la definizione e la denominazione delle principali variabili analizzate.

Tabella 1.3 - Definizione delle variabili e fonte dei dati

<i>Variabili</i>	<i>Definizione</i>	<i>Fonte</i>
<i>GHG</i>	Kyoto basket: tonnellate per abitante	Eurostat
<i>CO₂</i>	Biossido di carbonio: tonnellate per abitante	Eurostat
<i>CH₄</i>	Biossido di metano: tonnellate per abitante	Eurostat
<i>N₂O</i>	Protossido di azoto: tonnellate per abitante	Eurostat
<i>Y</i>	GDP pro capite in PPP	OECD
<i>Res</i>	Consumi finali di energie rinnovabili per abitante in terajoule	Eurostat
<i>Trade</i>	Quota di importazioni ed esportazioni in percentuale al GDP	World Development Indicators
<i>PopDensity</i>	Numero di persone per chilometro quadrato di superficie terrestre	World Development Indicators
<i>Fossil</i>	Quota di energia elettrica generata da fonti fossili in rapporto a quella totale	World Development Indicators

1.4.3- Statistiche descrittive

Per comprendere meglio il modello è necessario spiegare in modo più approfondito il significato delle variabili analizzate calcolando, sia per la variabile dipendente sia per le variabili indipendenti, le principali statistiche descrittive. Tra quest'ultime assumono particolare importanza la media, che è un indice di posizione, e la deviazione standard che, invece, è un indice di dispersione. I valori ottenuti sono riportati nella tabella 1.3.1.

Tabella 1.3.1- Statistiche descrittive

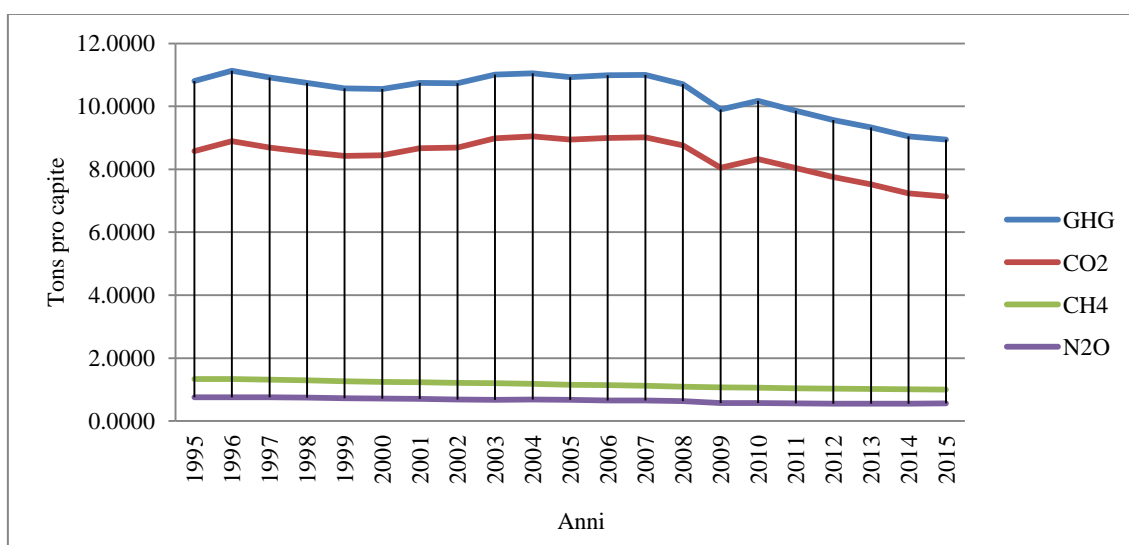
<i>Variabile</i>	<i>Obs.</i>	<i>Media</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>GHG</i>	630	10.97112	4.190896	4.41151	30.74039
<i>ln(GHG)</i>	630	2.300449	0.344003	1.4738	3.3273
<i>CO₂</i>	630	8.938578	3.863708	3.03281	28.74222
<i>ln(CO₂)</i>	630	2.072581	0.38741	1.094424	3.253998
<i>CH₄</i>	630	1.17697	0.527381	0.360308	4.185807
<i>ln(CH₄)</i>	630	0.088947	0.370801	-1.020796	1.4317
<i>N₂O</i>	630	0.663676	0.355824	0.105632	2.493873
<i>ln(N₂O)</i>	630	-0.52882	0.487681	-2.247794	0.913837
<i>GDP</i>	630	27867	14760.92	5453.938	120553.9
<i>ln(GDP)</i>	630	10.09681	0.550316	8.604094	11.69985
<i>[ln(GDP)]²</i>	630	102.2479	10.95782	74.03043	136.8865
<i>Res</i>	630	0.006838	0.007174	0	0.041576
<i>ln(Res)</i>	623	-5.22358	1.073087	-10.58315	-3.18024
<i>Trade</i>	630	106.2285	58.57381	37.1079	410.1716
<i>ln(Trade)</i>	630	4.548805	0.463323	3.61383	6.016576
<i>PopDensity</i>	630	512.2185	1034.485	2.592019	5578.853
<i>ln(PopDensity)</i>	630	4.906191	1.629976	0.9524373	8.626739
<i>Fossil</i>	630	0.552408	0.306286	0.0001162	1
<i>ln(Fossil)</i>	630	-1.10224	1.674281	-9.060198	0

Le emissioni di gas serra per abitante non subiscono marcati cambiamenti tra i paesi considerati. Il ruolo di eco-leader per le emissioni del Kyoto *basket* (GHG) e di biossido di carbonio (CO₂) viene assunto dai paesi dell'Europa nord-orientale (Svezia,

Lituania, Lettonia). A questi si aggiunge la Croazia. Di contro, i paesi che presentano un elevato livello di emissioni sono rappresentati da Lussemburgo e Irlanda. Per le emissioni di biossido di metano, invece, gli eco-leader sono rappresentati da Malta e Svezia. Discorso simile vale anche per le emissioni di protossido di azoto dove i paesi dell'Europa sud-occidentale, tra cui Malta e Portogallo, registrano livelli relativi più bassi. D'altronde, i paesi che registrano elevati livelli di emissioni di CH₄ e N₂O sono rappresentati da Irlanda, Lituania e Regno Unito.

Se, tuttavia, si considera la media di tutti gli indicatori, si evince un andamento decrescente delle emissioni di gas serra. Questo risultato si può facilmente osservare dal grafico 1.3 che esprime l'andamento medio di tali indicatori, espressi in tonnellate per abitante, nel periodo di tempo considerato e per tutto il campione.

Fig. 1.3- Andamento medio delle emissioni di gas serra per il campione oggetto di studio, anni 1995-2015

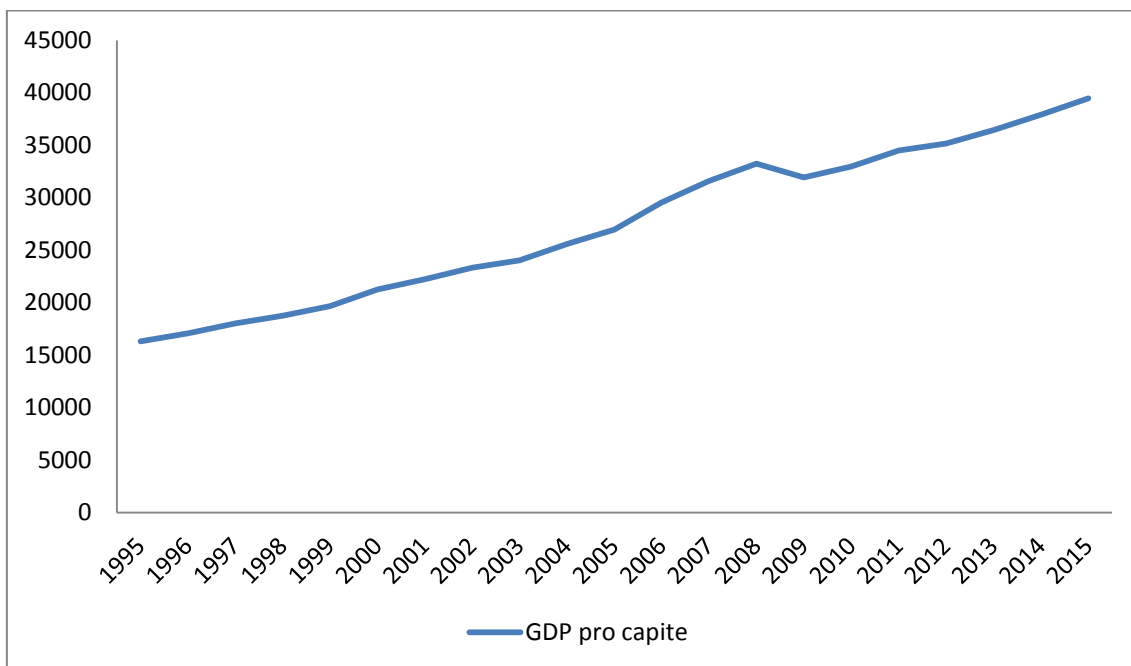


Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat

Dal grafico, si può notare come il livello di tali sostanze inquinanti sia in diminuzione. Difatti, le elaborazioni statistiche fornite da Eurostat confermano come, nel 2015, le emissioni di gas serra siano diminuite del 22% rispetto agli inizi degli anni novanta (Eurostat, *“Greenhouse gas emission statistics- emission inventories”*, 2017).

Discorso differente vale per i dati riguardanti il GDP pro capite in cui si registra una maggiore dispersione nei dati. In tal caso i valori massimi di tale indicatore si registrano per Lussemburgo, Norvegia, Olanda e Austria. Di contro, i paesi con un livello di reddito pro capite più basso sono quelli dell'Europa sud-orientale (Romania, Bulgaria ed Estonia). Se consideriamo tutto il campione, ad eccezione degli anni di piena crisi economica, si registra un aumento continuo del GDP pro capite con una media che, nel 2015, si è assestata su 39.475,23 dollari per abitante. Il grafico sottostante esprime l'andamento medio del GDP pro capite periodo di tempo considerato e per tutto il campione.

Fig. 1.4- Andamento medio del GDP pro capite per il campione oggetto di studio, anni 1995-2015

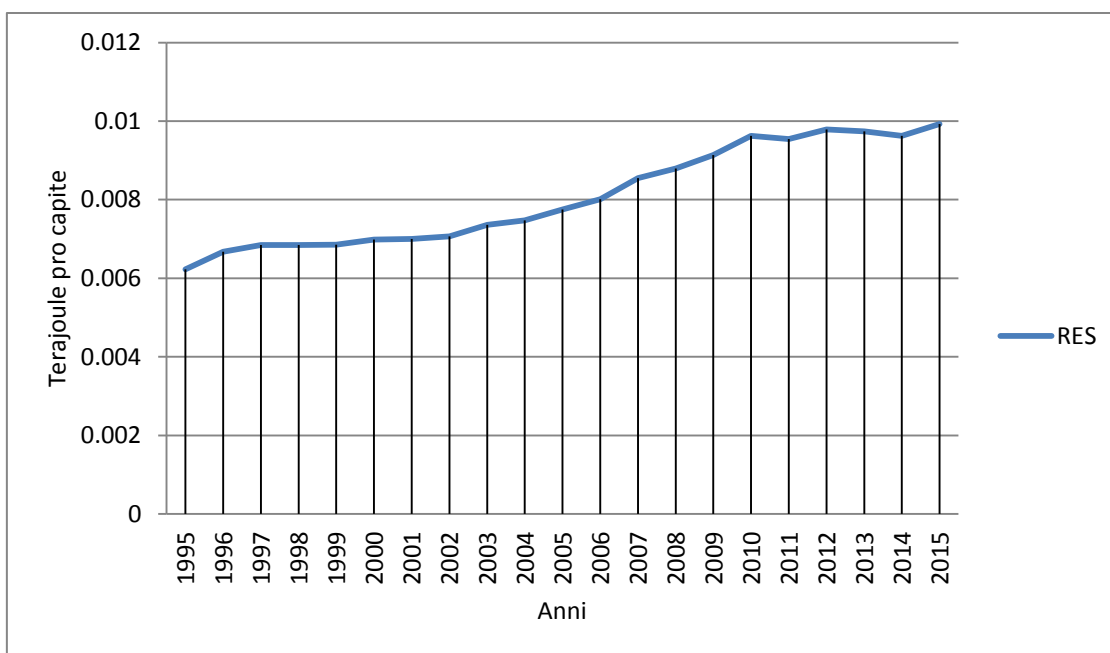


Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat

I dati sulle fonti energetiche rinnovabili fanno registrare un certo grado di eterogeneità nel panel analizzato. In modo particolare, i dati dimostrano che i *renewable-leader* sono rappresentati dai paesi dell'Europa settentrionale (Islanda, Norvegia, Finlandia e Svezia) che si contrappongono a Malta, UK, Slovacchia e Irlanda. In ogni caso, se si prende in considerazione la media dei consumi finali di energie rinnovabili in tutto il campione, si evince un andamento crescente di tale indicatore.

Questo trend si può facilmente osservare dal grafico 1.5 che esprime l'andamento medio dei consumi finali di fonti rinnovabili, espressi in terajoule per abitante, nel periodo di tempo considerato e per tutto il campione.

Fig. 1.5- Andamento dei consumi interni lordi di fonti rinnovabili per il campione oggetto di studio, anni 1995-2015



Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat

Le altre variabili esplicative di controllo presentano delle statistiche descrittive dalle quali emergono importanti risultati. In primo luogo, le variabili espressione della densità demografica (*PopDensity*) e del grado di apertura commerciale (*Trade*) sono quelle che presentano un livello di dispersione più elevato. Pertanto, si ritiene che esse costituiscano le variabili che subiscono un maggior cambiamento nel tempo e tra le entità geografiche. La variabile espressione della quota di energie tradizionali nella generazione di elettricità (*Fossil*) è, anch'essa, caratterizzata da un certo grado di eterogeneità: da un lato, si osservano paesi con quote elevate di fonti fossili (Cipro, Malta ed Estonia), dall'altro, i paesi con una quota contenuta di energia elettrica prodotta da gas, carbone e petrolio sono rappresentati da Islanda, Svezia e Norvegia.

1.5- Analisi dei risultati ottenuti per l'EKC: Modello 1

Nella fase iniziale della ricerca viene indagata l'esistenza di una curva ambientale di Kuznets nel campione oggetto di studio. A tal fine, prendendo come periodo temporale di riferimento gli anni 1995-2015, viene stimata l'equazione che fa riferimento al *Modello 1*. Quest'ultima, stimata per quattro differenti indicatori ambientali (GHG, CO₂, GH₄, N₂O), segue la seguente specificazione funzionale:

$$\ln(e)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \varepsilon_{it}$$

dove:

- ✓ $\ln(e)$: logaritmo naturale dell'indicatore ambientale in termini pro capite;
- ✓ $\ln(y)$: logaritmo naturale del GDP pro capite;
- ✓ $[\ln(y)]^2$: logaritmo naturale del GDP pro capite in forma quadratica;
- ✓ ε : termine d'errore;
- ✓ α : *dummy* individuali;
- ✓ γ : *dummy* temporali;
- ✓ β_1 e β_2 = parametri ignoti da stimare;
- ✓ $i = 1, \dots, 30$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 1.4- *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*: risultati per il Kyoto basket (GHG)

<i>Modello 1</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Variabili	<i>ln(GHG)</i>	<i>ln(GHG)</i>	<i>ln(GHG)</i>	<i>ln(GHG)</i>
<i>Costante</i>	-8.371*** (1.072)	-6.067*** (0.976)	-8.061*** (1.104)	-5.697*** (0.999)
<i>ln(y)</i>	2.283*** (0.218)	1.750*** (0.202)	2.211*** (0.224)	1.654*** (0.206)
$[\ln(y)]^2$	-0.121*** (0.011)	-0.091*** (0.010)	-0.117*** (0.011)	-0.086*** (0.011)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	630	630
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.2475	0.4337	0.2474	0.4326
between	0.4641	0.4328	0.4611	0.3919
overall	0.1951	0.0320	0.1919	0.0117
Prob>F	0.0000 (98.37)	0.0000 (25.42)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (154.18)	0.000 (325.10)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > chi2 = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	12,505.00	14,993.68	12,691,88	15,007.10

Note: *Standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.4.1- *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*: risultati per il biossido di carbonio (CO₂)

<i>Modello 1</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Variabili	$\ln(CO_2)$	$\ln(CO_2)$	$\ln(CO_2)$	$\ln(CO_2)$
<i>Costante</i>	-6.929*** (1.203)	-4.160*** (1.069)	-6.648*** (1.234)	-3.823*** (1.091)
$\ln(y)$	1.934*** (0.244)	1.308*** (0.221)	1.868*** (0.250)	1.219*** (0.225)
$[\ln(y)]^2$	-0.103*** (0.012)	-0.069*** (0.011)	-0.099*** (0.013)	-0.063*** (0.012)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	630	630	630	630
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.1685	0.4035	0.1684	0.4026
between	0.4366	0.4148	0.4328	0.3707
overall	0.2026	0.0167	0.1989	0.0301
Prob>F	0.0000 (60.61)	0.0000 (18.65)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (92.37)	0.000 (176.43)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > chi2 = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	11,948.68	13,072.43	12,510.74	15,908.40

Note: *Standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.4.2- *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*: risultati per il biossido di metano (CH₄)

<i>Modello 1</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Variabili	$\ln(CH_4)$	$\ln(CH_4)$	$\ln(CH_4)$	$\ln(CH_4)$
<i>Costante</i>	-14.602*** (1.034)	-12.958*** (1.055)	-13.861*** (1.049)	-12.770*** (1.061)
$\ln(y)$	3.107*** (0.211)	2.805*** (0.218)	3.074*** (0.213)	2.759*** (0.219)
$[\ln(y)]^2$	-0.169*** (0.011)	-0.149*** (0.011)	-0.167*** (0.011)	-0.147*** (0.011)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	630	630
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.5155	0.5458	0.5155	0.5457
between	0.0710	0.0791	0.0711	0.0799
overall	0.0054	0.0002	0.0054	0.0001
Prob>F	0.0000 (318.08)	0.0000 (33.18)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (593.25)	0.0000 (681.39)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > chi2 = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	9,821.28	12,243.51	9,932.75	11,900.71

Note: *Standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.4.3- *Environmental Kuznets Curve Hypothesis*: risultati per il protossido di azoto (N₂O)

<i>Modello 1</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Variabili	<i>ln(N₂O)</i>	<i>ln(N₂O)</i>	<i>ln(N₂O)</i>	<i>ln(N₂O)</i>
<i>Costante</i>	-24.323*** (1.400)	-22.401*** (1.354)	-24.130*** (1.413)	-22.192*** (1.360)
<i>ln(y)</i>	5.106*** (0.284)	4.545*** (0.280)	5.063*** (0.286)	4.494*** (0.280)
<i>[ln(y)]²</i>	-0.271*** (0.014)	-0.235*** (0.014)	-0.269*** (0.015)	-0.232*** (0.015)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	630	630
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.5044	0.5792	0.5044	0.5791
between	0.0877	0.0875	0.0877	0.0869
overall	0.0077	0.0014	0.0077	0.0020
Prob>F	0.0000 (304.34)	0.0000 (37.94)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (588.71)	0.0000 (785.12)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > chi2 = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	12,340.77	15,838.71	12,219.40	16,080.21

Note: *Standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Prima di analizzare i risultati delle stime è necessario decidere quale sia la metodologia di stima più appropriata tra gli stimatori con *random* e *fixed effects*. A tal

fine, in accordo con Paudel *et al.* (2005), Boluk e Mert (2014), Lopez-Menendez *et al.* (2014), Liobikiene e Butkus (2017), è stato eseguito il test di Hausman i cui risultati sono riportati di seguito:

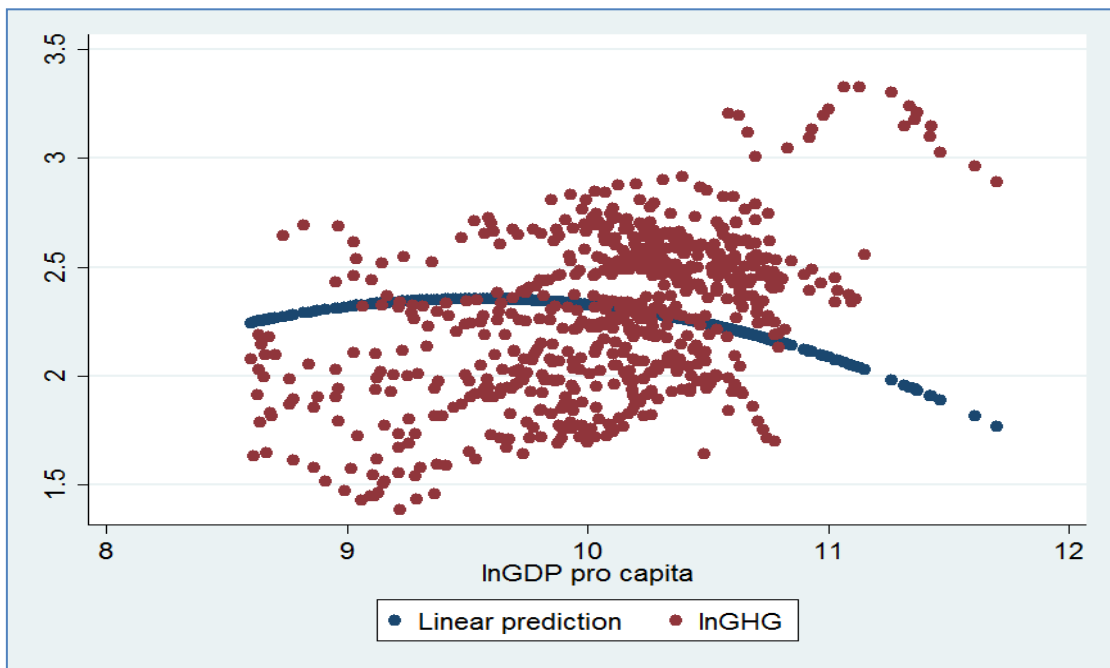
- ✓ Variabile dipendente $\ln(GHG)$: $\chi^2(2)= 42.40$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.0000$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CO_2)$: $\chi^2(2)= 42.40$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.0000$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CH_4)$: $\chi^2(2)= 14.09$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.0009$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(N_2O)$: $\chi^2(2)= 10.77$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.0011$;

Per ogni differente indicatore ambientale, il test di Hausman fornisce evidenza empirica a favore dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* (LSDV). Pertanto, tale metodologia si adatta meglio ai dati disponibili.

In prima approssimazione, le stime effettuate testimoniano la presenza di una EKC nel campione oggetto di studio. Le elasticità del reddito rispetto alle emissioni sono statisticamente significative ad un livello di significatività dell'1% e variano in funzione della sostanza inquinante considerata. Si registra, infatti, la presenza di differenti valori nel *turning point*. Quest'ultimo, a seconda della metodologia di stima, presenta un valore compreso tra 12,505.00 e 15,007.10 dollari pro capite per il *Kyoto basket*, tra 11,948.68 e 15,908.40 dollari pro capite per le emissioni di anidride carbonica, tra 9,821.28 e 12,243.51 dollari pro capite per le emissioni di metano e, infine, tra 12,340.77 e 16,080.21 dollari pro capite per le emissioni di protossido di azoto.

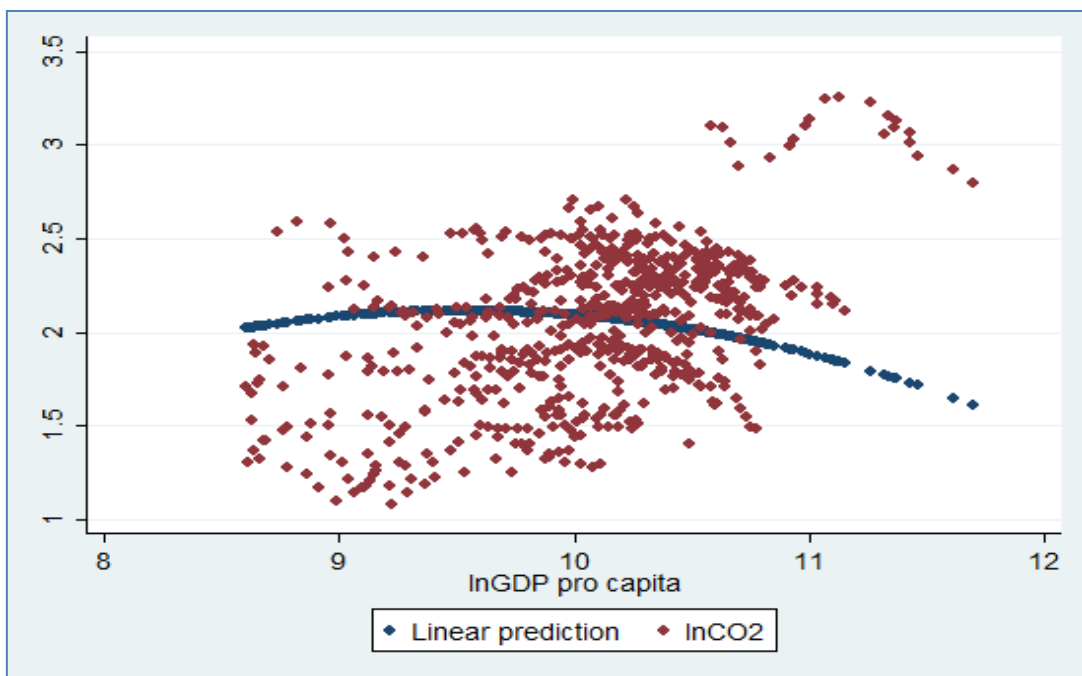
L'inferenza sulle stime con *fixed effects*, statisticamente più efficienti in funzione del test di Hausman, fornisce risultati validi. Le statistiche F, per testare la significatività congiunta di tutti i regressori, ci conducono a rifiutare l'ipotesi nulla che tutti i parametri associati ai regressori siano nulli. Inoltre, anche l'inferenza sugli effetti individuali e temporali ci fornisce risultati validi. In particolare, le statistiche F testimoniano la significatività statistica degli effetti fissi individuali: l'ipotesi nulla che le *n-1 dummies* individuali siano pari a zero può essere rifiutata per tutte le specificazioni funzionali proposte. Medesimo discorso vale per gli effetti temporali poiché l'ipotesi nulla che le *t-1* variabili binarie siano pari a zero può essere rifiutata per tutte le regressioni stimate. Le figure sottostanti riportano, per ogni diversa tipologia di indicatore ambientale, graficamente le relazioni stimate.

Fig. 1.6- EKC per il Kyoto *basket* (GHG)



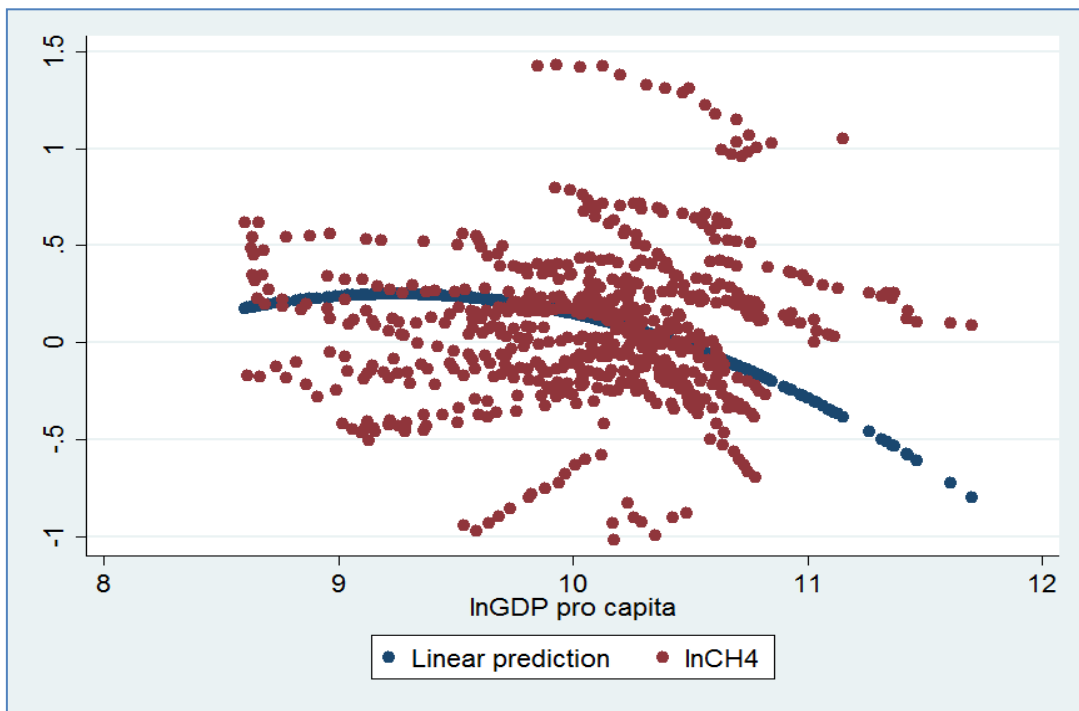
Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat e OECD

Fig. 1.6.1- EKC per il biossido di carbonio (CO₂)



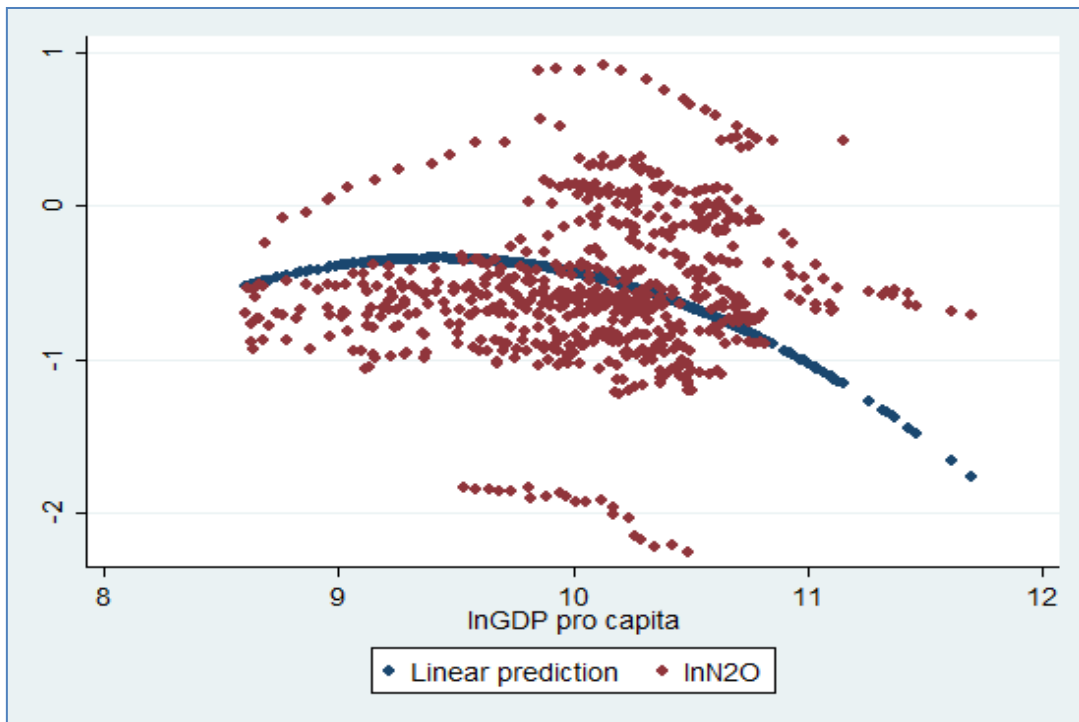
Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat e OECD

Fig. 1.6.2- EKC per il biossido di metano (CH₄)



Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat e OECD

Fig. 1.6.3- EKC per il protossido di azoto (N₂O)



Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat e OECD

1.5.1- *Extended Kuznes Curve model: il ruolo delle fonti energetiche rinnovabili*

Al fine di verificare empiricamente le potenzialità ambientali delle fonti energetiche rinnovabili nella relazione crescita-ambiente, viene stimato un *Extended Kuznets Curve model* in quanto, nonostante i risultati delle stime forniscano evidenza empirica di una EKC nel campione oggetto di studio, è necessario perfezionare il modello in questione per evitare una possibile distorsione da variabili omesse. In altre parole, i valori dei *turning points* ottenuti potrebbero essere poco accurati. Occorre, dunque, perfezionare il modello stimato in precedenza includendo, oltre al GDP pro capite, altre determinanti potenziali delle emissioni inquinanti. A tal fine, con riferimento al *Modello 2* e al *Modello 3*, vengono stimati due modelli di regressione, con tutte le variabili espresse in forma logaritmica, le cui specificazioni funzionali sono le seguenti:

$$\ln(e)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \beta_3 \ln(Res) + \varepsilon_{it}$$

$$\ln(e)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \beta_3 \ln(Res)_{it} + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove:

- ✓ $\ln(e)$: logaritmo naturale dell'indicatore ambientale in termini pro capite (GHG, CO₂, CH₄, N₂O);
- ✓ $\ln(y)$: logaritmo naturale del GDP pro capite;
- ✓ $[\ln(y)]^2$: logaritmo naturale del GDP pro capite in forma quadratica;
- ✓ $\ln(Res)$: logaritmo naturale dei consumi pro capite di fonti energetiche rinnovabili;
- ✓ ε : termine d'errore;
- ✓ α : dummy individuali;
- ✓ γ : dummy temporali;
- ✓ $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ = parametri ignoti da stimare;
- ✓ $i = 1, \dots, 30$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);

Inoltre, il termine Z comprende il logaritmo naturale del grado di apertura commerciale (*Trade*), il logaritmo naturale della densità demografica (*PopDensity*) e,

infine, il logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da gas, carbone e petrolio (*Fossil*).

La strategia empirica adottata di seguito si propone di stimare le relazioni tra le variabili oggetto di studio mediante l'utilizzo esclusivo dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* (LSDV) tralasciando, dunque, lo stimatore *random effects*. Tale assunto non contrasta la *Environmental-Energy-Growth literature* (si veda, in particolare, Boluk e Mert, 2014; Bilgili *et al.*, 2016; York e McGee, 2017) e le motivazioni sono da ricollegare ai risultati dei test inferenziali. In modo particolare, è stato eseguito il test di Hausman che compara, per ogni differente indicatore ambientale, gli stimatori con *fixed* e *random effects*.

Per il *Modello 2* i risultati del test di Hausman sono i seguenti:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(GHG)$: $\chi^2(3) = 33.68$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0000$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CO_2)$: $\chi^2(3) = 28.51$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0000$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CH_4)$: $\chi^2(3) = 13.06$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0045$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(N_2O)$: $\chi^2(3) = 24.88$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0000$;

Per il *Modello 3* i risultati del test di Hausman sono i seguenti:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(GHG)$: $\chi^2(6) = 66.93$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0000$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CO_2)$: $\chi^2(6) = 64.89$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0000$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CH_4)$: $\chi^2(6) = 18.09$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0032$;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(N_2O)$: $\chi^2(6) = 18.52$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0051$;

Analizzando, dunque, le medesime osservazioni temporali e longitudinali viste in precedenza (*Modello 1*), le regressioni stimate di seguito, con *standard errors* robusti all'eteroschedasticità, si propongono di valutare l'effetto ambientale delle fonti energetiche rinnovabili in un quadro analitico che prevede la stima di un *Extended Kuznets Curve model*, con l'inclusione degli effetti fissi individuali e temporali, per i quattro indicatori dell'inquinamento atmosferico.

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i valori dei coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 1.6- *Extended Kuznets Curve model*: risultati per il Kyoto basket (GHG)

<i>Modelli 2-3</i>	<i>FIXED EFFECTS REGRESSION</i>			
	Variabile dipendente $\ln(\text{GHG})$			
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-7.530*** (1.043)	-5.541*** (0.953)	-3.288*** (1.173)	-2.242** (0.984)
$\ln(y)$	1.977*** (0.215)	1.563*** (0.199)	1.386*** (0.335)	0.839*** (0.307)
$[\ln(y)]^2$	-0.103*** (0.011)	-0.080*** (0.010)	-0.073*** (0.017)	-0.044*** (0.016)
$\ln(\text{Res})$	-0.071*** (0.011)	-0.056*** (0.010)	-0.063*** (0.011)	-0.051*** (0.010)
$\ln(\text{Trade})$	-	-	0.038 (0.037)	0.052 (0.035)
$\ln(\text{PopDensity})$	-	-	0.271*** (0.053)	0.365*** (0.062)
$\ln(\text{Fossil})$	-	-	0.071*** (0.012)	0.053*** (0.011)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30
R^2				
within	0.3073	0.4696	0.3662	0.5142
between	0.0682	0.0300	0.0434	0.0049
overall	0.0087	0.0038	0.0487	0.008
Adj R^2	0.9345	0.9482	0.9398	0.9600
Prob>F	0.0000 (87.25)	0.0000 (23.98)	0.0000 (56.52)	0.0000 (24.05)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > F = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	14,721.83	17,478.90	13,268.53	13,832.02

Note: *Robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.6.1- *Extended Kuznets Curve model*: risultati per il biossido di carbonio (CO₂)

<i>Modelli 2-3</i>	<i>FIXED EFFECTS REGRESSION</i>			
	Variabile dipendente: $\ln(CO_2)$			
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-5.956*** (1.174)	-3.630*** (1.047)	-2.659** (1.230)	-2.985** (1.127)
$\ln(y)$	1.581*** (0.242)	1.088*** (0.219)	1.067*** (0.375)	1.051*** (0.376)
$[\ln(y)]^2$	-0.082*** (0.012)	-0.056*** (0.011)	-0.056*** (0.019)	-0.055*** (0.019)
$\ln(Res)$	-0.081*** (0.012)	-0.064*** (0.011)	-0.071*** (0.012)	-0.072*** (0.012)
$\ln(Trade)$	-	-	0.038 (0.041)	0.051 (0.041)
$\ln(PopDensity)$	-	-	0.230*** (0.057)	0.255*** (0.068)
$\ln(Fossil)$	-	-	0.091*** (0.013)	0.091*** (0.013)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.2306	0.4402	0.3055	0.4707
between	0.0108	0.0014	0.0529	0.0011
overall	0.0041	0.0254	0.0604	0.0028
Adj R ²	0.9351	0.9512	0.9411	0.9622
Prob>F	0.0000 (62.33)	0.0000 (20.41)	0.0000 (48.85)	0.0000 (19.51)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > F = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	15,371.09	16,552.38	13,722.41	14,108.67

Note: *Robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.6.2- *Extended Kuznets Curve model*: risultati per il biossido di metano (CH₄)

Modelli 2-3	FIXED EFFECTS REGRESSION			
	Variabile dipendente: $\ln(CH_4)$			
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-12.899*** (0.954)	-12.312*** (0.968)	-7.015*** (2.024)	-7.617*** (2.063)
$\ln(y)$	2.708*** (0.197)	2.525*** (0.202)	1.901*** (0.312)	1.900*** (0.319)
$[\ln(y)]^2$	-0.145*** (0.010)	-0.132*** (0.011)	-0.104*** (0.016)	-0.101*** (0.017)
$\ln(Res)$	-0.094*** (0.010)	-0.088*** (0.010)	-0.085*** (0.010)	-0.081*** (0.010)
$\ln(Trade)$			-0.015 (0.034)	-0.011 (0.036)
$\ln(PopDensity)$	-	-	0.369*** (0.065)	0.302*** (0.076)
$\ln(Fossil)$	-	-	0.037*** (0.011)	0.034*** (0.011)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.5949	0.6179	0.6212	0.6381
between	0.0651	0.0474	0.0303	0.0318
overall	0.0124	0.0054	0.0364	0.0435
Adj R ²	0.9495	0.9583	0.9518	0.9584
Prob>F	0.0000 (296.14)	0.0000 (43.44)	0.0000 (160.45)	0.0000 (40.13)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > F = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	11,360.87	14,248.31	9,315.38	12,160.40

Note: *Robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.6.3- *Extended Kuznets Curve model*: risultati per il protossido di azoto (N₂O)

<i>Modelli 2-3</i>	<i>FIXED EFFECTS REGRESSION</i>			
	Variabile dipendente: $\ln(N_2O)$			
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-23.279*** (1.378)	-21.838*** (1.341)	-8.551*** (2.909)	-8.954*** (2.841)
$\ln(y)$	4.732*** (0.285)	4.320*** (0.280)	2.690*** (0.449)	2.540*** (0.439)
$[\ln(y)]^2$	-0.249*** (0.015)	-0.221*** (0.015)	-0.144*** (0.023)	-0.131*** (0.023)
$\ln(Res)$	-0.084*** (0.014)	-0.064*** (0.014)	-0.074*** (0.014)	-0.057*** (0.014)
$\ln(Trade)$			-0.010 (0.049)	-0.009 (0.050)
$\ln(PopDensity)$	-	-	-0.340*** (0.084)	-0.432*** (0.051)
$\ln(Fossil)$	-	-	0.005 (0.016)	0.013 (0.016)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30
R ²				
within	0.5297	0.5922	0.5583	0.6126
between	0.2173	0.2055	0.1283	0.1362
overall	0.0228	0.0008	0.1118	0.1218
Adj R ²	0.9387	0.9451	0.9421	0.9588
Prob>F	0.0000 (221.46)	0.0000 (38.02)	0.0000 (123.67)	0.0000 (35.56)
Effetti temporali= 0	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > F = 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	13,386.58	17,566.61	11,387.57	16,230.64

Note: *Robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

I risultati empirici dei modelli estesi ci forniscono dei risultati rilevanti. In primo luogo, resta valida l'ipotesi di una relazione ad U invertita tra il reddito pro capite e le emissioni inquinanti: i coefficienti associati agli indicatori del GDP pro capite si alternano con segno positivo (β_1) e negativo (β_2). In particolare sia le stime del *Modello 2* sia quelle del *Modello 3* forniscono evidenza empirica dell'esistenza di una EKC nel campione oggetto di studio e per tutti gli indicatori dell'inquinamento atmosferico analizzati (GHG, CO₂, CH₄, N₂O). Inoltre, in base ai risultati delle regressioni, le stime contenute in entrambi i modelli estesi ci mostrano che i consumi energetici da fonti rinnovabili registrano delle elasticità negative per tutti i *polluters* esaminati: all'aumentare dei consumi pro capite da RES, l'inquinamento ambientale tende a ridursi di una percentuale che varia in funzione del *polluter* esaminato. Le altre variabili analizzate registrano, invece, dei risultati controversi che saranno approfonditi di seguito.

1.5.2- Controlli diagnostici

Prima di analizzare in dettaglio i risultati di tutti i modelli stimati è necessario eseguire alcuni controlli diagnostici e, eventualmente, correggere le minacce alla validità interna che potrebbero inficiare i risultati ottenuti. La tabella sottostante riporta le matrici di correlazione tra le variabili analizzate nei modelli stimati.

Tabella 1.7- Matrice di correlazione per il Kyoto *basket* (GHG)

VARIABILI	$\ln(\text{GHG})$	$\ln(y)$	$[\ln(y)]^2$	$\ln(\text{Res})$	$\ln(\text{Trade})$	$\ln(\text{PopDensity})$	$\ln(\text{Fossil})$
$\ln(\text{GHG})$	1						
$\ln(y)$	0.498***	1					
$[\ln(y)]^2$	0.501***	0.999***	1				
$\ln(\text{Res})$	-0.112**	0.0793*	0.0813*	1			
$\ln(\text{Trade})$	0.318***	0.250***	0.259***	-0.128**	1		
$\ln(\text{PopDensity})$	0.022**	0.0329	0.0311	-0.642***	0.195***	1	
$\ln(\text{Fossil})$	-0.0302	-0.221***	-0.223***	-0.353***	0.134***	0.728***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 1.7.1- Matrice di correlazione per il biossido di carbonio (CO₂)

VARIABILI	$\ln(CO_2)$	$\ln(y)$	$[\ln(y)]^2$	$\ln(Res)$	$\ln(Trade)$	$\ln(PopFensity)$	$\ln(Fossil)$
$\ln(CO_2)$	1						
$\ln(y)$	0.511***	1					
$[\ln(y)]^2$	0.514***	0.999***	1				
$\ln(Res)$	-0.125**	0.0793*	0.0813*	1			
$\ln(Trade)$	0.318***	0.250***	0.259***	-0.128**	1		
$\ln(PopDensity)$	0.0558**	0.0329	0.0311	-0.642***	0.195***	1	
$\ln(Fossil)$	0.0252	-0.221***	-0.223***	-0.353***	0.134***	0.728***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 1.7.2- Matrice di correlazione per il biossido di metano (CH₄)

VARIABILI	$\ln(CH_4)$	$\ln(y)$	$[\ln(y)]^2$	$\ln(Res)$	$\ln(Trade)$	$\ln(PopFensity)$	$\ln(Fossil)$
$\ln(CH_4)$	1						
$\ln(y)$	0.0627	1					
$[\ln(y)]^2$	0.0652	0.999***	1				
$\ln(Res)$	-0.101*	0.0793*	0.0813*	1			
$\ln(Trade)$	0.0287	0.250***	0.259***	-0.128**	1		
$\ln(PopDensity)$	0.230***	0.0329	0.0311	-0.642***	0.195***	1	
$\ln(Fossil)$	-0.117**	-0.221***	-0.223***	-0.353***	0.134***	0.728***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 1.7.3- Matrice di correlazione per il protossido di azoto (N₂O)

VARIABILI	$\ln(N_2O)$	$\ln(y)$	$[\ln(y)]^2$	$\ln(Res)$	$\ln(Trade)$	$\ln(PopDensity)$	$\ln(Fossil)$
$\ln(N_2O)$	1						
$\ln(y)$	0.111**	1					
$[\ln(y)]^2$	0.111**	0.999***	1				
$\ln(Res)$	0.236***	0.0793*	0.0813*	1			
$\ln(Trade)$	0.0275	0.250***	0.259***	-0.128**	1		
$\ln(PopDensity)$	-0.460***	0.0329	0.0311	-0.642***	0.195***	1	
$\ln(Fossil)$	-0.297***	-0.221***	-0.223***	-0.353***	0.134***	0.728***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Quando si utilizzano dati panel è probabile che si possano registrare alcune problematiche che rendano le stime non robuste. Poiché i dati panel sfruttano, infatti, sia la dimensione temporale che longitudinale delle osservazioni disponibili, si potrebbero verificare tre tipologie di problemi che violerebbero le ipotesi sottese alle metodologie di stima utilizzate: eteroschedasticità, autocorrelazione e *cross-sectional dependence*.

Pertanto, occorre eseguire alcuni test diagnostici per verificare se sussistano o meno tali minacce alla validità interna. In accordo con Ozokcu e Ozdemir (2017), infatti, «*Pesaran cross-sectional dependence (Pesaran CD) test is be used here in order to test whether residuals are correlated across countries or not. Modified Wald test is used to determine heteroskedasticity in model. A Wooldridge test is used to detect serial correlation in panel data*» (Ozokcu e Ozdemir, 2017). Sono stati, dunque, eseguiti i seguenti test di robustezza:

- Pesaran CD test (*cross-sectional dependence*);
- Wooldrige test (autocorrelazione);
- Modified Wald test (eteroschedasticità);

Il Pesaran CD test (Pesaran, 2004) è utilizzato per verificare l'ipotesi che i residui siano o meno correlati tra le entità osservazionali (Hoechle, 2007). Il Wooldrige test è eseguito, invece, per verificare l'ipotesi nulla di assenza di correlazione seriale nei dati

analizzati (Wooldridge, 2007). Infine, l'ipotesi nulla di errori omoschedastici viene verificata mediante l'utilizzo del Modified Wald test (Baltagi, 2008). Nella tabella riportata di seguito sono contenuti i risultati dei test diagnostici per indagare la presenza di possibili minacce alla validità interna. In modo particolare, sono stati realizzati dei controlli diagnostici per verificare se, per tutti i modelli stimati, sussistano problemi di eteroschedasticità, autocorrelazione e *cross-sectional dependence*. I risultati dei test diagnostici, applicati esclusivamente alle stime *fixed effects*, sono evidenziati nella tabella sottostante dove sono riportati anche i valori degli F-test sugli effetti fissi individuali.

Tabella 1.8- Risultati dei test diagnostici per tutti i modelli stimati

TEST DIAGNOSTICO	Modello 1	Modello 2	Modello 3
Pesaran CD Test Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	(21.331) Pr = 0.0000	(21.752) Pr = 0.0000	(18.349) Pr = 0.0000
Pesaran CD Test Variabile dipendente: $\ln(CO_2)$	(24.510) Pr = 0.0000	(24.930) Pr = 0.0000	(20.465) Pr = 0.0000
Pesaran CD Test Variabile dipendente: $\ln(CH_4)$	(5.500) Pr = 0.0000	(4.082) Pr = 0.0000	(3.286) Pr = 0.0000
Pesaran CD Test Variabile dipendente: $\ln(N_2O)$	(9.961) Pr = 0.0000	(7.692) Pr = 0.0000	(5.154) Pr = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	F(1, 29) = 89.241 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 89.914 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 76.074 Prob > F = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(CO_2)$	F(1, 29) = 95.765 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 95.489 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 79.489 Prob > F = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(CH_4)$	F(1, 29) = 21.686 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 19.105 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 18.991 Prob > F = 0.0002
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(N_2O)$	F(1, 29) = 126.870 Prob > F = 0.0000	F(1, 30) = 124.928 Prob > F = 0.0000	F(1, 29) = 164.530 Prob > F = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	chi2 (30) = 1214.59 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 2274.03 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 2063.53 Prob>chi2 = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(CO_2)$	chi2 (30) = 2221.75 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 2616.13 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 3125.83 Prob>chi2 = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(CH_4)$	chi2 (30) = 6864.61 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 3708.15 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 2664.52 Prob>chi2 = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(N_2O)$	chi2 (30) = 4688.86 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 3876.21 Prob>chi2 = 0.0000	chi2 (30) = 3485.71 Prob>chi2 = 0.0000
F-test effetti individuali Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	F(29, 598) = 216.89 Prob > F = 0.0000	F(29, 590) = 219.85 Prob > F = 0.0000	F(30, 587) = 190.53 Prob > F = 0.0000
F-test effetti individuali Variabile dipendente: $\ln(CO_2)$	F(29, 598) = 215.82 Prob > F = 0.0000	F(29, 590) = 216.90 Prob > F = 0.0000	F(30, 587) = 186.65 Prob > F = 0.0000
F-test effetti individuali Variabile dipendente: $\ln(CH_4)$	F(29, 598) = 358.29 Prob > F = 0.0000	F(29, 590) = 395.55 Prob > F = 0.0000	F(29, 587) = 379.24 Prob > F = 0.0000
F-test effetti individuali Variabile dipendente: $\ln(N_2O)$	F(29, 598) = 339.80 Prob > F = 0.0000	F(29, 590) = 311.32 Prob > F = 0.0000	F(29, 587) = 301.17 Prob > F = 0.0000

I risultati dei test per l'eteroschedasticità dimostrano che, per il *Modello 1*, l'ipotesi nulla di errori omoschedastici non può essere accettata. L'ipotesi nulla del Modified Wald test viene rigettata per tutti i modelli stimati. D'altronde, le stime ottenute soffrono anche di un problema di correlazione seriale e *cross-sectional dependence*. In modo particolare, il Pesaran CD test mostra che non è possibile accettare l'ipotesi nulla di assenza di *cross-sectional dependence* nei residui tra i vari paesi analizzati. Infine, il Wooldrige test, usato per indagare la presenza di autocorrelazione nei dati panel, fornisce risultati favorevoli all'ipotesi alternativa di correlazione seriale nei residui. Anche per i modelli estesi (*Modello 2* e *Modello 3*), i test diagnostici confermano la presenza di alcune problematiche ben precise. In linea con i risultati del *Modello 1*, si rifiuta l'ipotesi nulla di errori omoschedastici e di assenza di autocorrelazione per tutte le equazioni stimate. Pertanto, si configura un problema di eteroschedasticità ed autocorrelazione. Inoltre, l'applicazione del Pesaran CD test rileva la presenza di una correlazione di tipo *cross-sectional* tale per cui l'ipotesi nulla di assenza di una correlazione tra entità nei residui non può essere accettata per tutte le equazioni stimate.

1.6- Stime robuste: risultati per tutti i modelli

I risultati delle regressioni stimate mostrano che, per tutti i quattro indicatori ambientali, non può essere rifiutata l'ipotesi insita nel modello ambientale di Kuznets. In modo particolare, si ha evidenza che all'aumentare del GDP pro capite le emissioni inquinanti dapprima crescono e, successivamente, decrescono. Pertanto, si registra una relazione ad U invertita tra GDP ed inquinamento atmosferico: il coefficiente associato al logaritmo naturale del GDP pro capite (β_1) e quello associato al logaritmo naturale del GDP al quadrato (β_2) si alternano, rispettivamente, con segno positivo e negativo per tutti i *polluters* esaminati.

Per quanto attiene al ruolo delle fonti energetiche rinnovabili, analizzando i risultati dei modelli estesi (*Modello 2* e *Modello 3*), si rileva che l'elasticità ambientale di tali fonti energetiche tende ad assumere un segno negativo in tutti i *polluters* esaminati: i valori associati ai coefficienti della variabile *Res* variano da un minimo di -0.051%, per le emissioni del Kyoto *basket*, ad un massimo di -0.085%, per le emissioni

di biossido di metano (*Modello 3*); e da un minimo di -0.056%, per le emissioni del Kyoto *basket*, ad un massimo di -0.094%, per le emissioni di biossido di metano (*Modello 2*). Tali risultati mostrano come il processo di transizione energetica, attraverso la diffusione di fonti energetiche a basse emissioni, rappresenta un elemento chiave per la lotta all'inquinamento atmosferico.

Discorso controverso riguarda, invece, le variabili addizionali di controllo valutate all'interno degli *Extendend Kuznets Curve models*. Da un lato, coerentemente con la *Environment-Energy-Growth literature*, la quota di energia elettrica generata da fonti fossili fa registrare un effetto positivo e statisticamente significativo sulle emissioni totali di gas serra (GHG), di biossido di carbonio (CO₂) e di biossido di metano (CH₄). Questo effetto non si registra, invece, per le emissioni di protossido di azoto (N₂O) per le quali la quota di energia elettrica da fonti fossili, seppur con segno positivo, non è statisticamente significativa.

Le variabili espressione del grado di apertura commerciale (*Trade*) e della densità demografica (*PopDensity*) presentano, invece, risultati dissimili che variano in funzione della sostanza inquinante analizzata. In prima approssimazione, il coefficiente associato all'indicatore del grado di apertura commerciale (β_4) fa registrare effetti statisticamente non significativi per tutti i *polluters* esaminati. Un aumento del grado di urbanizzazione genera, invece, effetti ambientali negativi e statisticamente significativi che variano in funzione del *polluter* esaminato: il coefficiente β_5 , ad esclusione delle regressioni con variabile dipendente le emissioni di protossido di azoto, assume segno positivo e stasticamente significativo in tutte le specificazioni stimate. Pertanto, in accordo con la maggioranza della letteratura (Dutt, 2009; York e McGee, 2013; Alvarado *et al.*, 2018) un aumento nella numero di abitanti per Km² di superficie causa un peggioramento delle condizioni ambientali.

Tuttavia, come osservato dai risultati dei test diagnostici effettuati in precedenza, i modelli stimati sono caratterizzati dalla presenza di tre problematiche (eteroschedasticità, autocorrelazione e *cross-sectional dependence*) che, se tralasciate, potrebbero condurre a risultati distorti. Pertanto, in accordo con Boluk e Mert (2014), Ozokcu e Ozdemir (2017), i modelli descritti in precedenza sono stati nuovamente stimati facendo ricorso ai *Driscoll-Kraay Standard Errors* di Hoechle (2007). In

particolare, utilizzando lo stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy*, è stata applicata questa tipologia di *standard error* che, secondo Liu *et al.* (2015), «are robust to general forms of cross-sectional and temporal dependence».

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i valori dei coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 1.9- *Robustness check* delle stime per il Kyoto basket (GHG)

Modelli 1-3	Variabile dipendente: $\ln(GHG)$					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	-8.371*** (2.710)	-6.067*** (1.787)	-7.530*** (2.386)	-5.627*** (1.577)	-3.288** (1.606)	-0.242 (1.602)
$\ln(y)$	2.283*** (0.567)	1.750*** (0.349)	1.977*** (0.498)	1.563*** (0.301)	1.386*** (0.293)	0.839*** (0.236)
$[\ln(y)]^2$	-0.121*** (0.030)	-0.091*** (0.018)	-0.103*** (0.026)	-0.080*** (0.015)	-0.073*** (0.016)	-0.044*** (0.013)
$\ln(Res)$	-	-	-0.071*** (0.010)	-0.056*** (0.013)	-0.063*** (0.010)	-0.051*** (0.012)
$\ln(Trade)$	-	-	-	-	0.038 (0.027)	0.052 (0.048)
$\ln(PopDensity)$	-	-	-	-	0.271** (0.124)	0.365** (0.154)
$\ln(Fossil)$	-	-	-	-	0.071*** (0.026)	0.053** (0.019)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30	30	30
R ² (within)	0.2475	0.4337	0.3073	0.4696	0.3662	0.5142
Prob>F	0.0009 (9.03)	0.0009 (18.88)	0.0000 (30.44)	0.0000 (882.41)	0.0000 (41.51)	0.0000 (605.72)
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	12,505.00	14,993.68	14,721.83	17,478.90	13,268,53	13,823.02

Note: *Driscoll-Kraay standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.9.1- *Robustness check* delle stime per il biossido di carbonio (CO₂)

<i>Modelli 1-3</i>	Variabile dipendente: $\ln(CO_2)$					
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	-6.929** (3.339)	-4.160* (2.199)	-5.956* (2.942)	-3.630* (1.935)	-2.259 (1.720)	-1.985 (1.727)
$\ln(y)$	1.934*** (0.701)	1.308*** (0.427)	1.581** (0.613)	1.088*** (0.366)	1.067*** (0.359)	1.051*** (0.334)
$[\ln(y)]^2$	-0.103*** (0.037)	-0.069*** (0.021)	-0.082** (0.032)	-0.056*** (0.018)	-0.056*** (0.020)	-0.055*** (0.019)
$\ln(Res)$		-	-0.081*** (0.011)	-0.064*** (0.014)	-0.071*** (0.010)	-0.072*** (0.010)
$\ln(Trade)$	-	-			0.038 (0.031)	0.051 (0.036)
$\ln(PopDensity)$	-	-	-	-	0.230** (0.120)	0.255** (0.126)
$\ln(Fossil)$	-	-	-	-	0.091*** (0.029)	0.091*** (0.029)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30	30	30
R ² (within)	0.1685	0.4035	0.2346	0.4064	0.3319	0.4707
Prob>F	0.0009 (8.09)	0.0000 (9.12)	0.0000 (29.30)	0.0000 (1958.73)	0.0000 (56.39)	0.0000 (481.28)
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	11,948.36	13,072.43	15,371.09	16,552.38	13,772.41	14,108.67

Note: *Driscoll-Kraay standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.9.2- *Robustness check* delle stime per il biossido di metano (CH₄)

<i>Modelli 1-3</i>	Variabile dipendente: $\ln(CH_4)$					
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	-14.010*** (1.252)	-12.958*** (0.864)	-12.899*** (0.935)	-12.312*** (0.709)	-7.015** (2.990)	-7.617** (3.213)
$\ln(y)$	3.107*** (0.252)	2.805*** (0.172)	2.708*** (0.182)	2.525*** (0.141)	1.901*** (0.410)	1.900*** (0.456)
$[\ln(y)]^2$	-0.169*** (0.013)	-0.149*** (0.009)	-0.145*** (0.009)	-0.132*** (0.008)	-0.104*** (0.022)	-0.101*** (0.024)
$\ln(Res)$		-	-0.094*** (0.010)	-0.088*** (0.011)	-0.085*** (0.011)	-0.081*** (0.013)
$\ln(Trade)$	-	-			-0.015 (0.047)	-0.011 (0.055)
$\ln(PopDensity)$	-	-	-	-	0.369** (0.154)	0.302** (0.152)
$\ln(Fossil)$	-	-	-	-	0.037** (0.015)	0.034** (0.014)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30	30	30
R ² (within)	0.5155	0.5458	0.6009	0.6234	0.6212	0.6381
Prob>F	0.0000 (314.07)	0.0000 (116.71)	0.0000 (204.03)	0.0000 (1037.27)	0.0000 (177.72)	0.0000 (902.13)
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	9,821.28	12,243.51	11,360.87	14,248.31	9,315.38	12,160.40

Note: *Driscoll-Kraay standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.9.3- *Robustness check* delle stime per il protossido di azoto (N₂O)

Modelli 1-3	Variabile dipendente: $\ln(N_2O)$					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	-24.323*** (1.486)	-22.401*** (0.767)	-23.279*** (1.331)	-21.838*** (0.809)	-8.551*** (1.518)	-8.954*** (1.522)
$\ln(y)$	5.106*** (0.308)	4.545*** (0.172)	4.732*** (0.284)	4.320*** (0.183)	2.690*** (0.243)	2.540*** (0.272)
$[\ln(y)]^2$	-0.271*** (0.016)	-0.235*** (0.011)	-0.249*** (0.015)	-0.221*** (0.011)	-0.144*** (0.013)	-0.131*** (0.015)
$\ln(Res)$		-	-0.084*** (0.011)	-0.064*** (0.014)	-0.074*** (0.011)	-0.057*** (0.012)
$\ln(Trade)$	-	-			-0.010 (0.044)	-0.009 (0.028)
$\ln(PopDensity)$	-	-	-	-	-0.340*** (0.114)	-0.432*** (0.081)
$\ln(Fossil)$	-	-	-	-	0.005 (0.022)	0.013 (0.022)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI	-	SI
Osservazioni	630	630	623	623	623	623
Paesi	30	30	30	30	30	30
R ² (within)	0.5044	0.5792	0.5297	0.5922	0.5583	0.6126
Prob>F	0.0000 (154.25)	0.0000 (330.28)	0.0000 (174.56)	0.0000 (2930.09)	0.0000 (102.52)	0.0000 (2843.68)
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
<i>Turning point</i> (dollari pro capite)	12,340.77	15,838.71	13,386.56	17,566.61	11,387.57	16,230.64

Note: *Driscoll-Kraay standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Di seguito, per ogni differente indicatore ambientale, vengono analizzati i risultati di tutti i modelli stimati.

Per quanto attiene al Kyoto *basket* (GHG) si ha evidenza empirica a favore di una EKC per il campione analizzato: i valori del *turning point* per il *Modello 1* sono

compresi tra 12,505.00 e 14,993.68 dollari pro capite. In tal caso, sia gli effetti individuali che quelli temporali sono statisticamente significativi ad un livello di significatività dell'1%. Tuttavia, una caratteristica molto importante, comune a tutte le equazioni stimate, riguarda l'aumento nei valori del punto di svolta quando sono controllati gli effetti temporali. Nel caso del *Kyoto basket*, la differenza è pari a 2,448.68 dollari per il *Modello 1*. Per quanto attiene agli *Extended Kuznets Curve models* (*Modello 2* e *Modello 3*), i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili fanno registrare un valore negativo e statisticamente significativo per il *Kyoto basket*: ad un aumento dell'1% nei consumi finali di fonti energetiche rinnovabili corrisponde una riduzione dell'inquinamento atmosferico di una percentuale che oscilla tra lo 0.071% e lo 0.056%, per il *Modello 2*, e tra lo 0.063% e lo 0.051%, per il *Modello 3*. Discorso controverso riguarda, invece, la variabile espressione del grado di apertura commerciale: il coefficiente associato alla variabile *Trade* assume un valore compreso tra 0.052% e 0.073%. Tuttavia, la relazione tra grado di apertura commerciale ed inquinamento è statisticamente debole in quanto, se si controllano gli effetti individuali e temporali, il coefficiente risulta statisticamente non significativo. La densità demografica (*PopDensity*) e la quota di energia elettrica generata da fonti fossili (*Fossil*) presentano, invece, dei coefficienti positivi e statisticamente significativi. Per quanto attiene alla densità demografica, è possibile affermare che ad un aumento dell'1% nel numero di persone per chilometro quadrato corrisponde un incremento delle emissioni inquinanti pari a 0.271% e 0.365%. La quota di energia elettrica generata da fonti fossili fa registrare un coefficiente compreso in una percentuale che varia tra lo 0.071% e lo 0.053%. Pertanto, ad un aumento nella quota di energia elettrica da carbone, petrolio e gas corrisponde un aumento nelle emissioni totali di gas serra.

Le regressioni stimate per il biossido di carbonio (CO₂) forniscono evidenza empirica di una EKC per il campione analizzato: i valori del *turning point* risultano essere molto simili a quelli per il *Kyoto basket*. Tale risultato ci consente di intuire come le emissioni di anidride carbonica svolgano un ruolo dominante per l'inquinamento atmosferico. Per il *Modello 1*, infatti, il punto di svolta nella relazione crescita-inquinamento è compreso tra 11,948.36 e 13,072.43 dollari pro capite. I risultati empirici per gli *Extended Kuznets curve models* dimostrano che i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili presentano dei coefficienti negativi e statisticamente

significativi: ad un aumento dell'1% nei consumi finali da RES corrisponde una riduzione delle emissioni pro capite di CO₂ per un valore che oscilla da un minimo di 0.064% ad un massimo di 0.081%, per il *Modello 2*, e tra 0.071% e 0.072%, per il *Modello 3*. Per quanto attiene al grado di apertura commerciale si evince un risultato molto simile a quello ottenuto per il *Kyoto basket*: il coefficiente associato alla variabile *trade*, seppur di segno positivo, è statisticamente debole. Un certo grado di omogeneità si riscontra anche nei coefficienti correlati alla densità demografica e alla quota di energia elettrica generata da fonti fossili. Tali coefficienti registrano, infatti, valori positivi e statisticamente significativi. Nel caso della densità demografica ad un aumento dell'1% nel numero di persone per chilometro quadrato corrisponde un incremento nelle emissioni di CO₂ da un minimo di 0.230% ad un massimo di 0.255%. Infine, la quota di energia elettrica generata da fonti fossili presenta un'elasticità ambientale dello 0.091%, per le equazioni contenute nelle colonne (5) e (6).

I risultati delle regressioni per le emissioni di metano (CH₄) forniscono evidenza empirica a favore di una EKC per il campione oggetto di studio. In tal caso, i valori del *turning point* risultano minori rispetto a quelli registrati per il *Kyoto basket* e per il biossido di carbonio. In modo particolare, i valori del *turning point* per il *Modello 1* risultano essere 9,821.28 dollari pro capite per l'equazione (1) e 12,243.51 dollari pro capite per l'equazione (2). Negli *Extended Kuznets curve models* stimati i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili presentano un valore negativo e statisticamente significativo: l'elasticità delle RES rispetto alle emissioni di metano assume un valore che varia da un massimo di 0.094% ad un minimo di 0.081%, per il *Modello 2*, e da 0.085% a 0.081%, per il *Modello 3*. Pertanto, un aumento dell'1% nei consumi finali di fonti rinnovabili è in grado di generare una riduzione delle emissioni di metano per un valore medio dello 0.087%. Risultati contrastanti si registrano, invece, per il grado di apertura commerciale: entrambi i coefficienti associati alla variabile *Trade* sono negativi ma statisticamente non significativi. In linea con i risultati delle regressioni per il *Kyoto basket* (GHG) e per il biossido di carbonio (CO₂), i coefficienti associati alla densità demografica e alla quota di energia elettrica generata da fonti fossili sono positivi e statisticamente significativi. Facendo, infatti, riferimento alla colonna (6) è possibile affermare che un aumento dell'1% nella variabile *Fossil* è associato ad un

aumento delle emissioni di metano dello 0.034%. Similmente, ad un aumento della densità demografica corrisponde un incremento delle emissioni dello 0.302%.

Le regressioni stimate per il protossido di azoto (N₂O) forniscono evidenza empirica di una EKC per il campione analizzato: i valori del *turning point* nella relazione crescita-inquinamento sono compresi tra 12,340.77 e 15,838.71 dollari per abitante per il modello in forma ridotta (*Modello 1*). In tal caso, la differenza nei valori del *turning point* risulta essere particolarmente elevata quando vengono controllati gli effetti temporali: la differenza è pari a 3,497.94 dollari pro capite. I risultati empirici per gli *Extended Kuznets Curve models* dimostrano che i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili presentano dei coefficienti negativi e statisticamente significativi: ad un aumento dell'1% nei consumi finali da RES corrisponde una riduzione delle emissioni pro capite di protossido di azoto per un valore che oscilla da un minimo di 0.057% ad un massimo di 0.084%. Così come per le emissioni di biossido di metano, anche in questo caso il grado di apertura commerciale assume un valore negativo ma statisticamente non significativo. Di contro, la densità demografica, fa registrare un coefficiente negativo e statisticamente significativo: ad un aumento dell'1% nel numero di persone per chilometro quadrato corrisponde una riduzione delle emissioni di protossido di azoto pari allo 0.340% e allo 0.432%. Infine, contrariamente a quanto osservato per gli altri indicatori ambientali, la quota di energia elettrica generata da fonti fossili presenta dei coefficienti positivi ma statisticamente non significativi. Questo risultato deriva principalmente dal fatto che, a differenza degli altri *polluters* esaminati, le fonti antropogeniche del protossido di azoto sono connesse principalmente all'agricoltura intensiva, all'allevamento e alla combustione della biomassa.

1.7- Test di endogeneità

Nelle sezioni precedenti è stata verificata empiricamente, per tutti e quattro gli indicatori ambientali (GHG, CO₂, N₂O, CH₄) l'ipotesi di una relazione *inverted U shaped* tra il GDP pro capite e l'inquinamento ambientale pro capite. Tuttavia, come già ampiamente discusso, nella *Environmental Kuznets Curve literature* alcuni autori hanno rilevato delle criticità di natura econometrica nella relazione che lega le emissioni inquinanti al reddito pro capite (si veda, in particolare, Stern, 2004). Una di queste

problematiche riguarda la possibile natura endogena¹² del reddito pro capite che, se rilevata, renderebbe inconsistenti le stime ottenute per mezzo del metodo dei minimi quadrati con variabili *dummy*. In presenza di un problema di endogeneità, infatti, le stime OLS dei coefficienti associati alla variabile d'interessi saranno distorti poiché viene violata un'assunzione chiave del metodo dei minimi quadrati ordinari, ossia la cosiddetta *zero-conditional-mean assumption* (Baum, 2006), che richiede l'assenza di correlazione tra le variabili indipendenti e il termine d'errore della regressione. Tradizionalmente (si veda, in particolare, Wooldridge, 2007), le fonti dell'endogeneità sono molteplici: variabili omesse, causalità simultanea ed errori di misurazione nelle variabili. Tuttavia, «*the distinctions among the three possible forms of endogeneity are not always sharp; [...] an equation can have more than one source of endogeneity*» (Wooldridge, 2007).

Nella relazione tra l'inquinamento ambientale e la crescita economica, la letteratura ci suggerisce la sussistenza di molteplici ragioni che potrebbero confermare la natura endogena del GDP pro capite rispetto alle emissioni di gas serra. Liobikiene e Butkus (2017) sostengono, infatti, che «*EKC assumes that there is no feedback from environmental pollution to economic production as income is assumed to be an exogenous variable, i.e. damage to environment does not reduce economic activity to the point from which the process of growth begins to stop and reduces the level of income in the future. But this assumption can be fragile because environmental degradation and depletion of natural resources impose higher cost of production, lower level of growth and thus reverse causality between environmental pollution and income per capita*». Anche Lin e Liscow (2013) rilevano una possibile causalità simultanea tra il GDP pro capite e le emissioni inquinanti: «*while the increases in economic activity that come along with increases in GDP may increase pollution, increases in pollution may, at the same time, harm people's health, for example, thereby reducing GDP. Output and pollution may also be jointly produced in the production process, causing*

¹² Nell'economia applicata, una variabile è definita endogena se risulta correlata al termine d'errore della regressione. Di contro, una variabile è definita esogena se non sussiste alcuna correlazione con il termine d'errore (Stock e Watson, 2012).

GDP and pollution to be simultaneously determined». Altri autori, tra cui Balsalobre-Lorente e Alvarez-Herranz (2016) e Alvarez-Herranz *et al.* (2017), enfatizzano, invece, la possibile distorsione da variabili omesse nelle stime OLS dei coefficienti di regressione del modello ambientale di Kuznets. Entrambe le minacce alla validità interna (distorsione da variabili omesse e/o causalità simultanea) relazionate al GDP pro capite, seppur probabili, ci inducono a stimare nuovamente il modello d'interesse per mezzo dello stimatore dei minimi quadrati a due stadi. Il *Two Stage Least Square* (2SLS) costituisce un modo per ottenere stimatori non distorti e consistenti quando uno o più regressori sono correlati con il termine d'errore della regressione¹³. Tale procedura econometrica ci consente anche di testare e confermare l'eventuale natura endogena del GDP pro capite per mezzo del test di Durbin-Wu-Hausman (DWH) sulla presenza di variabili endogene tra i regressori.

Per ottenere delle stime non distorte e consistenti dell'effetto ambientale del reddito pro capite, seguendo la metodologia investigativa implementata da Lin e Liscow (2013), Alvarez-Herranz *et al.* (2017) e di Liobikiene e Butkus (2017), è necessario indagare l'eventuale natura endogena e/o esogena del GDP pro capite. Pertanto, viene messo in pratica un ulteriore controllo di robustezza in cui viene applicato il metodo delle variabili strumentali con *fixed effects* per il *Modello 3* che, ricordiamo, assume la seguente forma funzionale:

$$\ln(e)_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(y)_{it} + \beta_2 [\ln(y)]_{it}^2 + \beta_3 \ln(Res)_{it} + \ln(z)_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove:

- ✓ *e*: è un indicatore del livello di inquinamento ambientale in termini pro capite;
- ✓ *y*: è il reddito pro capite;
- ✓ *Res*: è un indicatore dei consumi energetici pro capite da fonti rinnovabili;

¹³ L'idea centrale della regressione con variabili strumentali è quella di dividere le variazioni che avvengono nei regressori in due parti: **una parte endogena** (correlata al termine d'errore che crea problemi di distorsione) e **una parte esogena** (non correlata al termine d'errore che viene utilizzata per stimare la regressione con stimatori non distorti). Tale scissione, basata su alcune variabili suppletive denominate strumenti, ci consente di utilizzare esclusivamente le variazioni esogene della variabile d'interesse per stimare l'effetto associato alla variabile potenzialmente endogena.

- ✓ z : è un vettore che contiene variabili addizionali di controllo (il grado di apertura commerciale, la densità demografica e la percentuale di energia elettrica generata da fonti fossili);
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore;

Per indagare la natura endogena e/o esogena del GDP pro capite, utilizziamo il metodo delle variabili strumentali che si articola in due fasi differenti. Nel primo stadio si scompone il regressore potenzialmente endogeno (nel nostro caso il GDP pro capite) in due elementi: una parte che potrebbe essere correlata al termine d'errore e un'altra esogena. Nel secondo stadio si utilizza la parte spiegata o predetta al primo stadio per stimare la relazione oggetto di studio. Tale scissione è basata sulla rilevanza e l'esogeneità di ulteriori variabili, definite strumenti (o, appunto, variabili strumentali), che ci consentono di isolare le variazioni della variabile potenzialmente endogena che non sono correlate al termine d'errore¹⁴.

Nella letteratura sulla Environmental Kuznets Curve (EKC) sono limitati i contributi che applicano il metodo delle variabili strumentali. In tale contesto, uno degli strumenti utilizzati per correggere la natura endogena del reddito pro capite è rappresentato dall'indice di dipendenza (*age dependency ratio*) che è definito come «*the ratio of dependents, people younger than 15 or older than 64, to the working-age population-those ages 15-64*» (World Bank, 2018). Esso si sostanzia nel rapporto tra individui dipendenti (in età non lavorativa) e indipendenti (in età lavorativa). Un elevato indice di dipendenza tende a ridurre il GDP (Lin e Liscow, 2013), per cui i paesi più poveri tendono ad avere questo profilo demografico. La ragione, è dovuta al fatto che i paesi con un rapporto di dipendenza elevato tendono ad essere meno produttivi e, di conseguenza, avranno tassi di crescita inferiori. Altri autori, utilizzano il tasso d'inflazione (Balsalobre Lorente e Alvarez-Herranz, 2016) oppure il tasso di urbanizzazione (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017). Nel nostro caso, gli strumenti utilizzati per indagare e depurare i problemi di endogeneità del GDP pro capite consistono in due variabili estratte dalla banca dati World Bank:

¹⁴ Se la condizione di rilevanza richiede che gli strumenti siano altamente correlati alla variabile endogena, la condizione di esogeneità richiede che gli strumenti non devono influenzare la variabile dipendente in maniera diretta ma esclusivamente attraverso il regressore endogeno. Se entrambe le condizioni sono rispettate, siamo in presenza di strumenti validi.

- *Fertility*, definita come «*the number of children that would be born to a woman if she were to live to the end of her childbearing years and bear children in accordance with age-specific fertility rates of the specified year*» (World Development Indicators, 2018);
- *LaborForce*, definita come «*the proportion of the population ages 15-64 that is economically active: all people who supply labor for the production of goods and services during a specified period*» (World Development Indicators, 2018);

Entrambi gli strumenti, le cui statistiche descrittive sono riportate nella sottostante Tabella 1.10, sono ragionevolmente validi in quanto sono altamente correlati al GDP pro capite e non hanno alcun effetto diretto sulla qualità ambientale se non attraverso la loro influenza sul reddito. Inoltre, poiché la variabile espressione del reddito pro capite è stata inclusa anche in forma quadratica, è necessario eseguire la medesima operazione per le variabili strumentali (Lin e Liscow, 2013; Balsalobre-Lorente e Alvarez-Herranz, 2016; Alvarez-Herranz *et al.*, 2017).

Tabella 1.10- Statistiche descrittive variabili strumentali

Variabili	Obs.	Media	Std. Dev.	Min	Max
<i>Fertility</i>	630	1.547892	0.247595	1.09	2.23
<i>Ln(Fertility)</i>	630	0.424373	0.157747	0.086178	0.802002
$[\ln(Fertility)]^2$	630	0.204937	0.140846	0.007427	0.643207
<i>LaborForce</i>	630	0.703935	0.062473	0.57098	0.88372
<i>Ln(LaborForce)</i>	630	-0.35498	0.088458	-0.5604	-0.12362
$[\ln(LaborForce)]^2$	630	0.133823	0.063305	0.015281	0.314049

1.7.1- *Stime con variabili strumentali*

La metodologia delle variabili strumentali, nel contesto analizzato, consiste in due differenti regressioni in cui il logaritmo naturale del GDP, in forma lineare e quadratica, viene modellato sulle variabili esogene incluse (*Z*) e sugli strumenti (*Fertility* e *LaborForce*). Analiticamente, il primo stadio dell'approccio delle variabili strumentali assume la seguente forma funzionale:

$$\ln(y)_{it} = \alpha_i + \pi_0 + \pi_1 \ln(RES)_{it} + \pi_2 \ln(TRADE)_{it} + \pi_3 \ln(PopDensity)_{it} + \pi_4 \ln(Fossil)_{it} + \pi_5 \ln(Fertility)_{it} + \pi_6 [\ln(Fertility)_{it}]^2 + \pi_7 \ln(LaborForce)_{it} + \pi_8 [\ln(LaborForce)_{it}]^2 + V_{1it} \quad \textbf{First-Stage regression (1a)}$$

$$[\ln(y)]_{it}^2 = \alpha_i + \pi_0 + \pi_1 \ln(RES)_{it} + \pi_2 \ln(TRADE)_{it} + \pi_3 \ln(PopDensity)_{it} + \pi_4 \ln(Fossil)_{it} + \pi_5 \ln(Fertility)_{it} + \pi_6 [\ln(Fertility)_{it}]^2 + \pi_7 \ln(LaborForce)_{it} + \pi_8 [\ln(LaborForce)_{it}]^2 + V_{2it} \quad \textbf{First-Stage regression (2a)}$$

dove le variabili analizzate sono di seguito specificate:

- ✓ $\ln(y)$ e $[\ln(y)]^2$: logaritmo naturale del GDP pro capite in forma lineare e quadratica;
- ✓ $\ln(res)$: logaritmo naturale dei consumi pro capite di fonti energetiche rinnovabili;
- ✓ $\ln(Trade)$: logaritmo naturale del grado di apertura commerciale;
- ✓ $\ln(PopDensity)$: logaritmo naturale della densità demografica;
- ✓ $\ln(Fossil)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da gas, carbone e petrolio;
- ✓ $\ln(Fertility)$ e $[\ln(Fertility)]^2$: logaritmo naturale del tasso di fertilità in forma lineare e quadratica;
- ✓ $\ln(LaborForce)$ e $[\ln(LaborForce)]^2$: logaritmo naturale della quota di popolazione attiva in forma lineare e quadratica
- ✓ α : dummy individuali;
- ✓ $i = 1, \dots, 31$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);
- ✓ V_1, V_2 : rappresentano il termine d'errore della regressione al primo stadio;

I risultati delle stime del primo stadio sono riportati nella sottostante Tabella 1.11, dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 1.11- Risultati delle stime al primo stadio per il logaritmo naturale del GDP pro capite in forma lineare e quadratica

<i>First-Stage Regression</i>	Variabile dipendente: $\ln(y)$	Variabile dipendente: $[\ln(y)]^2$
Variabili	(1)	(2)
<i>Costante</i>	7.482*** (0.476)	52.497*** (9.213)
<i>ln(Res)</i>	0.168*** (0.024)	3.336*** (0.467)
<i>ln(Trade)</i>	1.097*** (0.066)	21.329*** (1.273)
<i>ln(PopDensity)</i>	0.001 (0.054)	0.743 (1.054)
<i>ln(Fossil)</i>	0.088*** (0.024)	1.584*** (0.468)
<i>Ln(Fertility)</i>	1.844*** (0.363)	32.379*** (7.032)
$[\ln(Fertility)]^2$	-1.480*** (0.446)	-24.897*** (8.633)
<i>Ln(LaborForce)</i>	7.801*** (1.453)	166.029*** (28.152)
$[\ln(LaborForce)]^2$	8.788*** (1.901)	183.882*** (36.835)
<i>Fixed effects</i>	SI	SI
Osservazioni	613	613
ADJ-R ²	0.8793	0.8857
Prob>F	0.0009 (124.85)	0.0000 (132.67)

Note: *Standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

L'efficacia di utilizzare lo stimatore delle variabili strumentali dipende, tuttavia, dal rispetto della condizione di validità degli strumenti poiché strumenti non validi producono risultati privi di significato. Come già anticipato, affinché uno strumento sia

considerato valido, occorre rispettare due condizioni fondamentali: rilevanza ed esogeneità. Nel contesto analizzato, è necessario verificare empiricamente se le variabili strumentali utilizzate (*Fertility* e *LaborForce*) siano rilevanti rispetto al GDP pro capite ed esogene rispetto alle emissioni di gas serra.

La rilevanza, ossia la correlazione tra le variabili strumentali e le variabili endogene, viene testata al primo stadio per mezzo di una statistica F sui coefficienti associati alle variabili strumentali ($\Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8$). I risultati del test assumono i seguenti valori:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(y)$: $F(4, 576) = 26.08$;
- ✓ Variabile dipendente $[\ln(y)]^2$: $F(4, 576) = 28.18$;

Seguendo *la rule of thumb* (Wooldridge, 2007), non sussistono problemi di rilevanza estrumenti deboli in quanto risulta che entrambe le variabili strumentali influenzano in maniera significativa il GDP pro capite.

La seconda condizione di validità richiede l'esogeneità degli strumenti. Poiché il modello stimato è sovraidentificato, ossia il numero di strumenti è superiore al numero di variabili potenzialmente endogene, è possibile utilizzare il test delle restrizioni di sovraidentificazione (*test of overidentifying restrictions*) che verifica l'ipotesi nulla che le variabili strumentali siano esogene rispetto alla variabile dipendente del secondo stadio o, alternativamente, che non siano correlati al termine d'errore della regressione: «*if we reject this hypothesis, we cast doubt on the suitability of the instrument set*» (Baum, 2006). Il test è stato eseguito nelle due versioni proposte da Sargan (1958) e Basman (1960). I risultati del test sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 1.12 – Risultati del test delle restrizioni di sovraidentificazione

<i>Variabile dipendente</i>	<i>Sargan Test</i>	<i>Basmann test</i>
$\ln(GHG)$	chi-sq= 1.493 P-value= 0.4740	chi-sq= 1.475 P-value= 0.4784
$\ln(CO_2)$	chi-sq= 4.066 P-value= 0.1309	chi-sq= 4.033 P-value= 0.1331
$\ln(CH_4)$	chi-sq= 2.085 P-value= 0.3525	chi-sq= 2.062 P-value= 3567
$\ln(N_2O)$	chi-sq= 1.601 P-value= 0.4490	chi-sq= 1.582 P-value= 0.4534

I risultati del test delle restrizioni di sovraidentificazione ci suggeriscono che gli strumenti adottati sono esogeni rispetto alle emissioni di gas serra analizzate: l'ipotesi nulla che gli strumenti siano non correlati al termine d'errore della regressione viene rigettata per tutti e quattro i *polluters* esaminati.

Per verificare statisticamente la natura endogena del GDP pro capite è necessario effettuare un ulteriore test statistico, ossia il *Durbin-Wu-Hausman endogeneity test* sulla presenza di variabili endogene tra i regressori. Questo test, basandosi sul confronto *ex-post* tra due differenti stimatori (*Instrumental Variables Estimator* e *Ordinary Least Squares*), pone sotto l'ipotesi nulla la consistenza dello stimatore OLS. Nel caso in cui si ha evidenza a favore dell'ipotesi alternativa, rifiutando l'ipotesi nulla, gli effetti dei regressori endogeni sulle stime saranno significativi e, al fine di ottenere stime non distorte e consistenti, sarà necessario applicare la tecnica delle variabili strumentali. Di seguito, per tutti i *polluters* esaminati, sono riportati i risultati del test di endogeneità di Durbin-Wu-Hausman (DWH) per il logaritmo naturale del GDP pro capite in forma lineare e quadratica:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(GHG)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 14.86628, P-value = 0.00059;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(CO_2)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 11.03085, P-value = 0.00402;

- ✓ Variabile dipendente $\ln(CH_4)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 22.29006, P-value = 0.00001;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(N_2O)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 66.89137, P-value = 0.00000;

I risultati di questo test confermano la necessità di utilizzare lo stimatore delle variabili strumentali per superare il problema dell'endogeneità del GDP in tutti gli indicatori ambientali analizzati.

Le sottostanti Tabelle 1.13 e 1.14 contengono le stime delle equazioni del secondo stadio. Ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche. Per evitare problemi di consistenza, sono stati utilizzati *standard errors* robusti all'eteroschedasticità e all'autocorrelazione (*clustered standard errors*).

Tabella 1.13 - *Two Stage Least Square (2SLS)* risultati per il Kyoto basket (GHG) e il biossido di carbonio (CO₂)

<i>Modello 3</i>	Variabile dipendente: <i>ln(GHG)</i>	Variabile dipendente: <i>ln(GHG)</i>	Variabile dipendente: <i>ln(C₂O)</i>	Variabile dipendente: <i>ln(C₂O)</i>
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-25.091*** (6.307)	-26.889*** (7.016)	-18.996** (7.370)	-18.623** (8.100)
<i>ln(y)</i>	5.522*** (1.206)	5.544*** (1.431)	4.254*** (1.325)	3.815** (1.547)
<i>[ln(y)]²</i>	-0.278*** (0.061)	-0.266*** (0.074)	-0.211*** (0.067)	-0.173** (0.080)
<i>ln(Res)</i>	-0.101*** (0.018)	-0.099*** (0.024)	-0.115*** (0.019)	-0.108*** (0.025)
<i>ln(Trade)</i>	-0.079 (0.079)	-0.150 (0.110)	-0.143 (0.087)	-0.117 (0.122)
<i>ln(PopDensity)</i>	0.406** (0.174)	0.484** (0.199)	0.404** (0.194)	0.468** (0.198)
<i>ln(Fossil)</i>	0.073*** (0.019)	0.049** (0.022)	0.084*** (0.021)	0.051** (0.024)
<i>Fixed effects</i>	SI	SI	SI	SI
<i>Time effects</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	613	613	613	613
Paesi	30	30	30	30
R ²	0.9251	0.9075	0.9300	0.9169
Adj R ²	0.9205	0.8985	0.9257	0.9088
Prob>F	0.0000 (286.38)	0.0000 (107.24)	0.0000 (221.91)	0.0000 (142.93)
<i>Fixed effects= 0</i>	Prob > F = 0.0000	Prob > F = 0.0000	Prob > F = 0.0000	Prob > F = 0.0000
<i>Time effects= 0</i>	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > F = 0.0000
<i>Turning point (dollari pro capite)</i>	20,571.35	33,558.74	23,874.55	31,451.99

Note: *Robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 1.13.1 - *Two Stage Least Square (2SLS)* risultati per il biossido di metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O)

<i>Modello 3</i>	Variabile dipendente: <i>ln(CH₄)</i>	Variabile dipendente: <i>ln(CH₄)</i>	Variabile dipendente: <i>ln(N₂O)</i>	Variabile dipendente: <i>ln(N₂O)</i>
Variabili	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-47.874*** (8.074)	-54.357*** (7.824)	-35.887*** (8.312)	-36.623*** (8.716)
<i>ln(y)</i>	9.677*** (1.541)	10.832*** (1.472)	7.409*** (1.599)	7.271*** (1.678)
<i>[ln(y)]²</i>	-0.502*** (0.078)	-0.557*** (0.074)	-0.383*** (0.082)	-0.363*** (0.087)
<i>ln(Res)</i>	-0.098*** (0.022)	-0.106*** (0.022)	-0.091*** (0.018)	-0.085*** (0.020)
<i>ln(Trade)</i>	0.127 (0.088)	0.140 (0.098)	-0.025 (0.089)	-0.095 (0.104)
<i>ln(PopDensity)</i>	0.768*** (0.223)	0.891*** (0.283)	-0.225 (0.481)	-0.462 (0.529)
<i>ln(Fossil)</i>	0.080*** (0.017)	0.093*** (0.021)	0.008 (0.019)	0.002 (0.023)
<i>Fixed effects</i>	SI	SI	SI	SI
<i>Time effects</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	613	613	613	613
Paesi	30	30	30	30
R ²	0.9154	0.9094	0.9399	0.9422
Adj R ²	0.9103	0.9006	0.9362	0.9366
Prob>F	0.0000 (296.33)	0.0000 (165.44)	0.0000 (629.64)	0.0000 (425.68)
Fixed effects= 0	Prob > F = 0.0000	Prob > F = 0.0000	Prob > F = 0.0000	Prob > F = 0.0000
<i>Time effects = 0</i>	-	Prob > F = 0.0000	-	Prob > F = 0.0000
<i>Turning point (dollari pro capite)</i>	15,343.48	16,705.92	15,872.19	22,362.74

Note: *Robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

I risultati delle stime con variabili strumentali confermano l'ipotesi di una relazione *inverted U shaped* tra le emissioni inquinanti e il reddito pro capite. I valori del *turning point* variano in funzione della sostanza inquinante analizzata e assumono i seguenti valori:

- Per il Kyoto *basket* (GHG) 20,571.35 (senza effetti temporali) e 33,558.74 (con gli effetti temporali);
- Per il biossido di carbonio (CO₂) 23,874.55 (senza effetti temporali) e 31,451.99 (con gli effetti temporali);
- Per il biossido di metano (CH₄) 15,343.48 (senza effetti temporali) e 16,705.92 (con gli effetti temporali);
- Per protossido di azoto (N₂O) 15,872.19 (senza effetti temporali) e 22,362.74 (con gli effetti temporali);

In funzione dei risultati ottenuti per mezzo dello stimatore delle variabili strumentali, siamo portati a sostenere che l'*Environmental Kuznets Curve Hypothesis* sia un fenomeno solido dal punto di vista empirico: l'aumento del benessere economico può contrastare efficacemente le emissioni di gas serra. Inoltre, l'evidenza empirica ci mostra che i consumi da fonti energetiche rinnovabili costituiscono un importante mezzo per ridurre l'inquinamento atmosferico. In particolare, le stime al secondo stadio, ci mostrano dei coefficienti negativi e statisticamente significativi della variabile *Res* per tutti i *polluters* esaminati. Le elasticità ambientali dei consumi energetici da fonti rinnovabili sono le seguenti:

- Per il Kyoto *basket* (GHG) un aumento dell'1% nei consumi da RES è associato ad una riduzione dello 0.101% (senza effetti temporali) e dello 0.099% (con gli effetti temporali) delle emissioni inquinanti;
- Per il biossido di carbonio (CO₂) un aumento dell'1% nei consumi da RES è associato ad una riduzione dello 0.115% (senza effetti temporali) e dello 0.108% (con gli effetti temporali) delle emissioni inquinanti;
- Per il biossido di metano (CH₄) un aumento dell'1% nei consumi da RES è associato ad una riduzione dello 0.098% (senza effetti temporali) e dello 0.106% (con gli effetti temporali) delle emissioni inquinanti;

- Per il protossido di azoto (N_2O) un aumento dell'1% nei consumi da RES è associato ad una riduzione dello 0.091% (senza effetti temporali) e dello 0.085% (con gli effetti temporali) delle emissioni inquinanti;

Le variabili addizionali di controllo (*Trade*, *PopDensity* e *Fossil*) fanno registrare dei risultati che non variano sensibilmente rispetto alle stime ottenute nelle sezioni precedenti. Un certo grado di omogeneità si osserva, infatti, per la quota di energia elettrica generata da fonti fossili e per la densità demografica: i coefficienti associati a queste due variabili presentano coefficienti positivi e statisticamente significativi in relazione alle emissioni del Kyoto basket (GHG), di biossido di carbonio (CO_2) e biossido di metano (CH_4). Di contro, lo stesso risultato non si evince per le emissioni di protossido di azoto (N_2O) per le quali non sono statisticamente significativi. Il grado di apertura commerciale (*Trade*), fa registrare dei coefficienti statisticamente non significativi per tutti i *polluters* esaminati.

Conclusioni

Negli ultimi anni, la letteratura scientifica che si propone di analizzare le determinanti antropogeniche delle emissioni di gas serra ha avuto importanti sviluppi. La ragione sottesa alla rapida diffusione di questa tipologia di studi è principalmente connessa alle preoccupazioni della comunità scientifica internazionale nei confronti dei cambiamenti climatici. D'altronde, «*excess amount of GHGs which are namely water vapor, CO_2 , Methane (CH_4), Nitrous Oxide (N_2O), and Chlorofluorocarbons (CFCs) in the atmosphere are the main reason for global climate change*» (Ozokcu e Ozdemir, 2017). La maggior parte degli studi presenti in letteratura è rappresentata da analisi empiriche che indagano la relazione crescita-inquinamento in un contesto analitico ben preciso: la curva ambientale di Kuznets che postula l'esistenza di una relazione a forma di U invertita tra degrado ambientale e sviluppo economico. Inoltre, un ruolo di primaria importanza nelle dinamiche di sostenibilità ambientale dei diversi paesi è svolto dalla conformazione del mix energetico nazionale. In tal caso, la letteratura scientifica ci suggerisce che l'aumento delle emissioni di gas serra è un fenomeno *energy-related* in quanto deriva principalmente da un utilizzo diffuso dei combustibili fossili per la produzione di energia (Borghesi, 1999; Friedl e Getzner, 2003; Sharma,

2011). Solo recentemente la ricerca scientifica, grazie soprattutto alla disponibilità di dati, ha cercato di analizzare la strategicità ambientale assunta dalle fonti energetiche rinnovabili nella relazione che lega l'inquinamento ambientale alla crescita economica (Sulaiman *et al.*, 2013; Lopez-Menendez *et al.*, 2014; Boluk e Mert, 2015; Bilgili *et al.*, 2016; Alvarez-Herranz *et al.*, 2017; York e McGee, 2017; Zoundi, 2017; Liobikiene e Butkus, 2017). Questo filone di ricerca è, tuttavia, caratterizzato da alcune criticità ben precise, come ad esempio la scarsa considerazione per le emissioni inquinanti differenti dal biossido di carbonio (CO₂), la forte eterogeneità metodologica, la mancata considerazione della natura endogena del GDP pro capite.

La domanda di ricerca alla quale questo lavoro ha cercato di rispondere è: qual'è la relazione tra inquinamento, crescita economica ed energie rinnovabili? In particolare, il lavoro, analizzando tre differenti scenari, cerca di approfondire la relazione che lega le emissioni di gas serra alla crescita economica e alla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. Quest'ultima è stata indagata utilizzando come quadro teorico di riferimento la curva ambientale di Kuznets. Lo studio offre, inoltre, un nuovo contributo metodologico che consente di spiegare come il processo di inquinamento ambientale sia contrastato efficacemente dalle tecnologie energetiche a basse emissioni. Lo scopo finale è, infatti, di verificare se a un aumento nei consumi finali di fonti energetiche rinnovabili corrisponda una riduzione delle emissioni inquinanti. Tale effetto, noto come *dampening effects* (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017), è stato analizzato per mezzo di un *Extended Kuznets curve model*.

A tal fine, sulla base di un panel di trenta paesi europei, valutati per gli anni 1995-2015, abbiamo stimato dei modelli multivariati che analizzano quattro differenti indicatori dell'inquinamento atmosferico: il *Kyoto basket* (GHG), il biossido di carbonio (CO₂), il biossido di metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O). Per tutti i *polluters* esaminati è stata verificata favorevolmente l'ipotesi di un'economia sostenibile in grado di contrastare efficacemente le emissioni di gas serra per mezzo di un miglioramento delle condizioni economiche individuali. I risultati delle regressioni stimate per il *Modello 1* confermano, infatti, l'ipotesi dell'esistenza di una EKC: ad un aumento del GDP pro capite corrisponde, dapprima, un aumento delle emissioni e, successivamente, una riduzione dell'inquinamento ambientale. Una caratteristica comune a tutti i *polluters* analizzati riguarda il ruolo svolto dalle fonti energetiche

rinnovabili all'interno della relazione crescita-inquinamento (*Modello 2 e Modello 3*). Le regressioni in cui sono stati valutati i consumi finali di fonti energetiche rinnovabili forniscono, infatti, risultati omogenei che dimostrano come tali risorse energetiche svolgano un ruolo fondamentale nella riduzione dei gas a effetto serra.

Il presente lavoro contribuisce all'approfondimento della letteratura esistente in diversi modi. L'innovatività del lavoro è, in primo luogo, strettamente connessa agli indicatori ambientali analizzati e alle variabili esplicative analizzate nei modelli. Nella letteratura esaminata, infatti, la maggioranza degli autori (Sulaiman *et al.*, 2013; Lopez-Menendez *et al.*, 2014, Boluk e Mert 2015; Bilgili *et al.*, 2016; York e McGee, 2017) indaga la relazione tra inquinamento ambientale, crescita economica e diffusione delle rinnovabili facendo riferimento esclusivo alle emissioni di anidride carbonica (CO₂), tralasciando altri possibili inquinanti atmosferici. Per quanto attiene alle variabili esplicative, un certo grado di originalità rispetto alle ricerche esistenti riguarda la considerazione di alcuni importanti fattori che potrebbero influenzare la qualità ambientale. Il riferimento è alle fonti energetiche tradizionali, al grado di apertura commerciale e alla densità demografica che, se omissi, potrebbero generare una forma di distorsione da variabili omesse. Sul piano metodologico, i contributi presenti in letteratura si propongono di stimare il *dampening effect* delle rinnovabili tralasciando la possibile *cross-sectional dependence* nei dati analizzati. Questo lavoro, in accordo con Boluk e Mert (2014) e Ozokcu e Ozdemir (2017), ha impiegato una metodologia di stima che prevede l'applicazione dei Driscoll-Kraay *standard errors* di Hoechle (2007) robusti all'eteroschedasticità, all'autocorrelazione e alla dipendenza longitudinale. Un ulteriore elemento del lavoro consiste nell'utilizzo del metodo dei minimi quadrati a due stadi (2SLS) per affrontare il problema dell'endogenità del reddito pro capite nelle nostre stime. Questa metodologia, all'interno dell'*Environmental Kuznets Curve literature*, trova scarsa applicazione. Ad eccezione di alcuni autori (Lin e Liscow, 2013; Balsalobre-Lorente e Alvarez-Herranz, 2016; Alvarez-Herranz *et al.*, 2017), infatti, non si riscontrano studi che utilizzano lo stimatore dei minimi quadrati a due stadi per ottenere la stima dell'elasticità reddito-inquinamento. In tale contesto, una novità aggiuntiva riguarda anche la scelta di due variabili strumentali non utilizzate dalla letteratura. Il riferimento è al tasso di fertilità e alla quota di popolazione attiva che, in

funzione del test delle restrizioni di sovraidentificazione e della *rule of thumb*, rappresentano delle variabili esogene e rilevanti.

Un importante risultato emerso dalle stime riguarda, per tutti i *polluters* analizzati, l'aumento del *turning point* delle curve ambientali stimate. In modo particolare, confrontando il *Modello 1* con i modelli estesi in cui vengono valutati i consumi finali da fonti rinnovabili (*Modello 2*), i punti di svolta tendono ad assumere un valore più elevato. Questo risultato è coerente con la letteratura analizzata. A tal proposito risulta molto interessante il lavoro di Mandal e Chakravarty (2018) in cui, attraverso una meta-analisi che coinvolge settantacinque differenti studi sulla EKC, viene affrontata questa particolare tematica. Gli autori, si propongono, infatti, di valutare il ruolo svolto dalle variabili energetiche nella stima dei *turning points* quando vengono valutate *energy-related variables* come variabili addizionali di controllo all'interno di un *Extended Kuznets curve model*. L'effetto dell'inclusione delle variabili energetiche sul *turning point* viene valutato per mezzo di un modello Tobit che permette di controllare alcune caratteristiche specifiche degli studi analizzati: dimensione campionaria, livelli del reddito, indicatore ambientale, grado di apertura commerciale, fattori politico-istituzionali. In accordo con Alvarez-Herranz e Balsalobre-Lorente (2017), le stime realizzate conducono gli autori ad affermare che «*our analysis shows that studies where energy variable is included to estimate EKC, the turning point is recorded higher as compared to the studies where it is not*» (Mandal e Chakravarty, 2018). Questo risultato, secondo Alvarez-Herranz *et al.* (2017) e York e McGee (2017), è da ricondurre alla presenza di un effetto interattivo tra il GDP pro capite e i consumi da fonti rinnovabili «*reflecting the effect that income level (GDPpc) has on renewable sources in the correction of GHGpc emission levels*» (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017). Specificatamente, tale effetto interattivo risulta essere positivo: l'effetto del reddito sulle emissioni inquinanti varia in funzione dei consumi da fonti rinnovabili e viceversa, l'effetto ambientale delle rinnovabili varia in funzione del livello del reddito. Pertanto, secondo Thombs (2017) le fonti energetiche rinnovabili presentano effetti paradossali sulle emissioni inquinanti in quanto, in una fase di transizione energetica, la riduzione delle emissioni richiede un aumento maggiore del reddito pro capite. «*Specifically, developed countries should replace all fossil fuels with renewable energy, but deployment of renewables must be tied to additional non-to de-growth strategies*»

(Thombs, 2017). Le spiegazioni di questa variazione in avanti nei *turning points* sono state molteplici. York e McGee (2017) e Alvarez-Herranz *et al.* (2017) sono portati a ritenere che l'aumento dei consumi da fonti rinnovabili genera un effetto sostituzione che, nelle fasi iniziali, influenza maggiormente l'energia nucleare piuttosto che i combustibili fossili. York e McGee (2017), infatti, affermano che «*high levels of renewable make economic growth dependent on fossil fuels in place of nuclear power, and conversely, in affluent nations with nuclear power, growth in renewables tends to substitute more for nuclear power than for fossil fuels*». Di conseguenza, in fasi caratterizzate da elevati fabbisogni energetici, le economie con un'alta percentuale di fonti fossili trovano più difficile controllare i livelli di inquinamento atmosferico. Questo perché, in fasi espansive dell'economia, la domanda energetica è soddisfatta principalmente con il ricorso a fonti non rinnovabili (Alvarez-Herranz *et al.*, 2017). I nostri risultati ci portano a ritenere che l'aumento del *turning point* sia dovuto alla natura endogena del GDP pro capite e a problemi di distorsione da variabili omesse. Difatti, confrontando i risultati del modello in forma ridotta (*Modello 1*) con quelli dei modelli in forma estesa (*Modello 2* e *Modello 3*), l'aggiunta di variabili addizionali di controllo di varia natura genera, per tutti i *polluters* esaminati, un aumento del punto di svolta nella relazione crescita-inquinamento. Pertanto, tali assunzioni giustificano fortemente l'applicazione del metodo dei minimi quadrati a due stadi al fine di stimare in maniera non distorta e consistente la vera relazione reddito-inquinamento.

Sulla base dei risultati ottenuti alcuni autori sono portati a ritenere che l'inquinamento ambientale sia un fenomeno temporaneo e risolvibile e che l'aumento del reddito, associato a consumi energetici sostenibili, sia la giusta soluzione a tale problema nel lungo periodo. L'ipotesi contenuta nel modello ambientale di Kuznets ci suggerisce che, al fine di raggiungere velocemente il punto di svolta della curva, i *policy-makers* dovrebbero realizzare degli interventi indirizzati a promuovere tassi di crescita del GDP sempre più rapidi. In realtà, così come sostenuto anche nell'articolo seminale di Panayotou (1993), una politica che dedica la maggior parte delle risorse alla crescita non è necessariamente ottimale in quanto, anche se il degrado ambientale risulta fisicamente reversibile, il punto di svolta nella relazione crescita-inquinamento potrebbe verificarsi in un punto chiamato *shadow area* (Borghesi, 1999) che renderebbe l'inquinamento ambientale un problema irreversibile. In tal caso, potrebbe essere

impossibile sfruttare il percorso decrescente dell'EKC nel lungo periodo. Inoltre, la crescita economica non è un processo deterministico che tutti i paesi sono destinati ad attraversare (Unruh e Moomaw, 1998). Per tali motivazioni, le strategie ottimali per una riduzione efficace delle emissioni di gas serra dovrebbero essere orientate a sostenere con più forza la politica di incentivazione della produzione di energia da rinnovabili accoppiata ad una politica tesa a stimolare una crescita sostenibile dell'economia basata principalmente su una defossilizzazione (gas, petrolio e carbone) delle materie prime utilizzate nei processi produttivi.

CAPITOLO 2

L'inquinamento atmosferico in Europa: un'analisi empirica dell'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche

Sommario: Negli ultimi anni, a causa della diffusione su vasta scala delle fonti energetiche rinnovabili, numerosi autori hanno cercato di indagare empiricamente l'effetto ambientale di tali fonti energetiche sulle dinamiche di sostenibilità dei territori. Una delle principali critiche mosse nei confronti della letteratura esistente riguarda la selezione degli indicatori. La maggioranza degli autori utilizza, infatti, indicatori energetici aggregati e/o disaggregati senza tener in considerazione la presenza di eventuali effetti di composizione: la disaggregazione energetica, ricorrente in letteratura, comprende la distinzione tra fonti energetiche rinnovabili e fossili. Un altro aspetto controverso riguarda la selezione delle variabili ambientali. Anche in questo caso, nella letteratura corrente si analizzano le dinamiche di sostenibilità energetica con riferimento esclusivo alle emissioni di gas serra, tralasciando altre importanti sostanze inquinanti. Al fine di colmare queste lacune, l'obiettivo principale del presente studio è di indagare il nesso di causalità tra le due sub-categorie di rinnovabili elettriche (*non-combustible renewables* e *combustible renewables*) e le emissioni di gas serra (GHG), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x) e particolati sospesi (PM 2.5). L'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche è stato stimato per mezzo di un modello econometrico con effetti fissi e casuali. Il campione studiato fa riferimento ad un panel di ventotto paesi dell'Unione Europea (UE) analizzati per gli anni 1995-2015. I risultati delle stime indicano che l'espansione delle rinnovabili elettriche costituisce un mezzo efficace per la lotta all'inquinamento atmosferico. In particolare, l'elasticità ambientale associata alle due sub-categorie di rinnovabili elettriche dimostra che le rinnovabili non combustibili (eolico, solare, geotermico e idroelettrico) rappresentano le fonti energetiche con la maggiore produttività ambientale rispetto alle rinnovabili combustibili (biomassa).

Keywords: *Air pollution, Non-combustible renewables, Combustible renewables, Non-renewables, Energy transition, European Union countries; panel data.*

JEL classification: Q53; Q42; Q51; Q49; O52

2.0- Introduzione

L'energia, materia prima tra le più strategiche per la competitività di un sistema paese, oltre a costituire un elemento fondamentale per il funzionamento dell'economia mondiale, riveste un ruolo chiave per gli Stati che la posseggono e costituisce una criticità per quelli che devono acquistarla dall'estero. Negli ultimi anni, l'attenzione che i *policy maker* hanno posto sulle fonti energetiche rinnovabili è notevolmente cresciuta e con essa il dibattito economico-politico sui possibili effetti derivanti da una diffusione sempre maggiore delle tecnologie che sfruttano tali fonti energetiche. Con i miglioramenti scientifici delle tecnologie, prima fra tutte il fotovoltaico, e la crescita esponenziale della potenza energetica rinnovabile, la capacità delle fonti energetiche rinnovabili di contribuire a ridurre gli inquinanti atmosferici è divenuta una delle più importanti *research question* all'interno dell'Economia Ambientale (Tiba e Omri, 2017; Adewuyi e Awodumi, 2017). Si riscontra, infatti, un vasto numero di contributi, di carattere teorico ed empirico, che si propongono di valutare l'efficacia ambientale di tali fonti energetiche (Marrero, 2010; Boluk e Mert, 2014; Dogan e Seker, 2016; Bhattacharya *et al.*, 2016). In tale contesto, un ruolo di primaria importanza per la lotta all'inquinamento ambientale viene svolto dalle rinnovabili elettriche (Bengochea e Faet, 2011; Lopez-Menendez *et al.*, 2014; Dogan e Seker, 2016; Dogan Inglesi-Lotz, 2017).

Non stupisce, dunque, che la diffusa consapevolezza del ruolo altamente degradante dell'industria energetica da fonti fossili, testimoniata anche dai numerosi interventi normativi da parte delle istituzioni nazionali e/o internazionali, abbia generato un interesse crescente all'interno della comunità scientifica nei confronti dello sfruttamento delle risorse energetiche dei singoli paesi. Generalmente, l'impatto ambientale delle rinnovabili elettriche è stato analizzato in funzione della loro capacità di ridurre le emissioni di gas serra (Dijkgraaf e Vollebergh, 2001; Ang, 2008; Omri, 2013; Jebli e Youssef, 2015). Questa strategia investigativa trova fondamento nel fatto che circa il 65% di tali emissioni nel mondo sono attualmente dovute all'uso e alla produzione di energia elettrica e, questa percentuale, sale all'80% nei paesi dell'Unione europea (IEA, 2008). D'altronde, come confermato anche dal rapporto dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014), le emissioni di gas serra rappresentano la principale preoccupazione della comunità internazionale in quanto sono ritenuti alla base dei cambiamenti climatici che pervadono la società

contemporanea. La motivazione è semplice: le emissioni di gas ad effetto serra, generando un aumento della temperatura terrestre, costituiscono la causa primaria del fenomeno noto nella letteratura come *climate change*. In modo particolare, se analizziamo le *driving forces* delle emissioni di gas serra, suddivise per settori d'origine, si osserva che oltre i tre quarti delle emissioni sono causati dal cosiddetto *fuel combustion* per la generazione di energia termica e/o elettrica, per la costruzione di edifici ed infrastrutture, per la produzione di beni e, infine, per i trasporti (Eurostat, “*Climate change and driving forces*”, 2017).

Recentemente, molteplici autori hanno cercato di analizzare in maniera disgiunta le varie forme di tecnologie energetiche per la produzione di energia elettrica. Il dibattito si è principalmente indirizzato verso la distinzione tra fonti energetiche rinnovabili e non rinnovabili (Jebli *et al.*, 2013; Boluk e Mert, 2014; Mert *et al.*, 2015; Dogan e Seker, 2016; Sinha *et al.*, 2017). I risultati di questo filone di letteratura confermano come il processo di transizione energetica sia un requisito fondamentale per la sostenibilità economica ed ambientale dei sistemi energetici nazionali. Queste valutazioni comparative hanno, tuttavia, generato un importante dibattito su quale tipologia di fonte energetica sia la più efficace nel contrastare le emissioni inquinanti. D'altronde, come sarà approfondito di seguito, le rinnovabili elettriche rappresentano una macrocategoria di tecnologie che si differenziano in funzione della tipologia di risorsa primaria impiegata nei processi produttivi. L'individuazione della tecnologia energetica ottimale potrebbe essere d'aiuto anche alle istituzioni nazionali e/o locali al fine di implementare dei meccanismi di incentivazione che possano accelerarne la diffusione.

L'obiettivo di questo lavoro è di comprendere come la diffusione e l'adozione di tecnologie energetiche sempre più verdi possa rappresentare un'opportunità di sviluppo e di sostenibilità ambientale per l'economia moderna. L'attenzione sarà incentrata sul panorama elettrico europeo e l'elemento di innovatività consisterà nel dare una valutazione quantitativa all'impatto ambientale delle due principali macrocategorie di tecnologie energetiche: rinnovabili e fossili. In tale contesto, viene proposta un'ulteriore differenziazione energetica strettamente connessa alle rinnovabili elettriche (RES-E). Quest'ultime, infatti, si differenziano in *Non-combustible renewables* (idroelettrico, eolico, solare e geotermico) e *Combustible renewables* (biomassa). Lo scopo del lavoro

è, dunque, quello di individuare quale sub-categoria di rinnovabili elettriche causi un maggior miglioramento ambientale in termini di minori emissioni di gas serra (GHG), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x) e particolati sospesi (PM 2.5). L'analisi dell'effetto ambientale associato alla disaggregazione tra rinnovabili combustibili e non combustibili è una *research question* scarsamente affrontata dalla letteratura. Ad eccezione di Armenau *et al.* (2017), i contributi presenti in letteratura esaminano, infatti, esclusivamente la decomposizione tra fonti fossili e rinnovabili. Inoltre, il contributo di Armenau *et al.* (2017) analizza l'effetto delle singole fonti energetiche rinnovabili utilizzando come variabile di risposta il GDP reale piuttosto che indicatori dell'inquinamento ambientale.

L'idea di studiare in maniera disgiunta le singole tecnologie energetiche deriva da due problematiche. In primo luogo, Lopez-Menendez *et al.* (2014) fanno notare che *«regarding the specification, since the EU is working in the implementation of energy efficiency measures and energy saving technologies, new explanatory variables could be introduced in the model, also using a time trend as a proxy for technology change. The role of RES can also be extended by studying the different energy sources separately»*. D'altronde, la letteratura scientifica che si propone di studiare l'effetto ambientale delle fonti rinnovabili utilizza esclusivamente degli indicatori energetici aggregati (Ang, 2008; Atici, 2009; Zhang e Cheng, 2009). In secondo luogo, ad eccezione di Roca *et al.* (2001), la letteratura scientifica si concentra esclusivamente sulle emissioni di gas serra trascurando, dunque, gli altri agenti inquinanti. In tale contesto, un ulteriore fondamento della seguente ricerca è riconducibile alle informazioni contenute nell'ultimo rapporto Eurostat (2018). Quest'ultimo rileva che, oltre ai gas serra, vi sono delle sostanze inquinanti che influenzano la qualità ambientale: *«this article highlights the emission levels of the following most important air pollutants in the European Union (EU): sulphur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x), ammonia (NH₃), non-methane volatile organic compounds (NMVOC) and fine particulate matter (PM_{2.5}). Air pollution harms human health and the environment. Nitrogen dioxide and particulate matter pollution pose serious health risks while Europe's sensitive ecosystem areas are affected by acid deposition of excess sulphur and nitrogen compounds (SO_x, NO_x, NH₃). Air pollutants are emitted from human activities, mainly the combustion of fuels. Thanks to a wide range of environmental*

policy measures, emissions of air pollutants in Europe decreased significantly over the last 27 years» (Eurostat, “*Air pollution emission inventories*”, 2018).

Il presente lavoro, articolato in quattro sezioni, si pone come obiettivo primario lo studio analitico dell’effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche combustibili e non combustibili. Il lavoro è organizzato nel modo seguente. Nella prima parte, dopo aver discusso delle categorie di risorse energetiche e delle relative tecnologie di sfruttamento, viene effettuata una rivisitazione critica della letteratura. La parte centrale del lavoro contiene l’illustrazione dei modelli implementati e la spiegazione dei dati analizzati. La parte finale contiene i risultati delle stime econometriche.

2.1- Una breve disamina delle fonti energetiche e delle tecnologie di sfruttamento

In generale, l’energia primaria a disposizione dell’umanità può essere divisa in due categorie:

- Le energie rinnovabili (dette anche “*alternative*”), per le quali non dovrebbero sussistere problemi di esaurimento poiché possono riprodursi autonomamente in maniera continua.
- Le energie non rinnovabili (cosiddette “*tradizionali*”), per le quali si pone un problema di scarsità perché sono disponibili in quantità fissa in natura.

La distinzione si basa sull’assunto che le prime hanno come caratteristica principale la capacità di rigenerarsi, nel senso che possono essere ricostituite a velocità comparabili a quella con la quale vengono consumate oppure essere disponibili in quantità idealmente illimitate. Quelle non rinnovabili sono disponibili in quantità limitata e non possono rigenerarsi autonomamente.

In ingegneria energetica, con il termine “*energie rinnovabili*” si intendono tutte quelle forme di energia primaria generate da risorse naturali che, per loro caratteristica intrinseca, si rigenerano o non sono esauribili nella scala dei tempi umani in quanto il loro utilizzo attuale non pregiudica lo stock di risorse disponibili per le generazioni future. Sono, dunque, forme di energia alternative alle tradizionali fonti fossili e molte di esse hanno la peculiarità di essere anche energie pulite ovvero di non immettere in

atmosfera sostanze nocive e non producono scorie da smaltire. Esse hanno quattro diverse applicazioni:

- 1) produzione di elettricità, (ad esempio il fotovoltaico);
- 2) riscaldamento e raffreddamento, (ad esempio il solare termico);
- 3) biocarburanti per i trasporti, (ad esempio i biocarburanti);
- 4) servizi energetici rurali, (ad esempio la biomassa solida);

Le fonti energetiche rinnovabili possono essere suddivise così come segue.

L'energia solare. Essa deriva dallo sfruttamento delle radiazioni solari e per questo è ritenuta la fonte di energia maggiormente disponibile. Le principali tecnologie esistenti per trasformare l'energia primaria proveniente dal sole in energia elettrica o meccanica sfruttabile per usi domestici o industriali, sono tre: il pannello solare termico, il pannello fotovoltaico, il pannello solare a concentrazione¹⁵. Tale fonte presenta molteplici vantaggi poiché è inesauribile e ad immediata reperibilità; inoltre, non ha nessun effetto negativo per l'ambiente in quanto giunge sulla terra attraverso i raggi del sole non producendo alcuna emissione di gas serra o scorie da smaltire. Bisogna tuttavia considerare che l'energia solare può essere utilizzata in soli due campi: per generare elettricità (fotovoltaico) o per generare calore (solare termico).

L'energia eolica. Questa fonte di energia rappresenta il prodotto della trasformazione dell'energia cinetica del vento in altre forme di energia (elettrica o meccanica). Essa è una fonte energetica abbondante ed ampiamente distribuita. La principale tecnologia utilizzata per sfruttare l'energia eolica è costituita dagli aerogeneratori, che si potrebbero definire i mulini a vento del ventunesimo secolo. Essi presentano diverse forme e dimensioni¹⁶.

¹⁵ In tutte le tecnologie sopra citate si utilizzano dei particolari strumenti detti pannelli solari. Un pannello solare fotovoltaico si basa su materiali e tecnologie completamente differenti rispetto a un pannello solare termico e a un pannello solare a concentrazione ma comunque, la tecnologia maggiormente diffusa è costituita dai pannelli fotovoltaici che registrano una vita utile stimata di 50 anni.

¹⁶ Gli aerogeneratori possono, infatti, avere una, due o tre pale di varia lunghezza. Le più grandi arrivano ad un'altezza di 100 metri e sono in grado di erogare una potenza di 1500 Kwh riuscendo così a soddisfare il fabbisogno giornaliero di più di 500 famiglie.

L'energia geotermica. Questa fonte energetica deriva dal calore presente negli strati più profondi della crosta terrestre. Essa è naturalmente legata a quei territori dove vi sono fenomeni geotermici dove il calore che si trova nel sottosuolo può essere sfruttato per produrre energia elettrica. Esistono varie tecnologie per sfruttare tale calore: le sonde geotermiche, le serpentine nel terreno, i sistemi a pozzi d'estrazione e re-immissione, i pali energetici, le acque di tunnel, le acque termali¹⁷.

L'energia da biomasse. Le fonti di energia derivanti dalla biomassa sono costituite dalle sostanze di origine animale e vegetale, non fossili, che possono essere utilizzate come combustibili per la produzione di energia e cioè legna da ardere, scarti vegetali delle aziende agrarie e rifiuti agricoli, zootecnici ed urbani. Il termine biomassa è stato introdotto per indicare tutti quei materiali di origine animale e vegetale che non hanno subito alcun processo di fossilizzazione. Pertanto, tutti i combustibili fossili (petrolio, carbone, gas e metano) non possono essere considerati come biomassa. La biomassa utilizzabile ai fini energetici deriva da diversi tipi di materia organica: colture energetiche (semi oleiferi, piante zuccherine) e rifiuti forestali, agricoli e urbani, compresi domestici e del legno. Essa trova applicazione nel riscaldamento, nella produzione di elettricità e nei biocarburanti per autotrazione. I metodi di conversione dell'energia dalle biomasse sono fortemente dipendenti dalla tipologia delle stesse, che possono essere bruciate per produrre energia termica, subire processi di gassificazione o fermentazione in appositi reattori per la produzione di biogas, oppure essere utilizzate per la produzione di biocombustibili. Infatti, in relazione alla loro natura e composizione, le biomasse possono essere convertite in combustibili di vario tipo attraverso tre principali sistemi:

- 1) la gassificazione, che consiste nel sottoporre le biomasse a processi di fermentazione anaerobica, dai quali si ottiene il biogas, una miscela di metano e anidride carbonica;
- 2) la conversione biologica ad alcoli: l'amido viene demolito a glucosio e poi sottoposto all'azione di microrganismi, che operano la fermentazione alcolica; l'alcol è un ottimo carburante, ed è meno inquinante dei derivati del petrolio;

¹⁷ La geotermia è la fortuna dell'Islanda. Grazie alle fonti geotermiche presenti sull'isola, la maggior parte dell'energia elettrica viene generata da tale fonte rinnovabile. Tuttavia, è da notare che, con una potenza di 1400 MW, il più grande complesso geotermico al mondo si trova in Italia sul Monte Amiata.

- 3) la combustione diretta: il calore prodotto può essere convertito in energia elettrica.

L'Unione Europea, con la direttiva CE/2001/77, include tra le forme di risorse rinnovabili anche i cosiddetti *renewable municipal waste*. Quest'ultimi fanno riferimento alla parte biodegradabile di prodotti, rifiuti e/o residui provenienti dall'agricoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani. Essi non vanno confusi con l'energia generata all'interno dei termovalorizzatori che si avvale dei rifiuti solidi urbani perchè si utilizzano materiali derivati dal petrolio.

Energia idroelettrica. Questa tipologia di energia viene ricavata principalmente dal corso dei fiumi e dai laghi grazie alla creazione di dighe e di condotte forzate, ma può essere generata anche dallo sfruttamento del moto ondoso e delle correnti marine (in questo caso si parla di energia maremotrice). L'energia prodotta dalle centrali idroelettriche è da classificarsi a tutti gli effetti come energia rinnovabile, in quanto, almeno in teoria, l'acqua può essere riutilizzata infinite volte per lo stesso scopo senza subire un processo di depauperamento. Bisogna comunque notare che l'idroelettrico costituisce una tra le più importanti e tradizionali fonti di energia rinnovabile in tutto il mondo. Asia, Africa e Sud America hanno ancora importanti potenziali di sviluppo, mentre Europa e Stati Uniti hanno oramai quasi esaurito i potenziali realizzabili, anche a fronte di problematiche ambientali collegate.

Le varie tipologie di risorse rinnovabili sopra elencate vengono differenziate in due sub-categorie:

- ✓ *Non-combustible renewables*: eolico, solare, geotermico e idroelettrico;
- ✓ *Combustible renewables*: biomassa;

Le fonti primarie energetiche di gran lunga più utilizzate appartengono alla categoria delle fonti esauribili. Esse risultano dall'accumulo sotterraneo di energia solare, direttamente raccolta nella biosfera, nel corso di migliaia di anni, dai vegetali tramite la fotosintesi clorofilliana e dagli organismi animali tramite la catena alimentare. Il motivo per cui le fonti non rinnovabili sono oggi quelle più utilizzate nella nostra società risiede nel fatto che sono in grado di produrre un'elevata quantità di energia con

impianti tecnologicamente semplici e collaudati ormai da molteplici anni. Sono considerate fonti di energia non rinnovabili:

- 1) i combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale);
- 2) i minerali utilizzati per la produzione di energia nucleare, come l'uranio e il plutonio;

In questo momento storico, quando parliamo di contrapposizione tra energie rinnovabili e non rinnovabili, occorre far riferimento agli effetti che ogni tipologia di fonte energetica produce sull'ambiente. I combustibili fossili, al contrario delle fonti rinnovabili, presentano problemi ambientali notevoli, come ad esempio la produzione di gas serra o lo smaltimento di scorie radioattive, che si aggravano e diventano sempre più considerevoli con il loro crescente utilizzo. D'altro canto neanche l'energia nucleare è stata finora capace di risolvere il problema dei rifiuti radioattivi di lunga durata, e neppure di annullare il rischio di incidenti catastrofici, come dimostrano gli esempi di Chernobyl (1986) e il più recente disastro in Giappone alla centrale atomica di Fukushima (2011)¹⁸.

2.2- *Rassegna della letteratura*

Nell'ultimo ventennio, la letteratura scientifica che ha cercato di analizzare l'effetto delle singole fonti energetiche sulle emissioni inquinanti ha avuto importanti sviluppi. La *Environment-Energy-Growth Literature* (Dogan e Seker, 2016) si compone di un vasto numero di contributi che, in relazione alle grandezze energetiche analizzate, possiamo ricondurre a tre differenti sub-categorie. Oltre alla *renewable energy consumption-economic growth-emissions literature*, si registra, infatti, la presenza di due ulteriori filoni di ricerche che si concentrano, alternativamente, sui consumi energetici aggregati e/o disaggregati.

¹⁸ L'incidente nucleare di Fukushima è avvenuto nel nord-est del Giappone l'11 marzo 2011 in seguito ad un violentissimo terremoto di magnitudo 8,9 con epicentro a circa 500 Km da Tokio. Il terremoto ed il conseguente maremoto hanno gravemente danneggiato quattro dei sei reattori della centrale nucleare.

Di seguito saranno discussi entrambi i filoni di letteratura con un particolare approfondimento sulle ricerche scientifiche che si focalizzano sul disaccoppiamento tra fonti fossili e rinnovabili.

2.2.1-La letteratura sul legame esistente tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici aggregati

Una prima categoria di ricerche, diffusasi alla fine degli anni novanta, si pone come obiettivo principale lo studio dell'effetto ambientale associato agli impieghi totali di energia, senza effettuare una specifica distinzione tra le varie tecnologie e/o fonti energetiche (Suri e Chapman, 1998; Agras e Chapman, 1999; Say e Yucel, 2006; Ang, 2008; Atici, 2009; Du *et al.*, 2012; Zhang e Zhao, 2014). Questa vasta letteratura, definita come "*literature on the relationship between aggregate energy consumption, economic growth and emissions*" (si veda, in particolare, Dogan e Seker, 2016; Bilgili *et al.*, 2015; Adewuyi e Awodumi, 2017), è orientata a fornire, da un lato, una stima del legame causale tra crescita economica, inquinamento ambientale e consumi energetici aggregati, dall'altro, una valutazione dell'impatto ambientale associato ad un aumento dei consumi energetici aggregati. Nasir e Rehman (2010) sostengono che *«energy is being considered as an engine of economic growth and development. Countries having higher energy consumption usually have higher standard of living. However, energy consumption also leads to emissions of different green house gases like CO₂, SO₂, etc, which affect environment in an unfavorable manner. Therefore, researchers also started to focus on energy consumption along with economic growth to study energy-economic growth nexus and its contribution to environmental emissions»*. Il risultato fondamentale di questo filone di letteratura dimostra la forte correlazione tra inquinamento atmosferico e variabili *energy related*: l'evidenza empirica mostra che il consumo totale di risorse energetiche, all'interno dei processi produttivi e/o di consumo, contribuisce notevolmente a spiegare il trend assunto dalle emissioni di gas serra (Sun, 1999; Maldal e Chakravarty, 2018).

Molto interessante è il lavoro di Say e Yucel (2006) in cui sono stimati due differenti modelli econometrici per studiare la relazione tra crescita economica, emissioni di biossido di carbonio e consumi energetici aggregati in Turchia, per il

periodo 1970-2002. Nella prima parte del lavoro vengono indagate le determinanti potenziali dei consumi energetici totali (TEC), misurati in tonnellate equivalenti di petrolio (toe), per mezzo di un modello di regressione che testimonia come l'aumento della popolazione (CP) e del prodotto nazionale lordo (GNP) tendono ad incrementare i consumi energetici. Successivamente, viene analizzata la relazione di causalità tra i consumi energetici aggregati e le emissioni totali di biossido di carbonio per mezzo di un modello che presenta la seguente forma funzionale:

$$\ln (CO_2)_t = \beta_0 + \ln (TEC)_t + \varepsilon_t$$

I risultati a cui pervengono gli autori testimoniano, da un lato, che la crescita del GNP e della popolazione possiedono un forte potere predittivo per i consumi energetici aggregati, dall'altro, quest'ultimi sono fortemente correlati all'aumento delle emissioni inquinanti. Le assunzioni effettuate da Say e Yucel (2006) sono approfondite anche da Halicioglu (2009) che, analizzando un periodo temporale più lungo (1960-2005), dimostra la presenza di una forte correlazione tra consumi energetici ed emissioni di biossido di carbonio in Turchia.

All'interno dei contributi che si focalizzano su singoli paesi, un interessante lavoro è anche quello realizzato da Ang (2008) che esamina la relazione di lungo periodo tra il GDP (G), le emissioni inquinanti di CO₂ (C) e i consumi energetici aggregati (E) in Malesia per il periodo 1971-1999. I dati riguardanti le variabili analizzate, espresse in forma logaritmica, sono stati estrapolati dalla banca dati della World Bank (WDI). La strategia empirica adottata, rappresentata da un VAR (*Vector Autoregression model*), è articolata e prevede una molteplicità di test statistici riguardanti la relazione di causalità che lega le tre variabili oggetto di studio. In particolare, il modello assume la seguente forma funzionale:

$$G_t = f(C_t, E_t)$$

I risultati delle stime testimoniano che, nel lungo periodo, le emissioni di CO₂ ed i consumi energetici aggregati di energia sono positivamente correlate al GDP. Specificatamente, dalle stime emerge che il GDP esercita un'influenza positiva sui consumi energetici e, questi ultimi, incidono positivamente sulle emissioni inquinanti.

La medesima strategia metodologica di Ang (2008) è applicata da numerosi autori per studiare le dinamiche di sostenibilità per Cina (Zhang e Cheng, 2009), Arabia

Saudita (Alshehry e Belloumi, 2015), Pakistan (Nasir e Rehman, 2011), America Centrale (Apergis e Payne, 2009) e Stati Uniti (Soytas *et al.*, 2007). I risultati di questi studi sono, tuttavia, molto eterogenei. Se da un lato, Zhang e Cheng (2009), dimostrano che tra consumi energetici aggregati ed emissioni di gas serra si registra una causalità unidirezionale che procede dai primi verso i secondi, dall'altro, Apergis e Payne (2009) dimostrano che la causalità tra le due variabili risulta essere bidirezionale.

Mentre i contributi di Say e Yucel (2006), Ang (2008) e quello di Zhang e Cheng (2009) si concentrano su una sola entità statistica osservata per più periodi temporali, nella letteratura si riscontrano delle ricerche che utilizzano dati longitudinali. In quest'ultimo sottogruppo rientra il contributo realizzato da Omri (2013) dove si esamina il nesso di causalità tra le emissioni inquinanti di CO₂, i consumi energetici aggregati e la crescita del GDP pro capite per un panel di quattordici paesi collocati nelle cosiddette regioni MENA (Medio Oriente e Nord Africa). Specificatamente, utilizzando come periodo temporale di riferimento gli anni 1990-2011, vengono stimati tre modelli di equazioni strutturali attraverso il metodo generalizzato dei momenti (GMM), che consentono di esaminare simultaneamente «*the impact of (i) CO₂ emissions and energy consumption on economic growth, (ii) CO₂ emissions and economic growth on energy consumption, (iii) economic growth and energy consumption on CO₂ emissions*» (Omri, 2013). In modo particolare, sono stimate simultaneamente le seguenti equazioni:

$$\ln(GDP)_{it} = \alpha_0 + \alpha_{1j} \ln(ENC)_{it} + \alpha_2 \ln(CO2)_{it} + \alpha_3 \ln(K)_{it} + \alpha_4 \ln(L)_{it} + \pi_{it}$$

$$\ln(ENC)_{it} = \varphi_0 + \varphi_{1j} \ln(GDP)_{it} + \varphi_2 \ln(CO2)_{it} + \varphi_3 \ln(K)_{it} + \varphi_4 \ln(L)_{it} + \varepsilon_{it}$$

$$\ln(CO2)_{it} = \vartheta_0 + \vartheta_{1j} \ln(GDP)_{it} + \vartheta_2 \ln(ENC)_{it} + \vartheta_3 \ln(URB)_{it} + \alpha_4 \ln(TOP)_{it} + \mu_{it}$$

I risultati delle stime sono molto rilevanti. In primo luogo, si rileva una causalità bidirezionale tra i consumi energetici aggregati (ENC) e la crescita economica (GDP): un elevato tasso di crescita economica genera un aumento della domanda di energia e viceversa. Si ritiene, dunque, che l'energia rappresenti un fattore importante per la crescita economica. In secondo luogo, i risultati empirici mostrano che sussiste una relazione di causalità unidirezionale tra i consumi energetici e le emissioni di CO₂ secondo cui, ad un maggior consumo energetico corrisponde una maggiore pressione sull'ambiente in termini di emissioni inquinanti. Infine, tra la crescita del GDP e le emissioni pro capite di gas serra si riscontra una causalità bidirezionale. La complessità

dei legami causali analizzati conduce l'autore ad affermare che «*the research and investment in clean energy should be an integral part of the process of controlling the carbon dioxide emissions and find sources of energy to oil alternative*» (Omri, 2013).

Un vasto numero di autori si propone di analizzare il legame causale tra i consumi energetici e l'inquinamento ambientale per mezzo del modello ambientale di Kuznets (si veda, in particolare, Bilgili *et al.*, 2015). Ad esempio, un lavoro molto importante è quello di Atici (2009) in cui si studia l'impatto ambientale della crescita economica sulle emissioni di CO₂ per un panel di quattro paesi dell'Est Europa durante il periodo temporale 1980-2002. L'obiettivo è quello di indagare l'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve* nel campione oggetto di studio con un focus particolare sui consumi energetici aggregati e sul grado di apertura commerciale. Il modello stimato presenta la seguente forma funzionale:

$$\ln CO_{2,it} = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 (\ln GDP_{it})^2 + \beta_3 \ln EPC_{it} + \beta_4 \ln TI_{it} + \varepsilon_{it}$$

Le variabili analizzate, estratte dal database fornito dalla World Bank (WDI), sono rappresentate dalle emissioni pro capite di CO₂, dal GDP pro capite, dall'intensità energetica pro capite e da un indice di apertura commerciale che misura il rapporto tra merci scambiate e GDP. I risultati delle stime, effettuate attraverso un panel con effetti fissi e casuali, forniscono evidenza dell'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve* in quanto i coefficienti associati al GDP pro capite e al GDP pro capite al quadrato si alternano, rispettivamente, con segno positivo e negativo. L'intensità energetica registra un effetto positivo sull'inquinamento: all'aumentare dell'intensità energetica dell'1%, corrisponde un aumento delle emissioni di CO₂ dell'1,53%. La variabile espressione dell'apertura commerciale (TI) è risultata negativa ma statisticamente non significativa. Questo risultato, secondo l'autore, indica che il processo di globalizzazione non ha contribuito a mitigare le emissioni inquinanti nel campione oggetto di studio.

Un altro lavoro è quello di Zhang e Zhao (2014) sulla relazione esistente tra la crescita economica, le disuguaglianze reddituali, i consumi totali di energia elettrica e le emissioni di CO₂ in ventotto province cinesi classificate, in base alla localizzazione geografica, in tre differenti sottocategorie. Il periodo temporale di riferimento riguarda gli anni 1995-2010. A tal fine viene proposto un modello econometrico che analizza le emissioni totali di CO₂ (TC), misurate in tonnellate equivalenti di petrolio ed espresse in

forma logaritmica, in funzione quadratica del GDP pro capite (PGDP). Inoltre, vengono inserite alcune variabili di controllo in forma lineare tra cui le disuguaglianze reddituali (GINI), l'intensità energetica aggregata (EL), il grado di urbanizzazione (URB) e quello di industrializzazione (STR). Analiticamente, il modello assume la seguente forma funzionale logaritmica-lineare:

$$\ln TC_{it} = \alpha_i + B_1(PGDP)_{it} + B_2(PGDP)_{it}^2 + B_3(PGDP)_{it}^3 + \phi_1 GINI_{it} + \phi_2 EL_{it} + \phi_3 STR_{it} + \phi_4 URB_{it} + \epsilon_{it}$$

Le stime vengono effettuate per l'intero campione e per tre differenti aree geografiche di regioni (orientali, centrali e occidentali). Si ha, dunque, un panel che contiene 448 osservazioni per ventotto province cinesi i cui dati sono stati estratti dalla banca dati *China Energy Statistical Yearbook*. I metodi di stima consistono, invece, in un panel con effetti fissi. In tal caso, l'intensità energetica viene misurata in tonnellate equivalenti di petrolio per ogni 10.000 Yuan e costituisce un importante indicatore dell'efficienza energetica: essa è definita come il rapporto tra l'impiego totale di energia (fossile e rinnovabile), denominata consumo interno lordo di energia, ed il prodotto interno lordo. In tutti i modelli stimati, gli autori giungono al risultato che, sia per l'intero campione sia per le regioni analizzate, l'effetto del GDP sulla qualità ambientale si manifesta con segni alterni. In modo particolare, si ha evidenza di un andamento ad "N" tale per cui, in una fase iniziale le emissioni crescono insieme all'aumento del GDP, successivamente decrescono per poi tornare ad avere un legame positivo. Difatti, l'ipotesi dell'esistenza di un *Environmental Kuznets Curve* in Cina può essere parzialmente rigettata in quanto il coefficiente associato al GDP al quadrato è negativo, mentre quello al cubo è positivo. Tuttavia, la Cina è un paese in via di sviluppo, per cui gli autori sono portati a ritenere che, in tempi futuri, si registrerà un'inversione di tendenza. In altre parole il *turning point* non è ancora stato raggiunto. La particolarità che emerge dal lavoro è il segno positivo assunto dal coefficiente associato alla variabile espressione dell'intensità energetica (EL). Secondo le stime ottenute a un aumento dell'intensità energetica di una unità, corrisponde un aumento dell'inquinamento atmosferico pari, mediamente, a 0,0419% per tutto il campione. Pertanto, la variabile chiave che incide sull'inquinamento atmosferico viene attribuita alla scarsa efficienza energetica della Cina e, in modo particolare all'arretratezza tecnologica delle regioni centrali ed occidentali: «*energy intensity together with industry*

structure is significant in pushing up CO₂ emissions.[..]Chinas energy efficiency is still three times lower than that of the US, and five times lower than that of Japan. The energy composition relies heavily on fossil energy with 88.3% on fossil fuels and 70.4% on coal» (Zhang e Zhao, 2014).

Un ulteriore lavoro nell'insieme di ricerche che fanno ricorso al modello ambientale di Kuznets è quello realizzato da Ozokcu e Ozdemir (2017) nel quale si verifica l'esistenza di una EKC per ventisei paesi OECD e per cinquantadue paesi emergenti analizzati durante il periodo temporale 1980-2010. A tal fine viene proposto un modello econometrico che assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 X_{it} + \beta_2 (X_{it})^2 + \beta_3 (X_{it})^3 + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

I dati sulle emissioni inquinanti di CO₂, espressi in tonnellate metriche pro capite, sono stati estrapolati dal database EDGARD (*Emission Database for Global Atmospheric Research*). Le variabili indipendenti, rappresentate dal GDP reale pro capite (X) e dai consumi energetici pro capite (Z), sono state ottenute dal Conference Board Total Economy Database e dal World Development Indicators (WDI). I coefficienti della regressione, ottenuti utilizzando lo stimatore panel ad effetti fissi con l'applicazione dei cosiddetti Driscoll-Kraay *standard errors*, supportano l'evidenza di una relazione ad "N" invertita tra la crescita economica e le emissioni inquinanti. Per quanto attiene, invece, all'effetto ambientale dei consumi energetici aggregati, anche in questo caso si ha evidenza di un effetto positivo sull'inquinamento: all'aumentare dell'1% dei consumi energetici corrisponde un aumento dello 0.740% delle emissioni di CO₂.

Nonostante la forte eterogeneità che caratterizza la letteratura analizzata, in tale contesto, la valutazione dell'impatto ambientale dei consumi energetici aggregati presenta un certo grado di omogeneità in relazione ai risultati empirici. In particolare, così come evidenziato anche da Adewuyi e Awodumi (2017), si ha un consenso unanime sul fatto che ad una maggiore intensità energetica aggregata corrisponda un maggior inquinamento ambientale. Questo effetto è da ricondurre principalmente alla composizione del mix energetico: un aumento dei consumi energetici si traduce in un aumento della domanda di energia e poiché quest'ultima, a sua volta, viene soddisfatta principalmente attraverso l'utilizzo di combustibili fossili, si genera un effetto

produzione che causa un aumento delle emissioni inquinanti (Zhang e Zhao, 2014). Di contro, in questi lavori, la validità sull'esistenza di una *Environmental Kuznets Curve* risulta controversa.

2.2.2- La letteratura sull'effetto ambientale delle fonti energetiche disaggregate

Nelle ricerche scientifiche dell'ultimo decennio si è registrata la tendenza a distinguere i consumi energetici in funzione delle materie prime utilizzate nei processi produttivi. Questa tendenza è testimoniata dalla presenza di un vasto numero di contributi che, nelle dinamiche di sostenibilità dei territori, analizzano l'effetto ambientale delle singole fonti energetiche. Tale filone di letteratura, denominato "*literature on the relationship between disaggregate energy consumption, economic growth and emissions*" (Adewuyi e Awodumi, 2017), si caratterizza principalmente per la presenza di una bipartizione tra consumi energetici da fonti rinnovabili e consumi energetici da fonti fossili (Shafiei e Salim, 2014; Boluk e Mert, 2014; Dogan e Seker, 2016; Santana de Souza *et al.*, 2018). L'obiettivo è quello valutare l'effetto delle singole fonti energetiche sull'inquinamento ambientale. Tuttavia, in tempi molto recenti, un numero crescente di studi ha cercato di analizzare l'effetto ambientale disgiunto delle tecnologie energetiche nucleari, rinnovabili e fossili (Sinha *et al.*, 2017; Armeanu *et al.*, 2017; Thombs, 2018). In tale contesto, come verrà di seguito approfondito, le ricerche che valutano in maniera disaggregata le fonti energetiche rinnovabili, classificandole in funzione delle tecnologie impiegate per il loro sfruttamento, sono in numero relativamente ristretto (Armeanu *et al.*, 2017; Thombs, 2018).

Un contributo pionieristico è quello rinvenibile nella ricerca di Roca *et al.* (2001) in cui viene analizzato l'andamento di sei diversi indicatori dell'inquinamento atmosferico in Spagna per il periodo temporale 1973-1996. In modo particolare, vengono valutate le emissioni pro capite di biossido di carbonio (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O), anidride solforosa (SO₂), ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili non metanici (NMVOC) estratte dal database fornito dall'International Energy Agency (IEA) e dall'Inventory of Pollutants to the Atmosphere (CORINE-AIRE). Gli autori si propongono di analizzare tali indicatori ambientali per mezzo di una serie di modelli econometrici molto eterogenei. Nella prima parte del lavoro viene,

infatti, indagata l'ipotesi di una EKC per tutti i sei *polluters*: le emissioni inquinanti vengono modellate in funzione cubica del GDP pro capite. Nella seconda parte del lavoro, invece, sono stimati una serie di modelli, con variabili espresse in forma logaritmica, che conducono a risultati molto significativi per le emissioni di biossido di carbonio e anidride solforosa.

Per quanto attiene alle emissioni pro capite di biossido di carbonio (CO₂) viene proposto un modello che assume la seguente forma funzionale:

$$\ln\left(\frac{CO_2}{P}\right)_t = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{GDP}{P}\right)_t + \beta_2 \ln Nuclear_t + \beta_3 \ln Coal_t + \varepsilon_t$$

dove le variabili indipendenti sono rappresentate dal GDP pro capite, dalla quota di energia nucleare (*Nuclear*) e dalla quota di energia derivante dal carbone (*Coal*) sull'energia primaria totale.

Per le emissioni pro capite di anidride solforosa (SO₂) viene stimato il seguente modello:

$$\ln\left(\frac{SO_2}{P}\right)_t = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{GDP}{P}\right)_t + \beta_2 \ln\left(\frac{Thermal}{P}\right)_t + \varepsilon_t$$

dove, oltre al GDP pro capite, viene valutato l'effetto ambientale della quantità di energia elettrica generata all'interno delle centrali termiche.

Infine, le emissioni pro capite di ossidi di azoto (NO_x) vengono modellate secondo un modello che assume la seguente forma funzionale:

$$\ln\left(\frac{NO_x}{P}\right)_t = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{Thermal}{P}\right)_t + \beta_2 \ln\left(\frac{Transport}{P}\right)_t + \varepsilon_t$$

in cui la variabile associata al coefficiente β_2 rappresenta i consumi energetici pro capite nel settore dei trasporti.

I risultati delle stime dimostrano che soltanto l'energia nucleare ha un effetto sostenibile sulle emissioni inquinanti: *«nuclear power indeed played an important role in the reduction of CO₂ emissions, while the increase in coal use worked in the opposite direction. [...]at a higher level of per capita GDP there were lower SO₂ emissions, and at a level of higher electricity generated by thermal power stations, higher emissions»* (Roca *et al.*, 2001). Il lavoro presenta alcune criticità ben precise. In primo luogo, l'effetto delle singole fonti energetiche viene valutato in modo non omogeneo in quanto

ogni modello è espresso in forme funzionali differenti. Risulta, dunque, difficile poter compiere un confronto tra *polluters*. La strategia ottimale sarebbe quella di eseguire delle analisi omogenee in cui un gruppo di indicatori ambientali dovrebbe essere modellato in funzione delle medesime variabili energetiche. Inoltre, numerosi sono gli altri fattori che potrebbero incidere sulla relazione oggetto di studio (Tiba e Omri, 2017). Tali elementi, se omessi, potrebbero condurre ad una forma di distorsione da variabile omessa. Infine, non sono valutate le fonti energetiche rinnovabili.

Seppur caratterizzato da numerose limitazioni, i modelli stimati da Roca *et al.* (2001) hanno fornito un input fondamentale per l'analisi ambientale delle singole tecnologie energetiche. Due lavori interessanti sono quelli di Marrero (2010) e Shafiei e Salim (2014) in cui viene confermata l'ipotesi secondo cui, in funzione delle fonti energetiche analizzate, l'intensità energetica presenta effetti differenti sulle emissioni di gas serra. Marrero (2010) studia, infatti, la relazione di causalità tra le emissioni inquinanti di gas serra, la crescita del GDP ed i consumi energetici disaggregati per un panel di ventiquattro paesi europei, valutati per il periodo temporale 1990-2006. Le metodologie empiriche per lo studio della suddetta relazione si articolano in due differenti procedure econometriche: DPD (*dynamic panel data*) e *Pooled OLS*. Il modello, con le variabili espresse in forma logaritmica, assume la seguente forma funzionale:

$$p_{it} = \alpha_i + \epsilon_t + \beta p_{it-1} + \vartheta_1 y_{it} + \vartheta_2 y_{it}^2 + \theta e_{it} + \sum_{j=1}^{j-1} \delta_j m_{jit} + \sum_{k=1}^{k-1} \varphi_k s_{kit} + \epsilon_{it}$$

in cui le emissioni pro capite di gas serra (p) vengono stimate sui suoi valori ritardati, sul GDP pro capite in forma lineare (y) e quadratica (y^2), sui consumi pro capite di energia primaria (e) e sulla quota dei consumi energetici finali distinti per settore industriale (s). La principale variabile d'interesse è rappresentata dal mix energetico (m). Essa comprende i consumi di energia primaria distinti per singola fonte: nucleare, rinnovabili, gas naturale e petrolio. Per quanto attiene alle fonti informative, quest'ultime sono rappresentate dalla European Environmental Agency (EEA), da Eurostat e dal Conference Board and Groningen Growth and Development Centre (2008). I risultati a cui perviene l'autore dimostrano che un aumento nei consumi di energia primaria causa un aumento dell'inquinamento ambientale. Tuttavia, si registra la

presenza di una relazione negativa e statisticamente significativa tra le emissioni inquinanti ed i consumi energetici da RES secondo cui all'aumentare dei primi corrisponde una riduzione, seppur inferiore all'unità, dell'inquinamento atmosferico. Difatti, l'autore afferma che «*our findings highlight how merely shifting the energy mix toward renewable sources (and, to a lesser extent, nuclear) would yield significant reductions in per capita emissions*» (Marrero, 2010).

Shafiei e Salim (2014) studiano, invece, la relazione di breve e lungo periodo tra i consumi energetici disaggregati e le emissioni inquinanti di CO₂. Utilizzando come periodo temporale di riferimento gli anni 1980-2011, viene proposto un modello econometrico per stimare l'effetto dei consumi energetici disaggregati sulle emissioni di CO₂ registrate in ventinove paesi OECD. Le variabili che compongono il modello, espresse in forma logaritmica, sono rappresentate dalla popolazione (P), dal GDP pro capite (A), dai consumi energetici da fonti rinnovabili (R) e dai consumi energetici da fonti fossili (N). Formalmente, si ha la seguente specificazione:

$$\ln CO_{2,it} = \ln B_0 + \beta_1 \ln P_{it} + \beta_2 \ln A_{it} + \beta_3 \ln R_{it} + \beta_4 \ln N_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove l'intensità energetica è misurata come il consumo totale di energia primaria, in quadrilioni di BTU (*British Thermal Unit*), diviso il GDP. Le stime, ottenute attraverso l'applicazione del modello statistico STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology*), sono orientate ad esplorare la causalità di breve e lungo periodo tra le variabili analizzate. I risultati a cui pervengono gli autori suggeriscono che, se da un lato, i consumi energetici da fonti rinnovabili generano un effetto negativo e statisticamente significativo sulle emissioni inquinanti, dall'altro, i consumi energetici da fonti fossili fanno registrare un effetto positivo. Un'importante criticità nel lavoro di Shafiei e Salim (2014) riguarda gli indicatori energetici. Essi sono, infatti, misurati in termini assoluti e non tengono conto delle caratteristiche e delle dimensioni dei mercati energetici nei paesi analizzati.

I lavori di Marrero (2010) e Shafiei e Salim (2014) attestano empiricamente i benefici ambientali derivanti da un impiego maggiore delle RES. Tuttavia, le fonti energetiche rinnovabili si prestano a molteplici utilizzi, tra cui la produzione di carburante per i trasporti e la generazione di energia elettrica e/o termica. Inoltre, come verrà maggiormente approfondito in seguito, esse si sostanziano in risorse energetiche

che risultano strettamente connesse alle caratteristiche geomorfologiche dei territori e alle condizioni socio-economiche-istituzionali dei singoli paesi.

Un contributo di notevole importanza è rinvenibile nel lavoro realizzato da Bengochea e Faet (2012) in cui si analizza il rapporto causa-effetto tra le emissioni di CO₂ e la diffusione delle rinnovabili elettriche (RES-E). In particolare, considerando un campione di quindici paesi europei per il periodo 1990-2004, il modello proposto prevede una forma funzionale logaritmica in cui la variabile dipendente è rappresentata dalla quantità di energia elettrica generata da RES. Quest'ultima si riferisce all'energia elettrica da solare, eolico, biomassa, biocombustibili e rifiuti solidi urbani. Le variabili aggiuntive di controllo consistono nelle emissioni inquinanti di CO₂ e in un indice dei prezzi dell'energia fossile (FEP). I dati sono di provenienza Eurostat e OECD. L'obiettivo degli autori è stato quello di comprendere come la recente diffusione delle tecnologie energetiche da risorse rinnovabili in Europa sia stata trainata dalla forte crescita delle emissioni inquinanti. Il modello proposto assume, infatti, la forma seguente:

$$\ln RES_{it} = B_0 + \beta_1 \ln FEP_{it} + \beta_2 \ln CO_{2it-2} + \delta_i + \varepsilon_{it}$$

La variabile espressione delle emissioni inquinanti è ritardata per una semplice ragione: «we have lagged this variable 2 periods because a minimum adjustment period is needed for the renewables supply to adapt to the regulatory framework» (Bengochea e Faet, 2012). Le tecniche econometriche utilizzate sono rappresentate da un *Pooled OLS* e da un panel con effetti fissi e casuali con errori standard per dati raggruppati (*clustered standard errors*). Le stime forniscono risultati interessanti. In particolare, le emissioni inquinanti risultano statisticamente significative e con segno positivo, ciò implica che un aumento delle emissioni inquinanti conduce ad un aumento della fornitura elettrica da FER. Il range di valori è compreso tra una percentuale che oscilla tra 0,54% e 0,82%. Tale effetto viene attribuito dagli autori alla presenza di regolamentazioni governative sempre più stringenti: «the higher the emissions, the greater the need to resort to green energy to avoid exceeding the mandatory emissions caps» (Bengochea e Faet, 2012).

All'interno di questo filone di letteratura, un certo numero di autori utilizza come quadro metodologico di riferimento la curva ambientale di Kuznets. Rientrano in questa categoria i lavori di Boluk e Mert (2014), Jebli e Youssef (2015), Dogan e Seker (2016).

La ricerca di Boluk e Mert (2014) si propone di analizzare la relazione tra emissioni di CO₂, il GDP pro capite reale e i consumi energetici disaggregati per sedici paesi dell'Unione Europea. I dati, forniti dal World Development Indicators (WDI), si riferiscono al periodo temporale 1990-2008. L'indagine si propone di verificare le emissioni pro capite di anidride carbonica (CO₂) in funzione del GDP pro capite (GDPPC) e dei consumi finali pro capite di energia rinnovabile (REN) e fossili (FOSS). Il modello stimato assume la forma seguente:

$$CO_{2,it} = \alpha + \beta_1 GDPPC_{it} + \beta_2 GDPPC_{it}^2 + \beta_3 REN_{it} + \beta_4 FOSS_{it} + \varepsilon_{it}$$

La particolarità del lavoro riguarda la distinzione tra consumi energetici da fonti rinnovabili (REN) e da fonti fossili (FOSS). Nel modello vengono, infatti, inseriti sia i consumi pro capite di energia rinnovabile che i consumi pro capite di fonti fossili, entrambi misurati in termini di Chilotoni (Kt) equivalenti di petrolio. Le emissioni inquinanti, che rappresentano la variabile dipendente, sono misurate in tonnellate per abitante. Un'importante nota riguarda la trasformazione delle variabili indipendenti nei loro valori centrati: *«the centered values of the variables were obtained by recalculating the variables by subtracting their means. That is, we obtained the independent variables GDPPC-mean (GDPPC), REN-mean (REN) and FOSS-mean (FOSS) for each country. After centering, we took the variable GDPPC² as the square of the centered GDPPC in the model»* (Boluk e Mert, 2014). I coefficienti delle regressioni, stimati attraverso un modello panel con effetti fissi e casuali, conducono a risultati sorprendenti: entrambi i coefficienti associati alle due categorie di indicatori energetici sono positivi e statisticamente significativi. Questo risultato è abbastanza controverso e testimonia che ad un aumento dei consumi energetici da fonti rinnovabili corrisponde un aumento delle emissioni inquinanti. Tuttavia, gli autori sottolineano che *«the estimated coefficients state that pollution increases with both fossil and renewable energy consumption. As expected, fossil fuel consumption leads to a greater increase in pollution levels than renewable energy consumption. Moreover, the results state that renewable energy consumption contributes less than around 1/2 that of fossil energy consumption to CO₂*

emissions in EU countries» (Boluk e Mert, 2014). Inoltre, l'ipotesi dell'esistenza di una EKC per i 16 paesi analizzati viene respinta in quanto, tra il GDP e le emissioni di CO₂, sussisterebbe una relazione dapprima decrescente e successivamente crescente.

Sempre nella medesima categoria di ricerche scientifiche è possibile ricondurre il lavoro realizzato da Dogan e Seker (2016) in cui viene analizzato l'impatto del GDP, dei consumi energetici disaggregati, dell'apertura commerciale e dello sviluppo finanziario sulle emissioni inquinanti di gas serra. I dati esaminati, prendendo come periodo temporale di riferimento gli anni 1985-2011, riguardano un panel di ventitre paesi classificati secondo il cosiddetto *Renewable Energy Country Attractiveness Index* (www.ey.com). Utilizzando come quadro teorico di riferimento una *Environmental Kuznets Curve*, nella fase iniziale della ricerca, gli autori si propongono di modellare le emissioni inquinanti di CO₂, espresse in tonnellate metriche, come funzione quadratica del GDP reale, dei consumi energetici da fonti rinnovabili e da fonti fossili (gas naturale, petrolio, carbone). Per quanto attiene agli indicatori energetici, quest'ultimi esprimono la quantità di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (REC) e la quantità di energia elettrica generata da fonti fossili (NREC) misurati, entrambi, in Kilowattora. Successivamente, vengono stimati due ulteriori modelli che tengono conto del grado di apertura commerciale (TR) e del grado di sviluppo finanziario (FD). Essi assumono le seguenti forme funzionali:

$$\ln CO_{2,it} = B_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 (\ln GDP_{it})^2 + \beta_3 \ln REC_{it} + \beta_4 \ln NREC_{it} + \beta_5 TR_{it} + \varepsilon_{it}$$

$$\ln CO_{2,it} = B_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 (\ln GDP_{it})^2 + \beta_3 \ln REC_{it} + \beta_4 \ln NREC_{it} + \beta_6 FD_{it} + \varepsilon_{it}$$

Per quanto attiene all'apertura commerciale (TR), essa viene misurata come la somma delle importazioni e delle esportazioni di beni e servizi in percentuale del GDP mentre, per quanto riguarda lo sviluppo finanziario, quest'ultimo viene espresso dal credito erogato al settore privato in percentuale del GDP. Le fonti dei dati sono rappresentate dal World Development Indicators (WDI) e dalla U.S. Energy Information Administration (EIA). Le stime dei coefficienti vengono effettuate attraverso l'utilizzo di una metodologia innovativa proposta da Kao e Chiang (2002) che è orientata ad ottenere le elasticità di lungo periodo della variabile di risposta (CO₂) rispetto alle variabili indipendenti. I risultati delle stime conducono ad importanti conclusioni. In primo luogo, viene confermata la validità dell'esistenza di una EKC per

il campione analizzato: i coefficienti associati al GDP e al GDP al quadrato si alternano con segno opposto. Inoltre, se da un lato, i consumi energetici da fonti rinnovabili confermano le loro potenzialità ambientali, dall'altro, i consumi energetici da fonti fossili registrano un effetto positivo sui livelli di inquinamento. Considerazioni supplementari riguardano i coefficienti associati all'apertura commerciale e al grado di sviluppo finanziario dei paesi analizzati. In particolare, l'elasticità delle emissioni inquinanti rispetto a tali variabili presenta un segno negativo: ad un aumento dell'1% nell'apertura commerciale corrisponde una riduzione delle emissioni di CO₂ dello 0,03%. Come gli stessi autori affermano «*increases in both trade openness and financial development decrease carbon emissions in top renewable energy countries. It makes sense because developed countries in particular have made a good progress in inventing new technologies for over the last several decades, and the analyzed countries seem to take benefit of technology spillover through trade and financial networks. Furthermore, it is likely that the top renewable energy countries produce and exports non-energy intensive and environmentally-friendly goods, and imports dirty and environmentally-unfriendly goods*» (Dogan e Seker, 2016).

In un altro studio Dogan e Seker (2016) si propongono di studiare la relazione tra le emissioni di anidride carbonica, la crescita del GDP pro capite, l'apertura commerciale (TR) e la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (REC) e non rinnovabili (NREC), per un panel di 15 paesi europei (Austria, Belgio, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Paesi Bassi, Portogallo, Spagna, Svezia, Regno Unito). Prendendo come periodo temporale di riferimento gli anni 1980-2012, il modello teorico di riferimento consiste in un *Extended Kuznets Curve model* in cui le emissioni pro capite di CO₂ vengono modellate sul GDP pro capite, sul GDP pro capite al quadrato e su alcune variabili addizionali di controllo espressione dell'apertura commerciale dei territori e della produzione di energia elettrica. La variabile dipendente consiste nelle emissioni inquinanti di CO₂ pro capite espresse in tonnellate metriche. Le variabili esplicative consistono nel GDP e nel GDP al quadrato, espresso in dollari, nella produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e non rinnovabili, espresse in Kilowattora, e nell'apertura commerciale dei singoli paesi, rilevate in percentuale del GDP. Le fonti informative sono rappresentate dal World Development Indicators (WDI) e dalla U.S Information Energy Administration (EIA). In tal caso, i consumi energetici

da RES vengono definiti come la produzione di energia elettrica derivante da risorse solari, idroelettriche, geotermiche, eoliche, da biomassa e dai rifiuti urbani. Per quanto attiene ai consumi da fonti fossili, l'indicatore va interpretato come la quantità di energia elettrica generata da carbone, petrolio e gas naturali. Le tecniche econometriche utilizzate dagli autori per ottenere il valore dei coefficienti di regressione consistono nello stimatore dei minimi quadrati dinamici (DOLS) e nello stimatore *Fully Modified OLS* (FMOLS). I risultati delle stime testimoniano la presenza di una relazione ad U invertita tra le emissioni inquinanti e il GDP pro capite: viene, dunque, verificata l'ipotesi dell'esistenza di una EKC per il set di paesi analizzati. La particolarità che emerge è il segno assunto dai coefficienti associati alle variabili espressione della produzione di energia elettrica. Se da un lato, la produzione energetica da fonti rinnovabili presenta un coefficiente negativo tale per cui ad un aumento dell'1% nella produzione di energia da fonti rinnovabili è associato una riduzione dell'inquinamento dello 0,03%, dall'altro, la produzione da fonti fossili assume segno positivo. In termini quantitativi, si stima che un aumento dell'1% nella produzione di energia da fonti non rinnovabili, aumenta l'inquinamento atmosferico dello 0,44%. Pertanto, in accordo con Marrero (2010), la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili contribuisce sensibilmente ad abbattere le emissioni inquinanti.

Entrambi i lavori di Dogan e Seker (2016) «*for the first time in the literature, investigate the influences of real income, renewable energy consumption, non-renewable energy consumption and trade openness on CO₂ emissions in the modified EKC framework*» (Dogan e Seker, 2016). Essi, tuttavia, fanno ricorso a delle procedure analitiche molto articolate denominate *second-generation panel methods robust to cross-sectional dependence* (Kao e Chiang, 2002). Tale procedura prevede, inizialmente, di indagare la presenza o meno di una correlazione spaziale attraverso il Pesaran CD test (Pesaran, 2004). Nel caso in cui si ha evidenza empirica della presenza di questa forma di dipendenza sezionale, viene sfruttata la relazione di cointegrazione tra i dati analizzati per ottenere una misura dell'elasticità di lungo periodo tra le variabili incluse nei modelli. L'elasticità di lungo periodo viene ottenuta dall'applicazione di una tecnica econometrica denominata *Dynamic Ordinary Least Squares* (DOLS) che, secondo Dogan e Seker (2016), «*is the best in case of cross-sectional dependence*». In tempi recenti, questa procedura econometrica è stata criticata da molteplici autori

(Bolkesjo e Eltvig, 2014; Boluk e Mert, 2015; Carley *et al.*, 2017; Ozokcu e Ozdemir, 2017) che hanno optato per dei modelli panel statistici (*fixed e/o random*) con *Driscoll-Kraay standard errors* (Hoechle, 2007). La letteratura ci suggerisce, dunque, che in presenza di questi effetti *spillover* tra unità osservazionali nei dati panel è possibile ricorrere a due differenti tecniche econometriche: *Dynamic Ordinary Least Squares* (DOLS) oppure panel (*fixed e/o random effects*) con *standard errors* robusti alla *cross-sectional dependence*.

Se dal punto di vista analitico entrambi i lavori di Dogan e Seker risultano essere molto articolati, le criticità a cui sono assoggettati riguardano soprattutto la selezione campionaria e la misurazione delle variabili. Analizzare indicatori energetici in termini assoluti potrebbe essere fuorviante: si potrebbe non cogliere la vera elasticità ambientale delle singole fonti energetiche. Sarebbe più opportuno utilizzare degli indicatori che tengano conto delle dimensioni territoriali e/o demografiche degli stati analizzati (Shrimali e Kniefel, 2011). Inoltre, il campione è stato selezionato sulla base del *Renewable Energy Country Attractiveness Index* (RECAI) che classifica i paesi secondo la loro attrattività energetica rinnovabile: analizzare esclusivamente tali paesi potrebbe condurre ad una sovrastima delle varie elasticità energetiche. La motivazione è riconducibile al fatto che i paesi analizzati sono contraddistinti da alti tassi di elettricità da rinnovabili e basse quote di elettricità da fonti fossili. Inoltre, l'effetto ambientale delle tecnologie energetiche non tiene conto di ulteriori determinanti potenziali delle emissioni inquinanti.

Un problema riguardante la misurazione delle variabili contraddistingue anche i lavori di Jebli e Youssef (2015) e Dogan e Ozturk (2017). Il lavoro di Jebli e Youssef (2015) analizza la relazione di causalità tra la crescita economica, i consumi energetici disaggregati e l'apertura commerciale per un campione di sessantanove paesi, valutati per il periodo temporale 1980-2010. In modo particolare, gli autori sostengono che il commercio internazionale e la diffusione delle tecnologie energetiche da fonti rinnovabili siano due fenomeni strettamente connessi. Se da un lato, ad una maggiore apertura commerciale corrisponde un incremento nei consumi energetici da fonti rinnovabili, dall'altro, una maggiore produzione di energia rinnovabile può stimolare il commercio internazionale secondo diversi canali. Pertanto, vengono proposti due modelli empirici in cui la variabile di risposta è rappresentata dal GDP pro capite reale

mentre gli indicatori energetici sono rappresentati dai consumi elettrici da fonti rinnovabili e non rinnovabili espressi in milioni di Kilowattora. La differenza sostanziale tra i due modelli riguarda gli indicatori utilizzati per misurare l'intensità del commercio internazionale: nel primo modello, vengono utilizzate le esportazioni di merci, nel secondo, le importazioni. I risultati a cui pervengono gli autori, testimoniano l'effetto positivo e statisticamente significativo dei coefficienti associati ai consumi energetici e all'intensità commerciale. In particolare, «*in the long-run, any increase in capital, labor force, renewable energy consumption, non-renewable energy consumption and trade (exports or imports) will increase economic growth*» (Jebli e Youssef, 2015).

Dogan e Ozturk (2017) studiano, invece, la relazione tra i consumi energetici disaggregati, la crescita economica e le emissioni inquinanti per il periodo temporale 1980-2014 negli USA. Il modello proposto è di nuovo un *Extended Kuznets Curve model* che assume la forma seguente:

$$\ln CO_{2t} = B_0 + \beta_1 \ln GDP_t + \beta_2 (\ln GDP_t)^2 + \beta_3 \ln REC_t + \beta_4 \ln NREC_t + \varepsilon_t$$

I consumi di energia rinnovabile (REC) includono l'energia eolica, solare, geotermica, idroelettrica e da biomassa. Di contro, i consumi da fonti non rinnovabili (NREC) comprendono l'energia derivante da carbone, petrolio e gas naturale. Entrambi gli indicatori vengono espressi in BUT (*British Thermal Unit*). I coefficienti della regressione vengono stimati attraverso l'applicazione di un modello a ritardi distribuiti (ADRL). Tali parametri confermano, da un lato, l'effetto positivo delle fonti energetiche rinnovabili sulla qualità ambientale, e dall'altro, l'inefficienza ambientale delle fonti fossili. In modo specifico, «*a 1% rise in REC decreases CO₂ emissions by 0.09%, and a 1% increase in NREC increases the pollution by 1.04%*» (Dogan e Ozturk, 2017). Questo risultato conduce gli autori ad affermare che «*an obvious action towards the low levels of emissions is to increase the use of energy from renewable sources and decrease the use of energy from non-renewable sources in energy mix in the USA. In addition, regulatory policies should be implemented to fight for the pollution such that buildings, institutions, firms, factories, and electricity power companies should be forced by regulations to meet some portion of their energy needs from renewable sources, and to gradually increase its portion in the future*» (Dogan e Ozturk, 2017). Tuttavia, l'ipotesi di una curva ambientale di Kuznets per gli Stati Uniti, in base al

campione analizzato, non viene accettata: i coefficienti associati al GDP e al GDP al quadrato si alternano, rispettivamente, con segno negativo e positivo.

Un recente lavoro è quello di Santana de Souza *et al.* (2018) in cui, analizzando cinque paesi MERCOSUR (Argentina, Brasile, Paraguay, Uruguay e Venezuela) per il periodo 1990-2014, vengono studiate le determinanti potenziali delle emissioni di biossido di carbonio. A tal fine, gli autori formulano quattro differenti ipotesi: «*the following research hypotheses are formulated: H₁ There is a positive and significant relationship between income and emission of pollutants in MERCOSUR countries; H₂ There is a negative and significant relationship between consumption of renewable energy and emission of pollutants in MERCOSUR countries; H₃ There is a positive and significant relationship between consumption of non-renewable energy and emission of pollutants in MERCOSUR countries; H₄ There is a quadratic relationship between income and emission of pollutants, showing the validity of the EKC hypothesis for MERCOSUR*» (Santana de Souza *et al.*, 2018). La strategia empirica per la verifica di queste congetture si traduce nella stima di quattro modelli econometrici, di cui il più esteso presenta la seguente forma funzionale:

$$\ln CO_{2it} = B_0 + \beta_1 \ln GDP_{it} + \beta_2 [\ln GDP]_{it}^2 + \beta_3 \ln REC_{it} + \beta_4 \ln NREC_{it} + \beta_5 \ln TR_{it} + \beta_6 \ln FD_{it} + \beta_7 \ln URB_{it} + \varepsilon_{it}$$

Le variabili oggetto di studio sono rappresentate dalle emissioni pro capite di biossido di carbonio (CO₂), dai consumi energetici di fonti energetiche rinnovabili (REC) e non rinnovabili (NREC) in percentuale dei consumi totali, dal GDP pro capite, dal grado di urbanizzazione (URB), da un indice di apertura commerciale (TR) e da un indice del grado di sviluppo finanziario (FD) identici a quelli utilizzati in Dogan e Seker (2016). I risultati dei modelli, stimati per mezzo di un panel con *fixed effects*, in accordo con Al Mulali *et al.* (2015), forniscono evidenza empirica di una relazione sostenibile tra l'inquinamento ed un aumento dei consumi energetici da fonti rinnovabili. Di contro, le fonti fossili fanno registrare un effetto positivo sui livelli dell'inquinamento atmosferico: «*a 1% increase in the consumption of renewable energy had a negative impact of 2.7% on CO₂ emissions. As for non-renewable energy consumption (NREC), it had a strong impact on environmental degradation. The elasticity of NREC in relation to CO₂ showed that a 1% increase in the consumption of nonrenewable energy positively impacts CO₂ emissions by 8.86%*» (Santana de Souza *et al.*, 2018). Le

conclusioni a cui pervengono gli autori non contrastano con la maggioranza della letteratura (si veda, in particolare, Dogan e Seker, 2016). Tuttavia, il lavoro presenta alcune criticità di carattere metodologico. In primo luogo, gli autori non tengono conto di tutti quei fattori *time-variant* non osservabili che potrebbero influenzare la relazione oggetto di studio. Inoltre, al fine di verificare la tecnica econometrica migliore non viene implementato il test di Hausman (Stern, 2004). Pertanto, oltre alla possibile distorsione da variabile omessa, potrebbe sussistere un problema di inconsistenza negli stimatori.

Molto interessanti sono anche le ricerche che pongono enfasi sull'effetto ambientale dell'energia nucleare (Iwata *et al.*, 2010; Apergis e Payne, 2010; Baek e Pride, 2014). In tale contesto, un contributo da rilevare è quello di Apergis *et al.* (2010) dove viene esaminata la relazione di causalità di lungo periodo tra le emissioni di CO₂, la crescita economica ed i consumi energetici da fonti rinnovabili e nucleari per un panel di diciannove paesi. In modo particolare, prendendo in considerazione gli anni che vanno dal 1984 al 2007 ed utilizzando come base informativa il World Development Indicators (WDI), gli autori forniscono evidenza sulla capacità dell'energia nucleare di ridurre le emissioni di biossido di carbonio: ad un aumento dell'1% dei consumi energetici nucleari corrisponde un decremento dello 0,477% delle emissioni di CO₂. Di contro, i consumi energetici da fonti rinnovabili non contribuiscono alla riduzione delle emissioni inquinanti.

Generalmente, le ricerche scientifiche che analizzano gli effetti ambientali dell'energia nucleare convergono verso un importante *trade-off*: se da un lato, un maggiore sfruttamento di tali tecnologie energetiche può causare una riduzione dei gas serra, dall'altro, sussiste il problema relativo allo smaltimento delle scorie radioattive. Inoltre, il potenziale pericolo di una contaminazione e/o fughe radioattive, a cui sono tradizionalmente assoggettate le centrali atomiche, li rende poco sicure.

In tempi recenti stanno assumendo un interesse crescente le fonti energetiche cosiddette *combustible renewables* (Eurostat, 2018). La considerazione per tali forme di energia, come sostenuto da Dogan e Inglesi-Lotz (2017), è dovuta al fatto che «*biomass is the most convenient source of energy for households especially with low initial costs of implementation and hence, better chances in market penetration. [...] the effect of*

biomass usage to the level of emissions in neglected». La letteratura in questione, tuttavia, risulta essere contrastante: da un lato, Dogan e Inglesi-Lotz (2017) confermano i benefici ambientali associati ad un aumento della produzione di energia elettrica da biomassa, dall'altro, Sinha *et al.* (2017) sostengono che i consumi energetici da biomassa potrebbero avere un effetto negativo sulle emissioni di gas serra.

In tale contesto si inserisce il lavoro di Dogan e Inglesi-Lotz (2017) che si propone di studiare il ruolo della produzione di energia elettrica derivante dagli impieghi della biomassa, misurata in Kilowattora, in ventidue paesi OECD per gli anni 1985-2012. Anche in questo caso sono proposti una serie di modelli econometrici che prevedono la modellazione delle emissioni inquinanti di biossido di carbonio (CO₂) sul GDP pro capite e sulla produzione di energia elettrica da biomassa. Le equazioni stimate sono tre ed il modello più esteso assume la seguente forma funzionale:

$$CO_{2it} = B_0 + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 (GDP_{it})^2 + \beta_3 BIO_{it} + \beta_4 TR_{it} + \beta_5 URB_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove la principale variabile d'interesse è rappresentata dalla produzione di energia elettrica da biomassa espressa in Kilowattora. Tutte le variabili sono state trasformate in termini logaritmici. I risultati a cui pervengono gli autori testimoniano, da un lato, l'esistenza di una EKC per il campione analizzato, dall'altro, la strategicità ambientale svolta dalla produzione di energia elettrica da biomassa: all'aumentare del consumo di biomassa, le emissioni di CO₂ tendono a diminuire, in media, dello 0.05%.

Rilevante è anche il contributo di Sinha *et al.* (2017) dove, utilizzando come quadro teorico di riferimento la curva ambientale di Kuznets, viene studiato l'impatto della crescita economica (Y) e dei consumi energetici da biomassa (B) sulle emissioni di CO₂ per un panel di undici paesi emergenti, cosiddetti N-11 (Eghbal, 2008), valutati per il periodo temporale 1990-2014. A tal fine, viene proposto un *Extentend Kuznets Curve model* che, stimato attraverso il metodo generalizzato dei momenti (GMM), contiene numerose variabili suppletive di controllo tra cui assumono particolare rilevanza il commercio internazionale (T), i consumi energetici da fonti fossili (N) ed il grado di urbanizzazione (U). La particolarità del lavoro è strettamente connessa all'introduzione di due variabili interattive: l'interazione tra il GDP pro capite ed i consumi pro capite di biomassa e tra il GDP pro capite ed il grado di apertura commerciale. I risultati delle stime testimoniano l'esistenza di una relazione *N-shaped*

tra il GDP pro capite e le emissioni di CO₂. Tuttavia, il segno negativo assunto dalle variabili interattive conferma la presenza di un particolare effetto nella relazione crescita-inquinamento: «*when there is an interaction between income and biomass energy consumption and between income and trade openness, CO₂ emissions are reduced*» (Sinha *et al.*, 2017).

Alcuni contributi si concentrano, invece, sulle cosiddette *non-combustible renewables* (Eurostat, 2018) che comprendono l'energia solare, geotermica, idroelettrica ed eolica. In tale contesto, uno studio particolare è rinvenibile nel lavoro di Solarin *et al.* (2017) che si concentra esclusivamente sull'energia idroelettrica. Gli autori, analizzando Cina e India per il periodo temporale 1965-2013, si propongono di valutare l'efficacia ambientale dei consumi energetici da idroelettrico (H) secondo un modello che assume la seguente forma funzionale:

$$CO_{2t} = \beta_0 + \beta_1 GDP_t + \beta_2 (GDP_t)^2 + \beta_3 H_t + \beta_4 U_t + \beta_5 T + \beta_6 D_1 + \beta_7 D_2 + \varepsilon_t$$

dove le emissioni pro capite di biossido di carbonio sono modellate sul GDP pro capite, sui consumi pro capite di energia idroelettrica (H) e sul tasso di urbanizzazione (URB). Inoltre, vengono considerate un *time trend* (T) e due *dummy* che catturano i *break* strutturali (D₁ e D₂). Poiché vengono utilizzate delle serie storiche, l'equazione viene stimata mediante il metodo *autoregressive distributed lag* (ARDL). I risultati delle stime rivelano che «*there is a long-run negative causality from hydroelectricity consumption to emission with feedback effect from emission in both countries*» (Solarin *et al.*, 2017). Questa importante conclusione, secondo gli autori, è da imputare al fatto che l'aumento della quota dell'idroelettrico nel mix energetico potrebbe generare un effetto sostituzione riducendo l'utilizzo dei combustibili fossili.

Nei tre lavori discussi, nonostante sia attribuito un ruolo importante all'energia idroelettrica (Solarin *et al.*, 2017) e ai rinnovabili combustibili (Dogan e Inglesi-Lotz, 2017; Sinha *et al.*, 2017) vengono tralasciate le altre forme energetiche rinnovabili, come l'eolico e il fotovoltaico, che, soprattutto nel comparto elettrico, stanno registrando dei marcati tassi di diffusione.

Il lavoro di Thombs (2018) risulta finora essere l'unica ricerca che studia l'effetto ambientale disgiunto delle singole fonti energetiche rinnovabili. L'autore, analizzando un panel di vari paesi valutati per il periodo temporale 2000-2013, si propone di

esaminare la relazione tra la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e le emissioni totali di biossido di carbonio. Le fonti energetiche valutate sono rappresentate dall'energia solare, geotermica, idroelettrica, eolica. Inoltre, viene analizzata anche la relazione suddetta in funzione dell'energia nucleare. I paesi analizzati sono molteplici¹⁹. Essi variano in funzione della fonte energetica analizzata: «*only countries with data for every year from 2000 to 2013 were included in the study*» (Thombs, 2018). L'autore, in accordo con Sinha *et al.* (2017), fa ricorso ad un modello STIRPAT (*Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology*) stimato per mezzo di un panel con effetti fissi. Il modello stimato da Thombs, con variabili espresse in forma logaritmica, assume una forma funzionale in cui ogni variabile *energy-related*, misurata in terajoules, viene moltiplicata per gli anni analizzati. Le stime vengono controllate per cinque ulteriori variabili: il GDP pro capite, la popolazione totale, il grado di apertura commerciale e di urbanizzazione, la percentuale di energia elettrica generata da combustibili fossili (petrolio, gas naturale, carbone). Ogni fonte energetica viene stimata secondo un differente modello econometrico. I risultati a cui perviene l'autore testimoniano che «*non-fossil fuel technologies have a fluctuating temporal relationship with CO2 emissions, indicating that continued increases in the production of non-fossil fuel energy sources do not automatically produce emission reductions at increasing rates over time*» (Thombs, 2018). Se da un lato, l'energia geotermica e nucleare non fanno registrare fluttuazioni significative, dall'altro, le altre forme di energia analizzate tendono a variare sensibilmente nel tempo. Tali variazioni sono giustificate, secondo l'autore, nel modo seguente: «*these fluctuations could be due to a confluence of at least three factors: (1) embeddedness within the energy supply, (2) stimulus spending during the Great Recession and other public policies, and (3) energy source-specific characteristics and technological improvements*» (Thombs, 2018).

Una ricerca molto interessante è rinvenibile anche nel lavoro di Armeanu *et al.* (2017) che, concentrandosi sui ventotto paesi dell'Unione Europea per il periodo 2003-2014, si propongono di studiare la relazione tra le energie rinnovabili (aggregate e per singola tecnologia) e lo sviluppo sostenibile. La *research question* posta dagli autori si traduce analiticamente in un modello multivariato in cui il GDP pro capite rappresenta

¹⁹ In particolare, l'autore analizza 33 paesi per la biomassa, 15 per il geotermico, 99 per l'idroelettrico, 29 per il nucleare, 19 per il solare e 37 per l'eolico.

la variabile dipendente. In una fase iniziale, l'equazione stimata, con variabili espresse in forma logaritmica, assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it} + \beta_2 Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove le variabili indipendenti (X) sono rappresentate dalla quota di energie rinnovabili nei consumi finali e dalle singole tecnologie da sfruttamento di tali fonti energetiche (idroelettrico, biomassa, eolico, geotermico e solare). Questo effetto viene, inoltre, controllato per una serie di fattori socio-economici (Z) tra cui assumono rilevanza le spese in R&S e le emissioni inquinanti di biossido di carbonio. I risultati delle stime, effettuate per mezzo di un panel con effetti fissi, conducono ad importanti conclusioni. In primo luogo, si evince una relazione più che proporzionale tra la quota di energie rinnovabili nei consumi finali ed il GDP pro capite: *«if there is an increase by 1% of the share of renewable energy in gross final energy consumption, the effect would be to increase the gross domestic product per capita by 1.61%»* (Armeanu et al., 2017). Inoltre, le varie tecnologie energetiche esaminate sono strettamente correlate alla crescita del GDP: *«we acknowledge the positive influence of every kind of biomass energy on sustainable economic growth. [...] We acknowledge that primary production of hydropower shows a higher influence on economic growth than geothermal energy, wind power, and solar energy»* (Armeanu et al., 2017). Nella fase finale dell'articolo gli autori analizzano il legame di lungo periodo tra la produzione di energia elettrica (PRE), la dipendenza energetica (ED) e il GDP pro capite per mezzo di un panel dinamico (DOLS e FMOLS). Anche in questo caso vengono confermate le ipotesi secondo cui la diffusione delle rinnovabili risulta positivamente correlata alla crescita del GDP: *«the empirical findings document the presence of a long-term equilibrium between primary production of renewable energies, energy dependence, and gross domestic product per capita»* (Armeanu et al., 2017).

2.2.3- L'effetto ambientale disaggregato delle fonti energetiche: strategie investigative

Dalla precedente analisi della letteratura emergono alcuni importanti elementi. Il quadro sinottico (Tabella 2.1) sottostante riporta le informazioni riguardanti la strategia metodologica, le variabili d'interesse, le unità osservazionali e il periodo temporale valutato.

Tabella 2.1- Contributi analizzati

Autori	Periodo	Paesi	Variabili	Metodologia
Roca <i>et al.</i> (2001)	1973-1996; 1980-1996	Spagna	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SO ₂ , NO _x , NMVOC, Y, Nuc, Therm, Coal	Time series, OLS
Say e Youcel (2006)	1970-2002	Turchia	CO ₂ , Energy, GNP, P	Time series, OLS
Ang (2008)	1971-1999	Malesia	Y, CO ₂ , Energy	VAR
Atici (2009)	1980-2002	4 paesi europei	Y, CO ₂ , Energy	FE, RE
Marrero (2010)	1990-2006	24 paesi europei	GHG, Y, M	Pooled OLS, DPD, GMM
Bengochea e Faet (2012)	1990-2004	15 paesi europei	CO ₂ , RES, FEP	FE, RE, Pooled OLS
Omri (2013)	1990-2011	Emirati Arabi Uniti	Y, CO ₂ , Energy	GMM
Shafiei e Salim (2014)	1980-2011	29 paesi OECD	CO ₂ , P, Y, FOS, RES	FE, STIRPAT
Boluk e Mert (2014)	1990-2008	16 paesi europei	CO ₂ , Y, RES, FOS	FE, RE
Dogan e Seker (2016)	1985-2011	23 paesi	CO ₂ , Y, RES, FOS, TR, FD	FMOLS, DOLS
Dogan e Seker (2016)	1980-2012	15 paesi europei	CO ₂ , Y, RES, FOS, TR	FMOLS, DOLS
Dogan e Ozturk (2017)	1980-2014	USA	CO ₂ , Y, RES, FOS	Time series, ADRL
Sinha <i>et al.</i> (2017)	1990-2014	11 paesi emergenti	CO ₂ , Y, BIO, RES, FOS, TR, URB	FE, GMM
Dogan inglesi-Lotz (2017)	1995-2012	22 paesi OECD	CO ₂ , Y, COMBRES, TR, URB	FMOLS, DOLS
Solarin <i>et al.</i> (2017)	1965-2013	Cina e India	CO ₂ , Y, Hydro, URB	Time series, ADRL
Armeanu <i>et al.</i> (2017)	2003-2014	UE 28	CO ₂ , Y, Hydro, BIO, GEO, Solar, Nuc, Wind	FE
Alvarado <i>et al.</i> (2018)	1980-2016	151 paesi	Y, CO ₂ , Energy	FE, RE
Thombs (2018)	200-2013	Vari paesi	CO ₂ , Y, Hydro, BIO, GEO, Solar, Nuc, Wind, FOS, TR, URB	FE, STIRPAT
Santana de Souza <i>et al.</i> (2018)	1990-2014	5 paesi MERCOSUR	CO ₂ , Y, RES, FOS, TR, FD, URB	FE

Nota: FE= Fixed Effects; RE= Random Effects; DOLS= Dynamic OLS; GMM= Generalised Method of Moments; FMOLS= Fully Modified OLS; VAR= Vector Autoregression; ADRL= Autoregressive Distributed Lag; STIRPAT= Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology; Energy= consumi energetici aggregati; Y= GDP; P= popolazione; GNP= *Gross National Product*; M=consumi di energia primaria per singola fonte; FEP= fossil energy price index; RES= energia da RES; FOS= energia da Fonti Fossili; BIO= Biomassa; COMBRES= produzione di energia elettrica da combustibili rinnovabili; TR= somma delle importazioni e delle esportazioni in percentuale del GDP; FD= credito erogato al settore privato in percentuale del GDP; URB= grado di urbanizzazione; Hydro= iroelettrico; Solar= solare; Nuc= nucleare; GEO= geotermico; Wind= eolico; Therm= energia elettrica da gas naturale, carbone e petrolio; CO₂= emissioni di CO₂; CH₄= metano; N₂O= protossido di azoto; SO₂= anidride solforosa; NO_x= ossidi di azoto; NMVOC= composti organici volatili non metanici

La particolarità di questi studi riguarda sia le strategie investigative sia le variabili oggetto di studio. Tralasciando la letteratura che si concentra esclusivamente sulle fonti fossili²⁰, la prima particolarità che emerge riguarda una bipartizione, molto ricorrente in letteratura (Boluk e Mert, 2014; Farhani e Shahbaz, 2014; Jebli e Youssef, 2015; Mert *et al.*, 2015; Dogan e Seker, 2016), tra fonti fossili e non fossili. Tale bipartizione è molto interessante poiché consente di valutare distintamente l'effetto ambientale associato ad ognuna delle due categorie sopramenzionate. Questa macrocategoria di studi, in relazione ad una molteplicità di variabili, si può distinguere in vari sottogruppi in quanto risulta esserci un certo grado di eterogeneità che procede verso diverse direzioni. In primo luogo, si registra la presenza di contributi che, utilizzando serie storiche e/o dati sezionali, analizzano la relazione tra i consumi energetici disaggregati e l'inquinamento ambientale valutando le dinamiche territoriali di singole unità statistiche osservate per periodi temporali medio-lunghi (Al-Mulali *et al.*, 2015; Bento e Moutinho, 2016). Di contro, un numero molto più cospicuo di ricerche si focalizza su set di paesi, regioni e/o province (Boluk e Mert, 2014; Farhani e Shahbaz, 2014; Dogan e Seker, 2016). Sempre nel medesimo filone di letteratura, un'altra fonte di difformità riguarda i modelli teorici di base utilizzati dai ricercatori per valutare il ruolo strategico svolto dalle due categorie di fonti energetiche. Se da un lato, alcuni autori utilizzano approcci metodologici molto eterogenei (Marrero, 2010; Shafiei e Salim, 2014), dall'altro, molteplici sono le ricerche scientifiche che fanno ricorso ad un modello ambientale di Kuznets esteso (Jebli *et al.*, 2013; Boluk e Mert, 2014; Al-Mulali *et al.*, 2015).

Per quanto attiene ai risultati di questo macroinsieme di studi occorre effettuare un'importante precisazione. Se per i consumi energetici aggregati è stata registrata una certa uniformità ambientale secondo cui ad un aumento dell'intensità energetica corrisponde un aumento dell'inquinamento, quando vengono analizzate separatamente le varie fonte energetiche si riscontrano risultati contrastanti: vi sono alcuni studi che giungono al risultato sorprendente secondo cui i consumi da RES contribuiscono ad aumentare le emissioni inquinanti (Boluk e Mert, 2014; Farhani e Shabaz, 2014). Di contro, alcuni autori, come ad esempio Shafiei e Salim (2014) ottengono il risultato

²⁰ Un contributo molto importante al riguardo è rappresentato dal lavoro di Adewuyi e Awodumi (2017) dove viene compiuta un'importante rivisitazione di questa letteratura.

inverso: un aumento dell'intensità energetica da risorse rinnovabili conduce ad una riduzione delle emissioni inquinanti. Questa difformità nei risultati è anche confermata da Adewuyi e Awodumi (2017) che affermano: «*existing studies on the causal relationship among renewable and non-renewable energy consumption, economic growth and carbon emissions present diverse results*».

Il filone di letteratura analizzato presenta alcune criticità ben precise. In primo luogo, ad eccezione di alcuni autori (Roca *et al.*, 2001; Dogan e Seker, 2016), si registra una scarsa considerazione per le rinnovabili elettriche: la maggioranza degli autori tende a modellare le emissioni inquinanti in funzione dei consumi finali lordi di energia (Santana de Souza *et al.*, 2018) oppure dei consumi interni lordi per abitante (Sinha *et al.*, 2017). Inoltre, vi sono molti autori che analizzano indicatori energetici che non tengono conto delle caratteristiche dei mercati analizzati (Dogan e Seker, 2016). La strategia migliore è quella di valutare indicatori energetici che tengano conto della dimensione dei mercati, come ad esempio in Thombs (2018), oppure della grandezza della popolazione (Solarin *et al.*, 2017). Altra caratteristica, comune a varie ricerche, riguarda gli indicatori ambientali analizzati: ad eccezione di Roca *et al.* (2001), la totalità degli autori si propone di valutare l'effetto disaggregato delle tecnologie energetiche in relazione alle emissioni di gas serra e, in modo particolare, alle emissioni di biossido di carbonio. Sarebbe opportuno valutare tale effetto in relazione ad una maggiore varietà di agenti inquinanti. È quello che cercheremo di sviluppare nel prosieguo del nostro lavoro.

2.3- Metodologia: specificazioni econometriche

Nell'ambito del quadro teorico ed analitico precedentemente analizzato diventa interessante studiare il ruolo svolto dalle singole tecnologie energetiche rinnovabili nel mitigare le emissioni atmosferiche all'interno del territorio europeo. Le ricerche esistenti che si propongono di studiare tale processo sono contraddistinte da un certo grado di difformità che procede secondo due diverse direzioni: teoriche e metodologiche.

In generale, la letteratura esaminata studia la relazione suddetta attraverso dei modelli multivariati, con variabili espresse in termini assoluti e/o logaritmici, che assumono la seguente forma funzionale:

$$E = f(\text{Renewable}, \text{Non-renewable}, \text{Socio-Economics})$$

dove:

- *E* è un indicatore del livello di inquinamento ambientale connesso alle emissioni di gas serra (Marrero, 2010) oppure ai cosiddetti *air pollutants* (Roca *et al.*, 2001);
- *Renewable* è un indicatore della diffusione delle fonti energetiche rinnovabili che comprende la percentuale di energia elettrica generata da tali risorse energetiche (Dogan e Seker, 2016), i consumi totali (Shafiei e Salim, 2014) e/o per abitante (Sinha *et al.*, 2017);
- *Fossil* è un indicatore della diffusione delle fonti energetiche non rinnovabili che comprende la percentuale di energia elettrica generata da fonti fossili (Dogan e Seker, 2016), i consumi totali (Santana de Souza *et al.*, 2018) e/o per abitante (Boluk e Mert, 2014);
- *Socio-Economics* è un insieme di variabili addizionali di controllo che includono, ad esempio, il livello del reddito pro capite (Dogan e Ozturk, 2017), il grado di apertura commerciale (Dogan e Inglesi-Lotz, 2017) e le caratteristiche demografiche dei paesi analizzati (Sinha *et al.*, 2017);

Le strategie metodologiche adottate in letteratura sono caratterizzate da una notevole eterogeneità. Accanto a modelli che includono elementi di dinamica (Marrero, 2010; Bengochea e Faet, 2012; Sinha *et al.*, 2017), si registra la presenza di modelli lineari (Thombs, 2018) e/o non lineari (Dogan e Seker, 2016) in cui un indicatore dell'inquinamento ambientale viene modellato in funzione di una molteplicità di variabili. La non linearità risulta strettamente connessa al quadro teorico di riferimento in quanto molteplici autori fanno ricorso a *Extended Kuznets Curve models* per studiare l'effetto ambientale disaggregato delle singole tecnologie energetiche (Dogan e Seker, 2016; Dogan e Ozturk, 2017). In tal caso, la non linearità dei parametri riguarda le condizioni economiche dei territori analizzati ed, in modo particolare, il livello del

reddito pro capite che viene utilizzato in forma lineare e quadratica. Di contro, alcune ricerche utilizzano funzioni lineari (Santana de Souza *et al.*, 2018; Armeanu *et al.*, 2017) che modellano un indicatore ambientale in relazione ad un certo numero di indicatori energetici. Se nel primo caso (*Extended Kuznets Curve models*), la totalità degli autori compie una distinzione tra fonti fossili e rinnovabili, nel secondo, la distinzione riguarda una varietà più ampia di tecnologie energetiche.

Un certo grado di eterogeneità si rileva anche nella metodologia empirica. In modo particolare, si assiste all'utilizzo di *Pooled OLS* (Bengochea e Faet, 2012), panel con effetti fissi e/o *random* (Boluk e Mert, 2014), *Fully Modified Ordinary Least Squares* (Jebli e Youssef, 2015), *Dynamic Ordinary Least Squares* (Dogan e Seker, 2016), *Generalised Method of Moments* (Marrero, 2010), *STIRPAT models* (Shafiei e Salim, 2014) *Autoregressive Distributed Lag* (Dogan e Ozturk, 2017) e *Vector Autoregression model* (Ang, 2008). Questa difformità è strettamente connessa al tipo di dati utilizzati (serie storiche, *cross-section* e/o panel) e alla *research question* affrontata. Nel caso di modelli dinamici, gli autori sono orientati ad ottenere le relazioni di lungo periodo tra le serie storiche analizzate (Dogan e Seker, 2016) ipotizzando che gli errori seguano processi autoregressivi oppure aggiungendo tra i regressori la variabile dipendente ritardata di uno o più periodi (Bengochea e Faet, 2012). Di contro, altri autori fanno ricorso a modelli statici (Armeanu *et al.*, 2017) in cui vengono controllati tutti quei fattori che variano nel tempo e/o tra le unità ma che non possono essere inclusi nel modello di regressione perché non osservabili. Le linee teoriche connesse alla difformità metodologica sono ben delineate da Dogan e Seker (2016) e da Armeanu *et al.* (2017). Quest'ultimi affermano che «*we have adopted a fixed-effects approach in order to overcome the omitted variable bias*» (Armeanu *et al.* 2017). Dogan e Seker (2016), invece, sostengono che l'utilizzo di modelli dinamici (DOLS, FMOLS) sono ottimali «*to see whether or not the analyzed variables have a long-run relationship*» (Dogan e Seker, 2016).

2.3.1- Specificazione funzionali: modelli per la valutazione dell'effetto ambientale delle RES-E

L'obiettivo primario di questo lavoro è di studiare la relazione esistente tra la diffusione delle rinnovabili elettriche (RES-E) e l'inquinamento atmosferico nei paesi europei. Al tal fine, nel seguito del lavoro, saranno analizzati due differenti scenari, poiché la distinzione tra contesti multipli è strettamente correlata all'utilizzo di indicatori energetici ed ambientali di varia natura.

Nella fase iniziale del lavoro, la disaggregazione che sarà effettuata procede in due differenti direzioni. In accordo con Dogan e Seker (2016), la prima distinzione riguarda le due macrocategorie di tecnologie elettriche: fonti fossili (o tecnologie tradizionali) e rinnovabili elettriche. Lo scopo primario è quello di verificare se la diffusione di queste due forme di tecnologie abbia avuto effetti differenti sulle emissioni inquinanti. In seguito, sarà valutata l'efficacia ambientale disaggregata delle rinnovabili elettriche. In tal caso la distinzione è tra *combustible renewables* (Dogan e Inglesi-Lotz, 2017) e *non-combustible renewables* (Solarin *et al.*, 2017). Questa strategia ci consente di verificare empiricamente se le due categorie di rinnovabili elettriche abbiano avuto un effetto difforme sui *polluters* esaminati. Questi ultimi comprendono quattro differenti indicatori: i gas serra (GHG), i particolati sospesi (PM 2.5), gli ossidi di zolfo (SO_x) e di azoto (NO_x). D'altronde, la letteratura esaminata, ad eccezione di Roca *et al.* (2001), analizza esclusivamente le emissioni di biossido di carbonio (CO₂).

Partendo da alcuni lavori precedenti (ad esempio, Dogan e Seker, 2016) l'equazione stimata nella fase iniziale della ricerca, che abbiamo chiamato *Modello 1*, assume la seguente forma funzionale:

$$E_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 RES_E_{it} + \beta_2 FOSSIL_{it} + \varepsilon_{it} \quad (\text{Modello 1})$$

dove:

- ✓ *E*: è un indicatore dell'inquinamento atmosferico riferito alle emissioni di gas serra (GHG) e agli *air pollutants* (NO_x, SO_x, PM 2.5), espresso in termini pro capite;

- ✓ *RES_E*: rappresenta la quota di energia elettrica generata da tutte le forme si rinnovabili elettriche (eolico, geotermico, solare, idroelettrico, biomassa) in percentuale alla produzione totale;
- ✓ *Fossil*: rappresenta la quota di energia elettrica generata da fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone) in percentuale alla produzione totale;
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore della regressione;
- ✓ α : effetti fissi individuali;
- ✓ γ : effetti fissi temporali;
- ✓ $i = 1, \dots, 28$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);
- ✓ β_1, \dots, β_3 : : parametri ignoti da stimare;

Questo modello ci consente di verificare empiricamente se, in relazione alla tipologia di fonte energetica sfruttata, si registra un effetto ambientale eterogeneo: studiando il segno dei coefficienti associati alle variabili *energy-related* (β_1, β_2) è possibile verificare empiricamente se le due macrocategorie di tecnologie elettriche presentino effetti dissimili sui *polluters* analizzati.

Il secondo passo è quello di stimare i seguenti altri due modelli che ci permettono di verificare il ruolo svolto delle diverse tipologie di risorse energetiche rinnovabili e non rinnovabili sull'inquinamento senza (*Modello 2*) e con variabili di controllo (*Modello 3*). Le equazioni stimate assumono la seguente forma funzionale:

$$E_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 RES_E_{hit} + \beta_2 FOSSIL_{it} + \varepsilon_{it} \text{ (*Modello 2*)}$$

$$E_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 RES_E_{hit} + \beta_2 FOSSIL_{it} + \beta_3 Z_{it} + \varepsilon_{it} \text{ (*Modello 3*)}$$

Nel *Modello 2*, E è sempre un indicatore dell'inquinamento atmosferico riferito alle emissioni di gas serra (GHG) e agli *air pollutants* ($NO_x, SO_x, PM 2.5$), espresso in termini pro capite; mentre la variabile *RES_E* rappresenta la quota di energia elettrica generata dalla risorsa rinnovabile h (combustibile o non combustibile) in relazione alla produzione totale. Formalmente sono analizzate separatamente due variabili di carattere energetico:

- ✓ *Comb*: è un indicatore energetico espressione della quota di energia elettrica generata da rinnovabili combustibili (biomassa);
- ✓ *NoComb*: è un indicatore energetico espressione della quota di energia elettrica generata da rinnovabili non combustibili (idroelettrico, solare, eolico e geotermico);

Il *Modello 2* ci consente di analizzare l'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche, mentre il *Modello 3* ci consente di verificare l'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche, controllando in funzione di ulteriori determinanti potenziali delle emissioni inquinanti che, se omesse, potrebbero condurre a stime distorte. L'indicatore *Z* rappresenta, infatti, un vettore di variabili esplicative *time-variant* che variano nel tempo e tra gli stati. Esso comprende i consumi elettrici pro capite (*EnergyCons*), le importazioni nette di energia elettrica (*NetImport*) e un indice di urbanizzazione (*Popdensity*);

Al fine di interpretare come elasticità i coefficienti stimati, tutte le variabili, ad eccezione delle importazioni nette di energia elettrica (*NetImport*), sono state trasformate nel loro logaritmo naturale.

Il carattere innovativo del presente lavoro varia in funzione di molteplici aspetti. Lo scopo principale è quello di verificare quale tecnologia energetica sia ambientalmente più efficace. Come appurato nella sezione precedente, sullo studio dell'effetto ambientale disaggregato delle fonti energetiche la letteratura economica è scarsa ed è caratterizzata da alcune criticità ben precise. D'altronde, ad eccezione di alcuni contributi come quello di Thombs (2018), la maggioranza degli autori ipotizza che le rinnovabili elettriche abbiano un effetto uniforme sull'inquinamento atmosferico. Tuttavia, si potrebbe presentare un differenziale tra le due categorie di risorse rinnovabili analizzate e sarebbe fondamentale individuare quella ambientalmente migliore. La disaggregazione energetica procede, infatti, verso la distinzione tra fonti rinnovabili e fossili (Shafiei e Salim, 2014; Dogan e Seker, 2016), trascurando l'eterogeneità che caratterizza le singole tecnologie produttive e/o di consumo. Se la strategia di disaggregare le fonti energetiche in due categorie è fondamentale per comprendere le dinamiche ambientali sottese a un processo di transizione energetica, si rilevano alcune problematiche connesse alla misurazione dell'effetto ambientale

disaggregato delle singole fonti energetiche. Sull'argomento, la letteratura ci suggerisce che l'effetto ambientale delle rinnovabili elettriche varia in funzione della risorsa energetica utilizzata nei processi di generazione e/o di consumo (Thombs, 2018): si registra un differenziale di produttività ambientale tra rinnovabili non combustibili (idroelettrico, solare, geotermico, eolico) e combustibili (biomassa). Soprattutto per quanto attiene all'effetto ambientale associato alla diffusione della biomassa i risultati della letteratura sono controversi: *«moving to the biomass results, the CO₂ elasticities fluctuated between positive and negative values. These fluctuations are likely associated with the types of biomass being produced and their varying production processes. This finding is generally consistent with life cycle analyses that find mixed results regarding the net emission benefit of biomass»* (Thombs, 2018). Fargione *et al.* (2010) affermano, inoltre, che *«proposed biomass energy crops pose significant risk of becoming invasive and causing unintended effects on species and ecosystem services, with significant costs associated with damage and invasive species control»*. Di contro, la stima dell'effetto ambientale delle rinnovabili non combustibili fa registrare dei risultati omogenei, soprattutto per le tecnologie eoliche (Raadal *et al.*, 2014) e fotovoltaiche (Lamnatou *et al.*, 2018). Pertanto, nell'analisi della capacità ambientali delle rinnovabili elettriche è importante esaminare il possibile effetto composizione che caratterizza il macroinsieme di tecnologie da fonti rinnovabili.

Questo lavoro si differenzia dalla letteratura esistente poiché, in primo luogo, analizza l'effetto delle rinnovabili elettriche postulando un differenziale di produttività ambientale tra rinnovabili combustibili e non combustibili. In accordo con Thombs (2018) e Armeanu *et al.* (2018), l'effetto ambientale delle rinnovabili è studiato in funzione della principale caratteristica che contraddistingue le risorse energetiche: la combustione. Vengono, infatti, utilizzati due differenti indicatori energetici rinnovabili (*Comb* e *NoComb*) espressione della quantità di elettricità generata da idroelettrico, solare, eolico, geotermico, biomassa. Altra caratteristica distintiva del lavoro, connessa alla misurazione delle variabili e alla possibilità di ottenere stime più precise, è rinvenibile nell'importanza attribuita al comparto elettrico. Come affermato in precedenza, infatti, la gran parte della letteratura esaminata propende per l'utilizzo di indicatori energetici globali piuttosto che settoriali (Santana de Souza *et al.*, 2018). Numerosi autori analizzano le emissioni inquinanti in funzione del cosiddetto *energy*

use pro capite (ad esempio, Atici, 2009) che, fornito dal World Development Indicators (WDI), «*refers to use of primary energy before transformation to other end-use fuels, which is equal to indigenous production plus imports and stock changes, minus exports and fuels supplied to ships and aircraft engaged in international transport*» (World Development Indicators, 2014). Altri autori utilizzano i consumi finali di energia (Santana de Souza *et al.*, 2018), ossia «*the total energy consumed by end users, such as households, industry and agriculture. It is the energy which reaches the final consumer's door and excludes that which is used by the energy sector itself*» (Eurostat, 2018). Tale strategia, seppur di grande interesse, non consente di analizzare con esattezza le dinamiche settoriali del comparto elettrico in quanto entrambi gli indicatori non tengono in considerazione la forma di energia generata (meccanica, elettrica, termica). Nel presente lavoro il focus è sul settore elettrico in quanto risulta essere il comparto industriale in cui le risorse rinnovabili stanno registrando i maggiori tassi di diffusione. Sta, infatti, imponendosi un sistema di generazione decentrato, rappresentato da milioni d'impianti, che nei prossimi anni sostituirà in larga parte la produzione centralizzata di elettricità che aveva dominato il secolo scorso (Silvestrini, 2015). Pertanto, gli indicatori di maggior interesse, in accordo con Dogan e Seker (2016), fanno riferimento alla quantità di energia elettrica generata da fonti fossili e rinnovabili. A differenza di Dogan e Seker (2016), tuttavia, gli indicatori elettrici utilizzati nel presente lavoro tengono conto delle caratteristiche dei mercati elettrici analizzati poiché sono espressi in rapporto alla quantità totale di energia.

Altra caratteristica innovativa riguarda gli indicatori ambientali analizzati. Come sarà approfondito di seguito, i processi per la produzione di energia elettrica sono molto correlati, oltre che alle emissioni di gas serra, anche al fenomeno noto nella letteratura come *air pollution*. La letteratura esaminata, ad eccezione di Roca *et al.* (2001), si focalizza esclusivamente sulle emissioni di gas serra trascurando, dunque, altri agenti inquinanti molto nocivi per la salute umana e per l'ecosistema. Nel presente lavoro diviene interessante valutare sia le emissioni di gas serra sia gli *air pollutants* più diffusi (particolati sospesi, anidride solforosa e ossidi di azoto).

Dal punto di vista metodologico, nella sezione precedente è stato rilevato come la letteratura sui consumi energetici disaggregati sia caratterizzata da un certo livello di eterogeneità. Tale difformità, oltre ad essere connessa con la tipologia di dati analizzati, è

strettamente correlata alla *research question* indagata. Nel caso di dati longitudinali si assiste, infatti, all'utilizzo di due macrocategorie di tecniche econometriche la cui distinzione si basa sull'introduzione di elementi di dinamica nei modelli stimati. Recentemente si è, infatti, diffuso l'impiego degli stimatori DOLS e FMOLS (Dogan e Seker, 2016; Dogan e Inglesi-Lotz, 2016), che mirano ad indagare l'effetto causale dinamico tra le variabili analizzate. Tale tecnica econometrica consente di ottenere una *long-term relationship* tra le variabili analizzate (Dogan e Seker, 2016) ed è particolarmente efficace nel caso in cui i dati sono caratterizzati dalla presenza di *cross-sectional dependence*. Tuttavia, alcuni autori (come ad esempio, Ozokcu e Ozdemir, 2017), utilizzano dei modelli panel (*fixed e/o random effects*) con l'applicazione dei cosiddetti Driscoll-Kraay *standard errors*: «*Hoechle (2007) states that it is better to use Driscoll-Kraay Standard Errors, if the model is heteroskedastic, autocorrelated, and cross-sectionally dependent*» (Ozokcu e Ozdemir, 2017). Occorre comunque notare che le tecniche econometriche più diffuse in questo filone di letteratura, nel caso di dati panel, consistono nello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* (LSDV, *Least Squares Dummy Variables*) e nello stimatore dei minimi quadrati generalizzati (GLS). Dogan e Seker affermano, infatti, «*almost all studies in the existing environment-energy-growth literature use conventional panel estimation techniques*». Entrambi gli stimatori (*fixed e/o random effects*) sono comparabili con l'ausilio del test di Hausman (1978) che verificare l'ipotesi nulla che i *random effects* non siano correlati con i regressori contro l'ipotesi alternativa che gli effetti stocastici siano correlati con i regressori.

Un'altra caratteristica distintiva del presente lavoro riguarda la selezione dei dati e del campione di riferimento. In particolare, per evitare problemi di endogeneità nella selezione delle principali variabili d'interesse (*Comb* e *NoComb*), le variabili di risposta analizzate (GHG, NO_x, SO_x, Pm 2.5) sono misurate con riferimento esclusivo al comparto elettrico. Questa strategia ci consente di ridurre la probabilità di incorrere in problemi di distorsione da variabili omesse poiché tali emissioni sono analizzate con riferimento alle principali variabili che potrebbero influenzare il loro processo di generazione. In particolare, le analisi econometriche effettuate di seguito tengono conto di tutte le probabili fonti antropiche di tali emissioni che, con riferimento al comparto elettrico, sono principalmente determinate dall'attività di produzione e di consumo. Dal

quadro sinottico (Tabella 2.1) è possibile notare, inoltre, che, ad eccezione di Armeanu *et al.* (2017), non sono presenti ricerche che analizzano l'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche per l'Unione Europea a ventotto paesi (UE-28). D'altronde Armeanu *et al.* (2017) utilizzano come variabile dipendente un indice di sostenibilità (il GDP reale pro capite) che non consente di valutare esaustivamente l'efficacia ambientale delle rinnovabili elettriche.

2.4- Fonte dei dati e variabili analizzate

I dati analizzati si riferiscono ad un panel di 28 paesi europei. Questi ultimi fanno riferimento ai ventotto paesi dell'Unione Europea (Austria, Belgio, Bulgaria, Croazia, Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Olanda, Polonia, Portogallo, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia, Regno Unito). Il periodo temporale di riferimento, in funzione alla disponibilità dei dati, riguarda gli anni 1995-2015 per i modelli con variabile dipendente le emissioni di gas serra (GHG), anidride solforosa (SO_x) e ossidi di azoto (NO_x). Per i modelli con variabile dipendente i particolati sospesi (PM 2.5), il periodo temporale di riferimento riguarda gli anni 2000-2015.

2.4.1- Variabile dipendente

Nei modelli stimati di seguito sono valutati quattro differenti indicatori ambientali rappresentati nello specifico dai seguenti inquinanti:

- ✓ Gas serra (GHG);
- ✓ Ossidi di zolfo (SO_x);
- ✓ Ossidi di azoto (NO_x);
- ✓ Particolati sospesi (PM 2.5);

Tali indicatori dell'inquinamento atmosferico sono misurati in tonnellate per abitante e la fonte informativa dalla quale sono stati ricavati è rappresentata dalla banca dati Eurostat (2018). In particolare, le banche dati di riferimento sono due:

- ✓ “*Air pollution statistics - emission inventories*” (Eurostat, 2018)²¹;
- ✓ “*Greenhouse gas emission statistics - emission inventories*” (Eurostat, 2018)²²;

È importante notare che, per entrambe le categorie di indicatori, i dati vengono raccolti dall’European Environment Agency (EEA). Tale ente, nel “*Manual for the EEA greenhouse gas data viewer*” (2017) e nel “*EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*” (2016), delinea le modalità computazionali di tali indicatori. Dall’analisi di questo processo di contabilizzazione emerge un’importante particolarità: le emissioni inquinanti, in base alla classificazione settoriale fornita dall’Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), sono differenziate per singoli comparti industriali. Per gli scopi di questa ricerca, i dati selezionati fanno riferimento alle emissioni inquinanti derivanti dal settore energetico che sono codificate nell’inventario Eurostat (2018) sotto la voce “*Energy production and distribution*”. Sono state ignorate le altre fonti naturali e antropogeniche in quanto il presente studio è orientato ad analizzare il trend delle emissioni con riferimento esclusivo al comparto elettrico. Tale strategia è adottata anche da York e McGee (2017).

E’ importante, in questo contesto, comprendere il processo sottostante alla generazione delle sostanze inquinanti analizzate e individuarne gli effetti sulla salute umana e l’ecosistema. Se i gas serra sono ritenuti alla base dell’aumento del surriscaldamento globale e dei cambiamenti climatici, gli altri tre *polluters* presentano delle peculiarità specifiche che li differenziano dai primi. Oltre alle fonti naturali di generazione, una prima caratteristica distintiva riguarda la localizzazione degli effetti. In tal senso, Roca *et al.* (2001) fanno un’importante distinzione secondo cui le emissioni inquinanti, diverse dai gas serra, non sono dei fenomeni globali ma, piuttosto, locali o regionali. Inoltre, le emissioni di gas serra non incidono direttamente sulla salute umana ma, indirettamente, attraverso la loro influenza sull’atmosfera terrestre. Di contro, gli *air polluters* influenzano direttamente l’ecosistema e possono essere molto pericolosi per la salute umana.

Gli ossidi di azoto (NO_x) e di zolfo (SO_x) sono «*an important component of acidification and, together with NMVOC, is a precursor of the formation of*

²¹ Cfr. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics.

²² Cfr. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Air_pollution_statistics_-_emission_inventories.

tropospheric ozone (O₃), which affects human and animal health and vegetation» (Roca *et al.*, 2001). Il settore dei trasporti su gomma, la produzione di energia nelle centrali termoelettriche e gli impianti di riscaldamento civile costituiscono le principali cause di tali emissioni in quanto vengono generate dai motori a combustione interna. Secondo il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2016)²³, gli ossidi di azoto, che comprendono il biossido di azoto (NO₂) e il monossido di azoto (NO), sono degli inquinanti che generano effetti negativi sulla salute umana e contribuiscono in maniera significativa ai fenomeni dello smog fotochimico e delle piogge acide. Gli ossidi di zolfo (SO_x), invece, comprendono l’anidride solforosa (SO₂) e l’anidride solforica (SO₃). Essi sono principalmente causati dai processi di combustione nelle centrali termoelettriche, dalle raffinerie, dagli impianti di riscaldamento e dal traffico veicolare. Entrambe le categorie di ossidi (azoto e zolfo) sono molto correlate perché le loro fonti naturali sono rinvenibili nelle eruzioni vulcaniche e negli incendi. Inoltre, la loro diffusione ha effetti soprattutto negativi sulle patologie cardio-respiratorie.

I particolati sospesi (*particulate matter*), comunemente chiamati polveri sottili, rappresentano uno degli inquinanti maggiormente pericoloso per salute umana. Le principali fonti antropiche sono strettamente connesse al riscaldamento domestico e agli inceneritori. Essi sono classificati, in funzione della loro dimensione, in particolato grossolano e particolato fino:

- ✓ particolato di dimensioni superiori ai 10 µm (Particolato grossolano);
- ✓ particolato con diametro inferiore a 10 µm (PM 10);
- ✓ particolato con diametro inferiore a 2.5 µm (PM 2.5);

In funzione della disponibilità dei dati, nell’ambito di questa ricerca sono state analizzate le particelle con diametro inferiore a 2,5 micrometri (PM 2.5).

2.4.2-Variabili esplicative

La selezione delle variabili è stata ovviamente influenzata dalla disponibilità dei dati e dalla rassegna della letteratura. Per comprendere meglio i modelli è necessario

²³ Cfr. <http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>.

spiegare in modo più approfondito il significato delle variabili esplicative analizzate. Nei modelli stimati di seguito, le principali variabili sono rappresentate dagli indicatori *energy-related* e da alcuni elementi di natura socio-economica.

Per quanto attiene agli indicatori *energy-related* di maggior interesse (*RES_E*, *NoComb*, *Comb* e *Fossil*) i dati sono stati ottenuti dai Bilanci Energetici Nazionali forniti dalla Commissione Europea²⁴. Al fine di tener conto delle caratteristiche territoriali dei mercati elettrici (Marques *et al.*, 2010; Jenner *et al.*, 2012), tutte le variabili sono definite come la quantità di energia elettrica generata da un determinata fonte in percentuale dell'energia elettrica totale. Esse, in accordo con Santana de Souza *et al.* (2018), sono espresse in forma logaritmica. Specificatamente, sono stati costruiti quattro differenti indicatori:

- ✓ *Fossil*: quota di energia elettrica generata da gas, petrolio e carbone;
- ✓ *RES_E*: quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili;
- ✓ *NoComb*: quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili;
- ✓ *Comb*: quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili combustibili;

Tutte le variabili sono definite come produzione elettrica lorda (*gross electricity generation*). Secondo l'ultimo rapporto Eurostat (2018), tale indicatore «*refers to the process of producing electrical energy. It is the total amount of electrical energy produced by transforming other forms of energy, for example nuclear or wind power. It is commonly expressed in gigawatt hours (GWh) i.e. 1 billion (10⁹) watt-hours. Total gross electricity generation covers gross electricity generation in all types of power plants. The gross electricity generation at plant level is defined as the electricity measured at the outlet of the main transformers, i.e. including the amount of electricity used in the plant auxiliaries and in the transformers*» (Eurostat, "Energy Glossary", 2018).

Al fine di ottenere stime più consistenti sono valutate alcune variabili aggiuntive di controllo che potrebbero costituire dei determinanti potenziali delle emissioni atmosferiche. In tal caso, la letteratura esaminata ci suggerisce che il fenomeno

²⁴Cfr. <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/country>.

dell'inquinamento atmosferico è influenzato dalle caratteristiche socio-economiche degli stati osservati. Pertanto sono analizzati:

- ✓ I consumi elettrici per abitante (*Electcons*)
- ✓ La densità demografica (*Popdensity*);
- ✓ Le importazioni nette di energia elettrica (*NetImport*);

I consumi elettrici pro capite sono stati ottenuti dalla banca dati della U. S. Energy Information Administration (EIA) e sono espressi in Megawattora (MWh) per abitante. Questa variabile è utilizzata come indicatore del livello di sviluppo di un sistema economico (Carley, 2009; Marques et al., 2010; Shrimali e Kniefel, 2011; Nicolini e Tavoni, 2017). Nella letteratura scientifica, si ha un certo grado di uniformità sull'effetto ambientale associato all'intensità energetica: un aumento dei consumi causa maggiori emissioni inquinanti di gas serra (Zhang e Cheng, 2009). Tuttavia, il loro effetto sui principali contaminanti atmosferici, come l'ossido di zolfo o i particolati sospesi, è stato scarsamente esplorato. Inoltre, in accordo con gli obiettivi del presente lavoro, è importante valutare l'effetto produzione delle risorse energetiche analizzate controllando anche l'effetto consumo.

Per quanto attiene alla variabile espressione della densità demografica (*PopDensity*), definita come il numero di persone per km² di superficie, i dati sono stati ottenuti da Eurostat. La densità della popolazione può avere effetti controversi sulla qualità ambientale: «*a negative impact, in fact, is noted because densely populated countries use less energy for transportation per capita than more sparsely populated countries. Positive effects on pollution can, on the other hand, be due to more intense consumption of households and production sector*» (Castiglione et al., 2012). Pertanto, si potrebbero registrare effetti negativi (Selden e Song, 1994) o positivi (Vincent, 1997) sulla qualità ambientale. Altri autori non hanno, invece, riscontrato alcun effetto sulle emissioni inquinanti di biossido di zolfo, particolati sospesi e biossido di azoto (Baycan, 2013).

Al fine di analizzare dettagliatamente la conformazione energetica del campione analizzato, l'ultima variabile analizzata fa riferimento alle importazioni nette di energia elettrica. Essa è misurata in *million tonnes of oil equivalent* (Mtoe) e rappresenta un indicatore strettamente correlato al fenomeno della *Energy Dependence* (Omri e Nuyen,

2014). Le importazioni nette di energia elettrica rappresentano un indicatore ottimale del grado di apertura commerciale nel mercato elettrico di un paese. In particolare, esprimono il grado di delocalizzazione produttiva degli impianti di generazione di energia elettrica.

La tabella sottostante contiene una descrizione sintetica del significato e delle fonti informative delle variabili analizzate.

Tabella 2.2- Definizione delle variabili e fonte dei dati

Variabili	Definizione	Fonte
<i>GHG</i>	Gas serra in tonnellate per abitante e derivanti dal settore <i>public electricity and heat production</i>	Eurostat (2018)
<i>NO_x</i>	Ossidi di azoto in tonnellate per abitante e derivanti dal settore <i>Energy production and distribution</i>	Eurostat (2018)
<i>SO_x</i>	Ossidi di zolfo in tonnellate per abitante e derivanti dal settore <i>Energy production and distribution</i>	Eurostat (2018)
<i>PM 2.5</i>	Particolati sospesi in tonnellate per abitante e derivanti dal settore <i>Energy production and distribution</i>	Eurostat (2018)
<i>FOSSIL</i>	Quota di energia elettrica generata da gas, petrolio e carbone	Commissione Europea, Bilanci Energetici Nazionali
<i>RES_E</i>	Quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili	Commissione Europea, Bilanci Energetici Nazionali
<i>NoComb</i>	Quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili	Commissione Europea, Bilanci Energetici Nazionali
<i>Comb</i>	Quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili combustibili	Commissione Europea, Bilanci Energetici Nazionali
<i>Electrcons</i>	Consumi elettrici pro capite in Megawattora (MWh)	U.S. Information Energy Administration (EIA)
<i>Popdensity</i>	Numero di persone per Km ² di superficie	Eurostat (2018)
<i>NetImport</i>	Importazioni nette di energia elettrica in Mtoe	Commissione Europea, Bilanci Energetici Nazionali

2.4.3- Statistiche descrittive

Per comprendere meglio i modelli stimati è stata fatta una breve analisi calcolando, per tutte le variabili, le principali statistiche descrittive. I valori ottenuti sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 2.3- Statistiche descrittive

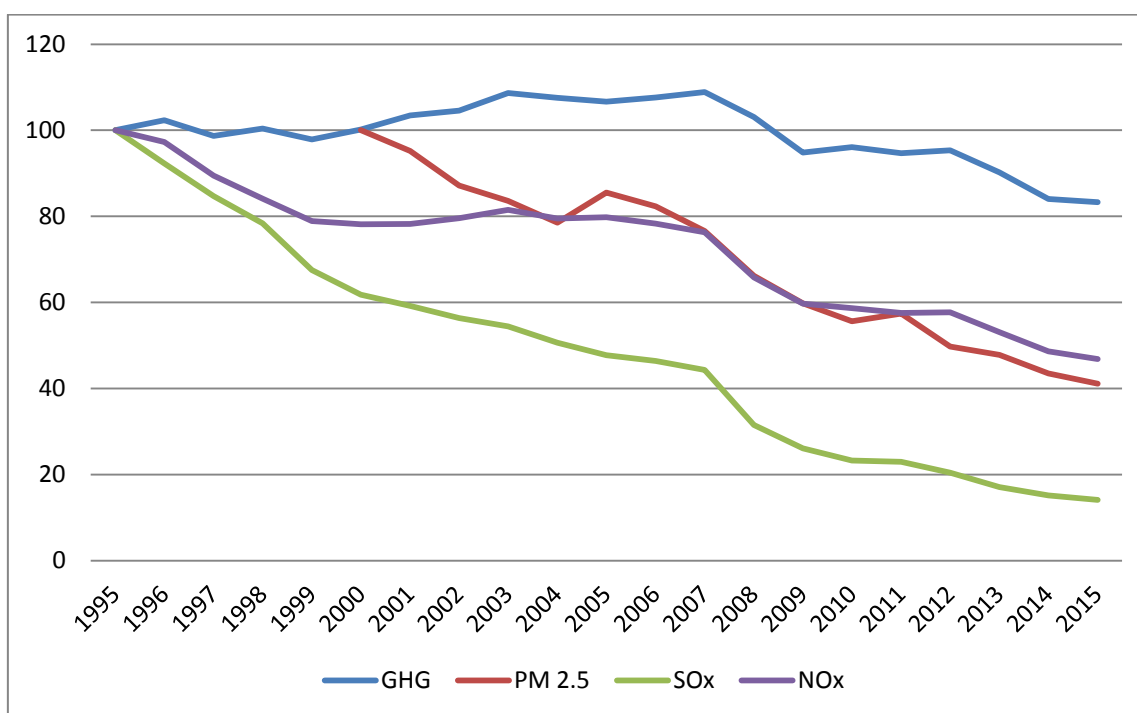
<i>Variabile</i>	<i>Obs.</i>	<i>Media</i>	<i>Std. Dev.</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>GHG</i>	588	2.893693	1.967277	0.200073	11.26442
<i>ln(GHG)</i>	588	0.837589	0.69846	-1.60907	2.421649
<i>NO_x</i>	588	0.005298	0.003449	0.000165	0.024121
<i>ln(NO_x)</i>	588	-5.4881	0.7624	-8.7083	-3.72468
<i>SO_x</i>	588	0.015816	0.02058	7.29E-06	0.135078
<i>ln(SO_x)</i>	588	-5.10755	1.762665	-11.8292	-2.0019
<i>PM2.5</i>	448	0.000303	0.000712	0	0.009011
<i>ln(PM2.5)</i>	448	-8.552	1.135718	-12.2991	-4.70927
<i>Import</i>	588	0.807636	0.986614	0	4.889
<i>Export</i>	588	0.810651	1.334894	0	7.334
<i>NetImpot</i>	588	0.133476	1.391658	-6.623	4.382
<i>Electrcons</i>	588	5.859763	3.2179	1.840444	16.58808
<i>ln(Electrcons)</i>	588	1.648732	0.472766	0.610007	2.808684
<i>NoComb</i>	588	0.199583	0.200782	0	0.814672
<i>ln(NoComb)</i>	563	-2.26701	1.521082	-8.44505	-0.20497
<i>Comb</i>	588	0.024894	0.03324	0	0.172688
<i>ln(Comb)</i>	512	-4.43916	1.626702	-10.8124	-1.75627
<i>RES_E</i>	588	0.224508	0.208753	0	0.827799
<i>ln(RES_E)</i>	563	-2.01282	1.324786	-8.44505	-0.18898
<i>Fossil</i>	588	0.576758	0.277383	0.011786	1
<i>ln(Fossil)</i>	588	-0.74884	0.775171	-4.44088	0
<i>PopDensity</i>	588	548.269	1061.697	15.0786	5578.853
<i>ln(PopDensity)</i>	578	4.67147	0.879037	2.819556	7.207568

Analizzando media e deviazione standard è possibile osservare che le quattro variabili dipendenti non registrano una forte variabilità tra i paesi analizzati. Il valore

medio per le emissioni di gas serra (GHG) è di 2.89 tonnellate pro capite. Tali emissioni variano da un massimo di 11.26 tonnellate pro capite, registrato in Estonia nel 2013, ad un minimo di 0.2 tonnellate, registrato in Lussemburgo nel 1996. Per quanto attiene agli altri tre indicatori ambientali, il valore medio per le emissioni di ossidi di azoto si assesta a 0.0052 tonnellate pro capite, a 0.015 per le emissioni di ossidi di zolfo e a 0.0003 per i particolati sospesi. Il ruolo di eco-leader nelle emissioni di ossidi di azoto (NO_x) è assunto dal Lussemburgo, seguito da Francia e Italia. Di contro, i paesi con i più alti valori pro capite sono Grecia e Malta. Discorso simile vale per gli altri due *polluters*. Per quanto attiene alle emissioni di ossidi di zolfo (SO_x), i paesi eco-leader sono i paesi dell'Europa centrale (Lussemburgo e Austria) mentre, per le emissioni di particolati sospesi (PM 2.5) a Lussemburgo e Austria si aggiungono Olanda e Svezia. Di contro, i paesi con elevati tassi di inquinamento risultano collocati nell'Europa orientale (Bulgaria e Repubblica Ceca).

Il grafico sottostante riporta l'andamento indicizzato dei quattro indicatori ambientali, espressi in tonnellate, per i ventotto paesi analizzati.

Fig. 2.1- Andamento degli indicatori ambientali, UE-28, anni 1995-2015, (indice 1995=100).



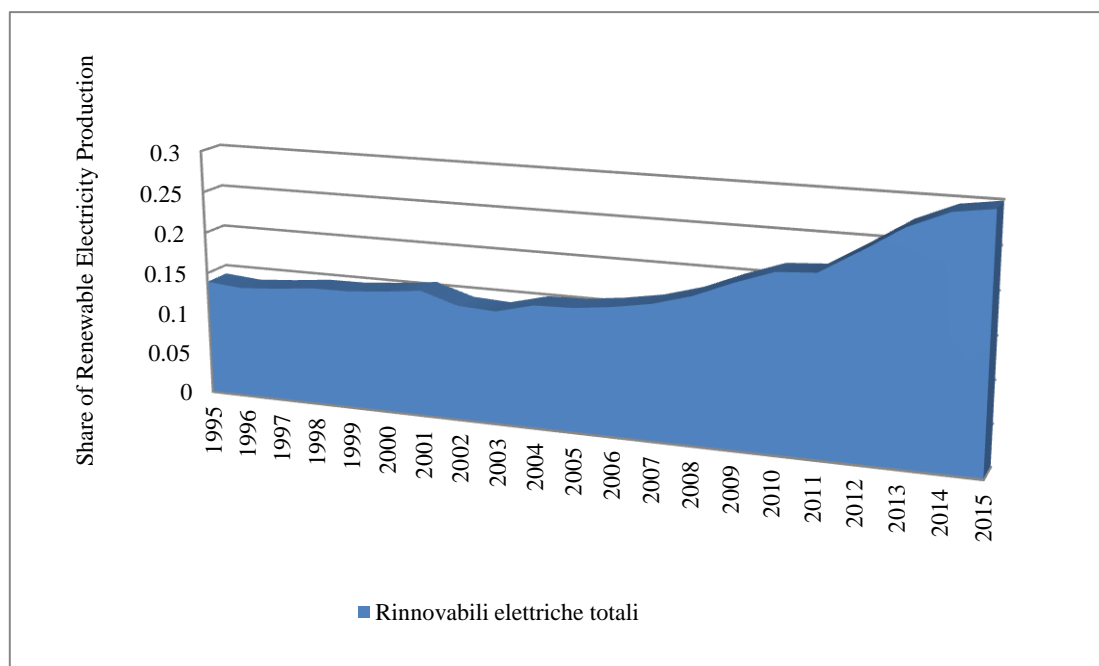
Fonte: Nostre elaborazioni su dati Eurostat (2018)

Dal grafico si può facilmente notare come, in media, tutti gli indicatori ambientali analizzati, con riferimento al comparto elettrico, abbiano assunto un trend decrescente nell'Unione Europea a 28 paesi. Soprattutto gli *air pollutants*, così come evidenziato nell'ultimo rapporto Eurostat (2018), sono le sostanze interessate da un trend in forte decrescita: *«for the last 27 years (1990 to 2016) the EU-28 recorded reductions in emissions of all air pollutants considered in this article. The biggest fall was reported for sulphur oxides (SO_x) which decreased by almost 90%, followed by non-methane volatile organic compounds (NMVOC) which declined by nearly 60 %. Emissions of nitrous oxides (NO_x) more than halved; while the smallest decrease was reported for ammonia (NH₃), emissions of which fell by roughly one quarter. Emissions of fine particulate matter (PM_{2.5}) decreased by roughly one third since the year 2000»* (Eurostat, “Air Pollution Emission Inventories”, 2018).

La sostanza inquinante con la maggior riduzione, nel periodo di tempo considerato, è stata l'ossido di zolfo (SO_x) con una diminuzione dell'85% rispetto al 1995. Questa speciale classifica vede in seconda posizione i particolati sospesi (-58%) seguiti dagli ossidi di azoto (-53%) e dai gas serra (-17%).

E' interessante analizzare il trend delle variabili *energy-related*. Dall'analisi dei valori massimi e minimi connessi alla disaggregazione tra fonti fossili e rinnovabili si osserva un dato importante: da un lato, vi sono paesi come Cipro (nel 2013) e Malta (nel 2015) in cui il processo di produzione di energia elettrica è fortemente alimentato da fonti fossili, dall'altro, paesi come Austria e Svezia che hanno fatto registrare una percentuale di energia elettrica generata da fonti rinnovabili molto elevata. Secondo gli ultimi dati disponibili, l'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili ha coperto il 28,8% del consumo lordo di energia elettrica nell'Unione Europea. Il grafico sottostante traccia l'andamento della quota di energie rinnovabili sulla produzione totale di energia elettrica nell'UE-28.

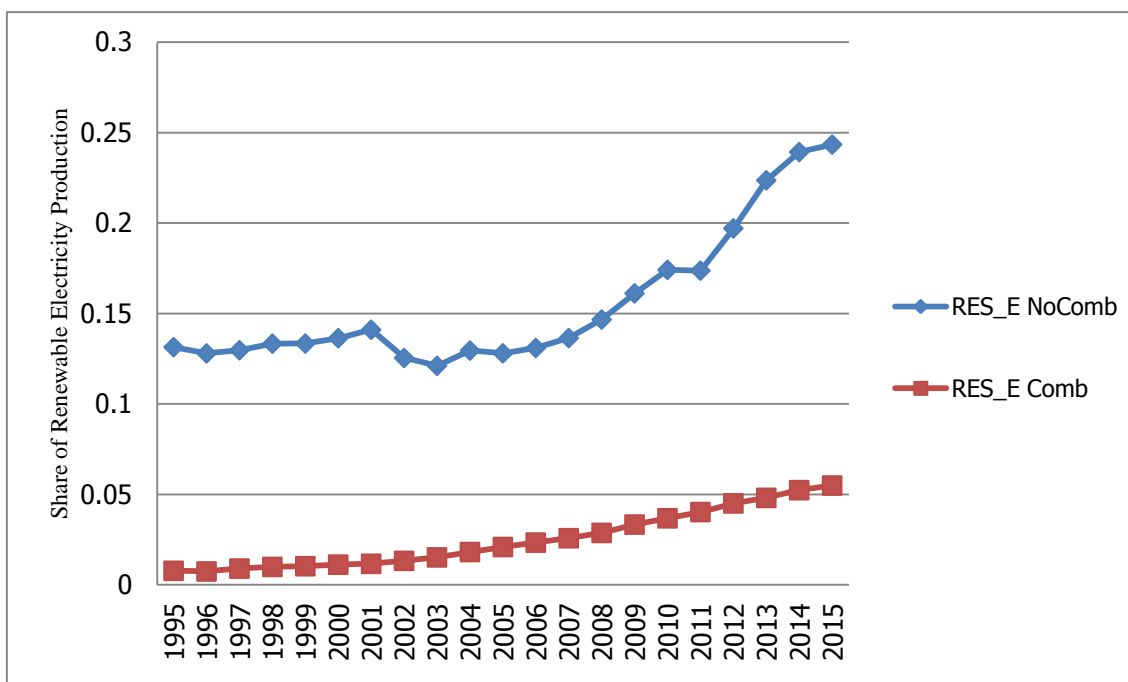
Fig. 2.2- Andamento delle rinnovabili elettriche totali in UE, anni 1995-2015



Fonte: Nostre elaborazioni su dati della Commissione Europea (2018)

La quota di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili si è almeno quintuplicata nel corso dell'ultimo decennio. Questo trend rispecchia in gran parte lo sviluppo di tre fonti energetiche rinnovabili: le turbine eoliche, l'energia solare e i biocombustibili solidi. Per quanto attiene alla disaggregazione delle rinnovabili elettriche in combustibili rinnovabili e non combustibili è, infatti, interessante osservare come entrambi gli indicatori stiano assumendo un trend crescente.

Fig. 2.2.1- Andamento delle rinnovabili elettriche disaggregate in UE, anni 1995-2015

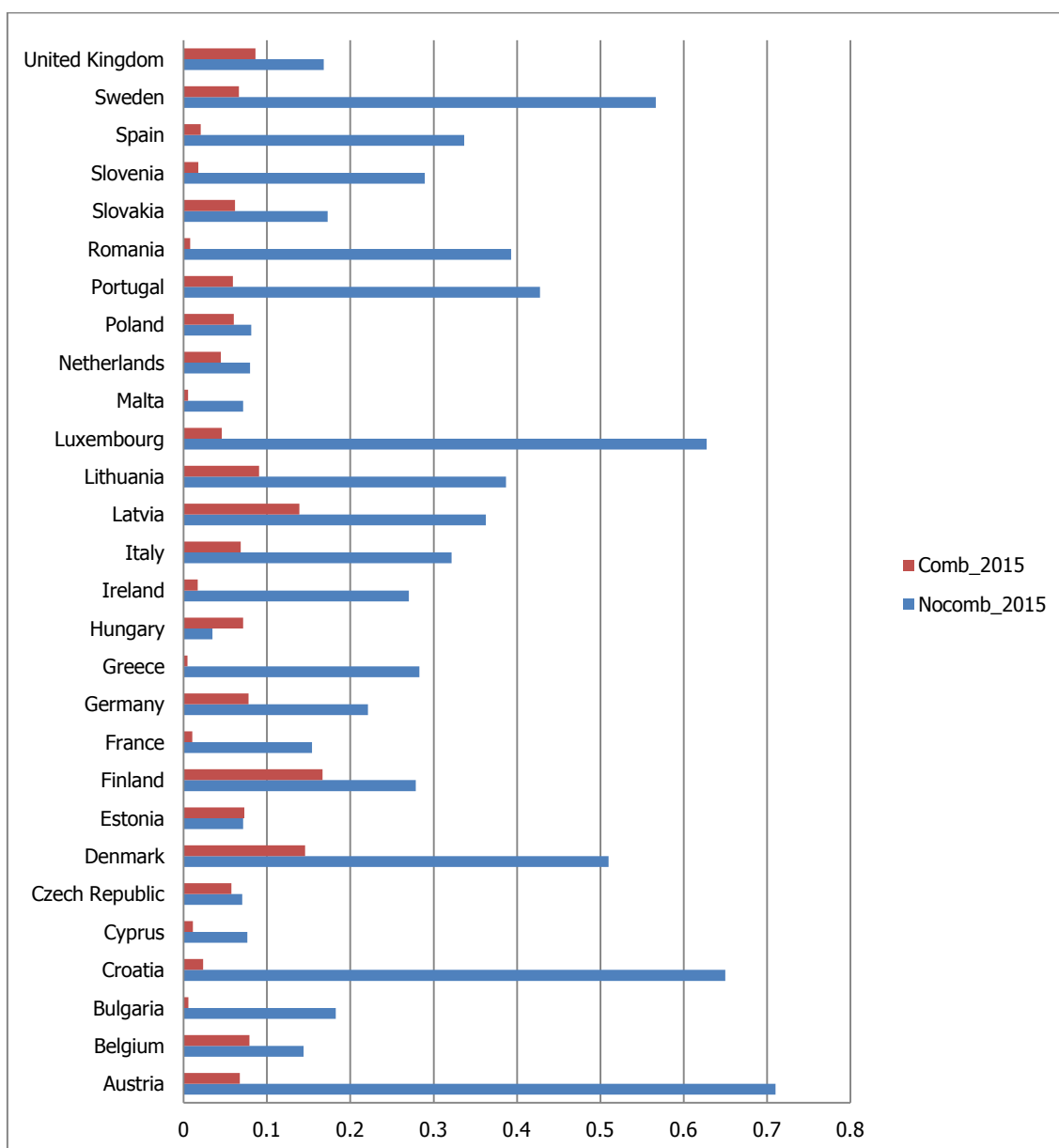


Fonte: Nostre elaborazioni su dati della Commissione Europea (2018)

Dal grafico si può facilmente notare come entrambe le tipologie di rinnovabili elettriche stiano assumendo un'importanza crescente all'interno del panorama energetico europeo con le rinnovabili non combustibili, prime fra tutte l'idroelettrico, che sono dominanti. Sebbene nel 2015 l'energia idroelettrica continuasse a essere la principale fonte di energia rinnovabile dell'UE-28 (38.4% del totale), la quantità di energia elettrica prodotta da questa fonte non si discostava molto dal livello registrato un decennio prima, considerando l'aumento totale della produzione pari al 6.5%. Al contrario, la quantità di energia elettrica derivante dai biocombustibili solidi e dalle turbine eoliche risulta di 2.5 e 4.3 volte superiore nel 2015 rispetto al 2005. La crescita dell'energia solare è stata ancora più pronunciata, passando da appena 1.5 TWh nel 2005 fino a superare l'energia geotermica nel 2008, raggiungendo un livello di 107.9 TWh nel 2015. In questo decennio, il contributo dell'energia solare nella produzione di tutta l'energia elettrica generata nell'UE-28 da fonti rinnovabili è cresciuto dallo 0.3 % all'11.2%. (Eurostat, "Renewable Energy Statistics", 2018). Tuttavia, eseguendo un'analisi *cross-country*, emergono importanti eterogeneità. Le rinnovabili non combustibili assumono un ruolo predominante in tutti i ventotto paesi analizzati. In tale

contesto, i paesi *renewable-leader*, sono rappresentati da Austria, Croazia, Svezia e Lussemburgo; nelle rinnovabili combustibili, invece, tale ruolo è assunto da Danimarca, Finlandia e Lituania. Il grafico sottostante confronta, per ogni paese europeo e per ogni indicatore energetico rinnovabile, la quota di energia elettrica derivante da fonti rinnovabili combustibili e non combustibili per il 2015.

Fig. 2.3- Confronto *cross-country* tra rinnovabili elettriche nei paesi UE, anno 2015

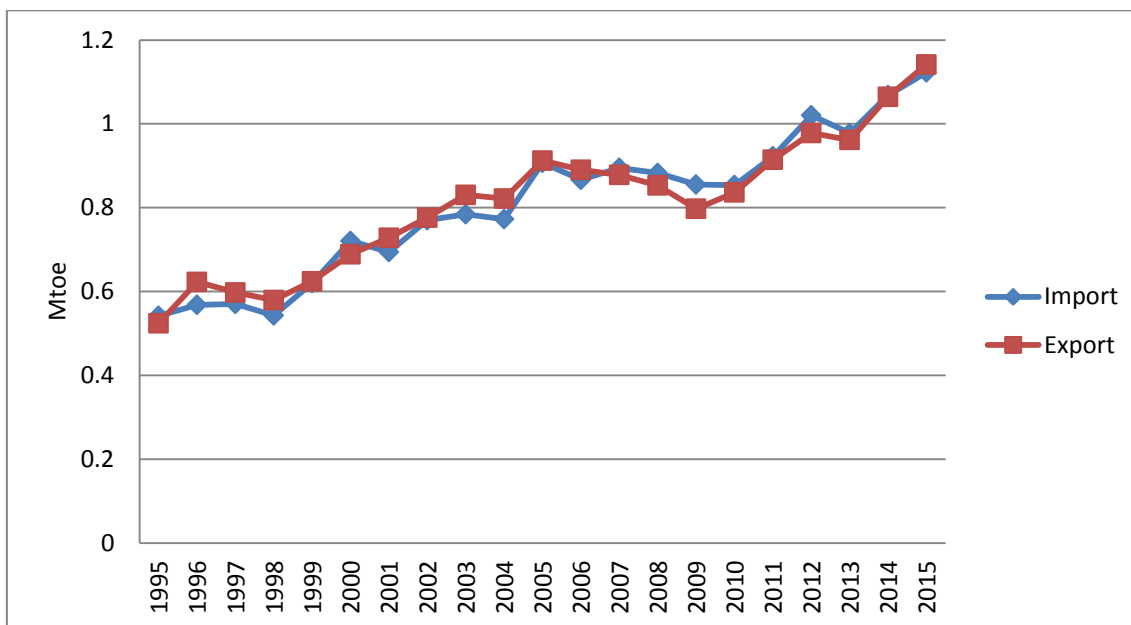


Fonte: Nostre elaborazioni su dati della Commissione Europea (2018)

Effettuando un confronto tra il 1995 e il 2015, si dimostra che in quasi tutti i paesi, entrambe le tipologie di rinnovabili elettriche hanno aumentato la loro quota sull'energia totale. La peculiarità che si osserva riguarda il fatto che in corrispondenza dei paesi che hanno fatto registrare una flessione nella quota di energia elettrica generata da rinnovabili combustibili corrisponde un aumento nella quota di rinnovabili non combustibili. Dal confronto tra il 2005 e il 2015, invece, emerge che Estonia, Belgio, Regno Unito e Polonia hanno registrato l'espansione più rapida nella quota di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili combustibili.

Gli indicatori energetici connessi al fenomeno della *Energy Dependence (Import e Export)*, ossia la dipendenza della domanda di energia dalle importazioni, meritano un particolare approfondimento. Tale fenomeno è stato ampiamente studiato in letteratura (Konstantinos e Ioannidis, 2007; Mazzoni, 2011; Papiez *et al.*, 2018). Molti autori sostengono che, seppur molto correlate, queste due variabili presentano degli andamenti opposti in quanto a maggiori importazioni dovrebbero corrispondere minori esportazioni e viceversa. Il paese con i tassi di dipendenza energetica più elevati è rappresentato dall'Italia che fa registrare un valore medio di 3.93 Mtoe negli anni considerati. Di contro, Francia e Germania e Svezia sono considerati paesi esportatori in quanto, in corrispondenza di ogni periodo temporale, le esportazioni superano le importazioni. Il grafico sottostante riporta il trend temporale delle due variabili d'interesse per l'Unione Europea nel suo complesso.

Fig. 2.4- Andamento importazioni ed esportazioni di energia elettrica nell'Unione Europea, in Mtoe, anni 1995-2015



Fonte: Nostre elaborazioni su dati Commissione Europea (2018)

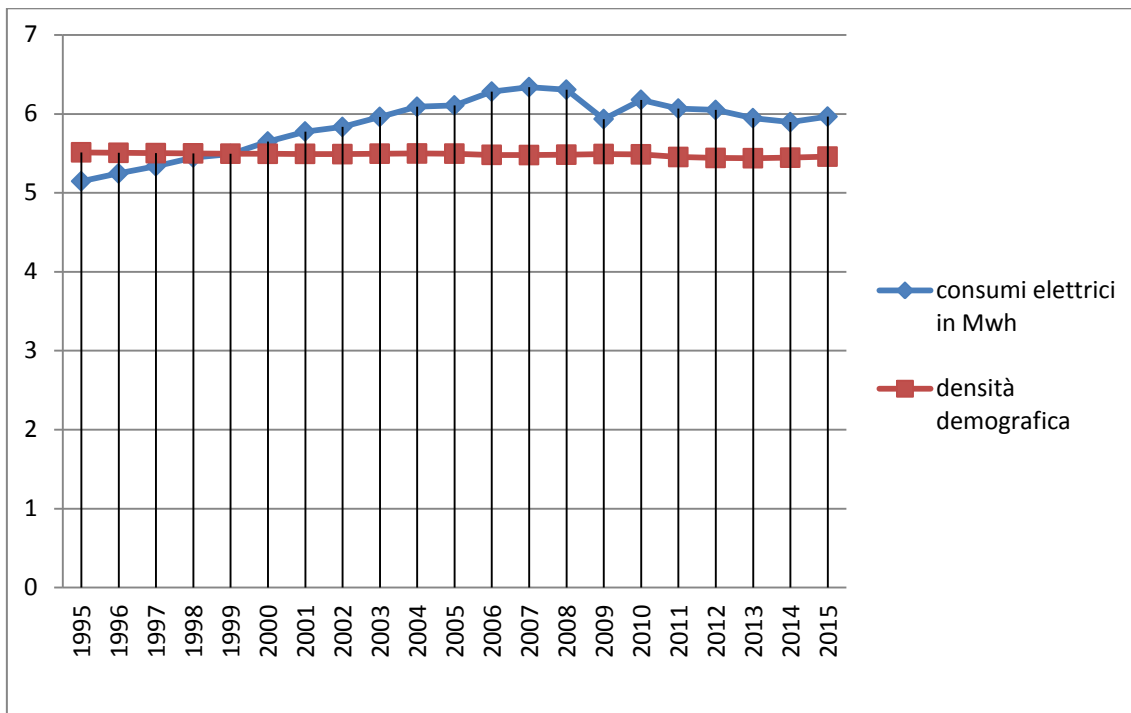
Come si può notare dal grafico, l'andamento delle importazioni e delle esportazioni di energia elettrica è caratterizzato da una notevole variabilità.

Le altre variabili suppletive di controllo (*Electrcons*, *PopDensity*) presentano delle statistiche descrittive dalle quali emergono importanti informazioni. Per quanto attiene alla densità demografica, essa presenta un elevato grado di dispersione nel campione analizzato: i valori minimi si registrano per i paesi nord-orientali (Finlandia e Svezia) mentre, il paese più densamente popolato è il Regno Unito.

Per l'intensità energetica (*Electrcons*), definita come consumi elettrici pro capite, si osservano i valori massimi nei paesi nord-orientali (Lituania, Lettonia e Polonia), Repubblica Ceca e Finlandia fanno registrare i valori minimi.

Prima di analizzare i risultati delle stime, occorre notare, che se da un lato, la densità demografica non subisce delle variazioni temporali significative, dall'altro, i consumi elettrici sembrano avere un trend in leggera decrescita, dimostrando come nel suo complesso l'UE stia diventando più attenta nei consumi elettrici pro capite.

Fig. 2.5 – Andamento dei consumi energetici pro capite (Mwh per abitante) e densità demografica (persone per km²) UE-28, anni 1995-2015.



Fonte: Nostre elaborazioni su dati Commissione Europea (2018)

2.5- Analisi dei risultati ottenuti: Modello 1

Come anticipato in precedenza, nella fase iniziale della ricerca, seguendo Dogan e Seker (2016), viene valutata l'efficacia ambientale delle due principali macrocategorie di tecnologie elettriche, rappresentate dalle rinnovabili e dalle fossili. A tal fine, prendendo come periodo temporale di riferimento gli anni 1995-2015, è stimata l'equazione che fa riferimento al *Modello 1*. L'equazione, stimata per quattro differenti indicatori ambientali (GHG, NO_x, PM 2.5, SO_x), presenta la seguente specificazione funzionale:

$$(1) \ln(E)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(RES_E)_{it} + \beta_2 \ln(Fossil)_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove:

- ✓ $\ln(E)$: logaritmo naturale dell'indicatore ambientale in termini pro capite che è rappresentato di volta in volta dal GHG, NO_x, SO_x, PM 2.5;

- ✓ $\ln (RES_E)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da tutte le rinnovabili elettriche (eolico, geotermico, solare, idroelettrico, biomassa) in relazione alla produzione totale;
- ✓ $\ln(Fossil)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone) in percentuale alla produzione totale;
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore della regressione;
- ✓ α : effetti fissi individuali;
- ✓ γ : effetti fissi temporali;
- ✓ $i = 1, \dots, 28$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);
- ✓ β_1, β_2 : parametri ignoti da stimare;

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti (tabelle 2.4.1-2.4.4) dove, ogni colonna, riporta una differente specificazione del modello stimato mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati e i principali risultati dei consueti test statistici.

Tabella 2.4.1 – Risultati delle stime del *Modello 1* per il *Kyoto basket* (GHG)

Variabile dipendente: <i>ln(GHG)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	1.066*** (0.042)	0.962*** (0.061)	1.048*** (0.093)	0.972*** (0.105)
<i>ln(RES_E)</i>	-0.108*** (0.008)	-0.102*** (0.012)	-0.110*** (0.012)	-0.105*** (0.015)
<i>ln(Fossil)</i>	0.605*** (0.037)	0.562*** (0.039)	0.595*** (0.035)	0.557*** (0.037)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	563	563	563	563
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.439	0.468	0.439	0.467
between	0.555	0.5568	0.557	0.558
overall	0.527	0.5323	0.529	0.534
Prob>F	0.0000 (208.55)	0.0000 (20.50)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (450.41)	0.000 (484.39)
Effetti temporali= 0	-	F(20, 513) = 4.22 Pr= 0.002	-	chi2(20) = 28.08 Pr= 0.1074
Effetti individuali= 0	F(27, 533) = 99.72 Pr= 0.0000	F(27, 513) = 100.94 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.4.2- Risultati delle stime del *Modello 1* per gli ossidi di azoto (NO_x)

Variabile dipendente: <i>ln(NO_x)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-5.378*** (0.066)	-4.982*** (0.091)	-5.433*** (0.116)	-5.003*** (0.134)
<i>ln(RES_E)</i>	-0.216*** (0.015)	-0.095*** (0.020)	-0.212*** (0.019)	-0.097*** (0.021)
<i>ln(Fossil)</i>	0.743*** (0.058)	0.650*** (0.058)	0.684*** (0.054)	0.623*** (0.053)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	563	563	563	563
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.405	0.498	0.405	0.498
between	0.445	0.437	0.446	0.419
overall	0.399	0.415	0.401	0.418
Prob>F	0.0000 (182.01)	0.0000 (20.50)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (373.35)	0.000 (526.74)
Effetti temporali=0	-	F(20, 513) = 4.71 Pr= 0.0000	-	chi2(20) = 99.10 Pr= 0.0000
Effetti individuali= 0	F(27, 533) = 55.72 Pr= 0.0000	F(27, 513) = 62.71 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.4.3- Risultati delle stime del *Modello 1* per gli ossidi di zolfo (SO_x)

Variabile dipendente: <i>ln(SO_x)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-5.807*** (0.140)	-5.991*** (0.149)	-5.879*** (0.295)	-4.244*** (0.309)
<i>ln(RES_E)</i>	-0.594*** (0.040)	-0.163*** (0.036)	-0.592*** (0.040)	-0.174*** (0.036)
<i>ln(Fossil)</i>	0.739*** (0.123)	0.482*** (0.095)	0.696*** (0.117)	0.496*** (0.092)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	563	563	563	563
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.362	0.675	0.362	0.675
between	0.270	0.222	0.272	0.227
overall	0.279	0.291	0.280	0.295
Prob>F	0.0000 (151.12)	0.0000 (48.36)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (310.78)	0.000 (1071.43)
Effetti temporali=0	-	F(20, 513) = 24.67 Pr= 0.0000	-	chi2(20) = 492.47 Pr= 0.0000
Effetti individuali= 0	F(27, 533) = 89.48 Pr= 0.0000	F(27, 513) = 171.41 Pr= 0.0000		

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.4.4- Risultati delle stime del *Modello 1* per i particolati sospesi (PM2.5)

Variabile dipendente: <i>ln(PM2.5)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-8.808*** (0.112)	-8.880*** (0.145)	-8.875*** (0.218)	-8.366*** (0.243)
<i>ln(RES_E)</i>	-0.317*** (0.032)	-0.164*** (0.040)	-0.316*** (0.032)	-0.166*** (0.038)
<i>ln(Fossil)</i>	0.506*** (0.053)	0.333*** (0.081)	0.436*** (0.056)	0.301*** (0.081)
<i>Time dummies</i>	-	SI	-	SI
Osservazioni	433	433	433	433
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.262	0.350	0.261	0.349
between	0.082	0.071	0.086	0.075
overall	0.091	0.111	0.096	0.115
Prob>F	0.0000 (71.43)	0.0000 (12.26)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (141.79)	0.000 (211.54)
Effetti temporali=0	-	F(15, 388) = 3.49 Pr= 0.0000	-	chi2(15) = 54.96 Pr= 0.0000
Effetti individuali= 0	F(27, 403) = 79.30 Pr= 0.0000	F(27, 388) = 86.29 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

I risultati di queste stime iniziali confermano i benefici ambientali derivanti dalle rinnovabili elettriche. Quest'ultime, in funzione della tipologia di sostanza inquinante analizzata, sembrano avere effetti differenti sulle emissioni inquinanti. Prima di analizzare dettagliatamente i risultati per i quattro differenti *polluters*, è necessario stabilire quale sia la metodologia di stima più appropriata per descrivere il fenomeno

oggetto di studio. A tal fine, è stato implementato il test di Hausman (1978) attraverso il quale convalida l'ipotesi nulla che i regressori non siano correlati con il termine d'errore della regressione: sotto l'ipotesi nulla lo stimatore *random effects* è consistente mentre, sotto l'ipotesi alternativa, i dati si adattano meglio allo stimatore *fixed effects*. Di seguito sono riportati i valori del test di Hausman che compara, per ogni differente indicatore ambientale, gli stimatori *fixed* e *random effects*:

- ✓ GHG: $\chi^2=5.87$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.0393$;
- ✓ NO_x : $\chi^2=7.84$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.0198$;
- ✓ PM 2.5: $\chi^2= 3.57$, $\text{Prob}>\chi^2= 0.168$;
- ✓ SO_x : $\chi^2= 1.39$; $\text{Prob}>\chi^2= 0.499$;

In tutte le specificazioni stimate, i risultati del test di Hausman, ad eccezione dei modelli con variabile dipendente le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e di gas serra (GHG), forniscono evidenza empirica favorevole allo stimatore *random effects*. L'ipotesi alternativa, secondo cui il modello *fixed effects* è appropriato, è rigettata per tutte le altre equazioni stimate.

Per quanto attiene al *Kyoto basket* (GHG), i risultati delle stime ci suggeriscono che ad un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili è associata una riduzione nelle emissioni di gas serra che varia dallo 0.108% (*fixed effects*) allo 0.11% (*random effects*). L'effetto rimane pressoché simile quando sono controllati gli effetti temporali. Le regressioni riportate nelle colonne (2) e (3) comprendono, infatti, gli effetti fissi temporali. In tal caso, ad un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili corrisponde una riduzione dello 0.102% (*fixed effects*) e dello 0.105% (*random effects*) nelle emissioni di gas serra.

In linea con i risultati del *Kyoto basket*, le regressioni stimate per i particolati sospesi (PM 2.5), gli ossidi di azoto (NO_x) e gli ossidi di zolfo (SO_x) confermano come l'aumento della quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili presenti un coefficiente negativo e statisticamente significativo. Inoltre, l'ipotesi nulla che le variabili binarie temporali siano nulle può essere rigettata ad un livello di significatività dell'1%. L'elasticità ambientale delle rinnovabili elettriche, considerando la validità

degli effetti fissi temporali e i risultati del test di Hausman, varia in funzione delle sostanze analizzate. Ad un livello di significatività dell'1%:

- Per gli ossidi di zolfo (SO_x) un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili corrisponde una riduzione dello 0.174% (*random effects*) delle emissioni;
- Per gli ossidi di azoto (NO_x) un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili corrisponde una riduzione dello 0.095% (*fixed effects*) delle emissioni;
- Per i particolati sospesi (PM2.5) un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili corrisponde una riduzione dello 0.166% (*random effects*) delle emissioni;

In accordo con la maggioranza della letteratura, la produzione di energia elettrica derivante da fonti fossili fa registrare un effetto positivo su tutti i *polluters* esaminati. In modo particolare, confrontando i quattro indicatori ambientali, un aumento dell'1% nel rapporto tra le tecnologie a combustione fossile e la produzione totale di elettricità genera un aumento delle emissioni pari a 0.592% (GHG), 0.650% (NO_x), 0.301% (PM 2.5) e 0.496% (SO_x).

2.5.1- Analisi dei risultati ottenuti: Modello 2

Al fine di verificare empiricamente le potenzialità ambientali disaggregate delle tecnologie rinnovabili elettriche viene stimato un ulteriore modello di regressione che tiene conto della tipologia di fonte energetica rinnovabile utilizzata nei processi di trasformazione. Come anticipato, le rinnovabili elettriche si distinguono in rinnovabili combustibili (biomassa) e rinnovabili non combustibili (solare, eolica, geotermica e idrica).

Pertanto, il *Modello 1*, viene ora modificato introducendo la distinzione tra energia elettrica prodotta da rinnovabili combustibili e rinnovabili non combustibili. In questo caso il *Modello 2* presenta la seguente forma funzionale:

$$(2) \ln(E)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(RES_E)_{hit} + \beta_2 \ln(Fossil)_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove:

- ✓ $\ln(E)$: logaritmo naturale dell'indicatore ambientale in termini pro capite (GHG, NO_x, SO_x, PM 2.5);
- ✓ $\ln(RES_E)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata dalla risorsa rinnovabile h (combustibile o non combustibile) in relazione alla produzione totale;
- ✓ $\ln(Fossil)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone) in relazione alla produzione totale;
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore della regressione;
- ✓ α : effetti fissi individuali;
- ✓ γ : effetti fissi temporali;
- ✓ $i = 1, \dots, 28$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);

Poiché la caratteristica distintiva di tale modello riguarda, dunque, la disaggregazione delle rinnovabili elettriche in due macrocategorie, le variabili che si riferiscono a tali tipologie di risorse energetiche sono così definite:

- ✓ $\ln(Nocomb)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da rinnovabili non combustibili (eolico, geotermico, solare, idroelettrico) in relazione alla produzione totale;
- ✓ $\ln(Comb)$: logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da rinnovabili combustibili (biomassa) in relazione alla produzione totale;

La specificazione stimata del *Modello 2* presenta, dunque, la seguente forma funzionale:

$$(3) \ln(E)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(NoComb)_{it} + \beta_2 \ln(Comb)_{it} + \beta_3 \ln(Fossil)_{it} + \varepsilon_{it}$$

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati ed i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 2.5.1- Risultati delle stime del *Modello 2* per il *Kyoto basket* (GHG)

Variabile dipendente: <i>ln(GHG)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	1.119*** (0.050)	0.738*** (0.079)	1.092*** (0.099)	0.726*** (0.114)
<i>ln(NoComb)</i>	-0.082*** (0.005)	-0.083*** (0.006)	-0.087*** (0.006)	-0.088*** (0.008)
<i>ln(Comb)</i>	-0.016*** (0.004)	-0.055*** (0.006)	-0.014*** (0.005)	-0.047*** (0.009)
<i>ln(Fossil)</i>	0.728*** (0.037)	0.735*** (0.038)	0.709*** (0.036)	0.707*** (0.036)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.541	0.601	0.541	0.605
between	0.515	0.489	0.520	0.497
overall	0.501	0.488	0.512	0.497
Prob>F	0.0000 (189.14)	0.0000 (30.79)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (592.10)	0.0000 (721.29)
Effetti temporali=0	-	F(20, 461) = 3.77 Pr= 0.0000	-	chi2(20) = 70.60 Pr= 0.0000
Effetti individuali= 0	F(27, 481) = 109.77 Pr= 0.0000	F(27, 461) = 122.91 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.5.2- Risultati delle stime del *Modello 2* per gli ossidi di azoto (NO_x)

Variabile dipendente: <i>ln(NO_x)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-5.622*** (0.080)	-5.181*** (0.132)	-5.679*** (0.128)	-5.185*** (0.169)
<i>ln(NoComb)</i>	-0.124*** (0.014)	-0.100*** (0.014)	-0.124*** (0.013)	-0.100*** (0.013)
<i>ln(Comb)</i>	-0.094*** (0.008)	-0.068*** (0.009)	-0.093*** (0.008)	-0.065*** (0.010)
<i>ln(Fossil)</i>	0.803*** (0.060)	0.700*** (0.063)	0.742*** (0.056)	0.661*** (0.058)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.477	0.520	0.477	0.526
between	0.414	0.404	0.415	0.404
overall	0.384	0.403	0.386	0.406
Prob>F	0.0000 (146.51)	0.0000 (21.74)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (445.14)	0.0000 (514.92)
Effetti temporali=0	-	F(20, 461) = 2.06 Pr= 0.0048	-	chi2(20) = 45.56 Pr= 0.0009
Effetti individuali= 0	F(27, 461) = 62.94 Pr= 0.0000	F(27, 481) = 64.38 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.5.3- Risultati delle stime del *Modello 2* per gli ossidi di zolfo (SO_x)

Variabile dipendente: <i>ln(SO_x)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-6.503*** (0.146)	-4.525*** (0.209)	-6.547*** (0.279)	-4.472*** (0.352)
<i>ln(NoComb)</i>	-0.154*** (0.014)	-0.082** (0.018)	-0.163*** (0.013)	-0.089*** (0.016)
<i>ln(Comb)</i>	-0.162*** (0.016)	-0.076** (0.020)	-0.161*** (0.016)	-0.083*** (0.020)
<i>ln(Fossil)</i>	0.993*** (0.109)	0.720*** (0.100)	0.977*** (0.104)	0.725*** (0.097)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.540	0.683	0.539	0.683
between	0.311	0.169	0.318	0.189
overall	0.328	0.275	0.334	0.281
Prob>F	0.0000 (188.19)	0.0000 (43.27)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (574.92)	0.0000 (1003.96)
Effetti temporali=0	-	F(20, 461) = 10.45 Pr= 0.0000	-	chi2(20) = 206.50 Pr= 0.0000
Effetti individuali= 0	F(27, 481) = 105.07 Pr= 0.0000	F(27, 461) = 153.03 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.5.4- Risultati delle stime del *Modello 2* per i particolati sospesi (PM 2.5)

Variabile dipendente: <i>ln(PM2.5)</i>	<i>Fixed Effects</i>		<i>Random Effects</i>	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Costante</i>	-9.246*** (0.134)	-8.427*** (0.207)	-9.323*** (0.231)	-8.456*** (0.287)
<i>ln(NoComb)</i>	-0.228*** (0.023)	-0.193*** (0.024)	-0.225*** (0.021)	-0.190*** (0.023)
<i>ln(Comb)</i>	-0.128*** (0.026)	-0.118*** (0.034)	-0.130*** (0.025)	-0.120*** (0.033)
<i>ln(Fossil)</i>	0.499*** (0.052)	0.321*** (0.068)	0.433*** (0.055)	0.289*** (0.066)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	413	413	413	413
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.313	0.374	0.312	0.374
between	0.092	0.074	0.098	0.781
overall	0.113	0.115	0.120	0.119
Prob>F	0.0000 (57.99)	0.0000 (12.19)	-	-
Prob > chi2	-	-	0.0000 (174.27)	0.0000 (222.78)
Effetti temporali=0	-	F(15, 367) = 2.39 Pr = 0.0026	-	chi2(15) = 37.40 Pr = 0.0011
Effetti individuali= 0	F(27, 382) = 78.55 Pr= 0.0000	F(27, 367) = 83.41 Pr= 0.0000	-	-

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Anche in questo caso al fine di individuare la metodologia di stima appropriata è stato eseguito il test di Hausman che compara, per ogni differente indicatore ambientale, le specificazioni funzionali che fanno riferimento all'equazione (3). I risultati del test di Hausman sono i seguenti:

- ✓ GHG: $\chi^2 = 8.53$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0363$;
- ✓ NO_x : $\chi^2 = 9.47$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0237$;
- ✓ SO_x : $\chi^2 = 5.34$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.1483$;
- ✓ PM 2.5: $\chi^2 = 3.45$, $\text{Prob} > \chi^2 = 0.327$;

Il test di Hausman per il secondo modello ci fornisce dei risultati controversi che variano in funzione della sostanza inquinante analizzata. Dai risultati del test è possibile notare che, ad eccezione dei modelli con variabile dipendente le emissioni di polveri sottili (PM 2.5) e le emissioni di ossido di zolfo (SO_x), non è possibile accettare l'ipotesi nulla secondo cui gli effetti stocastici non siano correlati con i regressori. Pertanto, in linea con il *Modello 1*, lo stimatore *fixed effects* è il più efficiente per i modelli con variabile dipendente gli ossidi di azoto (NO_x) e i gas serra (GHG). Per le altre specificazioni funzionali lo stimatore più efficiente è quello con effetti *random*.

Complessivamente, i risultati econometrici contenuti nelle tabelle 2.5.1-2.5.4, che si propongono di valutare l'effetto ambientale disaggregato delle due categorie di rinnovabili elettriche (combustibili e non combustibili), dimostrano che in funzione della tipologia di indicatore ambientale esaminato, le due categorie di tecnologie elettriche sembrano avere un effetto dissimile. Per le emissioni di gas serra (GHG), di ossidi di zolfo (SO_x), gli ossidi di azoto (NO_x) e particolati sospesi (PM2.5) le rinnovabili non combustibili fanno registrare un'elasticità ambientale negativa e statisticamente significativa per tutte le specificazioni funzionali stimate. In particolare, considerando l'inferenza statistica sugli effetti temporali e i risultati del test di Hausman, all'aumentare dell'1% nella quota di energia elettrica generata da rinnovabili non combustibili corrisponde una riduzione dello 0.083% per il *Kyoto basket*, dello 0.100% per gli ossidi di azoto, dello 0.089% per gli ossidi di zolfo e dello 0.190% per i particolati sospesi. Il medesimo risultato si configura per le rinnovabili combustibili che fanno registrare le seguenti elasticità ambientali: 0.055% (GHG), 0.068% (NO_x), 0.083% (SO_x) e 0.120% (PM 2.5).

D'altro canto, come previsto, le tecnologie da fonti fossili (*Fossil*) sono positivamente correlate alle emissioni inquinanti. Per tutti gli indicatori ambientali analizzati, un aumento della quota di energia elettrica generata da fonti fossili fa registrare un'elasticità ambientale positiva: l'utilizzo di tali tecnologie energetiche genera un aumento delle emissioni inquinanti. Il valore più alto si registra per gli ossidi di zolfo (SO_x) e per gli ossidi di azoto (NO_x) mentre, il valore più basso è relazionato ai particolati sospesi (PM 2.5).

2.5.2- Analisi dei risultati ottenuti: Modello 3

Come anticipato nella presentazione del *Modello 3*, esplicitato nella forma funzionale dell'equazione (4), al fine di migliorare il *Modello 2* sono state incluse ulteriori variabili (*Z*) *time-variant* che potrebbero influenzare le emissioni inquinanti. L'effetto ambientale disaggregato delle rinnovabili elettriche viene controllato in funzione:

- ✓ della densità demografica (*PopDensity*), espressa come logaritmo naturale del numero di abitanti per Km² di superficie;
- ✓ dei consumi elettrici pro capite (*EnergyCons*), espressi come logaritmo naturale della quantità di energia elettrica consumata da ogni abitante espressa in Megawattora (MWh);
- ✓ delle importazioni nette di energia elettrica (*NetImport*), espresse come la somma algebrica tra importazioni ed esportazioni espresse in Mtoe (*Million Tonnes of Oil Equivalent*);

La specificazione dell'equazione stimata per il *Modello 3* assume la seguente forma funzionale:

$$(4) \ln(E)_{it} = \alpha_i + \gamma_t + \beta_1 \ln(\text{NoComb})_{it} + \beta_2 \ln(\text{Comb})_{it} + \beta_3 \ln(\text{Fossil})_{it} + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti (tabelle 2.6.1-2.6.4) dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche. Per semplicità

espositiva sono state riportate le metodologie di stima che, in funzione del test di Hausman, sono consistenti ed efficienti²⁵.

²⁵ I risultati del test di Hausman che compara, per ogni differente indicatore ambientale, gli stimatori *fixed* e *random effects* per il *Modello 3* sono riportati di seguito. GHG: chi2= 22.63, Prob>chi2= 0.0000; NO_x: chi2=15.54, Prob>chi2= 0.0008; PM 2.5: chi2= 4.52, Prob>chi2= 0.138; SO_x: chi2= 2.23; Prob>chi2= 0.539.

Tabella 2.6.1- Risultati delle stime del *Modello 3* per il Kyoto basket (GHG) e per gli ossidi di azoto (NO_x)

<i>Fixed Effects Regression</i>	(1)	(2)	(3)	(4)
Variabile dipendente	<i>ln(GHG)</i>	<i>ln(GHG)</i>	<i>ln(NO_x)</i>	<i>ln(NO_x)</i>
<i>Constante</i>	-5.848*** (0.991)	-2.974** (1.370)	-0.019 (1.673)	-4.286* (2.308)
<i>ln(NoComb)</i>	-0.088*** (0.014)	-0.083*** (0.014)	-0.114*** (0.013)	-0.098*** (0.014)
<i>ln(Comb)</i>	-0.034*** (0.010)	-0.037*** (0.013)	-0.070*** (0.012)	-0.060*** (0.013)
<i>ln(Fossil)</i>	0.760*** (0.035)	0.762*** (0.038)	0.850*** (0.029)	0.769*** (0.033)
<i>ln(PopDendity)</i>	0.886*** (0.085)	0.713*** (0.092)	-0.627 (0.312)	-0.045 (0.324)
<i>ln(Electcons)</i>	0.491*** (0.030)	0.435*** (0.032)	-0.408* (0.268)	-0.334 (0.274)
<i>NetImport</i>	-0.0109*** (0.001)	-0.0104*** (0.001)	-0.0155*** (0.002)	-0.0155*** (0.002)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.619	0.642	0.5237	0.555
between	0.012	0.051	0.174	0.4.6
overall	0.013	0.058	0.185	0.411
Prob>F	0.0000 (129.29)	0.0000 (31.62)	0.0000 (87.61)	0.0000 (21.96)
Effetti temporali=0	-	F(20, 458) = 3.50 Prob > F = 0.0256	-	F(20, 458) = 2.60 Prob > F = 0.0285

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.6.2- Risultati delle stime del *Modello 3* per gli ossidi di zolfo (SO_x) e i particolati sospesi (PM 2.5)

<i>Random Effects Regression</i>	(1)	(2)	(3)	(4)
Variabile dipendente	<i>ln(SO_x)</i>	<i>ln(SO_x)</i>	<i>ln(PM 2.5)</i>	<i>ln(PM 2.5)</i>
<i>Costante</i>	-0.653 (1.178)	-2.851** (1.266)	-6.888*** (0.932)	-6.426*** (0.992)
<i>ln(NoComb)</i>	-0.166*** (0.022)	-0.087*** (0.027)	-0.220*** (0.021)	-0.187*** (0.022)
<i>ln(Comb)</i>	-0.162*** (0.019)	-0.078*** (0.022)	-0.123*** (0.018)	-0.111*** (0.021)
<i>ln(Fossil)</i>	0.993*** (0.103)	0.785*** (0.098)	0.477*** (0.096)	0.349*** (0.106)
<i>ln(PopDendity)</i>	-0.367* (0.178)	-0.178 (0.196)	-0.406*** (0.120)	-0.326*** (0.125)
<i>ln(Electcons)</i>	-0.240 (0.279)	-0.185 (0.298)	-0.159 (0.279)	-0.189 (0.304)
<i>NetImport</i>	-0.0106*** (0.002)	-0.0115*** (0.002)	-0.0081** (0.004)	-0.0084** (0.004)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	512	512	413	413
Paesi	28	28	28	28
R ²				
within	0.557	0.689	0.324	0.378
between	0.297	0.256	0.329	0.331
overall	0.327	0.347	0.345	0.355
Prob > chi2	0.0000 (651.09)	0.0000 (1030.86)	0.0000 (192.99)	0.0000 (235.23)
Effetti temporali=0	-	chi2(20) = 168.46 Prob > chi2 = 0.0000	-	chi2(15) = 33.38 Prob > chi2 = 0.0042

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

I risultati econometrici dei modelli estesi (tabelle 2.6.1-2.6.4) dimostrano che il differenziale di produttività ambientale tra rinnovabili combustibili e non combustibili permane anche dopo aver controllato tale effetto per ulteriori determinanti delle emissioni inquinanti. In modo particolare, per le emissioni di gas serra (GHG) ad un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili corrisponde una riduzione dello 0.088% (senza effetti temporali) delle emissioni inquinanti. Di contro, un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili corrisponde una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.034% (senza effetti temporali). I risultati cambiano di poco quando si controllano gli effetti temporali: le elasticità ambientali sono pari a 0.083% (*NoComb*) e 0.037% (*Comb*).

Per quanto attiene agli *air polluters* i risultati delle stime testimoniano una maggiore produttività ambientale delle rinnovabili non combustibili. In particolare, ad un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili corrisponde:

- per gli ossidi di azoto (NO_x), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.114% (senza effetti temporali) e dello 0.098% (con effetti temporali);
- per gli ossidi di zolfo (SO_x), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.166% (senza effetti temporali) e dello 0.087% (con effetti temporali);
- per i particolati sospesi (PM 2.5), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.220% (senza effetti temporali) e dello 0.187% (con effetti temporali);

In funzione della tipologia di *polluter* esaminato, le tecnologie elettriche che sfruttano le rinnovabili combustibili registrano dei coefficienti negativi e statisticamente significativi. Le elasticità ambientali stimate, tuttavia, sono inferiori rispetto ai coefficienti stimati per le rinnovabili non combustibili. In particolare, ad un aumento dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili combustibili corrisponde:

- per i gas serra (GHG), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.034% (senza effetti temporali) e dello 0.037% (con effetti temporali);
- per gli ossidi di azoto (NO_x), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.070% (senza effetti temporali) e dello 0.060% (con effetti temporali);

- per gli ossidi di zolfo (SO_x), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.292% (senza effetti temporali) e dello 0.078% (con effetti temporali);
- per i particolati sospesi (PM 2.5), una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.123% (senza effetti temporali) e dello 0.111% (con effetti temporali);

La produzione di energia elettrica da fonti fossili è positivamente correlata alle emissioni inquinanti: per tutti gli indicatori ambientali, un aumento della quota di energia elettrica generata da fonti fossili fa registrare un'elasticità ambientale positiva e statisticamente significativa.

Le variabili addizionali di controllo sembrano avere un effetto dissimile sui *polluters* esaminati. Se per gli di ossidi di zolfo (SO_x), gli ossidi di azoto (NO_x) e particolati sospesi (PM2.5) la densità demografica non presenta alcun effetto statisticamente significativo, per le emissioni di gas serra (GHG) un aumento dell'1% nell'indicatore *Popdensity* genera un aumento delle emissioni inquinanti pari allo 0.886% (senza effetti temporali) e allo 0.0713% (con effetti temporali). Tale risultato è coerente con le stime realizzate da Baycan (2013) per l'Unione Europea a venticinque stati. L'evidenza empirica mostra un certo grado di eterogeneità anche per i consumi elettrici che sono positivi e statisticamente significati solo per le emissioni di gas serra.

Risultato omogeneo si configura, invece, per le importazioni nette di energia elettrica (*NetImport*):

- per i gas serra (GHG), un aumento delle importazioni nette genera una riduzione delle emissioni inquinanti dello 1.09% (senza effetti temporali) e dello 1.04% (con effetti temporali);
- per gli ossidi di azoto (NO_x), un aumento delle importazioni nette genera una riduzione delle emissioni inquinanti dello 1.55% (senza effetti temporali) e dello 1.55% (con effetti temporali);
- per gli ossidi di zolfo (SO_x), un aumento delle importazioni nette genera una riduzione delle emissioni inquinanti dello 1.06% (senza effetti temporali) e dello 1.15% (con effetti temporali);
- per i particolati sospesi (PM 2.5), un aumento delle importazioni nette genera una riduzione delle emissioni inquinanti dello 0.081% (senza effetti temporali) e dello 0.84% (con effetti temporali);

2.5.3- Controlli diagnostici

Prima di analizzare in dettaglio i risultati di tutti i modelli stimati è necessario eseguire alcuni controlli diagnostici e, eventualmente, correggere le minacce che potrebbero inficiare i risultati ottenuti.

Tabella 2.7.1- Matrice di correlazione per il Kyoto *basket* (GHG)

Variabili	$\ln(\text{GHG})$	$\ln(\text{RES_E})$	$\ln(\text{FOSSIL})$	$\ln(\text{NoComb})$	$\ln(\text{Comb})$	$\ln_{\text{popdensity}}$	$\ln(\text{Electrcons})$	NetImport
$\ln(\text{GHG})$	1							
$\ln(\text{RES_E})$	-0.575***	1						
$\ln(\text{FOSSIL})$	-0.0314	0.352***	1					
$\ln(\text{NoComb})$	-0.586***	0.977***	0.225***	1				
$\ln(\text{Comb})$	0.669***	-0.422***	-0.156***	-0.427***	1			
$\ln_{\text{popdensity}}$	-0.143**	-0.0815	-0.00245	-0.0515	0.273***	1		
$\ln(\text{Electrcons})$	0.0121	0.210***	0.541***	0.164***	-0.412***	-0.293***	1	
NetImport	0.0200***	0.00228	0.0122**	-0.00174	0.0438***	0.0282***	-0.00511	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 2.7.2- Matrice di correlazione per gli ossidi di azoto (NO_x)

Variabili	$\ln(\text{NOX})$	$\ln(\text{RES_E})$	$\ln(\text{FOSSIL})$	$\ln(\text{NoComb})$	$\ln(\text{Comb})$	$\ln_{\text{popdensity}}$	$\ln(\text{Electrcons})$	NetImport
$\ln(\text{NOX})$	1							
$\ln(\text{RES_E})$	-0.515***	1						
$\ln(\text{FOSSIL})$	0.561***	-0.422***	1					
$\ln(\text{NoComb})$	-0.488***	0.977***	-0.427***	1				
$\ln(\text{Comb})$	-0.228***	0.352***	-0.156***	0.225***	1			
$\ln_{\text{popdensity}}$	-0.0716	-0.0815	0.273***	-0.0515	-0.00245	1		
$\ln(\text{Electrcons})$	-0.197***	0.210***	-0.412***	0.164***	0.541***	-0.293***	1	
NetImport	0.00749	0.00228	0.0438***	-0.00174	0.0122**	0.0282***	-0.00511	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 2.7.3- Matrice di correlazione per gli ossidi di zolfo (SO_x)

Variabili	$\ln(\text{SO}_x)$	$\ln(\text{RES_E})$	$\ln(\text{FOSSIL})$	$\ln(\text{NoComb})$	$\ln(\text{Comb})$	$\ln_{\text{popdensity}}$	$\ln(\text{Electrcons})$	NetImport
$\ln(\text{SO}_x)$	1							
$\ln(\text{RES_E})$	-0.549***	1						
$\ln(\text{FOSSIL})$	0.370***	-0.422***	1					
$\ln(\text{NoComb})$	-0.492***	0.977***	-0.427***	1				
$\ln(\text{Comb})$	-0.461***	0.352***	-0.156***	0.225***	1			
$\ln_{\text{popdensity}}$	0.016	-0.0815	0.273***	-0.0515	-0.00245	1		
$\ln(\text{Electrcons})$	-0.473***	0.210***	-0.412***	0.164***	0.541***	-0.293***	1	
NetImport	-0.00047	0.00228	0.0438***	-0.00174	0.0122**	0.0282***	-0.00511	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 2.7.4- Matrice di correlazione per i particolati sospesi (PM 2.5)

Variabili	$\ln(\text{PM 2.5})$	$\ln(\text{RES_E})$	$\ln(\text{FOSSIL})$	$\ln(\text{NoComb})$	$\ln(\text{Comb})$	$\ln(\text{popdensity})$	$\ln(\text{Electrcons})$	NetImport
$\ln(\text{PM 2.5})$	1							
$\ln(\text{RES_E})$	-0.362***	1						
$\ln(\text{FOSSIL})$	0.158**	-0.399***	1					
$\ln(\text{NoComb})$	-0.330***	0.971***	-0.403***	1				
$\ln(\text{Comb})$	-0.285***	0.327***	-0.129**	0.178***	1			
$\ln(\text{popdensity})$	-0.392***	-0.110*	0.256***	-0.0776	-0.00586	1		
$\ln(\text{Electrcons})$	-0.255***	0.178***	-0.370***	0.133**	0.523***	-0.287***	1	
NetImport	-0.0077	0.00421	0.0419***	-0.00593	0.0158**	0.0262***	-0.00418	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Nonostante alcune variabili mostrino una correlazione statisticamente significativa, l'analisi del *variance inflation factor* (VIF) per tutti i modelli rileva l'assenza di multicollinearità. Di seguito sono riportati i valori del VIF, differenziati per *polluters* e per tutti i modelli stimati.

Modello 1:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{GHG})$, mean VIF=1.19
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{NO}_x)$, mean VIF=1.19
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{SO}_x)$, mean VIF=1.19
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{PM 2.5})$, mean VIF=1.18

Modello 2:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{GHG})$, mean VIF=1.36
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{NO}_x)$, mean VIF=1.36
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{SO}_x)$, mean VIF=1.36
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{PM 2.5})$, mean VIF=1.35

Modello 3:

- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{GHG})$, mean VIF=1.39
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{NO}_x)$, mean VIF=1.39
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{SO}_x)$, mean VIF=1.39
- ✓ Variabile dipendente $\ln(\text{PM 2.5})$, mean VIF=1.43

Nell'ambito della metodologia empirica adottata potrebbero sussistere alcuni problemi econometrici che renderebbero le stime distorte. Tali problematiche, in

accordo con Dogan e Seker (2016), sono connesse all'eteroschedasticità, all'autocorrelazione nei termini d'errore della regressione e alla possibile *cross-sectional dependence*. Tali problematiche, se trascurate, potrebbero invalidare i coefficienti stimati. Al fine di indagare la presenza di tali problematiche sono stati effettuati tre tipologie di test statistici:

- ✓ Pesaran CD test (*cross-sectional dependence*);
- ✓ Wooldrige test (autocorrelazione);
- ✓ Modified Wald test (eteroschedasticità);

Per tutti i modelli stimati, i risultati dei test forniscono evidenza empirica della presenza di eteroschedasticità ed autocorrelazione nei termini di errore. Specificatamente, l'ipotesi nulla di errori omoschedastici (Modified Wald test) e l'ipotesi alternativa di errori serialmente non correlati (Wooldrige test) sono rigettate per tutte le specificazioni funzionali. Per quanto attiene al Pesaran CD test, utilizzato per verificare se i residui siano o no correlati tra le entità statistiche analizzate, l'evidenza empirica è controversa. I risultati dei test sono riportati nella tabella sottostante.

Tabella 2.8- Risultati test diagnostici per tutti i modelli stimati

TEST DIAGNOSTICO	Modello 1	Modello 2	Modello 3
Pesaran Cd Test Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	(5.391) Pr = 0.0000	(4.671) Pr = 0.0000	(1.047) Pr = 0.2950
Pesaran Cd Test Variabile dipendente: $\ln(NO_x)$	(4.273) Pr = 0.0000	(0.960) Pr = 0.3369	(0.2419) Pr = 0.6750
Pesaran Cd Test Variabile dipendente: $\ln(PM2.5)$	(2.625) Pr = 0.0087	(-0.438) Pr = 1.3384	(-1.569) Pr = 1.8833
Pesaran Cd Test Variabile dipendente: $\ln(SO_x)$	(32.239) Pr = 0.0000	(1.265) Pr = 0.1435	(0.799) Pr = 0.4245
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	F(1, 27) = 73.037 Pr = 0.0000	F(1, 27) = 39.663 Pr = 0.0000	F(1, 27) = 97.660 Pr = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(NO_x)$	F(1, 27) = 108.174 Pr = 0.0000	F(1, 27) = 83.952 Pr = 0.0000	F(1, 27) = 90.253 Pr = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(PM2.5)$	F(1, 27) = 20.915 Pr = 0.0001	F(1, 27) = 16.863 Pr = 0.0003	F(1, 27) = 16.906 Pr = 0.0003
Wooldridge Test Variabile dipendente: $\ln(SO_x)$	F(1, 27) = 384.938 Pr = 0.0000	F(1, 27) = 353.394 Pr = 0.0000	F(1, 27) = 383.835 Pr = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(GHG)$	chi2 (28) = 8795.39 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 15955.83 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 3292.13 Pr = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(NO_x)$	chi2 (28) = 1114.45 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 11318.27 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 1754.51 Pr = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(PM2.5)$	chi2 (28) = 26323.76 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 40668.75 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 33220.14 Pr = 0.0000
Modified Wald test Variabile dipendente: $\ln(SO_x)$	chi2 (28) = 38447.10 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 8376.26 Pr = 0.0000	chi2 (28) = 950.98 Pr = 0.0000

I risultati dei test variano in funzione del modello di riferimento e del *polluter* esaminato. Per il primo modello stimato (*Modello 1*) è chiaro che i risultati del Pesaran CD test conducono al rifiuto dell'ipotesi nulla per tutte le equazioni stimate. L'evidenza empirica cambia quando vengono aggiunte variabili addizionali di controllo (*Modello 2*): si accetta l'ipotesi nulla esclusivamente per i modelli con variabile dipendente le emissioni di gas serra (GHG). Quest'ultimo risultato non si registra per il modello esteso (*Modello 3*) dove, per tutti i quattro *polluters* esaminati, si accetta l'ipotesi nulla dell'assenza di dipendenza spaziale tra i residui. I risultati dei test diagnostici per l'eteroschedasticità e l'autocorrelazione, invece, risultano omogenei per tutti i modelli stimati: si evince la presenza di errori eteroschedastici e serialmente correlati.

Nonostante la letteratura analizzata non pone un problema di endogeneità delle variabili energetiche, un ulteriore controllo di robustezza riguarda la possibile natura endogena delle variabili espressione della disaggregazione tra rinnovabili combustibili e non combustibili che, se rilevata, renderebbe inconsistenti le stime ottenute per mezzo del metodo dei minimi quadrati con variabili *dummy* e con effetti casuali. Al fine di indagare la presenza dell'endogeneità delle variabili *NoComb* e *Comb*, abbiamo stimato il modello esteso (*Modello 3*) per mezzo dello stimatore dei minimi quadrati a due stadi (*Two Stage Least Square, 2SLS*) con *fixed e random effects* che costituisce un modo per ottenere stimatori non distorti e consistenti quando uno o più regressori sono correlati con il termine d'errore della regressione. Tale procedura econometrica ci consente anche di testare e confermare l'eventuale natura endogena delle principali variabili d'interesse per mezzo del test di Durbin-Wu-Hausman (DWH): un rifiuto dell'ipotesi nulla indica che gli effetti dei regressori endogeni sulle stime sono rilevanti e la procedura econometrica da seguire consiste nello stimatore dei minimi quadrati a due stadi (2SLS). Nel nostro caso, gli strumenti utilizzati per indagare l'endogeneità delle variabili *NoComb* e *Comb* consistono in due variabili estratte dalla banca dati Eurostat (2019)²⁶:

- *Electricity prices for non-household consumers*, ossia il prezzo annuale medio dell'energia elettrica per chilowattora (KWh), espresso in *Purchasing Power Standard* (PPP), e comprensivo delle imposte accessorie;

²⁶ https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics.

- *Electricity prices for household consumers*, ossia il prezzo annuale medio dell'energia elettrica per chilowattora (KWh), espresso in *Purchasing Power Standard* (PPP), e comprensivo delle imposte accessorie;

Occorre, tuttavia, notare che Eurostat fornisce i dati esclusivamente per il periodo temporale 2007-2015 e, pertanto, l'analisi sulla natura endogena delle variabili d'interesse (*Comb* e *NoComb*) è stata possibile eseguirla solo con riferimento a tale intervallo. Di seguito, per tutti i *polluters* esaminati (GHG, NO_x, SO_x, PM 2.5), sono riportati i risultati del test di endogeneità di Durbin-Wu-Hausman (DWH) per il logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili (*NoComb*) e da fonti rinnovabili combustibili (*Comb*):

- ✓ Variabile dipendente $\ln(GHG)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 2.84509 Chi-sq(2) P-value = 0.24110;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(NO_x)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 2.42362 Chi-sq(2) P-value = 0.28443;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(SO_x)$: Durbin-Wu-Hausman chi-sq test= 2.17115 Chi-sq(2) P-value = 0.314438;
- ✓ Variabile dipendente $\ln(PM\ 2.5)$: Durbin-Wu-Hausman Chi-sq test= 2.06277 Chi-sq(2) P-value = 0.35651;

I risultati del test confermano la natura esogena delle due variabili energetiche di principale interesse poiché, con riferimento a tutti e quattro i *polluters* analizzati, si accetta l'ipotesi nulla secondo cui gli effetti dei regressori endogeni sulle stime non sono significativi. Pertanto, non vi è la necessità di utilizzare lo stimatore delle variabili strumentali per superare il problema dell'endogeneità.

Sulla base dei test statistici, l'evidenza empirica ci mostra che i modelli estesi sono caratterizzati da varie problematiche e, al fine di ottenere stime robuste, i modelli precedentemente discussi sono stati stimati con l'utilizzo di *standard errors* per tenere conto dei problemi sopra elencati. La strategia adottata, in accordo con Bolkesio *et al.* (2014) e Ozokcu e Ozdemir (2017), prevede l'utilizzo dello stimatore *fixed effects* con *Driscoll-Kraay standard errors* nel caso in cui il modello presenta problemi di eteroschedasticità, autocorrelazione e *cross-sectional dependence*. Nei modelli in cui si manifesta un problema esclusivo di eteroschedasticità ed autocorrelazione, in accordo

con Dong (2012) e Garcia-Alvarez *et al.* (2018), l'utilizzo di errori standard per dati raggruppati (*clustered standard errors*) ci fornisce stime valide indipendentemente dal fatto che vi sia eteroschedasticità e/o correlazione seriale (Stock e Watson, 2012). Pertanto, le equazioni contenute nei modelli 1-3 sono state stimate nuovamente per tener conto di questi problemi econometrici.

Tabella 2.9.1- *Robustness check* delle stime per il Kyoto basket (GHG)

Tipologia di test	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se	Clustered se	Clustered se
Variabile dipendente	$\ln(GHG)$	$\ln(GHG)$	$\ln(GHG)$	$\ln(GHG)$	$\ln(GHG)$	$\ln(GHG)$
<i>Costante</i>	1.066*** (0.194)	0.962*** (0.197)	1.119*** (0.233)	0.738*** (0.187)	-5.848*** (1.591)	-2.974* (1.570)
$\ln(NoComb)$	-	-	-0.082*** (0.015)	-0.083*** (0.018)	-0.088** (0.040)	-0.083** (0.042)
$\ln(Comb)$	-	-	-0.016* (0.009)	-0.055*** (0.011)	-0.034* (0.020)	-0.037* (0.022)
$\ln(Fossil)$	0.605*** (0.086)	0.562*** (0.100)	0.728*** (0.106)	0.735*** (0.114)	0.760*** (0.135)	0.762*** (0.152)
$\ln(Popdensity)$	-	-	-	-	0.886** (0.355)	0.713* (0.405)
$\ln(Electcons)$	-	-	-	-	0.491** (0.230)	0.435* (0.235)
<i>NetImport</i>	-	-	-	-	-0.0109** (0.004)	-0.0104** (0.005)
$\ln(RES_E)$	-0.108*** (0.013)	-0.102*** (0.019)	-	-	-	-
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Metodologia	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>
Osservazioni	563	563	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²						
within	0.4390	0.4678	0.541	0.606	0.619	0.642
between	-	-	-	-	0.012	0.507
overall	-	-	-	-	0.013	0.582
Effetti temporali=0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
Prob > F	0.0000 (162.05)	0.0000 (686.24)	0.0000 (99.72)	0.0000 (520.71)	0.0005 (14.35)	0.0000 (107.90)

Note: *robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.9.2- *Robustness check* delle stime per gli ossidi di azoto (NO_x)

Tipologia di test	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se	Clustered se	Clustered se	Clustered se	Clustered se
Variabile dipendente	$\ln(NO_x)$	$\ln(NO_x)$	$\ln(NO_x)$	$\ln(NO_x)$	$\ln(NO_x)$	$\ln(NO_x)$
<i>Costante</i>	-5.378*** (0.201)	-4.982*** (0.208)	-5.622*** (0.280)	-5.181*** (0.332)	-0.019 (2.673)	-4.286 (3.308)
$\ln(NoComb)$	-	-	-0.124** (0.057)	-0.100** (0.050)	-0.114** (0.043)	-0.098** (0.044)
$\ln(Comb)$	-	-	-0.094** (0.039)	-0.068* (0.041)	-0.070** (0.032)	-0.060* (0.033)
$\ln(Fossil)$	0.743*** (0.104)	0.650*** (0.154)	0.803*** (0.200)	0.700*** (0.223)	0.850*** (0.229)	0.769*** (0.233)
$\ln(Popdensity)$	-	-	-	-	-0.627 (0.412)	-0.045 (0.424)
$\ln(Electcons)$	-	-	-	-	-0.408 (0.368)	-0.334 (0.374)
<i>NetImport</i>	-	-	-	-	-0.0155* (0.007)	-0.0155* (0.007)
$\ln(RES_E)$	-0.216*** (0.039)	-0.095*** (0.32)	-	-	-	-
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
<i>Metodologia</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>	<i>Fixed effects</i>
Osservazioni	563	563	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²						
within	0.4058	0.4980	0.477	0.520	0.524	0.555
between	-	-	0.414	0.404	0.174	0.406
overall	-	-	0.384	0.403	0.185	0.411
Prob > F	0.0005 (208.12)	0.0005 (661.98)	0.0005 (146.51)	0.0000 (21.74)	0.0005 (9.52)	0.0000 (363.04)
Effetti temporali=0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000

Note: *robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.9.3- *Robustness check* delle stime per gli ossidi di zolfo (SO_x)

Tipologia di test	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se	Clustered se	Clustered se	Clustered se	Clustered se
Variabile dipendente	$\ln(SO_x)$	$\ln(SO_x)$	$\ln(SO_x)$	$\ln(SO_x)$	$\ln(SO_x)$	$\ln(SO_x)$
<i>Costante</i>	-5.879*** (0.531)	-4.244*** (0.646)	-6.547*** (1.279)	-4.472*** (1.352)	-0.653 (1.978)	-2.851 (2.105)
<i>ln(NoComb)</i>	-	-	-0.163** (0.043)	-0.089* (0.048)	-0.166*** (0.042)	-0.087* (0.047)
<i>ln(Comb)</i>	-	-	-0.161*** (0.036)	-0.083* (0.040)	-0.162*** (0.039)	-0.078* (0.042)
<i>ln(Fossil)</i>	0.696*** (0.187)	0.496*** (0.161)	0.977*** (0.204)	0.725*** (0.297)	0.993*** (0.203)	0.785** (0.298)
<i>ln(Popdensity)</i>	-	-	-	-	-0.367 (0.278)	-0.178 (0.296)
<i>ln(Electcons)</i>	-	-	-	-	-0.240 (0.379)	-0.185 (0.398)
<i>NetImport</i>	-	-	-	-	-0.0106* (0.005)	-0.0115* (0.005)
<i>ln(RES_E)</i>	-0.592*** (0.085)	-0.174** (0.088)	-	-	-	-
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
<i>Metodologia</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>
Osservazioni	563	563	512	512	512	512
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²						
within	0.3618	0.6747	0.539	0.683	0.577	0.689
between	-	-	0.318	0.189	0.297	0.297
overall	-	-	0.334	0.281	0.327	0.327
Prob > chi2	0.0000 (51.53)	0.0000 (343.35)	0.0000 (46.22)	0.0000 (355.04)	0.0000 (59.80)	0.0000 (447.75)
Effetti temporali=0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000

Note: *robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 2.9.4- *Robustness check* delle stime per i particolati sospesi (PM 2.5)

Tipologia di test	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se	Clustered se	Clustered se	Clustered se	Clustered se
Variabili dipendente	$\ln(\text{PM } 2.5)$	$\ln(\text{PM } 2.5)$	$\ln(\text{PM } 2.5)$	$\ln(\text{PM } 2.5)$	$\ln(\text{PM } 2.5)$	$\ln(\text{PM } 2.5)$
<i>Costante</i>	-8.875*** (0.100)	-8.366*** (0.101)	-9.323*** (1.231)	-8.456*** (1.287)	-6.888*** (1.332)	-6.426*** (1.992)
$\ln(\text{NoComb})$	-	-	-0.225*** (0.071)	-0.190** (0.075)	-0.220** (0.081)	-0.187* (0.082)
$\ln(\text{Comb})$	-	-	-0.130** (0.065)	-0.120* (0.072)	-0.123* (0.058)	-0.111* (0.061)
$\ln(\text{Fossil})$	0.436*** (0.087)	0.301** (0.133)	0.433*** (0.125)	0.289** (0.136)	0.477*** (0.176)	0.349* (0.186)
$\ln(\text{Popdensity})$	-	-	-	-	-0.406* (0.220)	-0.326 (0.225)
$\ln(\text{Electcons})$	-	-	-	-	-0.159 (0.309)	-0.189 (0.325)
<i>NetImport</i>	-	-	-	-	-0.0081 (0.014)	-0.0084 (0.015)
$\ln(\text{RES}_E)$	-0.316*** (0.067)	-0.166** (0.070)	-	-	-	-
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
<i>Metodologia</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>
Osservazioni	433	433	413	413	413	413
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²						
within	0.2617	0.3494	0.312	0.374	0.324	0.378
between	-	-	0.098	0.781	0.329	0.331
overall	-	-	0.120	0.119	0.345	0.355
Prob > chi2	0.0000 (34.11)	0.0000 (798.36)	0.0000 (26.19)	0.0000 (108.38)	0.0000 (64.12)	0.0000 (486.92)
Effetti temporali=0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000

Note: *robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

2.6- Interpretazione dei risultati

I risultati empirici dei modelli stimati mostrano che, per tutti i *polluters* esaminati, un aumento nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili genera una riduzione delle emissioni inquinanti. Tale effetto varia in funzione della sostanza inquinante e della tipologia di tecnologia esaminata (*Modello 1*). In accordo con la letteratura esaminata, le due macrocategorie di tecnologie elettriche (fossili e rinnovabili), presentano degli effetti ambientali opposti: da un lato, la variabile *RES_E* presenta coefficienti negativi e statisticamente significativi per tutti i *polluters*, dall'altro, la variabile *Fossil*, fa registrare delle elasticità ambientali positive e stasticamente significative. Ogni stato europeo presenta, inoltre, delle caratteristiche individuali ben precise che potrebbero avere un effetto dissimile sull'inquinamento atmosferico. Tra queste peculiarità rientrano le condizioni atmosferiche e metereologiche, quelle socio-economiche ed, infine, la qualità istituzionale. Omettere tali elementi potrebbe condurre a problemi di distorsione da variabile omessa nello stimatore dell'effetto delle tecnologie elettriche sull'inquinamento atmosferico.

L'aumento nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili influenza negativamente le emissioni inquinanti anche quando vengono analizzate delle variabili addizionali di controllo (*Modello 3*). Quest'ultime comprendono variabili legate alla conformazione dei mercati elettrici (*NetImport* e *Electcons*) e alle caratteristiche demografiche (*PopDensity*) dei paesi analizzati. L'inclusione di tali variabili riduce le elasticità ambientali delle rinnovabili elettriche soprattutto per gli ossidi di zolfo (SO_x) e per i particolati sospesi (PM 2.5).

Di particolare interesse sono i risultati riguardanti la disaggregazione delle rinnovabili elettriche in rinnovabili non combustibili e rinnovabili combustibili (*Modello 2* e *Modello 3*). Per le emissioni di gas serra (GHG), le regressioni del *Modello 2* mostrano che le rinnovabili non combustibili e combustibili fanno registrare delle elasticità ambientali negative e statisticamente significative per tutte le specificazioni stimate. Seguendo i risultati del *Modello 2*:

- ✓ all'aumentare dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili (*NoComb*) le emissioni inquinanti si riducono di

una percentuale che varia tra lo 0.082% (senza effetti temporali) e lo 0.083% (con effetti temporali);

- ✓ all'aumentare dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili combustibili (*Comb*) le emissioni inquinanti si riducono di una percentuale pari a 0.016% (senza effetti temporali) e 0.055% (con effetti temporali);

I risultati cambiano poco quando sono inserite variabili addizionali di controllo (*Modello 3*) ad eccezione delle rinnovabili combustibili le cui elasticità ambientali sono pari allo 0.34% (senza effetti temporali) e allo 0.37% (con effetti temporali).

Situazione simile si registra per gli ossidi di azoto (NO_x), gli ossidi di zolfo (SO_x) e i particolati sospesi (PM 2.5). In particolare, tutte le regressioni stimate mostrano che le rinnovabili non combustibili presentano delle elasticità ambientali maggiori rispetto alle rinnovabili combustibili. Facendo riferimento ai risultati del modello esteso (*Modello 3*):

- ✓ all'aumentare dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili le emissioni inquinanti di NO_x si riducono di una percentuale pari a 0.114% (senza effetti temporali) e 0.098% (con effetti temporali). L'elasticità associata alle rinnovabili combustibili varia tra lo 0.070% (senza effetti temporali) allo 0.060% (con effetti temporali);
- ✓ all'aumentare dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili le emissioni inquinanti di SO_x si riducono di una percentuale pari a 0.166% (senza effetti temporali) e 0.087% (con effetti temporali). L'elasticità associata alle rinnovabili combustibili varia tra lo 0.162% (senza effetti temporali) allo 0.078% (con effetti temporali);
- ✓ all'aumentare dell'1% nella quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non combustibili le emissioni inquinanti di PM 2.5 si riducono di una percentuale pari a 0.220% (senza effetti temporali) e 0.187% (con effetti temporali). L'elasticità associata alle rinnovabili combustibili varia tra lo 0.123% (senza effetti temporali) allo 0.111% (con effetti temporali);

Come previsto, l'effetto ambientale associato alle tecnologie elettriche da fonti fossili (*Fossil*) risulta, invece, positivo e statisticamente significativo in tutte le

specificazioni stimate. Tale effetto si dimostra particolarmente rilevante per gli ossidi di zolfo (SO_x) e per gli ossidi di azoto (NO_x). Difatti, facendo riferimento ai risultati del *Modello 3*, per questi due indicatori dell'inquinamento atmosferico le elasticità ambientali associate alla variabile *Fossil* sono pari, rispettivamente, a 0.758 (SO_x) e 0.769 (NO_x).

La sensibilità dei coefficienti associati alle variabili energetiche (*NoComb* e *Comb*) dopo l'introduzione di ulteriori variabili di controllo, indica che tali variabili dovrebbero essere incorporate nella specificazione di base (*Modello 2*). Analizzando, infatti, le variabili addizionali di controllo (*Z*), per le emissioni di gas serra (GHG), gli ossidi di azoto (NO_x) e quelli di zolfo (SO_x) un aumento delle importazioni nette di energia elettrica causa una riduzione delle emissioni. Tale risultato è coerente con l'ipotesi secondo cui un aumento delle importazioni rispetto alle esportazioni causa una riduzione delle emissioni atmosferiche. D'altronde, tale effetto, indicato come una delle cause principali per la diffusione delle rinnovabili (Kilinc-Ata, 2016), è trainato dalla delocalizzazione degli impianti di produzione.

Per quanto attiene alla densità demografica (*PopDensity*) e ai consumi elettrici pro capite (*Electcons*), i risultati delle stime conducono a risultati controversi. Nel caso delle emissioni di gas serra (GHG) un aumento della densità demografica e dei consumi energetici causa un aumento delle emissioni inquinanti: all'aumentare del numero di persone per Km² di superficie le emissioni del Kyoto *basket* aumentano dello 0.713% (con effetti temporali), l'incremento dell'1% nei consumi elettrici causa un aumento dello 0.435% (con effetti temporali) delle emissioni. Per gli altri *polluters*, i coefficienti associati a tali variabili assumono segno opposto ma risultano statisticamente non significativi. Questi risultati sono strettamente correlati all'ipotesi secondo cui l'aumento della popolazione e dei consumi elettrici sono stati controbilanciati dall'aumento del grado di efficienza: «*l'analisi della decomposizione dei consumi elettrici mostra che l'efficienza contribuisce alla riduzione delle emissioni atmosferiche solo nel settore industriale che rivela una struttura piuttosto eterogenea per i diversi comparti, mentre nel settore terziario la diminuzione dei fattori di emissione è compensata dall'incremento dei consumi elettrici. Nel settore domestico si ha un forte disaccoppiamento tra consumi elettrici e corrispondenti emissioni atmosferiche con l'aumento del grado di efficienza nei consumi elettrici*» (Ispra, 2018). Pertanto, le stime

del modello esteso (*Modello 3*) ci suggeriscono che è il processo di produzione a causare l'aumento dell'inquinamento ambientale, piuttosto che il processo di consumo.

Conclusioni

Produzione e consumi energetici stanno cambiando rapidamente ed il loro avvenire sarà certamente vincolato dalle risposte all'inquinamento ambientale. D'altronde, l'umanità sta utilizzando in modo irreversibile le sue stesse basi di sostentamento con un maggiore degradazione del suolo terrestre, dei sistemi idrici e con un alterazione sempre maggiore del clima. Attualmente, come confermato anche dall'ultimo rapporto dell'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014*), sono quattro le aree nelle quali si stanno superando pericolosamente i limiti di sicurezza: la perdita di biodiversità, la deforestazione, l'immissione negli oceani di azoto e fosforo provenienti dai fertilizzanti e l'inquinamento atmosferico. In tale contesto, la vera speranza in campo energetico è ancorata alle rinnovabili elettriche che, con i continui miglioramenti dei rendimenti e le sorprendenti riduzioni dei prezzi, stanno assumendo dei sentieri di diffusione che le vedranno protagonisti nello scenario energetico mondiale (Silvestrini, 2015). Le rinnovabili elettriche, sospinte anche dalle politiche di incentivazione, hanno, infatti, registrato degli alti tassi di crescita in diversi paesi europei. Tuttavia, a causa degli elevati costi iniziali e della produttività fortemente variabile, soprattutto dell'eolico e del fotovoltaico, non hanno ancora raggiunto un ruolo predominante sul mercato elettrico. Nel 2015, analizzando i dati degli ultimi Bilanci Energetici Nazionali forniti dalla Commissione Europea, le rinnovabili elettriche hanno soddisfatto quasi la metà dei consumi elettrici in Europa. Basti pensare che l'elettricità verde ha soddisfatto la domanda elettrica per il 62% i consumi elettrici in Portogallo e per il 37% in Italia.

Nonostante un numero crescente di studi abbia cercato di analizzare le determinanti potenziali dell'inquinamento atmosferico, l'effetto ambientale delle rinnovabili elettriche è stato scarsamente affrontato in letteratura. Vi sono autori che hanno cercato di analizzare il ruolo svolto dai sistemi energetici nell'evoluzione temporale assunta dalle emissioni inquinanti (Ang, 2008; Zhang e Cheng, 2009). Tuttavia, un'importante critica mossa nei confronti di tale filone riguarda la selezione

degli indicatori energetici ed ambientali. In primo luogo, la maggioranza degli autori analizza l'effetto ambientale associato ad un aumento dei consumi energetici aggregati, senza fare una distinzione tra fonti energetiche rinnovabili e non rinnovabili (Dijkgraaf e Vollebergh, 2001; Say e Youcel, 2006; Omri, 2013). Di contro, grazie alla vasta disponibilità di dati, negli ultimi anni alcuni autori hanno cercato di disaggregare i consumi energetici in funzione delle fonti utilizzate nei processi produttivi (Shafiei e Salim, 2014; Boluk e Mert, 2014; Dogan e Ozturk, 2017; Santana de Souza *et al.*, 2018). Tuttavia, anche in quest'ultimo caso, ad eccezione di Dogan e Seker (2016), la ricerca scientifica ha attribuito poca importanza al comparto elettrico. Lo stesso contributo di Dogan e Seker (2016) studia l'effetto ambientale associato a due categorie di indicatori energetici: elettricità da fonti fossili e fonti rinnovabili.

In questo lavoro abbiamo cercato di indagare l'efficacia ambientale associata alle rinnovabili elettriche combustibili (biomassa) e non combustibili (geotermico, eolico, idroelettrico e solare), per verificare se a tale disaggregazione corrisponda una difformità nel processo di abbattimento delle emissioni. Utilizzando un panel di ventotto paesi europei, valutati per gli anni 1995-2015, sono stati stimati dei modelli multivariati in cui sono stati analizzati quattro differenti indicatori ambientali: Kyoto *basket* (GHG), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x) e particolati sospesi (PM 2.5). Le variabili d'interesse comprendono l'energia elettrica generata da fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone) e l'energia elettrica derivante da fonti rinnovabili. Quest'ultima ricomprende due ulteriori indicatori: quota di energia elettrica da rinnovabili combustibili e da rinnovabili non combustibili. A tali indicatori sono state affiancate delle variabili di controllo espressioni della domanda e dell'offerta di energia, quali i consumi elettrici pro capite, la densità demografica e le importazioni nette di energia elettrica. Le relazioni oggetto di studio, a causa della presenza di eteroschedasticità ed autocorrelazione nei termini d'errore, sono state ottenute per mezzo di modelli panel con effetti fissi e *random* ed errori *standards* per dati raggruppati.

Il lavoro si differenzia dalla letteratura esistente per due aspetti principali. In primo luogo, viene analizzato, per la prima volta, il differenziale di produttività ambientale delle due sub-categorie di rinnovabili elettriche: combustibili e non combustibili. Inoltre, poiché la letteratura esistente, ad eccezione di Roca *et al.* (2001), esamina i consumi energetici disaggregati in funzione dei gas serra (Boluk e Mert, 2014;

Santana de Souza *et al.*, 2018) in questo lavoro sono stati utilizzati tre ulteriori indicatori dell'inquinamento atmosferico rappresentati dagli ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x) e particolati sospesi (PM 2.5).

I risultati delle stime, contrariamente a quanto ottenuto da Boluk e Mert (2014), confermano come le rinnovabili elettriche sembrano assumere un ruolo strategico per l'abbattimento delle emissioni inquinanti nei paesi europei (*Modello 1*): per ogni indicatore ambientale la quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili presenta un'elasticità negativa e statisticamente significativa. Sulla base dei risultati delle stime del *Modello 2*, siamo portati a ritenere che la disaggregazione tra rinnovabili combustibili e non combustibili presenta effetti difformi sulle variabili analizzate: in tutte le specificazioni le rinnovabili non combustibili presentano delle elasticità maggiori rispetto a quelle associate alle rinnovabili combustibili. L'effetto ambientale associato a tali fonti energetiche non cambia di segno quando si controlla per ulteriori determinanti potenziali delle emissioni inquinanti (*Modello 3*).

La difformità dell'impatto ambientale tra tecnologie rinnovabili e fossili induce a ritenere che le direttive europee (CE/2009/28) indirizzate, entro il 2020, ad ottenere un aumento della quota di energia rinnovabile almeno fino al 20% dei bisogni totali di energia (27% per il 2030) e un aumento dell'efficienza energetica del 20% (27-30% per il 2030) rappresentino una *policy* efficace per il contrasto alle emissioni inquinanti. Gli interventi di politica energetica, indirizzati ad aumentare la quota delle fonti rinnovabili e a rallentare la diffusione delle fonti fossili, rappresentano degli importanti strumenti di eco-sostenibilità per l'Unione Europea. Sulla base dei risultati di questo studio, la strategia più efficace consisterebbe nel promuovere maggiormente le tecnologie che sfruttano le rinnovabili elettriche non combustibili. Le centrali elettriche da rinnovabili non combustibili presentano la ragguardevole caratteristica di non sfruttare la combustione per produrre unità di output, mentre quelle da rinnovabili combustibili generano elettricità sfruttando combustione, pirolisi e gassificazione. Al pari di ogni processo di combustione, quello che avviene nelle centrali a biomassa introduce nell'atmosfera una certa quantità di inquinanti anche se, per merito di nuove tecnologie ad alta efficienza tecnologica, risultano essere in quantità sempre più basse rispetto alle centrali a combustibili fossili. Le tecnologie da rinnovabili non combustibili, ad eccezione dell'idroelettrico, si presentano come un sistema di generazione decentrato

rappresentato da milioni di impianti di piccole-medie dimensioni. Questo elemento di decentralizzazione, in contrapposizione alla produzione centralizzata che storicamente domina il mercato elettrico, rappresenterà anche un elemento di innovatività per gli operatori elettrici. Tale fenomeno giustifica, in parte, il risultato secondo cui il valore delle elasticità ambientali delle rinnovabili non combustibili sono più elevati per gli *air polluters* rispetto ai gas serra. Discorriamo, dunque, di un processo di distruzione creativa che, teorizzato da Schumpeter (1942), vede delle soluzioni energetiche distruttive di assetti preesistenti e ad alta valenza ecologica per la loro capacità di ridurre l'utilizzo di risorse primarie limitate. La piccola scala favorisce il controllo dal basso da parte degli *end-users*, elimina gli impatti paesaggistici e non coinvolge grandi capitali: si tratterebbe di un modello di sistemi elettrici da favorire.

Un importante risultato di questo studio è fortemente correlato alla dipendenza energetica. In particolare, il risultato secondo cui un aumento delle importazioni genera una riduzione delle emissioni inquinanti pone un importante quesito nella *Environment-Energy-Growth literature*. Si configura, infatti, un *trade-off* tra aumento dell'indipendenza energetica e abbattimento dell'inquinamento atmosferico che necessita di essere superato attraverso investimenti esclusivi in tecnologie energetiche a basso impatto ambientale. La necessità di ridurre la dipendenza energetica in Europa dovrebbe essere controbilanciata da aumenti sempre più consistenti nella quota di energia elettrica generata da fonti energetiche rinnovabili.

CAPITOLO 3

Le determinanti delle rinnovabili elettriche in Europa: un'analisi esplorativa sull'utilizzo degli incentivi

Abstract: Le rinnovabili elettriche (RES-E) rappresentano uno degli strumenti principali per il perseguimento degli obiettivi energetici dell'Unione Europea. Al fine di promuovere la diffusione su vasta scala delle RES-E, i paesi europei hanno implementato una vasta gamma di misure economiche e normative. Tali strumenti, denominati *support schemes*, si distinguono in due principali categorie: finanziari (*feed-in tariff* e *feed-in premium*) e obbligazionari (*renewable portfolio standards*). La letteratura corrente ha dimostrato che i meccanismi finanziari causano una performance migliore rispetto a quelli obbligazionari, non distinguendo però tra tariffe incentivanti a premio e fisse. Sulla base di un panel di dati relativo a ventotto paesi dell'Unione Europea e agli anni 1995-2015, il presente lavoro si pone come obiettivo primario lo studio dell'eterogeneità *cross-country* che caratterizza gli strumenti di supporto alle RES-E non idroelettriche (solare, eolico, geotermico e biomassa) nei paesi europei. A tal fine, sulla base di metodologie *Pooled, fixed e random effects*, si è stimata l'efficacia relativa degli incentivi a prezzo fisso (FIT), a premio (FIP) e obbligazionari (RPS) nel promuovere lo sviluppo della capacità (*Cap-non idro*) e della produzione (*Gen-non idro*) di energia elettrica da rinnovabili non idroelettriche. I coefficienti di eterogeneità sono stati costruiti per mezzo di variabili dicotomiche che assumono valore unitario per i paesi che hanno adottato un certo meccanismo di *policy* e zero altrimenti. I risultati delle stime dimostrano che nei paesi con meccanismi incentivanti di tipo FIP la produzione di energia elettrica da tecnologie rinnovabili registra delle performance migliori rispetto a quelli con sistemi di tipo FIT e RPS. Su queste stime viene poi fatto un controllo di robustezza per verificare se questi risultati sono verificati anche quando si tiene conto del *timing* di adozione nei diversi paesi delle tre diverse *policies*.

Keywords: *Sustainable development; renewable electric deployment; European Union countries; feed-in tariffs; feed-in premium; renewable portfolio standard; pooled e random effects.*

JEL classification: Q42; O33, Q48; 052

3.0- Introduzione

L'Unione Europea, dal 2001, si è fatta promotrice di innovative politiche in materia di clima ed energia, con il proposito di assumere un ruolo guida su scala mondiale nell'affrontare i pericoli causati dal cambiamento climatico e nel costruire un sistema di produzione dell'energia sicuro, sostenibile e competitivo. Questa posizione è stata rafforzata con il cosiddetto pacchetto clima-energia (denominato anche Piano 20-20-20) approvato dal Parlamento e dal Consiglio europeo il 23 aprile 2009, con il quale l'UE ha assunto definitivamente la *leadership* mondiale nella lotta al cambiamento climatico, adottando obiettivi ambiziosi in materia di riduzione delle emissioni di gas serra e promozione delle energie rinnovabili. In particolare, il piano clima-energia UE, contenuto nella direttiva CE/2009/29 ed entrato in vigore nel giugno 2009, prevede di raggiungere entro il 2020: una riduzione delle emissioni di gas serra pari al 20%, un incremento pari al 20% della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e un aumento del 20% per il risparmio energetico.

In tale contesto, le criticità alle quali le politiche comunitarie cercano di dare una soluzione possono essere così riassunte: la crescente dipendenza dalle importazioni; l'incremento dei prezzi dell'energia; la ricerca di un equilibrio nella composizione del mix energetico; il conseguimento della cosiddetta *grid parity*, ossia il punto di equilibrio tra prezzo dell'energia prodotta dalle fonti rinnovabili e il prezzo dell'energia prodotta sfruttando le fonti tradizionali. Tutto ciò comporta la scelta di politiche energetiche sostenibili che tengano conto dell'ambiente e dei cambiamenti climatici. Con la direttiva CE/2011/77, l'Unione Europea ha rafforzato il suo ruolo di leader nella lotta all'inquinamento ambientale attraverso il perseguimento di un triplice obiettivo: una riduzione del 40% delle emissioni di gas a effetto serra rispetto ai livelli del 1990; una quota del 27% nei consumi finali lordi di energia rinnovabile; un miglioramento del 27% dell'efficienza energetica.

La diffusione delle energie rinnovabili costituisce lo strumento chiave per la concretizzazione congiunta degli obiettivi comunitari (Klessman *et al.*, 2011; Scarlat *et al.*, 2015; Pacesila *et al.*, 2016). All'interno della letteratura si riscontra, infatti, un vasto numero di contributi, di carattere teorico ed empirico, che si propongono di valutare l'efficacia economica ed ambientale delle fonti energetiche rinnovabili in Europa

(Marrero, 2010; Lopez-Menendez *et al.*, 2014; Boluk e Mert, 2014; Dogan e Seker, 2016; Inglesi-Lotz, 2016; Bhattacharya *et al.*, 2016). Le conclusioni di questo filone di letteratura hanno dimostrato che la diffusione su vasta scala delle fonti energetiche rinnovabili contrasta efficacemente l'aumento delle emissioni inquinanti (Lopez-Menendez, *et al.*, 2014; Dogan e Seker, 2016) e può contribuire positivamente ed in modo sostenibile alla crescita economica dei singoli territori (Marrero, 2010; Bhattacharya *et al.*, 2016).

Un importante filone di ricerca, sviluppatosi negli ultimi anni, si propone di valutare analiticamente le determinanti potenziali della diffusione delle fonti energetiche rinnovabili (Alagappan *et al.*, 2011; Omri e Nguyen, 2014; Sener *et al.*, 2018). In tale contesto, l'interesse dei ricercatori si è principalmente concentrato sugli aspetti istituzionali che contraddistinguono e/o differenziano i paesi oggetto di studio (Menz e Vachon, 2006; Carley, 2009; Adelaja e Hailu, 2010; Jenner *et al.*, 2013; Marques *et al.*, 2010; Shrimali e Kniefel, 2011; Bolkesjo *et al.*, 2014; Kilinc-Ata, 2016; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). Ulteriori fattori analizzati consistono in variabili di natura economica (Jenner *et al.*, 2013; Bolkesjo *et al.*, 2014), ambientale (Dong, 2012; Kilinc-Ata, 2016) ed energetica (Marques *et al.*, 2010).

Focalizzando l'attenzione sul comparto elettrico, in molti paesi sussistono ancora numerose barriere alla promozione delle energie rinnovabili (Sener *et al.*, 2018). Tali ostacoli sono soprattutto rappresentati da bassi livelli di concorrenza e da elevati costi di investimento iniziali (Beck e Martinot, 2004; Jebli *et al.*, 2016). Dong (2012) sostiene, infatti, che *«in most countries, renewables still comprise only a small percentage of the energy being used. For those countries that have implemented well-designed renewable energy policies, substantial environmental and economic benefits have been received. However, just having a renewable energy policy may not lead to optimal policy outcomes as research as shown different policy approaches produce different policy outcomes. Thus, in order to design the most effective policy approach, it is necessary to understand the linkage between policy mechanisms and energy developments»*.

Il presente lavoro, concentrando l'attenzione sulle rinnovabili elettriche (RES-E), si pone come obiettivo lo studio analitico dei *driver* della diffusione delle fonti rinnovabili all'interno del panorama elettrico europeo. La ricerca è basata sul principio

secondo cui la diffusione delle RES-E non può prescindere da efficaci interventi di politica energetica indirizzati a correggere i fallimenti del mercato (Kilinc-Ata, 2016). Lo scopo della ricerca può essere suddiviso in due elementi di analisi distinti ed altamente correlati che si riferiscono all'eterogeneità tra i paesi europei nel tipo di *policy* adottata e nel tempo di adozione delle *policy*. Partendo, infatti, dall'analisi della relazione che collega le *renewable energy policies* alla diffusione su vasta scala delle rinnovabili, si cercherà di individuare analiticamente gli strumenti di supporto più efficaci. La distinzione effettuata, molto ricorrente in letteratura (si veda, in particolare, Dong, 2012), è tra elementi di eterogeneità e principi di efficacia delle politiche incentivanti. Gli stati europei non hanno, infatti, implementato delle politiche energetiche omogenee: se da un lato, paesi come la Danimarca e la Romania hanno adottato dei meccanismi incentivanti di tipo obbligazionario (*renewable portfolio standards* o *quota system*), dall'altro, la maggior parte dei paesi europei ha implementato politiche energetiche di tipo finanziario che, a loro volta, si distinguono in due categorie (*feed-in tariff* e/o *feed-in premium*). La variabilità *cross-country* dei sistemi di incentivazione alle RES-E risulta presente anche nel *timing* di adozione in quanto i paesi europei non hanno introdotto un particolare meccanismo incentivante nel medesimo istante temporale: da un lato, si osservano paesi cosiddetti pionieristici (come ad esempio la Spagna), dall'altro, molti paesi europei hanno introdotto solo recentemente politiche di supporto alle RES-E. L'obiettivo, dunque, è effettuare un'analisi *cross-country*, che tenga conto di tali diversità, al fine di individuare quali siano i meccanismi di incentivazione energetici più efficaci nel favorire la diffusione delle RES-E.

Il presente lavoro ostituisce una novità rispetto alla letteratura esistente in diversi modi. In primo luogo, viene analizzata l'efficacia relativa dei principali strumenti di supporto alle RES-E: *feed-in tariff* (FIT), *feed-in premium* (FIP) e *renewable portfolio standards* (RPS). Il campione oggetto di studio, valutato per il periodo temporale 1995-2015, consiste nei ventotto paesi dell'Unione Europea. In aggiunta alle variabili *policy related*, sono valutati altri indicatori di natura economica, ambientale ed energetica che potrebbero avere un impatto sulla produzione (*Gen-non idro*) o capacità (*Cap-non idro*) di elettricità da fonti rinnovabili non idroelettriche (eolico, solare, biomassa, geotermico). In secondo luogo, alcuni contributi presenti in letteratura (Dong, 2012;

Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) testano l'efficacia relativa degli schemi di supporto alle RES-E senza eseguire una distinzione tra tariffe incentivanti a premio (FIP) e fisse (FIT). Questa distinzione, se trascurata, porta a sovrastimare o sottostimare l'efficacia relativa dei meccanismi finanziari e obbligazionari. Pertanto, la prima novità del presente lavoro è fare un passo in avanti rispetto alla letteratura esistente, verificando l'impatto sulla produzione e sulla capacità di energia elettrica da fonti rinnovabili, non di un indicatore aggregato di *policy* incentivante, ma dei diversi meccanismi incentivanti portati avanti nei ventotto paesi europei. Ciò ha comportato la costruzione di tre indicatori dicotomici espressione dell'adozione dei tre principali meccanismi incentivanti (FIP, FIT, RPS). La natura binaria delle variabili di politica energetica utilizzate ha influenzato la strategia metodologica adottata che è consistita nella stima di modelli *Pooled OLS* e panel con effetti fissi e casuali. La seconda novità, sulla base dei risultati ottenuti nelle stime dei modelli basati su variabili binarie, riguarda il controllo di robustezza sui risultati ottenuti. Questo controllo viene effettuato introducendo il *timing* di adozione dei tre principali *support schemes* alle rinnovabili elettriche adottate dai paesi europei, ossia le tariffe finanziarie a prezzo fisso (FIT), quelle a premio (FIP) e i *renewable portfolio standard* (RPS). In questo caso, l'obiettivo è valutare l'impatto dell'adozione temporale dei *major support instruments* alle RES-E sulla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili non idroelettriche.

Il lavoro è organizzato nel modo seguente. Nella prima parte, dopo aver discusso del meccanismo di funzionamento degli schemi di supporto alle rinnovabili elettriche, viene effettuata una rivisitazione critica della letteratura che si propone di studiare le determinanti potenziali della diffusione delle RES-E. Nella seconda parte si illustrano le metodologie adottate e i dati analizzati. La terza parte contiene la presentazione e la discussione dei risultati delle stime econometriche. L'ultima parte presenta delle valutazioni conclusive.

3.1- Una breve disamina degli strumenti di politica energetica negli stati europei

La promozione di forme di energia nuove e rinnovabili è ormai divenuta una prerogativa d'interesse mondiale (Alagappan *et al.*, 2011; Carley *et al.*, 2017; Sener *et al.*, 2018). Con il proposito di facilitare la diffusione delle tecnologie energetiche da

fonti rinnovabili, all'interno del panorama energetico mondiale, si assiste alla presenza di numerosi strumenti di incentivazione nel comparto energetico. Gli interventi di *energy policy* perseguono finalità multiple e hanno come principale campo di applicazione la produzione di elettricità (RES-E), riscaldamento e raffreddamento (RES-H) e i trasporti (RES-T). Secondo Carley (2009), «*the majority of policy objectives aim to facilitate the diversification of electricity generation mixes, increase renewable energy deployment, reduce state reliance on fossil fuels, help renewable energy sources become cost competitive with conventional energy sources, reduce carbon emissions, or various combinations thereof*».

La ragione per cui i governi centrali e/o le entità pubbliche locali intervengono nel settore elettrico è da ricondurre al fatto che il mercato non fornisce il livello ottimale di energie rinnovabili in assenza di un intervento pubblico: la presenza di fonti energetiche consolidate e a basso costo, la parziale internalizzazione delle esternalità negative e, soprattutto, il basso livello di concorrenza sono i principali fattori che, storicamente, hanno inibito la diffusione delle fonti rinnovabili all'interno dei mercati energetici. Inoltre, come sostenuto da Jebli *et al.* (2016), «*in most cases fiscal incentives and/or subsidies are needed because, compared to the use of conventional energy sources, the use of renewable energies necessitates an initial investment cost*».

La letteratura differenzia le politiche di supporto alle rinnovabili elettriche in varie macrocategorie. Si distingue, infatti, tra:

- *Direct and indirect policy instruments;*
- *Investment and generation policy instruments;*
- *Major and supplementary support instruments;*

Nel primo caso (politiche di supporto dirette e indirette) la distinzione è strettamente connessa alla *ratio* di una determinata scelta normativa. Hass *et al.* (2011) affermano, infatti, che «*direct policy measures aim at the immediate stimulation of RES-E, whereas indirect instruments focus on improving long-term framework conditions*». Pertanto, se da un lato, le politiche di supporto dirette sono state introdotte con l'obiettivo primario di stimolare la diffusione delle RES-E, dall'altro, quelle indirette (come ad esempio le eco-tasse) perseguono propositi non direttamente

riconducibili al fenomeno delle fonti energetiche rinnovabili. La differenza tra *investment and generation policy instruments* è da ricondurre, invece, agli effetti e alla natura di un determinato meccanismo di *policy*. Nel caso di *generation based-policy* il meccanismo di incentivazione è studiato per stimolare l'effetto produzione e, pertanto, viene erogato in base alla quantità di energia elettrica prodotta e/o da produrre. Di contro, gli *investment support instrument* (come ad esempio gli incentivi fiscali) sono orientanti a stimolare l'effetto capacità e, dunque, trovano applicazione esclusivamente per l'installazione di nuovi impianti a fonti a rinnovabili.

Nonostante la letteratura differenzi le politiche di supporto alle rinnovabili elettriche in varie categorie, i principali strumenti di *energy policy* adottati dai governi europei per promuovere la diffusione delle rinnovabili elettriche sono essenzialmente di due tipologie:

- ✓ Finanziari (*feed-in tariffs, feed-in premium*);
- ✓ Obbligazionari (*renewable portfolio standards o quota system*);

Entrambe le categorie, qualificate come *major support instruments* (Kitzing *et al.*, 2012), sono orientate a ridurre i rischi connessi all'investimento iniziale creando un mercato a lungo termine per le rinnovabili incentivate. Esse, come sarà di seguito approfondito, si differenziano dai cosiddetti *supplementary support instruments* poiché rappresentano i principali mezzi attraverso cui le RES-E sono promosse dalle autorità governative.

Gli schemi di supporto finanziari costituiscono delle misure *price-based* e presentano due varianti fondamentali (*feed-in tariff* e *feed-in premium*) la cui distinzione, in letteratura, è posta in rilievo da Hass *et al.* (2011): «*the difference between fixed FITs and premiums is the following. While for fixed FITs the total feed-in price is fixed, for premium systems the amount to be added to the electricity price is fixed. For the renewable plant owner, the total price received per kWh, in the premium scheme (electricity price plus the premium), is less predictable than under a feed-in tariff because it depends on a volatile electricity price*».

Il meccanismo di incentivazione di tipo *feed-in tariff* (FIT), il più diffuso nel panorama energetico europeo (Haas *et al.*, 2011; Kitizing *et al.*, 2012; Jenner *et al.*, 2013), è stato progettato con l'obiettivo di accelerare gli investimenti nelle tecnologie

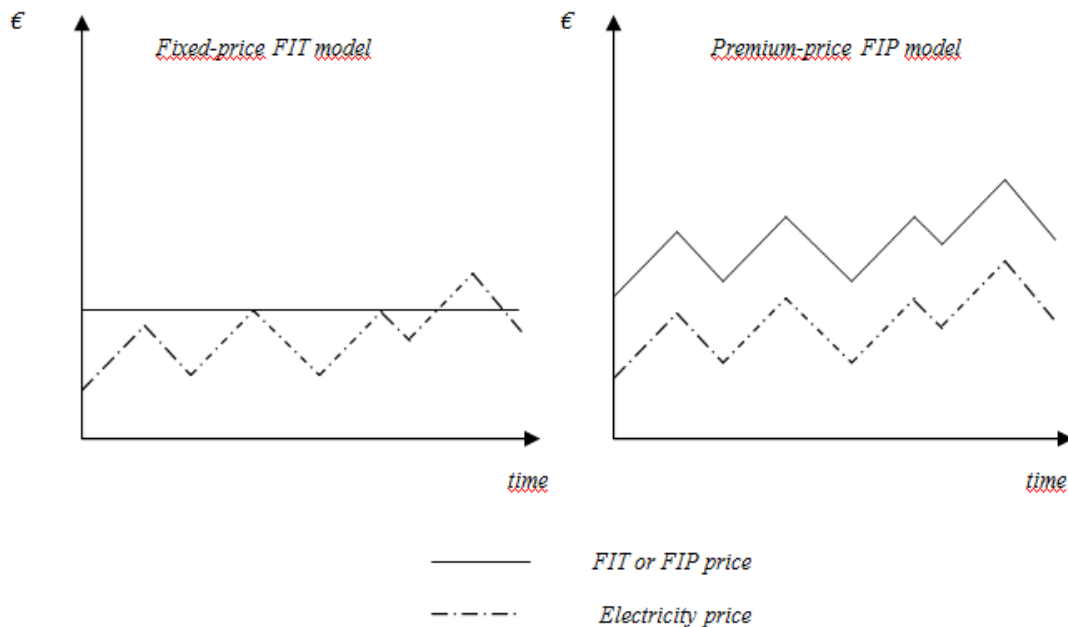
per lo sfruttamento di fonti rinnovabili. Esso si sostanzia in un contratto che, per un periodo di tempo prestabilito oppure per un predeterminato ammontare di elettricità generata, offre ai produttori di energia rinnovabile un prezzo fisso preferenziale per unità di energia elettrica prodotta ed immessa in rete (Couture e Gagnon, 2010; Schmalensee, 2012). Generalmente, il prezzo offerto ai *producers* è superiore al prezzo di mercato ed è assicurato per un periodo di tempo variabile e strettamente correlato alla vita economica della tecnologia incentivata (generalmente dai dieci ai venti anni). Questo sistema di incentivazione, denominato anche *fixed FIT* (Couture *et al.*, 2010; Nicolini e Tavoni, 2017), risulta particolarmente efficace in quanto garantisce un ricavo costante per un orizzonte temporale predeterminato. L'obiettivo principale delle tariffe a prezzo fisso è di offrire un prezzo garantito, che comprende sia il prezzo dell'elettricità sia il supporto aggiuntivo, come un unico pagamento congiunto (Pablo-Romero *et al.*, 2017). Per questo motivo le FIT sono anche denominate tariffe *all-inclusive* (Kitzing *et al.*, 2012).

Una variante delle tariffe incentivanti finanziarie, molto diffusa per il solare fotovoltaico, è rappresentata, in Europa, dalle tariffe cosiddette *feed-in premium* (FIP). Questi incentivi finanziari riconoscono al produttore di energia elettrica da fonti rinnovabili una tariffa incentivante ed un premio tariffario aggiuntivo. Mentre con le FIT l'energia elettrica prodotta è venduta alla rete con un'unica tariffa agevolata, con le *feed-in premium* il prezzo pagato ai *producers* è composto da due fattori: un prezzo variabile per l'energia elettrica prodotta e un bonus (o premio) stabilito da contratto con l'autorità pubblica. «*Thus, it generates two sources of income for the producers: one with the sale of energy in the electrical market and the other with the receipt of the premium*» (Pablo-Romero *et al.*, 2017). Il premio erogato può essere di due tipologie: *constant* (come ad esempio in Germania) oppure *sliding* (applicato in Spagna). Nel caso di *constant feed-in premium*, il bonus non varia con il prezzo di mercato dell'elettricità ma è costante: «*the bonus rides on top of the market price and remains unresponsive to changes over time and continues to be offered even if electricity prices increase*» (Couture *et al.*, 2010). Nel caso di *sliding* (o *floating*) *feed-in premium* il livello del bonus varia in base all'evoluzione dei prezzi di mercato: quando il prezzo dell'elettricità tende ad aumentare il premio si riduce e viceversa.

Ad esempio, in Italia, l'energia fotovoltaica è stata assoggettata a dei meccanismi di tipo *feed-in premium* (conto energia) che, in vigore fino al 6/07/2013, assegnava un incentivo a privati, imprese e pubbliche amministrazioni che avevano installato un impianto solare fotovoltaico connesso alla rete elettrica. In tale contesto e per una durata di venti anni, il titolare di un impianto fotovoltaico riceve un incentivo fisso e il prezzo dell'energia immessa in rete secondo le modalità contrattate con il GSE (Gestore dei servizi energetici). Un esempio di incentivo di tipo *feed-in tariffs* è, invece, rappresentato dalla tariffa omnicomprensiva così denominata in quanto il suo valore economico incorpora sia la componente incentivante sia una componente di valorizzazione dell'energia elettrica immessa in rete.

La differenza tra questi due meccanismi di supporto alle rinnovabili è, dunque, strettamente correlata alla struttura di pagamento e ai prezzi di mercato dell'energia elettrica. Se nel caso delle tariffe fisse (FIT) l'importo dell'incentivo ricevuto è *price market independent*, nel caso di tariffe a premio (FIP), invece, l'incentivo è collegato al prezzo del mercato dell'elettricità. All'interno dei meccanismi finanziari, si distingue, dunque, tra strumenti di supporto *dependent or independent* dal prezzo di mercato dell'elettricità: «*market-independent FIT policies are generally known as fixed-price policies, since they offer a fixed or minimum price for electricity from RES delivered to the grid; market-dependent FIT policies are generally known as premium price policies, or feed-in premiums, since a premium payment is added above the market price*». (Couture e Gagnon, 2010). Ciò che diverge sensibilmente tra le due tipologie di incentivi finanziari è soprattutto la cosiddetta *payment structure* illustrata nel grafico sottostante.

Fig. 3.0- *Payment structure: confronto tra Fixed-price model e Premium-price model*



Fonte: Couture e Gagnon (2010)

Come si può notare dal grafico, le due categorie di tariffe finanziarie divergono sensibilmente: nelle tariffe FIT, offrendo un pagamento per un periodo predeterminato di tempo, il pagamento dell'incentivo è indipendente dal prezzo di mercato, mentre in quelle FIP la somma dell'incentivo è strettamente correlata al prezzo di mercato dell'energia elettrica. Questa differenza implica il fatto che *«the total price received per kWh by the producer is less predictable in the premium scheme than under a FiT, as it depends on the electricity price»* (Nicolini e Tavoni, 2017).

I *Renewable portfolio standards* (RPS), noti in Europa con il termine *quota system* (o *quota obligations*), non consistono in incentivi finanziari ma, piuttosto, hanno carattere prescrittivo in quanto obbligano alcuni soggetti economici ad immettere in rete una certa quota di energia prodotta da fonti rinnovabili. Wiser *et al.* (2007) definiscono tali strumenti nel modo seguente: *«we define an RPS as a requirement that retail electricity suppliers procure a certain minimum quantity of eligible renewable energy or capacity, measured in either absolute units (kWh or kW) or as a percentage share of retail sales. RPS policies are generally designed to maintain and/or increase the*

contribution of renewable energy to the electricity supply mix». Generalmente, sono i produttori e i fornitori di energia elettrica derivante da fonti fossili a dovere ottemperare a tali obblighi in quanto, tali strumenti di *policy*, richiedono di soddisfare la domanda di elettricità attraverso una percentuale minima da fonti rinnovabili (Buckman, 2011). Pertanto, a differenza delle tariffe finanziarie, dove sono i livelli dei prezzi ad essere controllati dai *policy-makers*, i *renewable portfolio standards* rappresentano degli strumenti di controllo sulla quantità da produrre. Questi meccanismi di incentivazione trovano ampia applicazione negli Stati Uniti (Carley *et al.*, 2017) e vengono attuati attraverso l'utilizzo dei cd. *tradable renewable energy certificates (RECs)* che consistono in titoli negoziabili, attestanti la produzione di elettricità da fonti rinnovabili, che possono essere utilizzati per ottemperare agli obblighi previsti dalla normativa. In questo sistema di incentivazione i produttori e i fornitori di energia elettrica sono obbligati a detenere una quota specifica di energie rinnovabili nel proprio portafoglio. I certificati attestanti la produzione da fonti rinnovabili sono utilizzati per dimostrare la conformità con l'obbligo definito dalle autorità. Il regime delle quote con i *tradable renewable energy certificates* può essere uniforme oppure differenziato: nel primo, tutte le tecnologie energetiche ricevono lo stesso ammontare di certificati per unità di elettricità generata (esempi sono Svezia, Belgio, Polonia), nel caso di regime differenziato, invece, alcune tecnologie ricevono più certificati per unità generata e altre meno (esempi sono UK e Romania).

In Europa, ad eccezione di alcuni stati come Svezia e Polonia, tali meccanismi trovano scarsa applicazione. Per l'Italia, un esempio è rappresentato dai cosiddetti Certificati Verdi. Questi ultimi, sostituiti dal 2016 con i GRIN (Gestione Riconoscimento Incentivo), rappresentano una particolare forma di incentivazione per le energie rinnovabili basata sull'obbligo, a carico dei produttori ed importatori di energia elettrica prodotta da fonti non rinnovabili, di immettere nel sistema elettrico nazionale una quota minima di elettricità prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili. I soggetti obbligati, possono raggiungere tale quota immettendo in rete elettricità prodotta da energie rinnovabili oppure acquistando da altri produttori i Certificati Verdi che sono emessi a favore dei produttori di energia elettrica da rinnovabili. Nello specifico, i Certificati Verdi sono dei titoli negoziabili che attestano la produzione di una certa quantità di energia rinnovabile da un impianto I.A.F.R.

(impianto alimentato da fonti rinnovabili). Pertanto, il funzionamento dei *tradable renewable energy certificates* «is based on the obligation of producers, distributors, or consumers to maintain a specific quota of RES-E in their energy consumption: this quota has been set previously by government. In this system, the energy price is established by the agents that participate in the program. The quota system is known as quota obligation (or renewable portfolio standard), and it is mainly implemented by tradable green certificates that represent the environmental benefit of the electricity generated from RES-E» (Marques *et al.*, 2010).

In aggiunta ai meccanismi *quantity-based* (RPS) e alle tariffe incentivanti (FIT e FIP) si registra la presenza di un rilevante numero di misure economiche, normative e fiscali orientate a promuovere la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. Tali meccanismi sono denominati *supplementary support instruments* (Haas *et al.*, 2011; Kitzing *et al.*, 2012) e spesso sono utilizzati per migliorare il funzionamento dei *major support instruments* (Ragwitz *et al.*, 2012). Concentrando l'attenzione sulla realtà energetica europea si assiste alla presenza di ulteriori importanti meccanismi di incentivazione: incentivi fiscali, sussidi, prestiti, *net-metering* e *tendering schemes* (o quote d'asta). Sussidi e riduzioni fiscali rientrano nella categoria di incentivi a carattere contributivo che si concretizzano spesso in misure normative caratterizzate da un'elevata eterogeneità spaziale e temporale. Essi sono ampiamente utilizzate nel settore energetico e si distinguono in *investment grants*, *fiscal misure* e *financing support* (Kitzing *et al.*, 2012).

Il meccanismo di tipo *net-metering* (o misurazione netta), in uso soprattutto per il solare fotovoltaico, consiste in una forma di incentivazione che mira a compensare il valore dell'elettricità consumata con il valore dell'elettricità prodotta, riducendo i costi di acquisto dell'elettricità dalla rete. Tale strumento, in vigore in Italia dal 2009 con la denominazione "scambio sul posto", si sostanzia in una forma di compensazione economica tra immissioni e prelievi in quanto, da un lato, consente di immettere in rete l'energia prodotta e non auto consumata, dall'altro, di poter prelevare dalla rete l'energia prodotta senza sostenere costi di prelievo: il proprietario dell'impianto avrà delle detrazioni sul costo di acquisto poiché gli verrà contabilizzata solo l'energia elettrica netta, ovvero la differenza tra l'energia prodotta dall'impianto e l'energia consumata durante il periodo di fatturazione.

Il meccanismo di tipo *tender*, molto diffuso in Irlanda, consiste in una tipologia di incentivo che consente ad un'impresa privata di accordarsi con un ente pubblico al fine di realizzare un investimento in un territorio ad elevata capacità di rinnovabili: l'impresa che presenta l'offerta migliore per la realizzazione di un impianto alimentato a fonti rinnovabili si accorda sul prezzo per la realizzazione dell'impianto. In particolare, nelle quote d'asta, l'autorità responsabile avvia dei bandi di gara per la realizzazione di progetti specifici (o gruppi di progetti) con quantità definite di capacità energetica. I potenziali investitori competono per vincere l'opportunità di sviluppare il progetto, richiedendo un certo livello di supporto. A conclusione del processo di competizione, l'impresa che vince la gara riceve una tariffa garantita per un determinato periodo di tempo. «*In this system, the governments and regulating authorities request bids for the supply of electrical energy, by means of a specific technology, with the purpose of receiving an energy service at a competitive price and of developing that particular technology, in this case, the RES-E*» (Pablo-Romero *et al.*, 2017). Le quote d'asta sono, dunque, dei meccanismi competitivi per assegnare un sostegno finanziario agli impianti da fonti rinnovabili.

3.2- Revisione della letteratura

La letteratura scientifica che si propone di analizzare empiricamente le determinanti potenziali della diffusione delle rinnovabili elettriche non può prescindere da un'accurata analisi dei meccanismi di *policy* che contraddistinguono il settore elettrico (Sener *et al.*, 2018). L'effetto dei meccanismi di incentivazione sulla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili si compone, infatti, di un numero di contributi che, in base agli strumenti di *energy policy* valutati all'interno dei modelli e agli approcci metodologici, è possibile ricondurre a tre differenti sub-categorie (Carley *et al.*, 2017):

- ✓ Una prima categoria di ricerche si concentra esclusivamente sui meccanismi di incentivazione di tipo obbligazionario, ossia i *renewable portfolio standards*;
- ✓ Un secondo filone di letteratura analizza unicamente le *energy policy* di tipo finanziario, ossia le *feed-in tariffs* e le *feed-in premium*;
- ✓ Un'ultima categoria di ricerche, sviluppatasi negli ultimi anni, combina entrambi i filoni sopra menzionati con l'obiettivo di valutare congiuntamente l'efficacia

relativa dei numerosi meccanismi di incentivazione adottati all'interno delle unità statistiche analizzate;

I due strumenti di politica energetica esaminati principalmente in letteratura sono, dunque, rappresentati dagli incentivi finanziari (*feed-in tariffs* e *feed-in premium*) e obbligazionari (*renewable portfolio standards*). In merito ai risultati di questo filone di letteratura, in prima approssimazione è possibile affermare due importanti fatti stilizzati: se da un lato, l'effetto diffusione del meccanismo incentivante RPS risulta controverso in quanto non viene rilevato da alcuni autori che fanno ricorso a dati panel (Carley, 2009; Shirmali e Kniefel, 2011), dall'altro, la maggioranza degli autori riscontra un effetto positivo dei meccanismi di tipo finanziario (Jenner *et al.*, 2013; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). Secondo Jenner *et al.* (2013), in relazione alla tipologia di dati utilizzati, tali studi si possono raggruppare in due differenti gruppi. Se da un lato, un certo numero di ricerche scientifiche fa ricorso a dati di tipo *cross-section* (Menz e Vachon, 2006; Adelaja e Hailu, 2010; Alagappan *et al.*, 2011), dall'altro, la crescente disponibilità di dati ha favorito la diffusione di ricerche con dati panel (Carley, 2009; Dong, 2012).

Al fine di individuare le ragioni sottese all'adozione di un determinato schema di supporto, numerosi contributi presenti in letteratura hanno adottato degli approcci informativi e descrittivi su singoli e/o gruppi di paesi (Bird *et al.*, 2005; Mitchell *et al.*, 2006; Arbolino, 2015). In tale contesto, molto rilevanti sono gli studi di Hass *et al.* (2011), Kitzing *et al.* (2012) e Ragwitz *et al.* (2012) che ravvisano le modalità e le dinamiche attraverso cui gli stati europei hanno supportato lo sviluppo storico delle fonti energetiche rinnovabili nel settore dell'elettricità (RES-E). A causa della rilevanza dei temi trattati, si riscontrano, inoltre, numerosi *case studies* su singoli e/o gruppi di paesi (Bird *et al.*, 2005; Mitchell *et al.*, 2006; Arbolino, 2015) che rilevano come le politiche di supporto rappresentino un importante elemento per la diffusione delle RES-E. Molto interessanti sono anche alcuni *case studies* sugli incentivi all'energia fotovoltaica (Dusonchet e Telaretti, 2010; Sarasa-Maestro *et al.*, 2013; Campoccia *et al.*, 2014; Sener e Fthenakis, 2014; Orioli e Di Gangi, 2017) che si concentrano su contesti territoriali e temporali molto eterogenei.

All'interno della letteratura che si propone di indagare empiricamente il nesso di causalità tra le politiche energetiche incentivanti e la diffusione delle energie rinnovabili

per gli Stati Uniti si inserisce il contributo di Carley (2009). L'autore, analizzando i cinquanta stati che compongono gli Stati Uniti d'America per il periodo 1998-2006, si propone, infatti, di studiare l'effetto dei meccanismi incentivanti *renewable portfolio standard* (RPS) sulla quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili. Tuttavia, seppur contraddistinto da numerose criticità, il lavoro che assume peculiarità pionieristiche all'interno della letteratura è quello realizzato da Menz e Vachon (2006). Quest'ultimo, risulta essere il primo studio empirico sull'effetto dei *renewable portfolio standards* sulla promozione dell'energia eolica. Gli autori, utilizzando dei dati *cross-section* su trentanove stati americani, stimano un modello di regressione OLS che assume la seguente forma funzionale:

$$WDI = \beta_0 + \beta_1 Potential + \beta_2 RPS + \beta_3 FGD + \beta_4 MGPO + \beta_5 PBF + \beta_6 RET + \varepsilon$$

in cui la variabile di risposta è rappresentata dal cosiddetto *Wind Development Indices* (WDI), ossia «*the number of large wind energy projects (defined as projects with more than 25MW in capacity) developed in a given state over the period*» (Menz e Vachon, 2006). Le variabili esplicative comprendono, oltre ai *renewable portfolio standards* (RPS), ulteriori strumenti di *energy policy* che contraddistinguono il sistema di incentivi all'energia eolica nel campione studiato. La variabile RPS consiste, invece, in una variabile dicotomica che assume valore unitario se lo stato *i*-esimo ha implementato un sistema di tipo RPS prima del 2003 e zero altrimenti. Oltre ai *renewable portfolio standards* (RPS), vengono valutate le seguenti *state-levels policies*: *fuel generation disclosure requirement* (FGD), *mandatory green power option* (MGPO), *public benefits funds* (PBF), *retail choice* (RET). I risultati di questa analisi confermano i benefici energetici derivanti dall'implementazione di politiche di tipo obbligazionario: «*states with an RPS exhibited, on average, higher levels of capacity in 2003 and had larger expansion in wind capacity between 1998 and 2003 than states without an RPS*» (Menz e Vachon, 2006). Tuttavia, come anticipato, le stime realizzate risentono probabilmente di alcune criticità dovute alla bassa dimensione campionaria (37 osservazioni) e a problemi di distorsione da variabile omessa in quanto non sono state controllate tutte quelle caratteristiche inosservabili che contraddistinguono gli stati analizzati. Un'ulteriore problematica, strettamente connessa alla variabile dipendente del modello, riguarda l'utilizzo del *Wind Development Indices*. In particolare, l'analisi degli autori considera esclusivamente gli effetti delle politiche energetiche sullo sviluppo

dell'energia eolica. Carley (2009) sostiene, infatti, che «*analysis of Menz e Vachon (2006) considers the effects of RPS policies on wind energy development, not the percentage of wind energy in total generation portfolios. The overwhelming majority of RPS policies, however, aim to alter the percentage of RE, not simply the total amount of RE*» (Carley, 2009). Pertanto, sarebbe più opportuno valutare degli indicatori che tengano conto della dimensione del mercato elettrico.

Il contributo di Carley (2009), analizzando due differenti indicatori energetici, si propone di modellare il logaritmo naturale della quota annuale di energia elettrica generata da fonti rinnovabili e l'ammontare totale annuo di energia elettrica rinnovabile espresso in Megawattora, ad esclusione dell'energia idroelettrica, secondo un modello che assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{st} = \alpha + \beta_1 X_{st} + \delta_1 Z_{1st} + \delta_2 Z_{2s} + \gamma_t Z_t + \mu_{st}$$

in cui le unità osservazionali vengono indicati con il pedice s e il periodo temporale (1998-2009) con il pedice t . La variabile correlata ai meccanismi di tipo RPS (X), ottenuta dal database DSIRE (*Database of State Incentives for Renewables and Efficiency*), è binaria in quanto assume valore unitario in corrispondenza dell'anno (*timing* di adozione) e dello stato che ha implementato tale strumento di *energy policy* e zero altrimenti. Essa, contrariamente alla *proxy* esaminata da Menz e Vachon (2006), è, dunque, una variabile *time-variant* in quanto tiene conto del periodo di adozione del meccanismo incentivante valutato. Ulteriori variabili addizionali di controllo che possono contribuire alla diffusione delle RES-E sono state valutate nel modello. Esse si distinguono in due macro-categorie:

- ✓ *time-variant* (Z_1), come ad esempio il tasso di crescita delle popolazione;
- ✓ *time-invariant* (Z_2), tra cui assumono particolare interesse i potenziali energetici dei singoli stati;

I risultati delle stime mostrano alcuni importanti fatti stilizzati. In primo luogo, quando viene considerato il logaritmo naturale della quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili, non si evince alcun effetto causale della *policy* di tipo RPS. Di contro, quando si analizza l'ammontare totale annuo di energia elettrica rinnovabile, i risultati empirici mostrano che tale strumento di *policy* ha un effetto positivo e statisticamente significativo sulla variabile di risposta. In altre parole, *ceteris paribus*,

gli stati che hanno adottato politiche energetiche di tipo RPS non registrano dei tassi di diffusione delle rinnovabili maggiori rispetto agli stati che non dispongono di tale meccanismo: non si ha alcuna prova evidente che le politiche di tipo RPS siano in grado di aumentare la quota di energie rinnovabili non idroelettriche nel mix energetico.

Il lavoro di Carley (2009) risulta essere di particolare importanza in quanto, contrariamente a Marques *et al.* (2010), tiene conto delle caratteristiche temporali che contraddistinguono le *energy policy dummies*. Inoltre, l'autore stima l'effetto delle politiche *renewable portfolio standards* controllando per quei fattori *time-invariant* inosservabili che potrebbero avere un effetto significativo sulla diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. Probabilmente, l'utilizzo di *standard errors* robusti all'eteroschedasticità e all'autocorrelazione avrebbe perfezionato i risultati ottenuti.

Per quanto attiene alle strategie empiriche adottate nella letteratura per valutare le politiche energetiche, oltre al contributo di Menz e Vachon (2006), si registra la presenza di due ulteriori ricerche che utilizzano dati sezionali (Alagappan *et al.*, 2011 e Adelaja e Hailu, 2010). Entrambe le ricerche forniscono evidenza empirica a favore di una causalità positiva tra la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili e l'adozione di *policy* di tipo *feed-in tariff* per Stati Uniti, Canada ed Europa (Alagappan *et al.*, 2011) oppure di tipo *renewable portfolio standard* per i cinquanta stati che compongono gli Stati Uniti (Adelaja e Hailu, 2010). Nonostante i contributi di Alagappan *et al.* (2011) e Adelaja e Hailu (2010) confermino i benefici delle *policy* analizzate, così come in Menz e Vachon (2006), i risultati delle stime di Adelaja e Hailu (2010) presentano potenziali problematiche econometriche dovute alla bassa numerosità campionaria e al mancato controllo di tutte quelle caratteristiche *country-based* e/o *time-based* che, se omesse, potrebbero condurre a stime distorte.

In tale contesto, si inserisce anche la ricerca di Shrimali e Kniefel (2011) che, analizzando un panel di cinquanta stati americani per il periodo 1991-2007, si propone di valutare l'effetto dei meccanismi obbligazionari di tipo RPS sul rapporto tra la capacità rinnovabile totale non idroelettrica e la produzione totale netta di elettricità (C/G). Tale indicatore include l'energia elettrica generata da eolico, fotovoltaico, biomassa e geotermico mentre non include l'energia idroelettrica in quanto gli autori sostengono che «*hydropower is not included in the renewable energy capacity because*

most hydropower was created well before the mid-1990s, with few changes in capacity or costs over the time period being analyzed» (Shrimali e Kniefel, 2011). Il modello stimato è un panel con *fixed effects* che tiene conto anche degli effetti fissi temporali (T). La forma funzionale proposta è la seguente:

$$C/G_{it} = \alpha_0 + \beta R_{it} + \delta W_{it} + \gamma S_i + \theta T_t + \varepsilon_{it}$$

nella quale vengono valutati un indicatore binario (R), che varia sia tra gli stati osservati sia nel tempo, e ulteriori variabili addizionali di controllo (W) di carattere economico (prezzo medio dell'elettricità e del gas naturale, GDP pro capite) ed energetico (percentuale energia elettrica da carbone). L'importanza della ricerca di Shrimali e Kniefel (2011) è strettamente connessa alla disaggregazione della variabile dipendente in quattro diversi indicatori energetici: «*wind nameplate capacity (windcap)*, *biomass nameplate capacity (biocap)*, *geothermal nameplate capacity (geocap)*, and *solar nameplate capacity (solarcap)*» (Shrimali e Kniefel, 2011). Le stime sull'impatto energetico dei RPS mostrano, però, risultati controversi e configurano un effetto negativo e/o non statisticamente significativo sugli indicatori energetici analizzati. Nel caso dell'energia geotermica, invece, si registra un effetto positivo per gli stati che hanno adottato i RPS.

Jenner (2012) e Jenner *et al.* (2013), analizzando un campione di ventisei paesi europei, hanno cercato di studiare l'efficacia dei meccanismi *feed-in tariffs* attraverso l'utilizzo di un *Investment Decision Model* (IDM) per spiegare come le diverse caratteristiche di tale meccanismo incentivante (in termini di importo tariffario, durata del contratto, prezzo dell'elettricità, durata del sistema, incertezza dei prezzi, costo di generazione, tasso di sconto e un'opzione di investimento alternativa) influenzino l'incentivo ad investire nei sistemi di energia rinnovabile.

Nel lavoro di Jenner (2012) il campione analizzato è composto da ventisei paesi europei valutati per il periodo temporale 1990-2010. La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili viene analizzata attraverso un modello panel con effetti fissi che assume la forma seguente:

$$q_{hit} = \alpha_0 + \beta_1 FIT_{it} + \beta_2 FIT\ Tariff\ Amount_{it} + \beta_3 SFIT_{hit} + \beta_4 ISI_{hit} + \beta_x Z_{it} + \beta_y W_{it} + \gamma \mu + \varepsilon_{it}$$

La variabile dipendente del modello è rappresentata dalla quantità annuale di energia elettrica rinnovabile (q) derivante dalla tecnologia h (biomassa, geotermico, eolico e fotovoltaico). Le variabili esplicative sono rappresentate dal rendimento che un investitore guadagna a causa dell'esistenza di un meccanismo incentivante di tipo *feed-in tariffs* (SFIT), dalla quota obbligatoria delle fonti rinnovabili (ISI), dall'ammontare nominale che viene pagato per kilowattora (*FIT Tariff Amount*), da alcune variabili espressione delle condizioni socio-economiche degli stati (W) e da un insieme di indicatori binari (Z). In tal caso, la variabile espressione dell'adozione di una politica incentivante di tipo FIT viene trattata come *time-variant*: «*FIT Binary represents a dummy variable that equals 1 if a FIT is in place and 0 if it is not*» (Jenner, 2012). I risultati delle stime forniscono importanti spunti. In primo luogo, l'indicatore binario della presenza delle tariffe energetiche incentivanti è positivo e statisticamente significativo solo per l'energia fotovoltaica. Di contro, «*the binary variables for FIT policies to support biomass, geothermal, and wind power generation produce large negative parameters*» (Jenner, 2012).

Nel lavoro di Jenner *et al.* (2013), gli autori, concentrandosi esclusivamente sull'energia eolica e fotovoltaica, concludono che i meccanismi FIT sono più efficaci nel promuovere investimenti che sfruttano l'energia solare. In tale contesto, viene analizzato un panel di ventisei paesi europei per gli anni 1992-2008 con l'obiettivo di fornire un triplice contributo alla letteratura esistente: «*first, we apply an econometric framework to assess FIT effectiveness in Europe. We assemble country-specific data at a technology-specific level for solar PV and onshore wind capacity for the period from 1992 to 2008 in 26 European Union countries. Thus, we can test for the impact of political and socioeconomic variables on RES-E development and also assess the effectiveness of FIT and other policies specifically. Second, we use a fixed-effects panel data approach to control for unobserved country-level characteristics that may influence both policy implementation and RES-E development. Third, we develop a new statistical indicator for feed-in tariffs that accounts for policy design features and market factors that may influence policy strength*» (Jenner *et al.*, 2013). L'effetto delle tariffe incentivanti di tipo FIT viene analizzato all'interno di un modello panel con *fixed effects* che assume la seguente specificazione funzionale:

$$\ln(\text{AddedCapacity})_{ist} = \beta_0 + \beta_1 \text{ROI}_{hit} + \beta_2 \text{INCRQMTSHARE}_{st} + \beta_x Z_{ist} + \beta_y W_{ist} + \mu_s + \mu_{ist}$$

in cui la variabile dipendente «*is the additional RES-E generation capacity installed between years t-1 and t for energy technology i (solar PV or onshore wind)*» (Jenner *et al.*, 2013). Specificatamente, l'effetto delle FIT viene controllato per numerose altre variabili che potrebbero spiegare le variazioni che avvengono nella variabile dipendente: il ROI (che rappresenta il ritorno sull'investimento associato alla capacità energetica rinnovabile *i*, nell'anno *t* all'interno del paese *s*) e l'INCRQMTSHARE (che rappresenta l'aumento obbligatorio nella produzione di energia rinnovabile). Ulteriori controlli sono stati effettuati attraverso l'inserimento di variabili sia di interesse socio-economico (GDP pro capite e importazioni nette) sia di carattere energetico (la quota di energia derivante dal nucleare, dal carbone, dal petrolio e dal gas naturale). I risultati delle stime, in accordo con Jenner (2012), mostrano che le *policy* basate sui meccanismi FIT hanno contribuito in modo significativo all'aumento della capacità energetica fotovoltaica piuttosto che ad un incremento della capacità energetica che sfrutta l'energia eolica.

Un importante contributo che si focalizza sulla realtà energetica europea è il lavoro di Marques *et al.* (2010). La caratteristica distintiva di questa ricerca riguarda sia le *energy policy variables* analizzate sia le procedure econometriche implementate. Analizzando un panel di ventiquattro paesi europei per gli anni 1990-2006, gli autori si propongono di modellare il logaritmo naturale del cosiddetto CRES, ossia il contributo delle energie rinnovabili in relazione alla quantità totale di energia, in funzione di alcuni importanti fattori politici, socioeconomici e *country-specific*. Il modello, stimato attraverso l'utilizzo di un *Pooled OLS* e di un panel con effetti fissi e casuali, assume la seguente forma funzionale:

$$LCRES_{ct} = \alpha + \sum_{k=1}^k B_k X_{kct} + \sum_{j=1}^j \delta_j Z_{jc} + \varepsilon_{ct}$$

dove vengono considerate numerose variabili *time-invariant* (Z) e *time-variant* (X). L'obiettivo degli autori è quello di valutare analiticamente le determinanti e gli ostacoli alla diffusione delle rinnovabili elettriche. A tal fine, i modelli di regressione stimati contengono una serie di indicatori espressione delle condizioni politiche, economiche ed

ambientali dei paesi analizzati. La variabile di maggiore interesse è rappresentata da una variabile dicotomica *time-invariant* (DEU01): «*we consider a shift dummy variable to identify EU Members in the year 2001. Beyond that, we separate the countries in two groups: the EU Members and the non-EU Members (but potentially adherent countries)*» (Marques *et al.* 2010). Le altre variabili esplicative sono rappresentate dai seguenti indicatori: emissioni pro capite di anidride carbonica, consumi energetici pro capite, il GDP, contributo delle fonti energetiche tradizionali (gas, carbone, petrolio e nucleare) nel mix energetico, importazioni di energia elettrica, prezzi dell'energia elettrica da fonti tradizionali e area geografica. I risultati delle stime sono molto interessanti. In primo luogo, in accordo con Dong (2012), si registra una relazione negativa e statisticamente significativa tra le emissioni di CO₂ e la diffusione delle rinnovabili. Medesimo risultato si registra nella relazione tra la quota energetica da rinnovabili e la quota energetica da fonti fossili: all'aumentare della quota energetica derivante da carbone e petrolio la percentuale di energia rinnovabile tende a diminuire. Infine, la variabile dicotomica che divide il campione in due gruppi (DEU01) assume segno positivo e statisticamente significativo. Occorre, tuttavia, notare che Marques *et al.* (2010) si propongono di determinare i *drivers* delle fonti energetiche rinnovabili senza considerare i due principali meccanismi di *energy policy* ampiamente discussi in precedenza ma, piuttosto, prendono come riferimento normativo la direttiva CE/2001/77 che identifica il gruppo di paesi dell'Unione Europea prima del 2001. L'omissione dei meccanismi incentivanti nello studio dei *drivers* delle rinnovabili elettriche potrebbe condurre a risultati distorti in quanto è stato ampiamente dimostrato che tali *policy* rappresentano dei fattori chiave per la diffusione delle fonti rinnovabili sul territorio europeo (Groba *et al.*, 2011; Jenner *et al.*, 2013; Bolkesjo *et al.*, 2014; Nicolini e Tavoni, 2017).

3.2.1- La letteratura sulla valutazione congiunta dei support schemes alle RES-E

Come anticipato in precedenza, nelle recenti ricerche empiriche che si occupano di studiare l'efficacia degli incentivi energetici si registra la tendenza a valutare congiuntamente più meccanismi di *energy policy* (Dong, 2012; Bolkesjo *et al.*, 2014; Kilinc-Ata, 2016; Carley *et al.*, 2017; Nicolini e Tavoni, 2017; Garcia-Alvarez *et al.*,

2018). Molto importante è il lavoro di Bolkesjo *et al.* (2014) che, analizzando un panel di cinque paesi europei (Francia, Italia, Germania, Spagna e UK) per il periodo temporale 1990-2012, si concentra su tre differenti meccanismi di incentivazione: *feed-in tariffs*, *renewable portfolio standards* e *tendering schemes*. L'importanza del lavoro è strettamente connessa alle variabili dipendenti utilizzate nei modelli: «*as dependent variable we use the natural logarithm of cumulative RE capacity for each country, technology and year*». (Bolkesjo *et al.*, 2014). Questa strategia risulta essere molto efficace in quanto i meccanismi di incentivazione delle fonti rinnovabili non variano solo in funzione dei paesi esaminati ma anche in relazione alle tecnologie energetiche. Gli autori, dunque, propongono un *behavior model*, stimato per mezzo di un panel con effetti fissi e Driscoll-Kraay *standard errors*, che assume la seguente forma funzionale:

$$\ln(Cap)_{Hit} = \alpha_0 + \beta_1 SFIT_{hit} + \beta_2 IPR_{it} + \beta_3 Binary\ tender_{hit} + \beta_x K_{it} + \mu_{it}$$

dove la variabile dipendente (*Cap*) è rappresentata dal logaritmo naturale della capacità energetica installata della tecnologia *h* (fotovoltaico, eolico e biomassa), nel paese *i* e nell'anno *t*. Tale variabile, in accordo con Jenner *et al.* (2013), viene modellata in funzione di due variabili continue: il rendimento che un investitore guadagna a causa dell'esistenza di un meccanismo incentivante di tipo finanziario (SFIT) e il cosiddetto *Incremental Percentage Requirement* (IPR), ossia un indicatore che misura l'efficacia di un meccanismo RPS (si veda, in particolare, Yin e Powers, 2010). La variabile espressione degli strumenti di *energy policy* (*Binary tender*) assume carattere dicotomico: «*binary variable taking the value 1 if there existed such a scheme in a specific country for a specific technology and otherwise 0*» (Bolkesjo *et al.*, 2014). Ulteriori variabili addizionali di controllo (*K*) sono rappresentate dal GDP pro capite e dalle quote di energia elettrica distinte per singola fonte (nucleare, gas naturale, petrolio, rinnovabili). I risultati delle stime confermano l'efficacia dei meccanismi incentivanti analizzati nel promuovere la capacità energetica delle tecnologie esaminate, soprattutto per l'energia eolica. In particolare, «*for the variable binary tender we reject the null hypothesis that the presence of tendering schemes has no impact on cumulative capacity of onshore wind at a 1% significance level but we cannot reject the null hypothesis of no such effect for PV or biomass in our analysis*» (Bolkesjo *et al.*, 2014). Tuttavia, le osservazioni campionarie (88) sono in numero

eccessivamente ristretto e, come in Menz e Vachon (2006), potrebbero sussistere alcune problematiche di carattere econometrico dovute alla bassa numerosità campionaria.

In tale contesto si inserisce il lavoro di Kilinc-Ata (2016) che, analizzando un panel di cinquanta stati degli Stati Uniti e di ventisette paesi europei, si propone di valutare l'efficacia dei seguenti meccanismi incentivanti: *feed-in tariffs*, *quotas*, *tenders* e *tax incentives* per il periodo temporale 1990-2008. Il modello proposto, stimato per mezzo di un panel con effetti fissi, assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = \beta Policy_{it} + \delta X_{it} + \sum_{j=1}^{T=1} \tau_j T_j + \mu_i + \omega_{it}$$

in cui la capacità di energia elettrica rinnovabile non-idroelettrica (geotermico, eolico, fotovoltaico e biomassa) in percentuale alla capacità elettrica totale viene analizzata in funzione dei quattro strumenti di *policy* e di alcune variabili di carattere economico ed ambientale (X). Le fonti informative sono rappresentate dall'International Energy Agency (IEA) e dalla U. S. Information Energy Administration (EIA). Le variabili espressione dei meccanismi di incentivazione assumono carattere binario: «*a country was coded as 1 if it adopted any of the policy instruments (either FIT, quota, tender, or tax incentives) and a zero otherwise*» (Kilinc-Ata, 2016). Molto importante, contrariamente a Marques *et al.* (2010), è la considerazione per l'elemento temporale dei meccanismi di *policy* esaminati in quanto «*the four policy variables take on a value of 1 after the introduction of any policy instruments, and 0 before*» (Kilinc-Ata, 2016). Tuttavia, come sostiene l'autore, nel modello stimato non si tiene conto della possibile multi-applicabilità degli strumenti sopra analizzati. Difatti, le unità statistiche oggetto della ricerca potrebbero aver adottato contemporaneamente e/o separatamente uno o più meccanismi di incentivazione: «*for some countries, more than one policy is adopted, while other countries adopt just one. One drawback of the specification used here is that within policy type heterogeneity is ignored*» (Kilinc-Ata, 2016). I risultati delle stime mostrano che, ad eccezione dei sistemi *quota-based*, le *policy energy variables* presentano un effetto positivo e statisticamente significativo sulla diffusione delle rinnovabili elettriche. Pertanto, i paesi con politiche energetiche di tipo RPS non presentano tassi di crescita delle rinnovabili maggiori rispetto agli stati che non hanno adottato tali strumenti. L'autore, infatti, afferma che «*the*

estimates of policy effectiveness presented here suggest that FIT, tender and tax are positively linked to capacity of RE deployment. However, quota-based RE policies do not seem to have significant effect on reliance. [...] countries/states with quota based policies do not have statistically higher rates of capacity of RE deployment than countries/states without quota based policies» (Kilinc-Ata, 2016). I coefficienti associati alle altre variabili esplicative (X) mostrano, invece, risultati controversi.

Un contributo che cerca di valutare congiuntamente l'efficacia di entrambi i meccanismi di incentivazione (FIT e RPS) per l'energia eolica è rinvenibile nel lavoro di Dong (2012). L'autore, analizzando un panel bilanciato composto da cinquantatre paesi valutati per il periodo temporale 2005-2009, si pone come obiettivo principale quello di verificare quale dei due strumenti di *energy policy* sia il più efficace nel facilitare la diffusione dell'energia eolica. A tal fine, viene implementato un modello econometrico, stimato attraverso un *Pooled OLS* e un panel con *random* e *fixed effects*, che si propone di modellare la capacità eolica annuale (Y), espressa in Megawatt, secondo un'equazione che assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = \alpha + \theta_t + \beta_1 FIT_i + \beta_2 RPS_i + \beta_3 FIT * RPS_i + \delta_1 Z_{it} + \delta_2 \omega_i + \mu_{it}$$

Oltre alla valutazione di due variabili binarie che assumono valore unitario per i paesi in cui è stato adottato un meccanismo di tipo *feed-in tariff* (FIT) o *renewable portfolio standard* (RPS), viene analizzata una variabile d'interazione tra i due strumenti di *policy* (FIT*RPS) che testa l'efficacia relative di entrambi i meccanismi incentivanti rispetto ai paesi che non hanno attuato nessuna politica. I dati sulle *energy policy variables* sono state tratte dalla banca dati fornita dal Renewable Global Status Report (2010). Le variabili addizionali di controllo (Z) sono rappresentate dal GDP pro capite, dai consumi elettrici, dalle importazioni nette di petrolio e dalle emissioni pro capite di CO₂. Inoltre, l'effetto dei meccanismi di incentivazione sulla capacità elettrica eolica viene controllato attraverso la considerazione di una *dummy time-invariant* che tiene conto del numero di politiche energetiche adottate in ogni paese. I risultati delle stime tengono conto di scenari multipli. In primo luogo, attraverso un *Pooled OLS*, le *policy dummies* sono trattate come fattori invarianti nel tempo: «*both policies and their interaction are treated as time- invariant at first, in which case only information in 2009 is used for the three indicators»* (Dong, 2012). Successivamente, per mezzo di un

panel con effetti fissi, viene considerato anche il *timing* di adozione dei due meccanismi di *policy*: «*later on, after adding the time information on when the policies are adopted in each country, fixed effects model can be estimated to compare the results with pooled OLS*» (Dong, 2012). I risultati delle stime mostrano che, in entrambi le situazioni, i meccanismi di incentivazione FIT, rispetto ai RPS, sono più efficaci nel facilitare la diffusione dell'energia eolica: «*all of the other four models indicate that adopting FIT could spur around 1800 MW more capacity installed relative to adopting RPS across countries*» (Dong, 2012). Di particolare interesse sono i segni dei coefficienti associati al GDP pro capite e alle emissioni di CO₂. Nel primo caso (GDP pro capite) i coefficienti assumono segno positivo ma statisticamente non significativo; di contro, le emissioni di CO₂ presentano un effetto negativo e statisticamente significativo sulla diffusione dell'energia eolica.

Di primaria importanza è il più recente contributo di Carley *et al.* (2017) in cui, utilizzando un panel sbilanciato di centosessantaquattro paesi valutati per il periodo temporale 1990-2010, viene analizzata l'efficacia di due strumenti di *energy policy* nel promuovere la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. In particolare, i meccanismi di incentivazione su cui si basa l'intera ricerca sono rappresentati dalle *feed-in tariffs* (FIT) e dai *renewable portafoglio standards* (RPS). Le variabili dipendenti valutate all'interno dei modelli, estratte dal database fornito dalla U. S. Energy Information Administration (EIA), sono rappresentate dalla quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili e dall'incremento annuale di tale quota, ossia la produzione totale di energia elettrica da rinnovabili nell'anno t meno la produzione totale di energia rinnovabile nell'anno $t-1$. Tali variabili vengono modellate secondo un modello econometrico che assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \lambda_t + \delta_i + \beta_1 F_{it} + \beta_2 R_{it} + \gamma_1 X_{it} + \varepsilon_{it}$$

dove, alternativamente, le variabili espressione della diffusione delle fonti rinnovabili vengono regredite su due indicatori binari espressione dei meccanismi *feed-in tariffs* (F) e *renewable portafoglio standards* (R); λ_t e δ_i rappresentano, rispettivamente, gli effetti fissi temporali e individuali. Oltre, alle politiche energetiche vengono anche valutate delle variabili suppletive di controllo (X) espressione delle caratteristiche socio-economiche dei paesi analizzati. Molto interessante è comprendere come gli autori

abbiano costruito le *policy variables*. In particolare, attraverso l'utilizzo di numerose fonti informative (REN21, REEEP, International Energy Agency, World Future Council; NCSC, UNFCCC, Ecofys), gli autori si propongono di stimare gli effetti delle *policy* sulla diffusione delle rinnovabili attraverso delle variabili dicotomiche che assumono valore unitario in corrispondenza delle unità osservative in cui la *policy* analizzata è entrata in vigore e zero altrimenti. Per quanto attiene alla variabile espressione della quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili i risultati delle stime mostrano che entrambi i meccanismi di incentivazione hanno avuto un effetto positivo: «*on average, countries with a FIT have 1.78% points more RE as a share of total electricity generation than countries without one; countries with an RPS have 2.81% points more RE on average than those without, holding all else constant*» (Carley *et al.*, 2017). Nel caso in cui vengono considerati i tassi di crescita delle rinnovabili elettriche, i risultati a cui pervengono gli autori mostrano che «*countries with a FIT generate 1.57 terawatt-hours more new annual RE on average than countries without a FIT, holding all other factors constant, while countries with an RPS generate an additional 4.10 terawatt-hours of new annual RE on average than countries without an RPS*» (Carley *et al.*, 2017). Poiché gli effetti marginali dei meccanismi di incentivazione di tipo RPS sono migliori rispetto a quelli di tipo FIT, gli autori enfatizzano il ruolo dei primi come causa trainante della diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. Questa assunzione viene anche confermata da un'analisi di sensibilità che replica la medesima strategia empirica per la quota di energia elettrica generata da fonti rinnovabili non idroelettriche e dall'incremento annuale di tale quota. Tuttavia, gli autori analizzano un campione di paesi altamente eterogeneo (164 paesi) che potrebbe soffrire di errori di misurazioni nelle variabili e di differenze di contesto.

Un recente lavoro è rinvenibile nella ricerca di Garcia-Alvarez *et al.* (2018) in cui, concentrandosi esclusivamente sull'energia fotovoltaica, si analizza l'efficacia dei meccanismi *feed-in tariffs* e *quota system* per un panel di ventotto paesi UE valutati per gli anni 2000-2014. Il modello si propone di modellare la capacità fotovoltaica installata (PV_CAPACITY) secondo un modello *Pooled OLS* che assume la seguente forma funzionale:

$$(PV_{CAPACITY})_i = \alpha_0 + \beta X_i + \sum_{t=2000}^{2014} D_t + \varepsilon_i$$

Le variabili espressione dell'adozione dei meccanismi incentivanti nei paesi (D) sono rappresentate da tre variabili dicotomiche: «*RES-E energy promotion policy1, which makes reference to the non-existence of a specific promotion policy in solar PV Energy (RES-E_POL1)*. *RES-E energy promotion policy2, which refers to the existence of a quota obligation in solar PV energy (RES-E_POL2)*. *RES-E energy promotion policy3, which refers to the existence of FIT in solar PV energy (RES-E_POL3)*» (Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). I risultati delle stime testimoniano che i meccanismi di incentivazione sono efficaci nel promuovere l'energia solare: si registra una differenza statisticamente significativa tra i gruppi di trattamento (RES-E_POL2 e RES-E_POL3) rispetto al gruppo di controllo (RES-E_POL1). Tuttavia, gli autori non prendono in considerazione in fatto che, come avviene per l'Italia, l'energia fotovoltaica potrebbe essere assoggetta a trattamenti multipli.

3.2.2- I drivers delle RES-E: strategie investigative

Dagli articoli analizzati in precedenza, emergono alcuni importanti elementi (riportati nella Tabella 3.1) in termini di strategia metodologica, variabili *policy related*, unità osservazionali e periodi temporali che registrano un certo grado di omogeneità che procede in diverse direzioni.

Tabella 3.1- Contributi empirici analizzati

<i>Autori</i>	<i>Periodo</i>	<i>Paesi</i>	<i>Metodologia</i>	<i>Energy Policy Variables</i>	<i>Variabile Dipendente</i>
Menz e Vachon (2006)	1998-2003	39 stati americani	Linear regression	RPS	WDI
Carley (2009)	1998-2007	48 stati americani	FE	RPS	LCRES, RE_TOTAL
Marques <i>et al.</i> (2010)	1990-2006	24 paesi EU	Pooled OLS, FE, RE	EU 2001	LCRES
Shrimali e Kniefel (2011)	1991-2007	50 stati americani	FE	RPS	RE-NON IDRO SHARE
Jenner (2012)	1990-2010	26 paesi EU	FE	FIT	RE-GEN
Dong (2012)	2005-2009	53 paesi	Pooled OLS, FE, RE	FIT, RPS	CAP WIND
Jenner <i>et al.</i> (2013)	1992-2008	26 paesi EU	FE	FIT	AD
Bolkesjo <i>et al.</i> (2014)	1990-2010	5 paesi EU	FE	Tendering schemes	LCAP
Kilinc-Ata (2016)	1990-2008	27 paesi europei e 50 stati americani	FE	FIT, quotas, tax incentive, tender	RE-NON IDRO CAPACITY
Carley <i>et al.</i> (2017)	1990-2010	164 paesi	FE	FIT, RPS	CAP_WIND
Garcia-Alvarez <i>et al.</i> (2018)	2000-2014	28 paesi europei	Pooled OLS	FIT, RPS	SOLAR_PV

Nota: FE= Fixed Effects; RE= Random Effects; WDI= wind development indices; RE SHARE= quota energia elettrica da RES sull'energia totale; RE_TOTAL= produzione totale di energia elettrica da RES; LCAP= logaritmo naturale della capacità elettrica installata da RES; CAP_WIND= capacità eolica elettrica installata; RE-NON IDRO CAPACITY= capacità elettrica da geotermico, biomassa, eolico e fotovoltaico; SOLAR_PV= capacità elettrica installata di fotovoltaico; FIT= feed-in tariffs; RPS= renewable portfolio standars; EU 2001= direttiva CE/2001/77; LCRES= logaritmo naturale della quota di energia elettrica da RES sull'energia totale; RE-GEN= quantità annuale di energia elettrica generata da fonti rinnovabili; AD= capacità addizionale di produzione di energia elettrica da rinnovabile

La particolarità che contraddistingue i modelli presenti in letteratura è rinvenibile nell'utilizzo di *policy energy variables* che assumono carattere dicotomico: la totalità delle ricerche che si propongono di analizzare l'effetto causale dei meccanismi incentivanti sulla diffusione delle rinnovabili elettriche fa ricorso a variabili binarie che

assumono valore unitario per i paesi che hanno subito un trattamento, ossia l'adozione di un determinato meccanismo di *policy*, e zero altrimenti. Difatti, i contributi analizzati in precedenza fanno uso di variabili dicotomiche che esprimono l'adozione o meno di un certo meccanismo incentivante: la ragione è strettamente connessa all'indisponibilità di dati quantitativi. Un'eccezione è rinvenibile nel contributo di Nicolini e Tavoni (2017) che, analizzando cinque paesi europei (Italia, Francia, Germania, Spagna e Regno Unito), «*collecting punctual data on the amount of subsidies granted in five EU countries in the period 2000–2010 and analysing the effect of subsidies and average tariffs on both energy production and installed capacity*» (Nicolini e Tavoni, 2017).

Un certo grado di uniformità si registra anche dal punto di vista prettamente analitico. Eccezion fatta per Menz e Vachon (2006) e Adelaja e Hailu (2010) la maggior parte degli autori utilizza dati longitudinali (Marques *et al.*, 2010; Jenner *et al.*, 2013; Bolkesjo *et al.*, 2014; Kilinc-Ata, 2016; Nicolini e Tavoni, 2017; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). D'altronde, la tipologia di dati analizzati influenza la metodologia econometrica implementata dai vari autori. Se da un lato, i contributi di Menz e Vachon (2006) e Adelaja e Hailu (2010) fanno ricorso a delle semplici regressioni lineari, dall'altro, la quasi totalità dei ricercatori si avvale di modelli *Pooled OLS* (Kilinc-Ata, 2016) e panel con *fixed* e/o *random effects* (Marques *et al.*, 2010; Jenner *et al.*, 2013). Occorre notare che la strategia empirica e le *energy policy variables* sono altamente correlate: se da un lato, l'utilizzo di variabili binarie *time-variant* si adatta maggiormente all'utilizzo di modelli panel con effetti fissi, dall'altro, quando si valutano variabili binarie *time-invariant* non è possibile controllare gli effetti fissi individuali attraverso *fixed effects models* per problemi di collinearità (Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). In quest'ultimo caso si assiste all'utilizzo di *Pooled OLS* e/o modelli panel con effetti casuali. Di conseguenza, se l'efficacia dei vari meccanismi di incentivazione è stata ampiamente studiata in letteratura, la *reserch question* inesplorata riguarda l'eccessiva diversificazione delle politiche energetiche. Ad eccezione di Dong (2012) e Garcia-Alvarez *et al.* (2018), la maggioranza delle ricerche indaga principalmente l'effetto energetico associato all'introduzione o meno di un certo meccanismo incentivante.

Un'importante considerazione riguarda gli indicatori energetici utilizzati come variabili dipendenti: la maggior parte degli autori si propone di stimare l'effetto delle politiche energetiche utilizzando degli indicatori energetici di produzione (Marques *et*

al., 2010; Jenner, 2012; Jenner *et al.*, 2013) o di capacità (Carley *et al.*, 2017). In tale contesto occorre sottolineare che i meccanismi di incentivazione alle rinnovabili spesso non ricomprendono tutte le tecnologie energetiche. Ad esempio, per l’Austria i *support schemes* non sono applicabili all’energia idroelettrica. Sarebbe, dunque, più opportuno valutare ogni singola tecnologia energetica oppure le rinnovabili elettriche non idroelettriche. Inoltre, poiché gli stati europei sono caratterizzati da dimensioni territoriali molto eterogenee, utilizzare un indicatore energetico in termini assoluti potrebbe non tener conto della dimensione del mercato e sottostimare o sovrastimare la dimensione dell’effetto diffusione associato alle politiche energetiche.

Infine, un discorso controverso riguarda le variabili addizionali di controllo che, in relazione alla tipologia di indicatore utilizzato, possono essere classificate in quattro differenti gruppi: variabili di natura energetica, socioeconomica, ambientale e geografica (si vedano, in particolare, i contributi di Nicolini e Tavoni, 2017 e Garcia-Alvarez *et al.*, 2018).

3.3- Metodologia: specificazioni econometriche

Nell’ambito del quadro teorico ed analitico precedentemente analizzato sarebbe interessante studiare empiricamente le determinanti del processo di diffusione delle rinnovabili elettriche all’interno del panorama energetico europeo. Generalmente, i modelli econometrici che si propongono di studiare tale processo consistono in funzioni lineari (Carley, 2009; Shrimali e Kniefel, 2011; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) che modellano un indicatore energetico di capacità (Dong, 2012; Carley *et al.*, 2017) e/o di produzione (Carley *et al.*, 2011; Nicolini e Tavoni, 2017) in relazione ad una molteplicità di variabili che includono uno o più schemi di supporto alle rinnovabili elettriche. Un certo grado di eterogeneità si rileva, invece, nella metodologia empirica: si assiste all’utilizzo di *Pooled OLS* (Dong, 2012; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) e panel con effetti fissi e/o casuali (Carley, 2009; Kilinc-Ata, 2016; Carley *et al.* 2017). Questa difformità nelle metodologie di stima, di seguito approfondita, è di fondamentale importanza perché ci consente di individuare la metodologia econometrica adatta per gli scopi di ricerca perseguiti.

In generale, i lavori esaminati utilizzano dei modelli multivariati, con variabili espresse in termini assoluti e/o logaritmici, che assumono la seguente forma funzionale:

$$RES-E = f(Policy, Environment, Economics, Energy)$$

Dove:

- *RES-E* è un indicatore energetico *renewable-related* di capacità (Carley, 2009; Dong, 2012) e/o di produzione (Marques *et al.*, 2010; Shrimali e Kniefel, 2011);
- *Policy* rappresenta un insieme di variabili binarie che indicano l'introduzione di uno schema di supporto (Shrimali e Kniefel, 2011; Kilinc-Ata, 2016) e/o la tipologia della *policy* implementata (Dong, 2012; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018);
- *Environment* rappresenta il livello di inquinamento ambientale (Dong, 2012; Carley *et al.*, 2017);
- *Economics* indica il livello del GDP totale e/o pro capite (Menz e Vachon, 2006; Jenner, 2012);
- *Energy* consiste, generalmente, in un insieme di variabili *energy-related* che ricomprendono i consumi elettrici (Kilinc-Ata, 2016), le importazioni e/o le esportazioni di energia elettrica (Carley, 2009), i prezzi dell'elettricità (Shrimali e Kniefel, 2011) e il contributo energetico delle fonti energetiche tradizionali (Bolkesjo *et al.*, 2014);

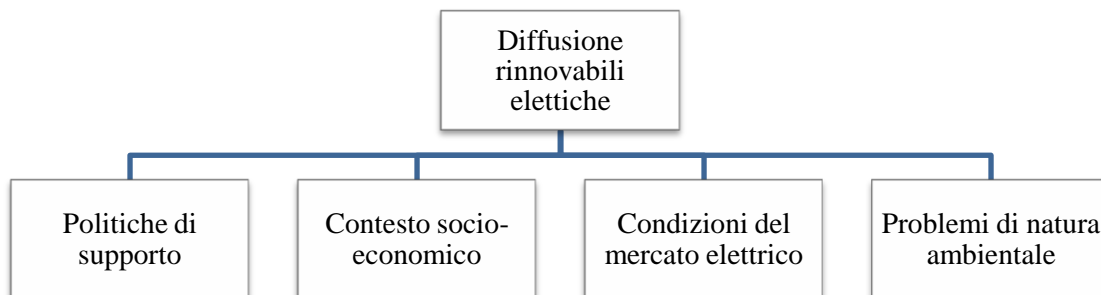
Come anticipato, l'omogeneità teorica è però controbilanciata da una certa difformità metodologica. Quest'ultima è strettamente connessa alla tipologia di *policy energy variables* valutate all'interno dei modelli (per un approfondimento si veda Shrimali e Kniefel, 2011). Se da un lato, un certo numero di autori analizza delle variabili dicotomiche *time-variant* (Shrimali e Kniefel, 2011; Jenner *et al.*, 2013; Bolkesjo *et al.*, 2014), dall'altro, si riscontra un certo numero di contributi caratterizzati dalla presenza di *policy dummies* invariati nel tempo (Marques *et al.*, 2010; Dong, 2012; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). Nel caso di variabili dicotomiche *time-invariant*, i modelli stimati sono orientati a valutare le differenze nell'*outcome* tra paesi che implementano politiche energetiche alternative: i coefficienti associati a tali indicatori sono interpretabili come differenza tra medie condizionate per il gruppo di trattamento (paesi che adottano un particolare meccanismo di supporto alle rinnovabili) e il gruppo

di controllo (paesi che non adottano alcun meccanismo di incentivazione o un sistema di incentivazione diverso da quello testato nei modelli econometrici). Gli indicatori qualitativi che variano nel tempo, invece, si adattano all'applicazione dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* (LSDV) in quanto è possibile controllare tutti quei fattori individuali che variano tra le unità statistiche analizzate ma restano costanti nel tempo: le variabili dicotomiche *time-variant* sono funzionali per studiare l'efficacia temporale di una certa tipologia *policy*. Essi sono interpretabili come effetti temporali post-trattamento (Carley *et al.*, 2017) associati a una particolare *energy policy*. Tuttavia, anche se l'utilizzo di indicatori binari fissi nel tempo consente di effettuare confronti tra due o più *policy*, esso non consente l'applicazione dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* per problemi di collinearità (Green, 2011). Nel caso di variabili dicotomiche *time-variant*, invece, è possibile controllare questi fattori costanti nel tempo e inosservabili. Pertanto, nel primo caso (*dummies-time invariant*), la letteratura ci suggerisce di utilizzare come metodologia di stima dei modelli *Pooled OLS* e/o panel con effetti casuali (Dong, 2012; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018), nel secondo (*dummies time-variant*), invece, la strategia ottimale è di impiegare dei modelli panel con effetti fissi (Jenner *et al.*, 2013; Bolkesjo *et al.*, 2014).

3.3.1- Specificazioni funzionali: modelli per la valutazione del processo di diffusione delle RES-E

Prima di presentare i modelli analitici stimati, seguendo Carley (2009) viene introdotto un diagramma, denominato DAG (*Directed Acyclic Graph*), che illustra graficamente i macro-fattori che potrebbero incidere sulla diffusione delle rinnovabili elettriche.

Fig. 3.1- *Directed Acyclic Graph* (DAG) per lo sviluppo delle rinnovabili elettriche



Fonte: Carley (2009)

Carley (2009), sostiene che «*this DAG demonstrates, for instance, that we must control for factors that confound the policy treatment variable and that, if omitted, would otherwise be captured in the error term*». Supponendo che questo diagramma sia una rappresentazione accurata del fenomeno oggetto di studio, è possibile utilizzarlo per identificare gli elementi chiave che dovranno essere analizzati nei modelli econometrici e per ridurre al minimo i problemi di distorsione da variabile omessa.

Il nostro obiettivo primario è di valutare la relazione statistica tra le principali politiche energetiche adottate nei paesi europei e la diffusione delle rinnovabili elettriche. In particolare, in aggiunta ai tradizionali meccanismi incentivanti di tipo finanziario (FIT) e obbligazionario (RPS), a causa della scarsa attenzione da parte della letteratura, una particolare riflessione riguarda le tariffe finanziarie di tipo *feed-in premium* (FIP) che, negli ultimi anni, stanno assumendo un'importanza crescente nel panorama energetico europeo. Al fine di esaminare esaurientemente il processo che determina la diffusione delle rinnovabili elettriche nel territorio europeo, nel prosieguo del presente lavoro verranno analizzati due differenti scenari. La distinzione tra contesti multipli è strettamente correlata agli indicatori energetici e alla modellazione delle variabili *policy-related*.

Nella fase iniziale della ricerca, viene indagata l'eterogeneità *cross-country* che caratterizza le strategie di supporto alle rinnovabili elettriche in Europa. L'obiettivo è

verificare se la diversificazione delle politiche energetiche, caratteristica distintiva dei paesi europei, abbia avuto un effetto dissimile sulla diffusione delle RES-E non idroelettriche. Specificatamente, seguendo la strategia metodologica di Dong (2012) e Garcia-Alvarez *et al.* (2018), siamo interessati ad analizzare, per la prima volta in letteratura, se l'adozione di schemi di supporto finanziari a premio (FIP) abbia fatto registrare una differenza nel valore atteso delle variabili di risposta studiate. Quest'ultime, come verrà di seguito approfondito, sono rappresentate dalla capacità rinnovabile elettrica installata (effetto tecnologico) e dalla quantità di energia elettrica generata da fonti rinnovabili (effetto produzione). Tale elemento longitudinale, per il contesto europeo, viene analizzato da Garcia-Alvarez *et al.* (2018) esclusivamente per l'energia fotovoltaica. Successivamente, l'analisi viene estesa includendo ulteriori determinanti potenziali della diffusione delle rinnovabili elettriche. L'obiettivo è perfezionare il modello stimato tenendo conto di fattori inosservabili ed osservabili. Nel primo caso (fattori inosservabili), controlliamo i coefficienti di eterogeneità per variabili inosservate che variano nel tempo ma non tra gli stati: l'esempio più ricorrente riguarda gli atteggiamenti culturali. I fattori osservabili riguardano, invece, una serie di variabili addizionali di controllo di natura economica, ambientale ed energetica. Essi sono stati scelti sulla base della letteratura analizzata.

Le equazioni stimate assumono la seguente forma funzionale:

$$(1) \quad Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \beta_1 POL_{1i} + \beta_2 POL_{2i} + \beta_3 POL_{3i} + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 1)}$$

$$(2) \quad Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \beta_1 POL_{1i} + \beta_2 POL_{2i} + \beta_3 POL_{3i} + \beta_4 OTHPOL_i + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 2)}$$

$$(3) \quad Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \beta_1 POL_{1i} + \beta_2 POL_{2i} + \beta_3 POL_{3i} + \beta_4 POL_{4i} + \delta_5 Z_{it} + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 3)}$$

In cui:

- ✓ Y : è un indicatore energetico di produzione e di capacità espressione della diffusione delle rinnovabili elettriche non idroelettriche (biomassa, geotermico, solare, eolico);
- ✓ POL_i : è una variabile binaria che assume valore unitario per l'insieme di paesi che hanno introdotto un meccanismo di supporto alle RES-E di tipo finanziario con opzione *premium* (FIP) e zero altrimenti;

- ✓ POL_2 : è una variabile binaria che assume valore unitario per l'insieme di paesi che hanno introdotto un sistema di supporto alle RES-E finanziario senza opzione *premium* ma esclusivamente di tipo *feed-in tariff* (FIT) e zero altrimenti;
- ✓ POL_3 : è una variabile binaria che assume valore unitario per l'insieme di paesi che hanno introdotto esclusivamente dei meccanismi di supporto alle RES-E di tipo obbligazionario (*quota system*) e zero altrimenti;
- ✓ $OTHPOL$: è una variabile continua che esprime il numero delle *supplementary renewable energy policy*, alternative a quelle analizzate, adottate nello stato i-esimo;
- ✓ Z : è un vettore che contiene delle variabili addizionali di controllo che variano nel tempo e tra gli stati;
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore della regressione;
- ✓ γ : comprende gli effetti fissi temporali;

Occorre precisare che, utilizzando esclusivamente le informazioni contenute nei National Renewable Energy Action Plans (NREAPs) definiti dalla direttiva 2009/28/CE, le variabili che esprimono la tipologia di *policy* adottata sono *time invariant* e assumono carattere dicotomico: un paese viene codificato con 1 se ha adottato, entro il 2010, il meccanismo incentivante analizzato e zero altrimenti. Tali forme funzionali ci consentono di verificare empiricamente se, in relazione alla tipologia di *support scheme* vigente, si ha una differenza di capacità e/o produzione nella diffusione delle RES-E (*Modello 1*). Assumendo come gruppo di riferimento l'insieme di paesi in cui sono vigenti prevalentemente dei meccanismi di tipo *quota system* (POL_3), possiamo interpretare i coefficienti come differenze tra medie condizionate tra il gruppo di controllo (POL_3) e i due gruppi di trattamento (POL_1 , POL_2). Studiando il segno del coefficiente associato alle variabili qualitative costruite, è possibile quantificare la differenza nel valore atteso dell'*outcome* tra i vari gruppi osservati. La stima del *Modello 2* e del *Modello 3* ci consente di controllare i coefficienti di eterogeneità in relazione a variabili di varia natura ($OTHPOL$, Z) che, se omesse, potrebbero condurre a problemi di distorsione. Le variabili addizionali di controllo sono state selezionate sulla base della letteratura analizzata.

A livello metodologico, come già anticipato, la natura *time-invariant* delle variabili binarie oggetto di studio non permette di applicare il modello con effetti fissi individuali per problemi di collinearità (Green, 2011). Cosicché, inizialmente, entrambe le equazioni vengono stimate per mezzo di un *Pooled OLS* con *dummy* temporali. Successivamente, al fine di ottenere un controllo di robustezza, le relazioni oggetto di studio vengono stimate con un *random effects model* e confrontate per mezzo del Breusch and Pagan Lagrangian multiplier test (1980).

3.4- Fonte dei dati e variabili analizzate

I dati analizzati si riferiscono ad un panel di ventotto paesi europei. Questi ultimi fanno riferimento ai ventotto paesi dell'Unione Europea (Austria, Belgio, Bulgaria, Croazia, Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Olanda, Polonia, Portogallo, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia, Regno Unito). Il periodo temporale di riferimento, in funzione alla disponibilità dei dati, riguarda gli anni 1995-2015. Le principali fonti informative sono rappresentate dalle banche dati fornite dalla Commissione Europea, da Eurostat e dall'International Energy Agency (IEA).

3.4.1- Variabile dipendente

Nei modelli (1)-(3), la variabile dipendente è rappresentata da due differenti indici della diffusione delle rinnovabili elettriche. In funzione della disponibilità dei dati vengono, infatti, valutati i seguenti indicatori energetici:

- ✓ Un indice di produzione: *Gross Electricity Generation (GEN-non idro)*;
- ✓ Un indice di capacità: *Installed Electricity Capacity (CAP-non idro)*;

Tali indicatori energetici, in accordo con Shrimali e Kniefel (2011) e Kilinc-Ata (2016), non includono le tecnologie che sfruttano l'energia idroelettrica. Le ragioni sono molteplici. In primo luogo, molti paesi (ad esempio Austria e Italia) hanno adottato degli schemi di supporto alle rinnovabili che non sono applicabili alle tecnologie idroelettriche. Questo assunto è rimarcato da Kilinc-Ata (2016): «*hydropower is generally not eligible for subsidies under the policy schemes*». Inoltre, l'idroelettrico

costituisce una tecnologia consolidata e, nel contesto europeo, risulta essere il principale sistema per la produzione di energia elettrica. Le rinnovabili elettriche computate all'interno degli indicatori sono, dunque, costituite dall'energia eolica, geotermica, da biomassa e fotovoltaica (si veda, in particolare, “*Energy datasheets EU-28 countries*”, 2018).

Un'importante particolarità da sottolineare riguarda la trasformazione delle variabili in termini percentuali. La ragione è semplice: il confronto tra nazioni di dimensioni differenti e con densità demografiche molto eterogenee potrebbe condurre a stime distorte. D'altronde, per effettuare confronti *cross-country*, occorre tener conto della dimensione del mercato elettrico: «*the use of renratio as the dependent variable allows us to control for market size across states. It is expected that, ceteris paribus, more renewable capacity will be found in states that generate more electricity to help meet the higher demand for electricity found in those states*» (Shrimali e Kniefel, 2011). Questo assunto è coerente con la letteratura analizzata (si vedano, in particolare, i contributi di Carley, 2009; Alagappan *et al.*, 2011; Dong, 2012). Pertanto, entrambi gli indicatori sono stati così riformulati:

- ✓ *Gen-non idro*: rappresenta la quota di energia elettrica generata da fonti energetiche non idroelettriche (biomassa, geotermico, eolico, fotovoltaico) in relazione alla produzione totale (*renewable e non-renewable*) di elettricità sul territorio nazionale;
- ✓ *Cap-non idro*: rappresenta la quota della capacità elettrica annuale da fonti energetiche non idroelettriche (biomassa, geotermico, eolico, fotovoltaico) in relazione alla capacità totale annuale installata (*renewable e non-renewable*) sul territorio nazionale;

Essi sono misurati, rispettivamente, in Terawattora (TWh) e in Megawatt (MW). La fonte informativa è, invece, rappresentata dai Bilanci Energetici estratti dal database fornito dalla Commissione Europea²⁷. Occorre notare che i due indicatori, seppur molto correlati, fanno riferimento a due processi separati. In particolare, la capacità elettrica installata è una grandezza che misura la potenza elettrica istantanea massima che un impianto può produrre e viene espressa in Megawatt (MW). La produzione lorda di

²⁷ Cfr. <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/country>.

elettricità «*is the total amount of electrical energy produced by transforming other forms of energy, for example nuclear or wind power*» (Eurostat, 2018) e viene espressa in una grandezza oraria (TWh, MWh, GWh). Per cui, questa grandezza esprime la quantità di elettricità prodotta da un impianto in un'ora.

3.4.2- Variabili esplicative

La selezione delle variabili è stata ovviamente influenzata dalla disponibilità dei dati e dai modelli di riferimento adottati nella letteratura. Per comprendere meglio i modelli è necessario spiegare in modo più approfondito il significato delle variabili indipendenti analizzate. Nei modelli che vengono stimati di seguito, le principali variabili esplicative sono rappresentate dagli indicatori *policy-related* e da alcuni elementi di natura economica, energetica ed ambientale.

Per quanto attiene alle politiche di supporto alle rinnovabili elettriche, come anticipato anche nelle sezioni precedenti, i paesi europei, come richiesto dalla direttiva CE/2009/28, hanno introdotto numerosi sistemi di incentivazione. La tabella sottostante riporta, per ogni stato europeo, i principali meccanismi incentivanti vigenti e i cosiddetti meccanismi di supporto alternativi (o *supplementary support instruments*). I dati sono contenuti nel documento denominato Piano di Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili (NREAP) che rappresenta il documento programmatico per il raggiungimento del target europeo 20-20-20.

Tabella 3.2- *Support instruments* per le rinnovabili elettriche (RES-E)

PAESE	ENERGY POLICY	PAESE	ENERGY POLICY
Austria	Fit, Sub	Italia	Fit, Premium, Tax, Net, Quota, Tend
Belgio	Quota, Sub, Net	Lettonia	Fit
Bulgaria	Fit, Sub, Loan	Lituania	Fit, Loan , Sub, Tax
Croazia	Fit, Loan	Lussemburgo	Fit, Sub, Tax
Cipro	Premium, Sub, Tend	Malta	Fit
Rep. Ceca	Fit, Loan, Premium, Sub	Olanda	Premium, Sub, Tax, Loan, Net, Tend
Danimarca	Premium, Sub, Net, Loan, Tend	Polonia	Quota, Tax
Estonia	Premium, Sub	Portogallo	Fit, Tend
Finlandia	Premium, Sub	Romania	Quota, Sub
Francia	Fit, Tax, Tend	Slovacchia	Fit, Sub, Tax
Germania	Fit, Premium, Loan, Tend	Slovenia	Fit, Premium, Sub, Loan, Tend
Grecia	Fit, Sub, Tax	Spagna	Fit, Premium, Tax
Ungheria	Fit, Sub	Svezia	Quota, Sub, Tax
Irlanda	Fit, Tax	UK	Quota, Tax, Fit

Note: Fit= feed-in tariffs; Tax= Tax regulation mechanism; Premium= feed-in premium; Quota= quota system; loan= loan system; Net= net-metering; Tend= tendering

Fonte: *European Commission Guidance for Renewable Support Scheme* (2013)

La particolarità del campione analizzato è che i paesi europei hanno adottato dei meccanismi di supporto alle rinnovabili elettriche molto eterogenei: da un lato, alcuni paesi hanno implementato esclusivamente delle politiche di supporto di tipo obbligazionario (ad esempio la Svezia), dall'altro, la maggioranza dei paesi hanno

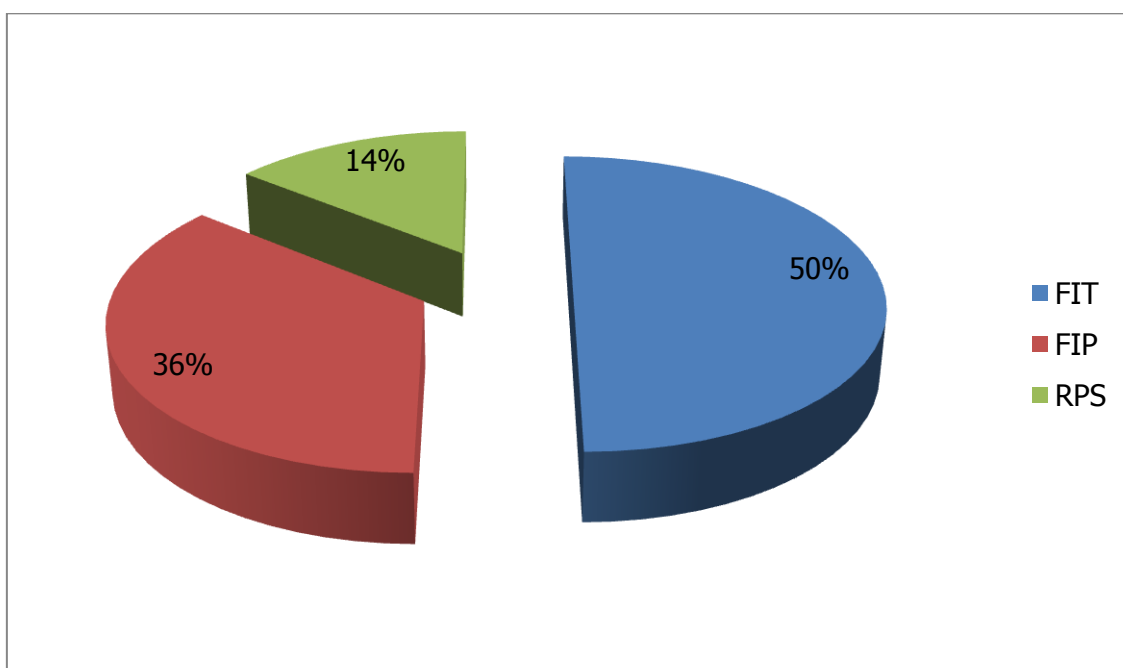
preferito adottare dei meccanismi di tipo finanziario. Inoltre, nella categoria di paesi che hanno optato per regimi monetari, si presentano tre sub-gruppi:

- ✓ Paesi che hanno adottato esclusivamente meccanismi di tipo *feed-in tariff*;
- ✓ Paesi che hanno adottato esclusivamente meccanismi di tipo *feed-in premium*;
- ✓ Paesi che hanno adottato i due meccanismi congiuntamente;

Discorso controverso vale per Italia e Regno Unito. Dalla tabella 3.2 è possibile osservare come entrambi i paesi hanno attuato dei meccanismi di supporto alle rinnovabili che prevedono una combinazione tra sistemi di tipo finanziario e obbligazionario. Se in Italia, nel 2002, è stato introdotto il meccanismo dei Certificati Verdi che ha affiancato il vecchio CIP6, in UK, nel 2010, il sistema obbligazionario denominato Renewable Obligation è stato supportato dall'introduzione di tariffe incentivanti a prezzo fisso.

La figura sottostante riporta graficamente lo stato dell'arte dei meccanismi di incentivazione in tutti i paesi oggetto di analisi. La distinzione effettuata è tra paesi che hanno introdotto sistemi finanziari a premio (FIP), a prezzo fisso (FIT) e a quota (RPS).

Fig. 3.2- Meccanismi di supporto alle RES-E e percentuale di paesi che li hanno introdotti



Fonte: Nostre elaborazioni su dati IEA e della Commissione Europea

Come si può notare dal grafico, un elevato numero di paesi europei è contraddistinto dalla presenza di *support schemes* di tipo finanziario (86%). Di contro, il restante 14% del campione è contraddistinto dalla presenza di meccanismi incentivanti obbligazionari. Nell'insieme di paesi che hanno adottato schemi di supporto alle RES-E di tipo finanziario, può essere compiuta una distinzione: se da un lato, alcuni paesi (50%) sono contraddistinti esclusivamente dalla presenza di tariffe incentivanti a prezzo fisso (FIT), dall'altro, vi sono dei paesi che hanno introdotto meccanismi di tipo premium (34%).

Sulla base di questi dati sono stati costruiti degli indicatori qualitativi espressione della principale tipologia di politica di incentivazione adottata negli stati analizzati. In particolare, sono state create tre variabili dicotomiche:

- ✓ POL_1 : esprime l'insieme di paesi (34%) che hanno introdotto l'opzione a premio (FIP);
- ✓ POL_2 : si riferisce all'insieme di paesi (50%) che presentano dei sistemi incentivanti finanziari a prezzo fisso (FIT);

- ✓ *POL₃*: si riferisce all'insieme di paesi (14%) in cui il principale strumento di supporto alle RES-E è di tipo obbligazionario (RPS);

La letteratura esaminata (si veda, in particolare, Haas *et al.*, 2011) ci suggerisce che nel campione esaminato si registra la presenza di una vasta gamma di misure alternative, come sussidi o incentivi fiscali, che variano sensibilmente nelle unità statistiche analizzate. Essi, come già anticipato sono denominati *supplementary support instrumets* (Kitzing *et al.*, 2012). Pertanto, seguendo Carley (2009) e Dong (2012), è stata creata un ulteriore variabile *time-invariant* che è data dal numero di strumenti di supporto, alternativi a quelli computati nelle tre variabili binarie, presenti negli stati analizzati. Essa viene definita come il numero di politiche di promozione alle rinnovabili elettriche, alternative o suppletive ai meccanismi convenzionali (*feed-in tariff, feed-in premium, RPS*), presenti in ciascun paese. Questa variabile, in accordo con Dong (2012) e Carley (2009), «*is used to control the effects of other RE policies*».

I dati sulle *policy variables* sono stati ottenuti da varie fonti informative: RES LEGAL Europe, European Commission Guidance for Renewable Support Scheme (2013), International Energy Agency (IEA) e, anche in questo caso, la variabile espressione della tipologia di *policy* adottata utilizza le informazioni all'anno 2010 contenute nei National Renewable Energy Action Plans (NREAPs).

I dati sul GDP pro capite sono stati ottenuti dalla banca fornita dall'OECD. Il GDP, misurato in dollari pro capite, è espresso in parità di potere d'acquisto (PPP) in modo tale da rendere i dati comparabili a livello osservazionale e temporale²⁸. Nonostante l'effetto del GDP sulle rinnovabili elettriche sia stato ampiamente studiato in letteratura (Carley 2009; Marques *et al.*, 2010; Jenner *et al.*, 2013), la sua capacità di promuovere tali tecnologie energetiche è controverso (si veda, in particolare, Sener *et al.*, 2018). Secondo alcuni studi (Aguirre e Ibikunle, 2014; Carley *et al.*, 2017), il processo di diffusione delle rinnovabili elettriche è più efficace nei paesi ad alto reddito. La motivazione è strettamente correlata alla capacità di fronteggiare maggiormente gli investimenti iniziali e di promuovere meccanismi di incentivazione più efficaci (Carley, 2009). Ulteriori studi (Shrimali e Kneifel, 2011; Dong, 2012) non hanno riscontrato alcuna correlazione tra livello del reddito e diffusione delle RES-E. Altri studi (Marques

²⁸ Cfr. <https://data.oecd.org/gdp/gross-domestic-product-gdp.htm#indicator-chart>.

et al., 2011), invece, hanno rilevato una relazione negativa. Tuttavia, in accordo con Carley *et al.* (2017) siamo portati a ritenere che ad un maggiore reddito pro capite corrisponda una maggiore diversificazione del mix energetico rinnovabile. Inoltre, Marques *et al.* (2011) affermano che «*we expect to conclude that greater income level is correlated with greater RE use. This expectation is based on two reasons: firstly, a greater level of income means greater potential to bear high regulatory costs (which can result in both higher prices and taxes); and secondly, greater income means more resources available to implement and promote sustainable environmental alternatives (and greater RE use)*».

La variabile espressione dell'inquinamento atmosferico è rappresentata dalla quantità di emissioni pro capite di biossido di carbonio registrate per il campione oggetto di studio e per gli anni 1995-2015. Esse sono misurate in tonnellate per abitante e i dati sono stati ottenuti dalla banca dati fornita da Eurostat²⁹. In tal caso, la letteratura scientifica esaminata sostiene che l'inquinamento ambientale presenti un effetto negativo sul processo di diffusione delle RES-E (Marques *et al.*, 2010 Dong, 2012). La ragione è da ricollegare al fatto che nei paesi con elevati livelli di inquinamento ambientale, le energie rinnovabili non trovano ampia diffusione ma, piuttosto, sono le tecnologie da fonti energetiche tradizionali a dominare il mercato elettrico (Dong, 2012). Tuttavia, alcuni autori (Kilinc-Ata, 2016; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) sostengono che non sussista alcuna relazione tra le variabili suddette.

Al fine di ottenere stime più consistenti, sono valutate alcune variabili addizionali di controllo che potrebbero costituire delle determinanti del processo esaminato. In accordo con Kilinc-Ata (2016), quando vengono esaminate le determinanti delle RES-E è importante tener conto della conformazione dei mercati energetici e, in particolare, delle cosiddette *substitute energy sources* (termico e nucleare). Pertanto, con l'obiettivo di verificare l'impatto delle fonti energetiche tradizionali, sono stati creati quattro differenti indicatori che esprimono le caratteristiche dei mercati elettrici nazionali:

- ✓ La capacità elettrica termica (petrolio, gas naturale e carbone) in percentuale alla capacità totale;
- ✓ La capacità elettrica nucleare in percentuale alla capacità totale;

²⁹ Cfr. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics.

- ✓ La produzione di energia elettrica termica (petrolio, gas naturale e carbone) in percentuale alla produzione totale;
- ✓ La produzione di energia elettrica nucleare in percentuale alla produzione totale;

Queste variabili, denominate *Thermal* e *Nuclear*, sono state calcolate sulla base dei bilanci energetici nazionali forniti dalla Commissione Europea e sono espresse in termini percentuali. Le fonti energetiche tradizionali (o convenzionali) sono state incluse a causa del loro impatto negativo sulle fonti rinnovabili (Carley, 2009; Kilinc-Ata, 2016). Esse, infatti, sono ritenute delle barriere alla promozione su vasta scala delle RES-E (Marques *et al.*, 2010). Questo è dovuto al fatto che tali tecnologie, prime fra tutte il termoelettrico, sono delle tecnologie consolidate e, riguardo alle RES-E, non richiedono elevati costi di investimento iniziali.

Altri fattori *energy related* sono rappresentati dalle importazioni nette di energia elettrica (Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) e dai consumi elettrici pro capite (Dong, 2012). Entrambi gli indicatori sono stati estratti dalla banca dati fornita dalla U.S. Energy Information Administration (EIA) e vengono espressi, rispettivamente, in milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtoe) e in Megawattora (MWh). L'indicatore riguardante le importazioni nette è definito come la somma algebrica tra importazioni ed esportazioni. Esso è una stima ben approssimata della cosiddetta *dependency of energy security*, nota anche come *Energy Dependence* (Omri e Nguyen, 2014), che potrebbe avere un effetto negativo (Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) o positivo (Dong, 2012) sulla diffusione delle RES-E. Per quanto attiene ai consumi energetici pro capite, numerosi autori hanno evidenziato la loro valenza strategica nel processo di diffusione delle tecnologie elettriche analizzate (Sener *et al.*, 2018). Tuttavia, l'effetto dei consumi sulla diffusione delle RES-S può essere positivo (Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) o negativo (Kilinc-Ata, 2016) in funzione delle unità statistiche analizzate.

Al fine di interpretare i coefficienti come elasticità ed evitare problemi di inconsistenza nelle stime, per le variabili espresse in termini pro capite (GDP, emissioni di biossido di carbonio e consumi elettrici) è stato calcolato il loro logaritmo naturale.

Dalla tabella sottostante è possibile cogliere il significato, la natura e la fonte delle variabili analizzate.

Tabella 3.3 - Definizione delle variabili e fonte dei dati

Variabili	Definizione	Fonte	Natura
<i>Gen-non indro</i>	Quota di energia elettrica generata da biomassa, fotovoltaico, geotermico ed eolico in percentuale della quantità totale	Commissione Europea, bilanci energetici nazionali	Continua
<i>Cap-non indro</i>	Quota di energia elettrica installata da biomassa, fotovoltaico, geotermico ed eolico in percentuale della capacità totale	Commissione Europea, bilanci energetici nazionali	Continua
<i>POL₁</i>	Adozione di uno schema di supporto di tipo <i>feed-in premium</i>	RES LEGAL, Commissione Europea, IEA	Dummy
<i>POL₂</i>	Adozione di uno schema di supporto di tipo <i>feed-in tariff</i>	RES LEGAL, Commissione Europea, IEA	Dummy
<i>POL₃</i>	Adozione di uno schema di supporto di tipo obbligazionario	RES LEGAL, Commissione Europea, IEA	Dummy
<i>ln(GDP)</i>	Logaritmo naturale del GDP pro capite in PPP	OECD	Continua
<i>ln(Energycons)</i>	Logaritmo naturale dei consumi elettrici pro capite in Megawattora (MWh)	U.S. Information Energy Administration	Continua
<i>ln(CO₂)</i>	Logaritmo naturale delle emissioni di biossido di carbonio in tonnellate per abitante	Eurostat	Continua
<i>OTHPOL</i>	Numero di ulteriori <i>supplementary support instruments</i> alle RES-E	RES LEGAL, Commissione Europea, IEA	Continua
<i>Netimport</i>	Importazioni nette di energia elettrica in <i>million tonnes of oil equivalent</i> (Mtoe)	Commissione Europea, bilanci energetici nazionali	Continua
<i>Thermal</i>	Capacità o produzione di energia elettrica da fonti fossili in percentuale di quella totale	Commissione Europea, bilanci energetici nazionali	Continua
<i>Nuclear</i>	Capacità o produzione di energia elettrica da fonti nucleari in percentuale di quella totale	Commissione Europea, bilanci energetici nazionali	Continua

3.4.3- Statistiche descrittive

Per comprendere meglio i modelli stimati è stata fatta una breve analisi calcolando, sia per la variabile dipendente che per le variabili indipendenti, le principali statistiche descrittive. I valori ottenuti sono riportati nella tabella 3.4.

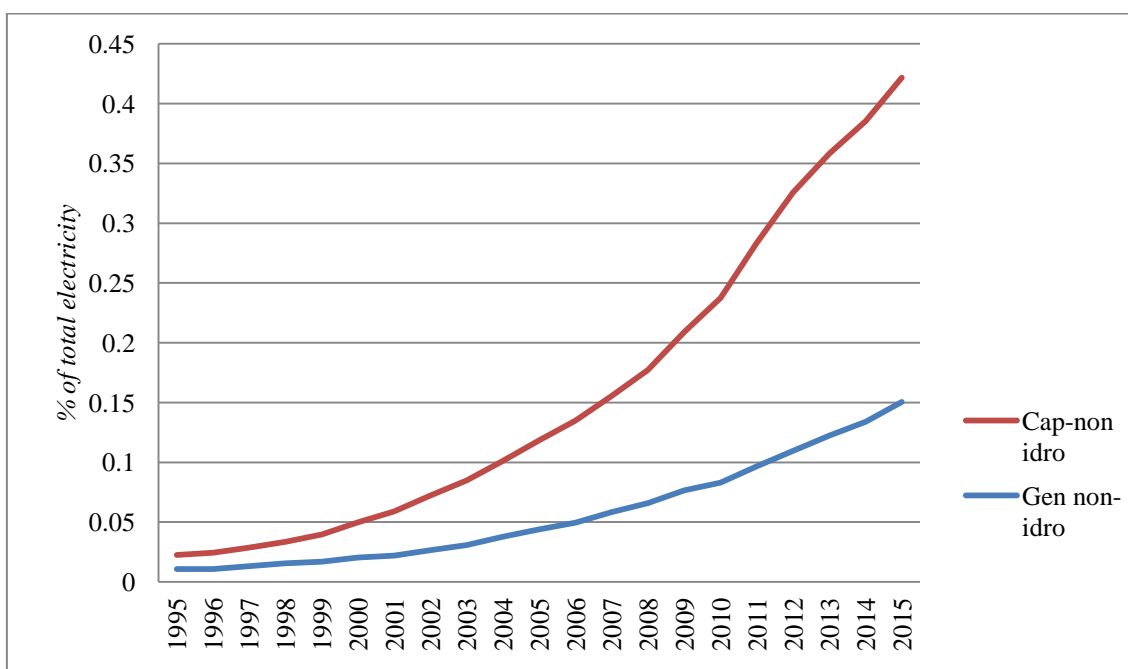
Tabella 3.4- Statistiche descrittive delle variabili utilizzate nelle stime

Variabile	Obs.	Media	Std. Dev.	Min	Max
<i>Gen-non indro</i>	588	0.057136	0.078973	0	0.654667
<i>Cap-non indro</i>	577	0.073942	0.091683	0	0.495286
<i>POL1</i>	588	0.357143	0.479565	0	1
<i>POL2</i>	588	0.5	0.500426	0	1
<i>POL3</i>	588	0.142857	0.350225	0	1
<i>OTHPOL</i>	588	1.75	1.090653	0	5
<i>Thermal (capacità)</i>	577	0.336708	0.258772	0	1
<i>Nuclear (capacità)</i>	577	0.113497	0.14415	0	0.5517
<i>Thermal (produzione)</i>	588	0.576758	0.277383	0.011786	1
<i>Nuclear (produzione)</i>	588	0.193366	0.234742	0	0.850565
<i>Energycons</i>	588	5.859763	3.2179	1.840444	16.58808
<i>ln(Energycons)</i>	588	1.648732	0.472766	0.610007	2.808685
<i>Netimport</i>	588	0.183295	1.468403	-6.623	4.824
<i>CO₂</i>	588	8.490809	3.624809	2.98746	25.89366
<i>ln(CO₂)</i>	588	2.059018	0.397175	1.094424	3.253998
<i>GDP</i>	588	26907.72	14435.65	5453.938	120553.9
<i>ln(GDP)</i>	588	10.062	0.54775	8.604094	11.69985

Analizzando media e deviazione standard è possibile osservare che entrambe le variabili dipendenti non subiscono cambiamenti marcati tra i paesi considerati. La

capacità energetica rinnovabili non idroelettrica presenta un valore medio di 0.073, mentre l'indice di produzione assume un valore medio di 0.057 in tutto il panel. Ovviamente, entrambi gli indicatori risultano essere fortemente correlati in quanto, ad una maggiore capacità elettrica dovrebbe corrispondere un aumento della produzione. I paesi con una più alta percentuale di capacità rinnovabile, al 2015, sono rappresentati da Danimarca, Portogallo e Germania. Nella produzione, invece, oltre a Danimarca e Portogallo, sono Lituania e Spagna ad assumere una posizione di leader. Molto interessante è notare che, analizzando il valore medio di entrambi gli indicatori, si evince un andamento a tassi crescenti delle rinnovabili non idroelettriche.

Fig. 3.3- Andamento della quota di capacità e produzione elettrica da biomassa, geotermico, fotovoltaico ed eolico, in percentuale a quella totale, anni 1995-2015



Fonte: Nostre elaborazioni su dati della Commissione Europea (2018)

Dal grafico si può notare come entrambi gli indicatori abbiano avuto dei tassi di crescita molto elevati nel campione esaminato. Una particolarità riguarda, tuttavia, il differenziale tra produzione e capacità: se, nella prima metà degli anni 90, il differenziale tra capacità e produzione era irrisorio, dal 2001 in poi tale disavanzo è aumentato a tassi crescenti a favore della capacità. Nonostante i due indicatori siano espressi in termini percentuali, questo dato giustifica, in parte, l'idea di valutare in

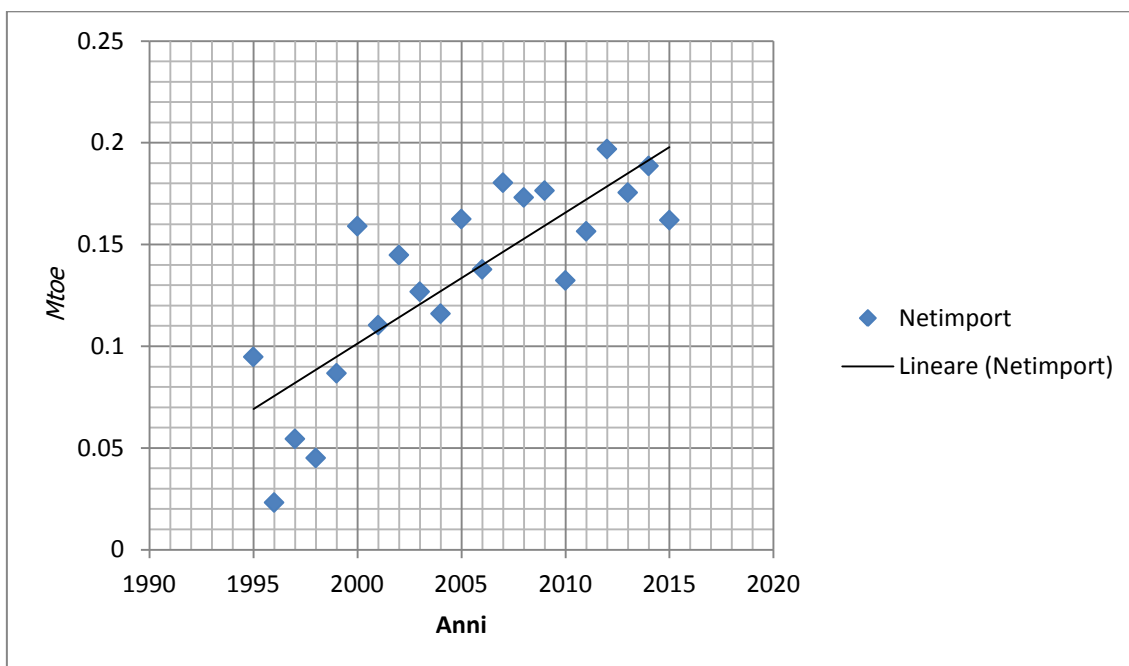
maniera distinta i due indicatori e contribuisce a spiegare l'intermittenza tecnologia delle fonti energetiche rinnovabili.

Discorso controverso vale per le variabili addizionali di controllo valutate nei modelli econometrici. Per quanto attiene al GDP pro capite, i valori massimi di tale indicatore si registrano per Lussemburgo, Olanda e Austria. Di contro, i paesi con un livello di reddito pro capite più basso sono quelli dell'Europa sud-orientale (Romania, Bulgaria ed Estonia). Per le emissioni pro capite di biossido di carbonio, invece, i paesi eco-leader sono rappresentati dai paesi nord-orientali (Svezia, Lituania e Lettonia). Di contro, i paesi nord-occidentali (Lussemburgo, Irlanda e Belgio) fanno registrare i valori più elevati di emissioni.

Se le variabili riguardanti i meccanismi di supporto sono state ampiamente discusse nella sezione precedente, un'importante particolarità del campione analizzato riguarda le altre variabili *energy-related* (*Energycons*, *Netimport*, *Thermal* e *Nuclear*). Una maggiore intensità energetica si registra nei paesi nord-orientali (Lituania, Lettonia e Polonia) con un consumo elettrico medio pro capite, per gli anni analizzati, di 6.35 Mwh per la Lettonia, 6.42 Mwh per la Lituania e 6.37 Mwh per la Polonia. Di contro, i valori più bassi si riscontrano per Repubblica Ceca e Finlandia.

Le importazioni nette di energia elettrica fanno registrare una forte variabilità tra gli stati e nel tempo. Nel campione analizzato, sono presenti sia paesi, come Italia e Repubblica Ceca che, storicamente, sono contraddistinti da una forte *dipendenza energetica*, sia paesi esportatori, come Germania e Francia. Il grafico sottostante esprime l'andamento medio per tutti i paesi analizzati e nel tempo dell'indicatore *Netimport*.

Fig. 3.4- Andamento medio delle importazioni nette di energia elettrica in Mtoe, anni 1995-2015

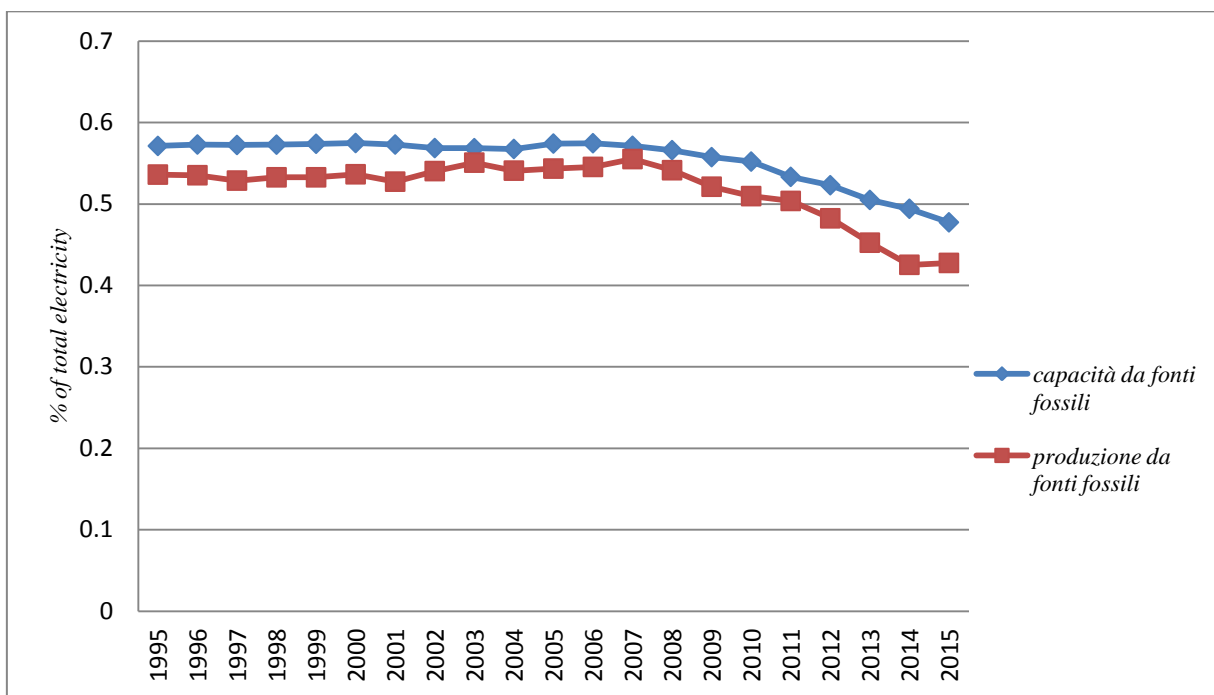


Fonte: Nostre elaborazioni su dati della Commissione Europea (2018)

Dal grafico a dispersione si può facilmente notare come, nonostante la forte variabilità nei dati, quando consideriamo l'Unione Europea come un'unica entità statistica il trend dell'indicatore è in netta crescita.

Le ultime due variabili energetiche presentano delle statistiche descrittive dalle quali emergono importanti fatti stilizzati. Per quanto attiene all'energia nucleare vi sono paesi caratterizzati dalla totale assenza di questa tecnologia energetica (tra cui l'Italia). Di contro, in alcuni paesi essa rappresenta la principale tecnologia per la produzione di energia elettrica (Belgio e Francia). Considerando, invece, l'energia elettrica da fonti fossili (petrolio, gas naturale e carbone), il grafico sottostante analizza il trend della capacità e della produzione di energia elettrica da tali fonti energetiche.

Fig. 3.4- Andamento della quota della capacità e della produzione elettrica da fonti fossili in Megawattora e in percentuale a quella totale, anni 1995-2015



Fonte: Nostre elaborazioni su dati della Commissione Europea (2018)

Come si può notare dal grafico, nell’Unione Europea, l’energia elettrica prodotta da petrolio, gas naturale e carbone risulta essere molto diffusa. Nonostante un trend in leggera decrescita, la particolarità da notare è che il differenziale tra capacità installata e produzione è minima. Contrariamente a quanto avviene per le tecnologie da sfruttamento delle fonti non idroelettriche, le tecnologie da fonti fossili risultano essere più efficienti: esse sono tecnologie consolidate da decenni e non sono assoggettate alla variabilità temporale e delle caratteristiche geomorfologiche dei territori.

3.5- Analisi dei risultati ottenuti

In prima istanza abbiamo provveduto a valutare l’efficacia energetica relativa dei meccanismi incentivanti di tipo finanziario (*feed-in tariff e/o feed-in-premium*) e di tipo obbligazionario (*renewable portfolio standard*) nel campione oggetto di studio. Viene, infatti, realizzata un’analisi *cross-country* che ha come obiettivo quello di studiare l’eterogeneità che contraddistingue gli schemi di supporto alle RES-E nel panorama energetico europeo. A tal fine, prendendo come periodo temporale di

riferimento gli anni 1995-2015, sono stimati tre modelli di regressione che fanno riferimento alle equazioni (1)-(3). Le equazioni, stimate per due differenti indicatori energetici (*Cap-non idro* e *Gen-non idro*), assumono le seguenti forme funzionali:

$$(4) \quad Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \beta_1 POL_{1i} + \beta_2 POL_{2i} + \beta_3 POL_{3i} + \varepsilon_{it}$$

$$(5) \quad Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \beta_1 POL_{1i} + \beta_2 POL_{2i} + \beta_3 POL_{3i} + \beta_3 OTHPOL_i + \varepsilon_{it}$$

$$(6) \quad Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \beta_1 POL_{1i} + \beta_2 POL_{2i} + \beta_3 POL_{3i} + \beta_4 POL_{4i} + \delta_5 Z_{it} + \varepsilon_{it}$$

Dove le variabili analizzate sono definite di seguito:

- ✓ Y : è un indicatore energetico di capacità (*Cap-non idro*) e di produzione (*Gen-non idro*);
- ✓ POL_1 : è una variabile binaria che assume valore unitario per l'insieme di paesi che hanno introdotto un meccanismo di supporto alle RES-E finanziario con opzione *feed-in premium* (FIP) e zero altrimenti;
- ✓ POL_2 : è una variabile binaria che assume valore unitario per l'insieme di paesi che hanno introdotto un sistema di supporto alle RES-E finanziario senza opzione *premium* ma esclusivamente di tipo *feed-in tariff* (FIT) e zero altrimenti;
- ✓ POL_3 : è una variabile binaria che assume valore unitario per l'insieme di paesi che hanno introdotto esclusivamente dei meccanismi di supporto alle RES-E di tipo obbligazionario (*quota system*) e zero altrimenti;
- ✓ $OTHPOL$: è una variabile continua che esprime il numero di ulteriori *renewable energy policy*, alternative a quelle analizzate, adottate nello stato i -esimo;
- ✓ δ : effetti temporali;
- ✓ β_1, \dots, β_3 : coefficienti di eterogeneità;
- ✓ β_4, δ_5 : coefficienti variabili di controllo;
- ✓ $i = 1, \dots, 28$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);
- ✓ Equazione (1) modello in forma ridotta;
- ✓ Equazioni (2) e (3) modelli in forma estesa;

Il vettore Z rappresenta un insieme di variabili esplicative *time-variant* che comprende il logaritmo naturale del GDP pro capite ($\ln GDP$), il logaritmo naturale delle emissioni pro capite di anidride carbonica ($\ln CO_2$), le importazioni nette di energia elettrica ($Netimport$), il logaritmo naturale dei consumi elettrici pro capite ($\ln EnergyCons$). Inoltre, vengono valutati ulteriori variabili *energy-related* che sono così esplicitate:

- due differenti indicatori di produzione e di capacità (*Thermal*), che esprimono, rispettivamente, la quota della capacità elettrica annuale da fonti tradizionali (petrolio, gas naturale e carbone) e la quota della produzione di energia elettrica da fonti tradizionali (petrolio, gas naturale e carbone) in rapporto alla capacità totale annuale installata e alla produzione totale;
- due differenti indicatori di produzione e di capacità (*Nuclear*) che esprimono la quota della capacità elettrica annuale da nucleare o la quota della produzione di energia elettrica da nucleare in rapporto alla capacità totale annuale installata e alla produzione totale;

Per problemi di perfetta collinearità e poiché le principali variabili *policy-related* d'interesse sono *time invariant* (si veda, in particolare, Dong, 2012), la relazione oggetto di studio non può essere stimata mediante l'utilizzo dello stimatore dei minimi quadrati con effetti fissi. Inoltre, per evitare la trappola delle variabili *dummy* (Stock e Watson, 2012), il gruppo di riferimento omesso è rappresentato dall'insieme di paesi che hanno adottato schemi di supporto alle rinnovabili elettriche di tipo *quota system* (POL_3). Pertanto, i coefficienti associati alle variabili *policy-related* sono interpretabili come differenze in Y tra il gruppo di controllo (insieme di paesi che ha adottato meccanismi incentivanti di tipo RPS) e i due gruppi di trattamento, ossia l'insieme di paesi che ha adottato, rispettivamente, tariffe *premium* (POL_1) e tariffe di riacquisto a prezzo fisso (POL_3). La metodologia econometrica adottata consiste in un *Pooled OLS* in cui sono inserite anche le venti *dummies* temporali (1996-2015).

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati ed i principali risultati delle inferenze statistiche. Inoltre, per ogni indicatore energetico,

sono stati stimati separatamente il modello in forma ridotta (4) e i modelli in forma estesa (5) e (6).

Tabella 3.5- Risultati delle stime dei modelli 1-3 per l'indicatore energetico di produzione (*Gen-non idro*)

<i>Modelli 1-3</i>	Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	0.043*** (0.008)	-0.003 (0.013)	0.031*** (0.010)	-0.015 (0.013)	-0.569*** (0.055)	-0.153*** (0.059)
<i>POL₁(FIP)</i>	0.039*** (0.010)	0.039*** (0.008)	0.032*** (0.010)	0.032*** (0.008)	0.034*** (0.005)	0.030*** (0.007)
<i>POL₂(FIT)</i>	0.021** (0.010)	0.021*** (0.007)	0.022** (0.009)	0.022** (0.008)	0.028*** (0.008)	0.023*** (0.007)
<i>OTHPOL</i>	-	-	0.008** (0.003)	0.008*** (0.003)	0.006** (0.003)	0.010*** (0.003)
<i>ln(CO₂)</i>	-	-	-	-	-0.079*** (0.012)	-0.048*** (0.011)
<i>ln(GDP)</i>	-	-	-	-	0.082*** (0.007)	0.026*** (0.009)
<i>ln(EnergyCons)</i>	-	-	-	-	0.022** (0.010)	0.027** (0.011)
<i>Netimport</i>	-	-	-	-	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
<i>Thermal</i>	-	-	-	-	-0.056*** (0.012)	-0.045*** (0.014)
<i>Nuclear</i>	-	-	-	-	-0.110*** (0.017)	-0.105*** (0.015)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	588	588	588	588	588	588
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²	0.0557	0.4337	0.0654	0.4434	0.4387	0.5465
ADJ R ²	0.0524	0.4117	0.0606	0.4207	0.4299	0.5230
Effetti temporali=0	-	F(20, 565) = 18.86	-	F(20, 565) = 19.15	-	F(20, 565) = 6.63
Prob>F	0.0000 (17.24)	0.0000 (19.67)	0.0000 (13.62)	0.0000 (19.54)	0.0000 (50.19)	0.0000 (23.19)

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 3.5.1- Risultati delle stime dei modelli 1-3 per l'indicatore energetico di capacità (*Cap-non idro*)

<i>Modelli 1-3</i>	Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	0.063*** (0.010)	0.000 (0.015)	0.053*** (0.011)	-0.011 (0.015)	-0.873*** (0.079)	-0.394*** (0.090)
<i>POL₁(FIP)</i>	0.040*** (0.012)	0.040*** (0.009)	0.034*** (0.012)	0.033*** (0.009)	0.034*** (0.007)	0.030*** (0.009)
<i>POL₂(FIT)</i>	0.018* (0.011)	0.019** (0.009)	0.017 (0.011)	0.018** (0.009)	0.016* (0.009)	0.015* (0.008)
<i>OTHPOL</i>	-	-	0.006* (0.004)	0.008*** (0.003)	0.005* (0.003)	0.008** (0.003)
<i>ln(CO₂)</i>	-	-	-	-	-0.098*** (0.011)	-0.056*** (0.011)
<i>ln(GDP)</i>	-	-	-	-	0.115*** (0.009)	0.050*** (0.011)
<i>ln(EnergyCons)</i>	-	-	-	-	0.023** (0.009)	0.024** (0.010)
<i>Netimport</i>	-	-	-	-	-0.001*** (0.000)	-0.001*** (0.000)
<i>Thermal</i>	-	-	-	-	-0.029** (0.014)	-0.023* (0.013)
<i>Nuclear</i>	-	-	-	-	-0.136*** (0.032)	-0.130*** (0.029)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	577	577	577	577	577	577
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²	0.0578	0.4841	0.0625	0.4909	0.4772	0.5794
ADJ R ²	0.0545	0.4636	0.0576	0.4698	0.4689	0.5571
Effetti temporali=0	-	F(20, 554) = 22.89	-	F(20, 553) = 23.27	-	F(20, 547) = 6.65
Prob>F	0.0000 (17.61)	0.0000 (19.67)	0.0000 (12.72)	0.0000 (23.19)	0.0000 (57.52)	0.0000 (25.19)

Note: *standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

I risultati delle stime mostrano che, per entrambi gli indicatori energetici esaminati, l'eterogeneità delle *renewable energy policy* ha generato delle differenze significative nel processo di diffusione delle rinnovabili elettriche. I coefficienti di eterogeneità stimati mostrano, infatti, che si registra una differenza significativa in entrambe le variabili dipendenti tra paesi che hanno introdotto meccanismi incentivanti a premio e paesi con *support schemes* di tipo obbligazionario. Prima di analizzare dettagliatamente i risultati empirici è bene notare che le equazioni che fanno riferimento al *Modello 1* presentano dei problemi di validità interna. I bassi valori dell' R^2 e la significatività statistica delle variabili addizionali di controllo dimostrano che il *Modello 1*, per entrambi gli indicatori, è affetto probabilmente da una forma di distorsione da variabile omessa poiché altri importanti fattori possono influenzare il processo di diffusione delle rinnovabili elettriche. La precedente rassegna della letteratura ci suggerisce, infatti, che, oltre a fattori *policy-related*, la diffusione delle rinnovabili elettriche è influenzata da una molteplicità di variabili. Occorre, dunque, valutare ulteriori determinanti del processo esaminato che, se omessi, potrebbero generare una forma di distorsione nei coefficienti stimati. Al fine di ottenere delle stime più consistenti sono stati implementati dei modelli estesi che fanno riferimento alle equazioni (5) e (6). Se nel *Modello 2* i coefficienti di eterogeneità sono controllati per il numero di *supplementary support instruments* presenti in ogni paese analizzato, nel *Modello 3* sono stati inclusi indicatori *time-variant* di varia natura. Quest'ultimo, per entrambi gli indicatori, presenta un buon adattamento ai dati. D'altronde, l'ipotesi congiunta che tutti i coefficienti di regressione tranne l'intercetta siano nulli può essere rifiutata ad un livello di significatività dell'1%.

Per quanto attiene ai modelli con variabile dipendente *Gen-non idro* (Tabella 3.5) la colonna (1) contiene una regressione *Pooled OLS* della quota di energia elettrica generata da rinnovabili non idroelettrica sulle variabili dicotomiche POL_1 e POL_2 senza la considerazione degli effetti temporali. Questi ultimi sono invece incorporati nella colonna (2). Secondo queste stime, si presenta una differenza statisticamente significativa nella produzione di energia elettrica da rinnovabili non elettriche tra i paesi che hanno adottato dei meccanismi di supporto di tipo *premium* e paesi che hanno impiegato esclusivamente sistemi incentivanti di tipo obbligazionari: il coefficiente associato alla variabile POL_1 è pari a 0.039 e risulta significativo ad un livello di

significatività dell'1%. Per i paesi che presentano dei meccanismi finanziari di supporto alle RES-E senza opzione *premium* il coefficiente associato alla variabile POL_2 non è statisticamente significativo. Osservando le colonne (3) e (4) i risultati cambiano poco quando i coefficienti di eterogeneità sono controllati per il numero di *supplementary support instruments*. In tal caso, la differenza nella produzione media di energia elettrica da rinnovabili non idroelettriche tra il gruppo di paesi che hanno introdotto meccanismi finanziari con opzione *premium* rispetto al gruppo di controllo (POL_3) è pari a 0.032 (con e senza effetti temporali). In linea con i risultati ottenuti da Jenner *et al.* (2013), può essere sostenuta l'ipotesi secondo cui i paesi che hanno adottato esclusivamente meccanismi incentivanti di tipo *feed-in tariff* (POL_2) presentino una performance migliore nel valore atteso della variabile di risposta rispetto ai paesi che hanno impiegato esclusivamente meccanismi di supporto obbligazionari. Inoltre, la variabile $OTHPOL$ registra un coefficiente positivo e testimonia che, all'aumentare del numero di politiche energetiche adottate in un paese per promuovere le energie rinnovabili, la quota della produzione elettrica da rinnovabili non idroelettriche aumenta, in media, dello 0.008. Quando vengono incorporate nella regressione ulteriori determinanti potenziali della diffusione delle rinnovabili non idroelettriche, le colonne (5) e (6) mostrano dei risultati molto importanti. Se da un lato, sussiste una differenza significativa tra chi ha adottato meccanismi di tipo *feed-in premium* ed il gruppo di controllo, dall'altro, viene confermata l'ipotesi, più volte testata in letteratura, di una differenza nel valore medio della variabile *Gen-non idro* tra chi ha adottato esclusivamente degli schemi di supporto a prezzo fisso (POL_2) e obbligazionari (POL_3). I modelli estesi suggeriscono che i paesi caratterizzati da schemi di supporto di tipo FIP fanno registrare una quota di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili non idroelettriche maggiore, in media, di 0.034 (senza effetti temporali) e 0.030 (con effetti temporali) rispetto ai paesi rientranti nel gruppo di controllo.

Le colonne dei modelli con variabile dipendente *Cap-non idro* (tabella 3.5.1) seguono le medesime specificazioni della tabella 3.5. Le colonne (1) e (2) ci forniscono il risultato secondo cui i paesi che hanno adottato meccanismi incentivanti di tipo FIP presentano un valore atteso più elevato nella capacità elettrica rinnovabile non idroelettrica rispetto al gruppo di controllo. Il coefficiente β_1 fa registrare un segno positivo e statisticamente significativo anche quando viene stimato un modello esteso.

Se da un lato, i coefficienti associati alle *policy energy variables* tendono a mantenere il medesimo segno, dall'altro, il loro valore cambia. Per i paesi inclusi nel gruppo *POL₁*, l'inclusione di ulteriori determinanti del processo di diffusione ha l'effetto di far diminuire la differenza nel valore atteso della variabile di risposta. Di contro, la differenza tra il gruppo *POL₂* e quello di controllo (*POL₃*) è controversa per il *Modello 2*. Tuttavia, per il *Modello 3*, nelle colonne (5) e (6) il coefficiente β_2 è positivo e statisticamente significativo ad un livello di significatività del 10%.

3.5.1- Controlli diagnostici e stime robuste

Prima di analizzare in dettaglio i risultati dei modelli stimati è necessario eseguire alcuni controlli diagnostici e, eventualmente, correggere le minacce alla validità interna che potrebbero inficiare i risultati ottenuti. La tabella sottostante riporta le matrici di correlazione tra le variabili analizzate nei modelli stimati.

Tabella 3.6- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con *Gen-non idro* come variabile dipendente

VARIABILI	Gen-non idro	<i>POL₁</i>	<i>POL₂</i>	<i>POL₃</i>	<i>OTHPOL</i>	<i>ln(CO₂)</i>	<i>ln(GDP)</i>	<i>ln(Energycons)</i>	<i>Netimport</i>	<i>Thermal</i>	<i>Nuclear</i>
<i>Gen-non idro</i>	1										
<i>POL₁</i>	0.236***	1									
<i>POL₂</i>	0.174***	-0.745***	1								
<i>POL₃</i>	0.0741	-0.304***	-0.408***	1							
<i>OTHPOL</i>	0.193***	0.445***	-0.361***	-0.0937*	1						
<i>ln(CO₂)</i>	-0.024	0.396***	-0.306***	-0.106*	0.261***	1					
<i>ln(GDP)</i>	0.487***	0.187***	-0.106*	-0.105*	0.253***	0.470***	1				
<i>ln(Energycons)</i>	0.252***	0.256***	-0.256***	0.0158	0.228***	0.616***	0.728***	1			
<i>Netimport</i>	0.0930*	0.271***	-0.271***	-0.0609	0.121*	0.158***	0.0749	-0.00583	1		
<i>Thermal</i>	-0.0878*	0.283***	-0.174***	-0.139***	-0.00837	0.379***	-0.0442	-0.254***	0.296***	1	
<i>Nuclear</i>	-0.189***	-0.148***	0.0415	0.143***	0.152***	-0.185***	-0.107**	0.156***	-0.449***	-0.674***	1

Note: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

Tabella 3.6.1- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con *Cap-non idro* come variabile dipendente

VARIABILI	<i>Cap-non idro</i>	POL_1	POL_2	POL_3	<i>OTHPOL</i>	$\ln(CO_2)$	$\ln(GDP)$	$\ln(Energycons)$	<i>Netimport</i>	<i>Thermal</i>	<i>Nuclear</i>
<i>Cap-non idro</i>	1										
POL_1	0.239***	1									
POL_2	0.195***	-0.742***	1								
POL_3	0.05	-0.312***	-0.405***	1							
<i>OTHPOL</i>	0.166***	0.435***	-0.342***	-0.109**	1						
$\ln(CO_2)$	0.0061	0.393***	-0.301***	-0.110**	0.254***	1					
$\ln(GDP)$	0.531***	0.181***	-0.0972*	-0.109**	0.244***	0.467***	1				
$\ln(Energycons)$	0.270***	0.250***	-0.249***	0.0116	0.217***	0.614***	0.726***	1			
<i>Netimport</i>	0.00408	0.271***	-0.217***	-0.0618	0.121**	0.158***	0.0742	-0.00408	1		
<i>Thermal</i>	0.0936*	-0.281***	0.223***	0.0671	-0.237***	-0.231***	-0.0601	0.0149	0.025	1	
<i>Nuclear</i>	-0.167***	-0.154***	0.0496	0.140***	0.132**	-0.137***	-0.0599	0.208***	-0.505***	-0.246***	1

Note: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Nonostante alcune variabili mostrino una correlazione statisticamente significativa, l'analisi del *variance inflation factor* (VIF) per i modelli estesi rileva l'assenza di multicollinearità: il VIF medio assume un valore di 2.23, per i modelli che hanno come variabile dipendente la capacità elettrica non idroelettrica (*Cap-non idro*), e di 2.40, per i modelli con cui è stato analizzato l'indicatore di produzione (*Gen-non idro*).

Nell'ambito della metodologia empirica adottata, le principali minacce alla validità interna derivano dall'eteroschedasticità e dall'autocorrelazione nei termini d'errore della regressione. Inoltre, così come rilevato da Bolkesjo *et al.* (2014) potrebbero sussistere problemi di *cross-sectional dependence* nei dati analizzati. Tali problematiche, se trascurate, potrebbero generare forme di distorsione nei coefficienti stimati. A tal fine sono stati eseguiti i seguenti test statistici:

- ✓ Pesaran CD test (*cross-sectional dependence*);
- ✓ Wooldrige test (autocorrelazione);
- ✓ White test e Breusch-Pagan test (eteroschedasticità);

Per tutti i modelli stimati, i risultati dei test, riportati nella Tabella 3.7 forniscono evidenza empirica della presenza di eteroschedasticità ed autocorrelazione nei termini di errore. Specificatamente, l'ipotesi nulla di errori omoschedastici e l'ipotesi alternativa di errori serialmente non correlati sono rigettate per tutte le specificazioni funzionali.

Per quanto attiene al Pesaran CD test, utilizzato per verificare se i residui siano o no correlati tra le entità statistiche analizzate, l'evidenza empirica mostra anche la presenza di un problema di *cross-sectional dependence*.

Tabella 3.7- Risultati test diagnostici per tutti i modelli stimati

TEST DIAGNOSTICO	Modello 1	Modello 2	Modello 3
White test Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>	(36.792) Pr = 0.0000	(32.013) Pr = 0.0000	(405.088) Pr = 0.0000
White test Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>	(28.439) Pr = 0.0000	(48.263) Pr = 0.0000	(373.206) Pr = 0.0000
Breusch-Pagan test Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>	(85.30) Pr = 0.0000	(128.62) Pr = 0.0000	(360.65) Pr = 0.0000
Breusch-Pagan test Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>	(63.14) Pr = 0.0000	(69.51) Pr = 0.0000	(114.20) Pr = 0.0000
Pesaran Cd Test Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>	(81.476) Pr = 0.0000	(81.476) Pr = 0.0000	(8.654) Pr = 0.0000
Pesaran Cd Test Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>	(79.361) Pr = 0.0000	(79.361) Pr = 0.0000	(4.337) Pr = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>	(140.064) Pr = 0.0000	(140.064) Pr = 0.0000	(284.483) Pr = 0.0000
Wooldridge Test Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>	(935.314) Pr = 0.0000	(935.314) Pr = 0.0000	(306.822) Pr = 0.0000

I risultati dei test dimostrano la presenza di alcune criticità nei modelli stimati. Per quanto attiene al modello di maggior interesse (*Modello 3*) con variabile dipendente l'indice energetico di produzione (*Gen-non idro*), il Breusch-Pagan test e il test di White ci forniscono, rispettivamente, un Chi-quadro pari a 360.65 e 405.088. Discorso

simile vale per il modello esteso con variabile dipendente la capacità elettrica rinnovabile non idroelettrica (*Cap-non idro*): in tal caso i test sopramenzionati ci mostrano un Chi-quadro pari a 114.20 (Breusch-Pagan test) e 373.206 (White test). Entrambi i test statistici indicano, dunque, che i modelli estesi sono contraddistinti dalla presenza di un livello significativo di eteroschedasticità. Medesima situazione si registra per il *Modello 1* e il *Modello 2*.

Una delle principali assunzioni dei modelli di regressione stimati postula l'assenza di autocorrelazione nei termini d'errore. Nel caso in cui non tenessimo conto dell'autocorrelazione nei residui, i coefficienti stimati sarebbero poco precisi. Il Wooldridge test, utilizzato per indagare l'ipotesi nulla di assenza di correlazione seriale nei dati analizzati, fornisce evidenza empirica della presenza di autocorrelazione nei residui. I risultati del test variano in funzione del modello di riferimento e, per il *Modello 3*, sono i seguenti:

- ✓ $F(1, 27) = 284.483$ per l'equazione con variabile dipendente *Gen-non idro*;
- ✓ $F(1, 27) = 306.822$ per l'equazione con variabile dipendente *Cap-non idro*;

Pertanto, l'ipotesi nulla di errori serialmente non correlati non può essere accettata per tutte le specificazioni funzionali.

Inoltre, l'evidenza empirica mostra che i dati si adattano meglio all'utilizzo di un modello panel con *random effects*: è stato eseguito il Breusch and Pagan Lagrangian multiplier test (1980) che, con un Chi-quadro pari a 1558.19, per il modello esteso con variabile dipendente *Gen-non idro*, e 1397.37, per il modello esteso con variabile dipendente *Cap-non idro*, ci porta ad accettare l'ipotesi secondo cui il modello con effetti casuali fornisce stimatori più efficienti rispetto al modello *Pooled OLS*.

Sulla base dei test statistici, l'evidenza empirica ci mostra che i modelli estesi sono caratterizzati dalla presenza di un problema di eteroschedasticità ed autocorrelazione. Al fine di ottenere stime robuste, in accordo con Dong (2012) e Garcia-Alvarez *et al.* (2018), i modelli precedentemente discussi devono essere stimati con l'utilizzo di *standard errors* che tengano conto di tali problematiche. Inoltre, come dimostrano i test sulle *time dummies*, il fenomeno oggetto di studio non può prescindere dalla considerazione degli effetti fissi temporali.

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati ed i test di significatività delle stime. Per evitare problemi di variabili omesse e ottenere stime più efficienti sono riportate esclusivamente le stime del modello esteso (Modello 3).

Tabella 3.8- *Robustness check* delle stime per l'indicatore energetico di produzione (*Gen-non idro*)

<i>Tipologia di test</i>	<i>Robust se</i>	<i>Robust se</i>	<i>Driscoll-Kraay se</i>	<i>Driscoll-Kraay se</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	-0.569*** (0.062)	-0.153*** (0.053)	-0.569*** (0.148)	-0.153 (0.132)	-0.043 (0.077)	0.546*** (0.106)
<i>POL₁(FIP)</i>	0.034*** (0.009)	0.030*** (0.008)	0.034*** (0.010)	0.030** (0.012)	0.068*** (0.024)	0.056** (0.023)
<i>POL₂(FIT)</i>	0.028** (0.012)	0.023** (0.011)	0.028* (0.015)	0.023* (0.014)	0.039* (0.019)	0.035* (0.021)
<i>OTHPOL</i>	0.006* (0.004)	0.010*** (0.003)	0.006*** (0.002)	0.010*** (0.002)	0.015* (0.009)	0.019* (0.010)
<i>Ln(CO₂)</i>	-0.079*** (0.012)	-0.048*** (0.010)	-0.079*** (0.017)	-0.048** (0.020)	-0.200*** (0.020)	-0.089*** (0.023)
<i>Ln(GDP)</i>	0.082*** (0.008)	0.026*** (0.007)	0.082*** (0.022)	0.026** (0.020)	0.054*** (0.008)	0.032*** (0.012)
<i>Ln(EnergyCons)</i>	0.022** (0.011)	0.027*** (0.009)	0.022* (0.012)	0.027** (0.013)	0.071*** (0.022)	0.059*** (0.021)
<i>Netimport</i>	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
<i>Thermal</i>	-0.056*** (0.017)	-0.045*** (0.016)	-0.056* (0.030)	-0.045* (0.024)	-0.222*** (0.024)	-0.215*** (0.023)
<i>Nuclear</i>	-0.110*** (0.020)	-0.105*** (0.018)	-0.110*** (0.031)	-0.105*** (0.027)	-0.320*** (0.021)	-0.292*** (0.021)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	588	588	588	588	588	588
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²	0.4387	0.547	0.4387	0.5079	0.3214	0.3912
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
Prob>F	0.0000 (33.30)	0.0000 (18.19)	0.0000 (1139.65)	0.0000 (613.88)	-	-
Prob>chi2	-	-	-	-	0.0000 (1457.95)	0.0000 (1900.69)

Note: *robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tbella 3.8.1- *Robustness check* delle stime per l'indicatore energetico di produzione (Cap-non idro)

<i>Tipologia di test</i>	<i>Robust se</i>	<i>Robust se</i>	<i>Driscoll-Kraay se</i>	<i>Driscoll-Kraay se</i>	<i>Random effects</i>	<i>Random effects</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Costante</i>	-0.873*** (0.085)	-0.394*** (0.074)	-0.873*** (0.206)	-0.394* (0.203)	-0.513*** (0.100)	0.658*** (0.131)
<i>POL₁(FIP)</i>	0.034*** (0.010)	0.030*** (0.008)	0.034*** (0.012)	0.030*** (0.010)	0.093** (0.038)	0.072** (0.036)
<i>POL₂(FIT)</i>	0.016** (0.010)	0.015* (0.009)	0.016 (0.011)	0.015 (0.010)	0.037* (0.022)	0.031* (0.019)
<i>OTHPOL</i>	0.005* (0.003)	0.008** (0.004)	0.005** (0.002)	0.008** (0.003)	0.012 (0.012)	0.021* (0.011)
<i>Ln(CO₂)</i>	-0.098*** (0.010)	-0.056*** (0.010)	-0.098*** (0.007)	-0.056*** (0.009)	-0.283*** (0.019)	-0.125*** (0.020)
<i>Ln(GDP)</i>	0.115*** (0.010)	0.050*** (0.008)	0.115*** (0.025)	0.050*** (0.024)	0.093*** (0.009)	0.063*** (0.015)
<i>Ln(EnergyCons)</i>	0.023** (0.011)	0.024*** (0.009)	0.023* (0.013)	0.024* (0.014)	0.099*** (0.024)	0.096*** (0.021)
<i>Netimport</i>	-0.001*** (0.000)	-0.001*** (0.000)	-0.001*** (0.000)	-0.001*** (0.000)	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)
<i>Thermal</i>	-0.029** (0.012)	-0.023** (0.011)	-0.029* (0.016)	-0.023** (0.013)	-0.112*** (0.014)	-0.063*** (0.013)
<i>Nuclear</i>	-0.136*** (0.032)	-0.130*** (0.029)	-0.136*** (0.014)	-0.130*** (0.013)	-0.132*** (0.041)	-0.109*** (0.036)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
<i>Osservazioni</i>	577	577	577	577	577	577
<i>Paesi</i>	28	28	28	28	28	28
<i>R²</i>	0.477	0.579	0.477	0.544	0.3098	0.354
<i>Effetti temporali = 0</i>	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
<i>Prob>F</i>	0.0000 (49.43)	0.0000 (24.16)	0.0000 (535.62)	0.0000 (817.55)	-	-
<i>Prob>chi2</i>			-	-	0.0000 (1156.31)	0.0000 (1459.45)

Note: *robust standard errors* in parentesi

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

I controlli diagnostici confermano, in parte, i risultati delle stime effettuate nella sezione precedente: per entrambi gli indicatori sussiste una differenza statisticamente significativa nei valori attesi delle variabili di risposta. Al fine di ottenere un'interpretazione ottimale dei risultati è importante valutare i modelli in funzione delle variabili *policy energy related* costruite e delle variabili dipendenti analizzate. In prima approssimazione, i risultati dei test diagnostici mostrano che la quota di capacità e produzione da rinnovabili non idroelettriche è maggiore nei paesi che hanno introdotto meccanismi di supporto a premio rispetto ai paesi che presentano incentivi alle rinnovabili di tipo obbligazionario.

Il primo scenario analizzato fa riferimento alla quota di energia elettrica generata da fonti energetiche rinnovabili non idroelettriche (*Gen-non idro*). In tal caso la Tabella 3.5 contiene i risultati del *Modello 3* in forma estesa che fa riferimento all'equazione (6). Le stime testimoniano che si registra una differenza statisticamente significativa tra i paesi che hanno adottato meccanismi di tipo *feed-in premium* e i paesi che hanno scelto di incentivare le rinnovabili elettriche attraverso meccanismi di tipo obbligazionario: *ceteris paribus*, tra questi due gruppi di paesi si registra una divergenza nel valore atteso della quota di produzione elettrica da rinnovabili non elettriche. Il valore dei coefficienti varia in funzione della metodologia econometrica adottata. Quando si utilizza una regressione *Pooled OLS* con errori standard robusti all'eteroschedasticità (colonne 1-2 della Tabella 3.8) e con *Driscoll-Kraay standard errors* (colonne 3-4 della Tabella 3.8), il valore del coefficiente associato alla variabile POL_1 è positivo e statisticamente significativo: i coefficienti di eterogeneità sono pari a 0.034 (senza effetti temporali) e 0.030 (con effetti temporali). Le colonne (5) e (6) della Tabella 3.8 contengono i risultati delle stime di un modello panel con effetti casuali. Anche in questo caso, la differenza tra paesi che hanno adottato schemi di supporto finanziari a premio e paesi che hanno introdotto esclusivamente meccanismi a quota permanente. Discorso simile vale per la variabile POL_2 poiché i coefficienti a essa associati sono positivi e statisticamente robusti.

Il secondo scenario si riferisce alla quota della capacità elettrica da rinnovabili non idroelettriche (*Cap-non idro*). A conferma della stretta correlazione tra capacità produttiva e produzione, i risultati empirici del modello esteso (Tabella 3.8.1) sostengono l'ipotesi che l'eterogeneità nella politica energetica abbia generato una

differenza nel valore atteso dell'*outcome* per i paesi che hanno implementato meccanismi incentivanti di tipo *premium*: il valore del coefficiente β_1 è positivo e statisticamente significativo in tutte le specificazioni stimate. Sembra, invece, sussistere una differenza tra gli altri gruppi esaminati. In particolare, nonostante i modelli *Pooled OLS* ci forniscano dei risultati controversi, le colonne (5) e (6) della Tabella 3.8.1 ci forniscono il risultato secondo cui i paesi con meccanismi incentivanti di tipo FIT presentino una quota maggiore di capacità elettrica da rinnovabili non idroelettriche rispetto ai paesi che hanno adottato un meccanismo RPS. Questa differenza, tuttavia, non è statisticamente significativa nel modello con Driscoll-Kraay *standard errors*.

Discorso controverso vale per la variabile espressione del numero di altri meccanismi di incentivazione presenti in ogni stato analizzato (*OTHPOL*). In accordo con Dong (2012), i coefficienti presentano un segno positivo in tutte le specificazione stimate: all'aumentare del numero di altre politiche adottate per promuovere le rinnovabili elettriche corrisponde un aumento della produzione e della capacità non idroelettrica.

La significatività statistica delle variabili addizionali di controllo mostra che il fenomeno oggetto di studio è influenzato da una molteplicità di variabili. Dati i risultati abbastanza simili raggiunti nelle stime per le due tipologie di indicatori energetici che abbiamo adottato (*Gen-non idro* e *Cap-non idro*), il commento relativo alle variabili addizionali introdotte nel *Modello 3* sarà unificato.

Per quanto attiene al GDP pro capite, per tutte le specificazioni proposte, esso assume un segno positivo e statisticamente significativo. Per entrambi gli indicatori energetici, un aumento del reddito pro capite si traduce in una crescita della capacità e della produzione elettrica da fonti rinnovabili non idroelettriche. In particolare, ad un aumento dell'1% nel GDP pro capite, è associata una variazione media dello 0.00093 nell'indicatore di capacità e dello 0.00054 nell'indicatore energetico di produzione. Questi valori fanno riferimento alle stime con effetti casuali. Questi risultati trovano conferma in Kilinc-Ata (2016) e in Garcia-Alvarez *et al.* (2018). La ragione è che «*countries of higher income per capita have less total RE, since many lower-income countries rely on hydroelectricity as their primary source of energy; when one removes hydroelectricity from the mix, however, we find that higher income per capita is*

associated with greater rates of RE deployment. [...]higher-income, liberal democracies are most likely to invest in non-hydroelectric forms of RE, such as wind and solar energy, while less wealthy countries are more likely to invest in large-scale hydroelectricity as a source of baseload electricit» (Carley *et al.*, 2017). Pertanto, un aumento del reddito riduce la quota di energia idroelettrica aumentando la diversificazione del mix energetico totale e rinnovabile. D'altronde, come sostengono Jenner *et al.* (2013), gli elevati costi d'investimento iniziali delle fonti energetiche esaminate, soprattutto per l'eolico, trovano una correlazione inversa con l'aumento reddito: *«wind installations have a high up front cost and are typically done at largescale, and wealthier societies are often more capable of organizing capital to meet these costs»* (Jenner *et al.*, 2013).

In linea con i risultati di Kilinc-Ata (2016) e Garcia-Alvarez *et al.* (2018), i modelli stimati mostrano una correlazione negativa tra le emissioni pro capite di biossido di carbonio e gli indicatori energetici analizzati. Questo risultato è in armonia con la letteratura scientifica analizzata e la ragione, secondo Marques *et al.* (2010), è data dal fatto che il rapporto di causalità tra le emissioni inquinanti e le rinnovabili non idroelettriche non è bidirezionale ma procede dalle seconde verso i primi. Se vale questa lettura, allora i nostri risultati dimostrano che i paesi che presentano maggiori emissioni di CO₂ per abitante prevalgono nel nostro campione e sono ancora lontani dal favorire l'introduzione di tecnologie per la produzione di energia elettrica da risorse rinnovabili non idroelettriche. Inoltre, Dong (2012) sostiene che a causa dell'elevata correlazione tra i consumi elettrici e le emissioni di CO₂, è ragionevole sostenere che la distribuzione della capacità non idroelettrica risponde solo ad un elevato livello di emissioni inquinanti.

Un certo grado di uniformità riguarda le variabili di controllo *energy-related*. In tal caso, le variabili che esprimono la quota delle cosiddette *substitute energy sources* (*Thermal e Nuclear*) presentano dei coefficienti negativi e statisticamente significativi ad un livello di significatività dell'1% per tutti i modelli stimati: un aumento della capacità e/o della produzione di energia elettrica da fonti energetiche tradizionali (nucleare e/o combustibili fossili) costituisce una barriera alla diffusione delle rinnovabili non idroelettriche. Questo risultato è da ricollegare al fatto che *«countries that are more reliant on fossil fuels to serve their Energy needs generally produce a*

smaller percentage of their electricity from renewables» (Carley *et al.*, 2017). Sia l'energia termica (petrolio, gas e carbone) sia l'energia nucleare tendono ad essere associate ad una minore diffusione delle rinnovabili non idroelettriche. Discorso controverso riguarda le due ulteriori variabili energetiche (*Energycons* e *Netimport*). I risultati dei modelli stimati mostrano che le importazioni nette fanno registrare un effetto significativo esclusivamente sull'indicatore di capacità. I consumi elettrici pro capite, invece, sono statisticamente deboli in quanto, ad esclusione del modello con effetti casuali, presentano dei coefficienti negativi e statisticamente non significativi. Sulla base dei nostri risultati siamo portati a dedurre che le importazioni nette di energia elettrica tendono ad assumere un segno negativo: in corrispondenza di un aumento delle importazioni, rispetto alle esportazioni, la quota della capacità elettrica non idroelettrica tende a diminuire. Questo risultato contrasta le assunzioni di Marques *et al.* (2010) e, come affermato da Kilinc-Ata (2016): *«the greater energy imports are, the lower the commitment to renewables, and the weaker the response to their development is»*. Questo risultato suggerisce che la sicurezza energetica non costituisce un *driver* fondamentale per lo sviluppo delle rinnovabili elettriche. Di contro, un aumento dei consumi elettrici dovrebbe rappresentare un elemento determinante per far aumentare la capacità e la produzione di elettricità da fonti non idroelettriche.

3.6- Una verifica supplementare sull'effetto causale dei principali meccanismi di supporto alle rinnovabili

I coefficienti di eterogeneità stimati nelle sezioni precedenti ci suggeriscono la presenza di un differenziale statisticamente significativo tra gruppi di paesi con politiche di supporto alle rinnovabili differenti: i paesi che hanno adottato dei meccanismi incentivanti di tipo finanziario con opzione *premium* registrano dei vantaggi comparati nelle quote di elettricità da rinnovabili non idroelettriche. Per entrambi gli indicatori energetici analizzati (*Gen-non idro* e *Cap-non idro*) i risultati delle stime mostrano, infatti, che l'eterogeneità delle *renewable energy policies* ha generato delle differenze significative nel processo di diffusione delle rinnovabili non idroelettriche.

Al fine di ottenere delle stime più accurate dell'effetto diffusione di una particolare politica di supporto alle RES-E, seguendo la metodologia investigativa implementata da Kilinc-Ata (2016) e Carley *et al.* (2017), sarebbe interessante verificare l'efficacia post-trattamento associata all'introduzione di un particolare meccanismo di politica energetica. In particolare, viene messo in pratica un ulteriore controllo di robustezza in cui si tiene conto del *timing* di adozione dei tre principali *support schemes* alle rinnovabili elettriche adottate dai paesi europei, ossia le tariffe finanziarie a prezzo fisso (FIT), quelle a premio (FIP) e i *renewable portfolio standard* (RPS). In tal caso, l'obiettivo primario è di valutare la relazione statistica tra l'adozione temporale dei *major support instruments* alle RES-E e la diffusione delle rinnovabili non idroelettriche.

In aggiunta ai tradizionali meccanismi incentivanti di tipo finanziario (FIT) e obbligazionario (RPS), a causa della scarsa attenzione da parte della letteratura, una particolare riflessione riguarda le tariffe finanziarie di tipo *feed-in premium* (FIP). La considerazione per questa forma di meccanismo di supporto alle RES-E, che sta assumendo un'importanza crescente nel panorama energetico europeo, rappresenta l'elemento di innovatività rispetto alla letteratura esistente.

Analiticamente, il modello di base per la valutazione del processo di diffusione delle RES-E assume la seguente forma funzionale:

$$Y_{it} = \beta_0 + \gamma_t + \alpha_i + \beta_1 FIP_{it} + \beta_2 FIT_{it} + \beta_3 RPS_{it} + \theta_1 Z_{it} + \varepsilon_{it} \text{ (Modello 4)}$$

In cui:

- ✓ Y : è un indicatore energetico di produzione (*Gen-non idro*) e di capacità (*Cap-non idro*) espressione della diffusione delle rinnovabili elettriche non idroelettriche (biomassa, geotermico, solare, eolico);
- ✓ FIP , FIT , RPS : sono tre variabili binarie che assumono valore unitario per lo stato i -esimo dopo l'introduzione dello schema di supporto analizzato e zero altrimenti;
- ✓ ε : rappresenta il termine d'errore della regressione;
- ✓ γ , α : comprendono, rispettivamente, gli effetti fissi temporali e individuali;

- ✓ $i = 1, \dots, 28$ (paesi);
- ✓ $t = 1995, \dots, 2015$ (anni);
- ✓ Z : è un vettore che contiene il logaritmo naturale del GDP pro capite ($\ln GDP$), il logaritmo naturale delle emissioni pro capite di anidride carbonica ($\ln CO_2$), le importazioni nette di energia elettrica ($Netimport$), il logaritmo naturale dei consumi elettrici pro capite ($\ln EnergyCons$) e il contributo delle fonti energetiche tradizionali (*Thermal e Nuclear*).

Questa forma funzionale, ci consente di verificare empiricamente l'effetto causale associato ai tre principali meccanismi di supporto adottati nei paesi europei: le tariffe finanziarie a prezzo fisso (FIT), le tariffe finanziarie a premio (FIP) e le quote obbligazionarie (RPS). Inoltre, al fine di evitare problemi di distorsione da variabili omesse, l'analisi tiene conto di ulteriori determinanti potenziali della diffusione delle rinnovabili elettriche. L'obiettivo è di perfezionare il modello stimato tenendo conto di fattori inosservabili (γ e α) ed osservabili (Z) che potrebbero influenzare le variabili oggetto di studio. Nel primo caso (fattori inosservabili), controlliamo i coefficienti di *policy* per elementi che variano tra le unità e non nel tempo (α) e che variano nel tempo e non tra i paesi (γ). Un altro controllo riguarda quei fattori quantificabili (Z) che variano nel tempo e tra le unità statistiche: tali elementi riguardano una serie di variabili addizionali di controllo di natura economica, ambientale ed energetica molto utilizzate dalla letteratura.

Occorre notare che, in questo caso, la relazione tra la diffusione delle RES-E e l'adozione degli schemi supporto, determinata per mezzo di un semplice *Pooled OLS*, potrebbe, tuttavia, non essere consistente a causa della potenziale distorsione da variabili omesse generata da quei fattori *time-invariant* non osservabili, ossia le caratteristiche *country-based* (Carley *et al.*, 2017). Pertanto, ci aspettiamo che, per mezzo dei convenzionali test statistici di adeguatezza, ossia il Breusch and Pagan Lagrangian multiplier test (1980) e il test di Hausman (1978), il metodo di stima più efficiente consista nello stimatore dei minimi quadrati con effetti fissi temporali ed individuali. D'altronde, a livello metodologico la natura *time-variant* delle variabili dicotomiche analizzate nel modello (FIP, FIT, RPS) ci consente di stimare i coefficienti di regressione per mezzo dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy*.

Difatti, «*after adding the time information on when the policies are adopted in each country, fixed effects model can be estimated*» (Dong, 2012).

Al fine di ottenere dei parametri non distorti e consistenti delle politiche energetiche, la metodologia di stima implementata di seguito prevede l'utilizzo delle convenzionali *panel data techniques*, ossia i minimi quadrati ordinari (*Pooled OLS*), con effetti fissi (FE) e con effetti casuali (RE). La selezione della metodologia di stima è stata, ovviamente, influenzata dalla letteratura (si vedano, in particolare, i contributi di Carley, 2009; Dong, 2012; Kilinc-Ata, 2016; Carley *et al.*, 2017) e, a differenza delle variabili binarie associate ai coefficienti di eterogeneità studiati nei modelli 1-3, nelle equazioni stimate di seguito sono state costruite tre variabili binarie espressione della tipologia di *support scheme* adottata dal paese *i-esimo* al tempo *t-esimo*:

- ✓ *FIP* rappresenta una variabile binaria che assume valore unitario per il paese *i-esimo* dopo l'introduzione di un meccanismo di supporto alle RES-E di tipo *premium tariff* e zero altrimenti;
- ✓ *FIT* rappresenta una variabile binaria che assume valore unitario per il paese *i-esimo* dopo l'introduzione di un meccanismo di supporto alle RES-E di tipo *fixed tariff* e zero altrimenti;
- ✓ *RPS* rappresenta una variabile binaria che assume valore unitario per il paese *i-esimo* dopo l'introduzione di un meccanismo di supporto alle RES-E di tipo obbligazionario e zero altrimenti;

I dati per la costruzione di queste variabili sono stati ottenuti da numerose fonti informative. Le principali sono il database fornito dall'International Energy Agency (IEA)³⁰ che, nella sezione denominata “*Global Renewable Energy Policies and Measures*” (IEA/IRENA), fornisce una sintesi dettagliata delle principali politiche energetiche adottate dai paesi oggetto di studio, e i National Renewable Energy Action Plans (NREAPs). Al fine di ottenere dati più dettagliati e completi, tali informazioni sono state perfezionate dalla consultazione di altre fonti informative, tra cui Res Legal Europe, Ragwitz *et al.* (2012); European Commission Guidance for Renewable Support Scheme (2013), Carley *et al.* (2017).

³⁰ Cfr., <https://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/>.

Per comprendere meglio il modello stimato, nella tabella sottostante sono state riportate le principali statistiche descrittive delle tre *energy policy variables* costruite.

Tabella 3.8.2- Statistiche descrittive delle *energy policy variables time-variant*

Variabile	Obs.	Media	Std. Dev.	Min	Max
<i>FIP</i>	588	0.159864	0.366792	0	1
<i>FIT</i>	588	0.433674	0.496003	0	1
<i>RPS</i>	588	0.144558	0.351954	0	1

Nonostante i meccanismi incentivanti di tipo *feed-in tariff* (FIT) siano i più diffusi, negli ultimi anni, numerosi paesi europei hanno optato per un cambiamento di sistema introducendo le tariffe a premio.

3.6.1- Analisi dei risultati ottenuti: *time-variant policy variables*

Seguendo la logica sottesa agli strumenti di supporto alle RES-E, ci aspettiamo che i coefficienti associati alle politiche energetiche analizzate nel *Modello 4* abbiano un segno positivo. Tuttavia, tenendo conto della varietà dei risultati di alcuni studi empirici (si veda, ad esempio, Carley, 2009; Dong, 2012, Kilinc-Ata, 2016), potrebbe registrarsi un differenziale di efficacia tra le tre politiche energetiche analizzate: nell'interpretare i risultati di regressione, gli strumenti che registrano il coefficiente maggiore sono i più efficaci nel promuovere la diffusione delle RES-E non idroelettriche.

La stima del *Modello 4* prevede l'utilizzo di due variabili dipendenti:

- ✓ La quota annuale della produzione di elettricità da fonti rinnovabili non idroelettriche (*Gen-non idro*);
- ✓ La quota annuale della capacità di elettricità da fonti rinnovabili non idroelettriche (*Gen-non idro*);

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati ed i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 3.9- Risultati delle stime del *Modello 4* per l'indicatore energetico di produzione (*Gen-non idro*)

Modello 4	Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>					
	Pooled OLS	Pooled OLS	FE	FE	RE	RE
<i>Costante</i>	-0.603*** (0.076)	-0.303*** (0.080)	0.209** (0.082)	0.657*** (0.108)	0.040 (0.081)	0.541*** (0.105)
<i>FIP</i>	0.058*** (0.007)	0.034*** (0.007)	0.022*** (0.005)	0.015** (0.005)	0.026*** (0.005)	0.015** (0.005)
<i>FIT</i>	0.020*** (0.006)	0.025*** (0.006)	0.014*** (0.004)	0.013*** (0.004)	0.014*** (0.004)	0.013*** (0.004)
<i>RPS</i>	0.014* (0.008)	0.021*** (0.008)	0.009 (0.007)	0.009 (0.007)	0.008 (0.007)	0.007 (0.007)
<i>Ln(CO₂)</i>	-0.075*** (0.012)	-0.043*** (0.012)	-0.230*** (0.021)	-0.127*** (0.026)	-0.192*** (0.020)	-0.092*** (0.023)
<i>Ln(GDP)</i>	0.082*** (0.009)	0.041*** (0.009)	0.033*** (0.009)	0.032** (0.013)	0.045*** (0.008)	0.027** (0.012)
<i>Ln(EnergyCons)</i>	0.012 (0.012)	0.025** (0.011)	0.108*** (0.025)	0.078*** (0.025)	0.079*** (0.022)	0.068*** (0.021)
<i>Netimport</i>	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
<i>Thermal</i>	0.022** (0.010)	0.021** (0.009)	-0.217*** (0.025)	-0.213*** (0.025)	-0.202*** (0.025)	-0.199*** (0.024)
<i>Nuclear</i>	-0.089*** (0.017)	-0.079*** (0.016)	-0.331*** (0.022)	-0.306*** (0.021)	-0.313*** (0.022)	-0.284*** (0.021)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	588	588	588	588	588	588
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²	0.4324	0.5186	0.7548	0.7909	0.7514	0.7883
Effetti temporali=0	-	F(20, 558) = 4.99	-	F(20, 531) = 4.58	-	chi2(20) = 110.41
Prob>F	0.0000 (48.93)	0.0000 (20.73)	0.0000 (188.42)	0.0000 (69.24)	-	-
Prob> chi2	-	-	-	-	0.0000 (1485.66)	0.0000 (1858.79)

Note: *standard errors* in parentesi; OLS: *ordinary least squares*; FE: *Fixed Effects*; RE: *Random effects*

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 3.9.1- Risultati delle stime del *Modello 4* per l'indicatore energetico di capacità (*Cap-non idro*)

Modello 4	Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>					
	Pooled OLS	Pooled OLS	FE	FE	RE	RE
<i>Costante</i>	-0.730*** (0.087)	-0.392*** (0.091)	0.164* (0.099)	1.257*** (0.115)	-0.068 (0.098)	1.037*** (0.114)
<i>FIP</i>	0.069*** (0.008)	0.042*** (0.008)	0.027*** (0.004)	0.017*** (0.005)	0.033*** (0.007)	0.017*** (0.006)
<i>FIT</i>	0.010* (0.006)	0.015** (0.007)	0.019*** (0.005)	0.014*** (0.004)	0.018*** (0.005)	0.013** (0.005)
<i>RPS</i>	0.000 (0.009)	0.008 (0.009)	0.004 (0.008)	0.011 (0.007)	0.001 (0.009)	0.007 (0.007)
<i>Ln(CO₂)</i>	-0.092*** (0.014)	-0.051*** (0.014)	-0.320*** (0.026)	-0.085*** (0.028)	-0.256*** (0.024)	-0.056** (0.025)
<i>Ln(GDP)</i>	0.095*** (0.010)	0.049*** (0.011)	0.042*** (0.010)	0.111*** (0.014)	0.060*** (0.010)	0.095*** (0.013)
<i>Ln(EnergyCons)</i>	0.022 (0.014)	0.035*** (0.013)	0.158*** (0.030)	0.079*** (0.026)	0.109*** (0.026)	0.080*** (0.023)
<i>Netimport</i>	-0.001*** (0.000)	-0.001** (0.000)	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)
<i>Thermal</i>	-0.018*** (0.002)	-0.014* (0.008)	-0.132*** (0.031)	-0.148*** (0.026)	-0.130*** (0.030)	-0.145*** (0.026)
<i>Nuclear</i>	-0.081*** (0.019)	-0.070*** (0.018)	-0.233*** (0.026)	-0.189*** (0.023)	-0.233*** (0.026)	-0.186*** (0.022)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	577	577	577	577	577	577
Paesi	28	28	28	28	28	28
R ²	0.4532	0.5376	0.7406	0.8298	0.7350	0.8269
Effetti temporali=0	-	F(20, 547) = 4.99	-	F(20, 520) = 13.62	-	chi2(20) = 274.74
Prob>F	0.0000 (52.22)	0.0000 (21.93)	0.0000 (171.27)	0.0000 (87.40)	-	-
Prob> chi2	-	-	-	-	0.0000 (1344.45)	0.0000 (2294.32)

Note: *standard errors* in parentesi; OLS: *ordinary least squares*; FE: *Fixed Effects*; RE: *Random effects*

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Prima di interpretare le stime dei coefficienti di regressione, al fine di individuare la metodologia di stima più efficiente e l'assenza di multicollinearità tra le variabili analizzate, sono stati eseguiti alcuni controlli diagnostici. Le tabelle sottostanti riportano le matrici di correlazione per le variabili analizzate nei modelli stimati.

Tabella 3.10- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con *Gen-non idro* come variabile dipendente

VARIABILI	<i>Gen-non idro</i>	<i>FIP</i>	<i>FIT</i>	<i>RPS</i>	$\ln(CO_2)$	$\ln(GDP)$	$\ln(Energycons)$	<i>Netimport</i>	<i>Thermal</i>	<i>Nuclear</i>
<i>Gen-non idro</i>	1									
<i>FIP</i>	0.363***	1								
<i>FIT</i>	0.170***	0.232***	1							
<i>RPS</i>	0.0634	-0.0191	-0.194***	1						
$\ln(CO_2)$	-0.024	0.0636	-0.0107	-0.0495	1					
$\ln(GDP)$	0.487***	0.250***	0.367***	0.161***	0.470***	1				
$\ln(Energycons)$	0.252***	0.121**	0.0622	0.0619	0.616***	0.728***	1			
<i>Netimport</i>	0.115**	0.0772	-0.0825*	0.258***	0.0917*	0.0721	-0.00983	1		
<i>Thermal</i>	-0.0878*	-0.0372	-0.0453	-0.00241	0.379***	-0.0441	-0.254***	0.296***	1	
<i>Nuclear</i>	-0.189***	0.0231	0.00218	0.0328	-0.185***	-0.107**	0.156***	-0.449***	-0.674***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Tabella 3.10.1- Matrice di correlazione per le variabili utilizzate nel modello con *Cap-non idro* come variabile dipendente

VARIABILI	<i>Cap-non idro</i>	<i>FIP</i>	<i>FIT</i>	<i>RPS</i>	$\ln(CO_2)$	$\ln(GDP)$	$\ln(Energycons)$	<i>Netimport</i>	<i>Thermal</i>	<i>Nuclear</i>
<i>Cap-non idro</i>	1									
<i>FIP</i>	0.383***	1								
<i>FIT</i>	0.243***	0.227***	1							
<i>RPS</i>	0.0857*	-0.0226	-0.202***	1						
$\ln(CO_2)$	0.0061	0.0602	-0.0183	-0.0531	1					
$\ln(GDP)$	0.531***	0.247***	0.363***	0.158***	0.467***	1				
$\ln(Energycons)$	0.270***	0.117**	0.0535	0.0579	0.614***	0.726***	1			
<i>Netimport</i>	0.0179	0.0771	-0.0836*	0.258***	0.0916*	0.0721	-0.0101	1		
<i>Thermal</i>	-0.0545	-0.0252	-0.0205	0.00979	0.401***	-0.0301	-0.245***	0.304***	1	
<i>Nuclear</i>	-0.157***	0.0164	-0.0117	0.0265	-0.194***	-0.116**	0.148***	-0.452***	-0.670***	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Nonostante alcune variabili mostrino una correlazione staticamente significativa, l'analisi del *variance inflation factor* (VIF) rileva l'assenza di problemi di multicollinearità tra le variabili analizzate. Di seguito sono riportati i valori del VIF medio per il Modello 4:

- ✓ Equazione con variabile dipendente *Gen-non idro*: 2.65;
- ✓ Equazione con variabile dipendente *Cap-non idro*: 2.29;

Come anticipato in precedenza, un aspetto molto importante riguarda la scelta della metodologia di stima che si adatta meglio ai dati. A tal fine è stato eseguito il Breusch and Pagan Lagrangian multiplier test (1980) che compara, per entrambe le variabili dipendenti analizzate, le stime *Pooled OLS* (colonne 1-2) e *random effects* (colonne 5-6). I risultati del test, con un Chi-quadro pari a 1662.87 per le regressioni con variabile dipendente la quota di energia elettrica generata da rinnovabili non idroelettriche (*Gen-non idro*) e con un Chi-quadro pari a 1470.17 per le regressioni con variabile dipendente la capacità elettrica rinnovabile non idroelettrica (*Cap-non idro*), ci suggeriscono che tra le entità statistiche analizzate si configura un importante *panel effect*. Pertanto, le relazioni tra le variabili analizzate si adattano meglio a un modello panel piuttosto che a una semplice regressione lineare multipla. D'altronde, questo risultato non contrasta la letteratura analizzata (si vedano, in particolare, i contributi di Dong, 2012; Carley *et al.*, 2017).

Un altro elemento da tener presente è che tra le metodologie *fixed* e *random effects* si configura un problema di scelta in quanto, nel caso in cui la numerosità campionaria è fissa e il periodo temporale molto grande, gli stimatori tendono ad essere identici. Tuttavia, i due differenti stimatori possono essere comparati con l'ausilio del test di Hausman (1978). Di seguito sono riportati i risultati del test di Hausman per entrambi gli indicatori:

- ✓ Equazione con variabile dipendente *Gen-non idro*: $\chi^2 = 61.92$, $\text{Prob}>\chi^2 = 0.0000$;
- ✓ Equazione con variabile dipendente *Cap-non idro*: $\chi^2 = 60.95$, $\text{Prob}>\chi^2 = 0.0000$;

Per ogni differente indicatore energetico, il test di Hausman fornisce evidenza empirica a favore dello stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy* (LSDV). Di

conseguenza, tale metodologia si adatta meglio ai dati disponibili. Questo risultato è confermato anche dalla significatività statistica degli effetti individuali: il test F sulla significatività congiunta delle *n-1 dummies country-based* è pari a $F(27, 551) = 61.48$, per l'indicatore energetico di produzione (*Gen-non idro*), e a $F(27, 540) = 51.39$, per l'indicatore energetico di capacità (*Cap-non idro*).

Infine, per evitare problemi di inconsistenza nelle stime, le equazioni del *Modello 4* sono state stimate nuovamente per mezzo di un panel con effetti fissi ed errori standard per dati raggruppati (*clusterd standard errors*), robusti all'eteroschedasticità e all'autocorrelazione nei residui. Inoltre, seguendo Carley *et al.* (2017) e Bolkesjo *et al.* (2014), sono stati utilizzati anche gli *standard errors* di Hoelchle (2007) che sono robusti all'eteroschedasticità, all'autocorrelazione e alla *cross-sectional dependence*.

I risultati delle stime sono riportati nelle tabelle sottostanti dove, ogni colonna, riporta una differente regressione mentre, ogni riga, contiene i coefficienti stimati e i principali risultati delle inferenze statistiche.

Tabella 3.11– *Fixed effects regression* per l'indicatore energetico di produzione (*Gen-non idro*)

Modello 4	Variabile dipendente: <i>Gen-non idro</i>			
	Clustered se	Clustered se	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se
<i>Costante</i>	0.209 (0.183)	0.657*** (0.098)	0.209 (0.124)	0.657*** (0.108)
<i>FIP</i>	0.022** (0.010)	0.015* (0.009)	0.022*** (0.007)	0.015*** (0.005)
<i>FIT</i>	0.014* (0.008)	0.013* (0.007)	0.014** (0.006)	0.013** (0.006)
<i>RPS</i>	0.009 (0.010)	0.009 (0.009)	0.009 (0.010)	0.009 (0.008)
<i>Ln(CO₂)</i>	-0.230*** (0.058)	-0.127*** (0.043)	-0.230*** (0.019)	-0.127*** (0.024)
<i>Ln(GDP)</i>	0.033* (0.020)	0.032* (0.019)	0.033** (0.014)	0.032** (0.015)
<i>Ln(EnergyCons)</i>	0.108** (0.050)	0.078** (0.040)	0.108*** (0.028)	0.078*** (0.023)
<i>Netimport</i>	-0.000 (0.001)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
<i>Thermal</i>	-0.217** (0.107)	-0.213** (0.100)	-0.217*** (0.073)	-0.213*** (0.069)
<i>Nuclear</i>	-0.331*** (0.082)	-0.306*** (0.074)	-0.331*** (0.054)	-0.306*** (0.054)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	588	588	588	588
Paesi	28	28	28	28
R ²	0.7548	0.7909	0.7548	0.7909
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
Effetti individuali = 0	Pr= 0.0000	Pr= 0.0000	Pr= 0.0000	Pr= 0.0000
Prob>F	0.0000 (54.63)	0.0000 (44.06)	0.0000 (687.73)	0.0000 (1179.51)

Note: robust *standard errors* in parentesi;

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Tabella 3.11.1– *Fixed effects regression* per l'indicatore energetico di capacità (*Cap-non idro*)

Modello 4	Variabile dipendente: <i>Cap-non idro</i>			
	Clustered se	Clustered se	Driscoll-Kraay se	Driscoll-Kraay se
<i>Costante</i>	0.164 (0.199)	1.257*** (0.118)	0.164 (0.170)	1.257*** (0.127)
<i>FIP</i>	0.027** (0.013)	0.017* (0.010)	0.027*** (0.006)	0.017*** (0.004)
<i>FIT</i>	0.019** (0.010)	0.014* (0.008)	0.019*** (0.006)	0.014** (0.006)
<i>RPS</i>	0.004 (0.012)	0.011 (0.010)	0.004 (0.011)	0.011 (0.014)
<i>Ln(CO₂)</i>	-0.320*** (0.065)	-0.085** (0.035)	-0.320*** (0.017)	-0.085*** (0.021)
<i>Ln(GDP)</i>	0.042* (0.022)	0.111*** (0.034)	0.042* (0.021)	0.111*** (0.014)
<i>Ln(EnergyCons)</i>	0.158* (0.082)	0.079** (0.034)	0.158*** (0.036)	0.079*** (0.023)
<i>Netimport</i>	-0.002* (0.001)	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)
<i>Thermal</i>	-0.132* (0.080)	-0.148** (0.058)	-0.132** (0.060)	-0.148*** (0.053)
<i>Nuclear</i>	-0.233** (0.100)	-0.189*** (0.056)	-0.233*** (0.034)	-0.189*** (0.033)
<i>Time dummies</i>	NO	SI	NO	SI
Osservazioni	577	577	577	577
Paesi	28	28	28	28
R ²	0.7406	0.8298	0.7406	0.8298
Effetti temporali = 0	-	Pr= 0.0000	-	Pr= 0.0000
Effetti individuali = 0	Pr= 0.0000	Pr= 0.0000	Pr= 0.0000	Pr= 0.0000
Prob>F	0.0000 (75.57)	0.0000 (27.88)	0.0000 (1644.36)	0.0000 (1279.51)

Note: robust *standard errors* in parentesi;

*** significativa all'1%; ** significativa al 5%; * significativa al 10%

Prima di analizzare dettagliatamente i risultati empirici è bene eseguire alcune precisazioni sulla metodologia di stima che si adatta meglio ai dati analizzati. Le tabelle 3.9 e 3.9.1 contengono, infatti, i risultati del *Modello 4* stimato attraverso tre differenti

tipologie di tecniche econometriche (*Ordinary Least Squares, Fixed Effects, Random Effects*). Tali metodologie, nonostante mostrino una certa uniformità nei segni dei coefficienti, forniscono dei parametri stimati abbastanza differenti per entrambe le variabili dipendenti. Osservando le variabili di politica energetica, in linea con i risultati di Dong (2012), le stime OLS producono, infatti, dei parametri più ampi rispetto alle stime *random* e *fixed effects*. Tuttavia, in funzione dei risultati del Breusch and Pagan Lagrangian multiplier test (1980) e del test di Hausman (1978), siamo portati a ritenere che i dati esaminati si adattino meglio allo stimatore dei minimi quadrati con variabili *dummy*. Per questa motivazione, nelle tabelle 3.11 e 3.11.1 sono stati eseguiti dei controlli diagnostici supplementari che riguardano le stime dei coefficienti del Modello 4 realizzate per mezzo di una regressione con *fixed* e *time effects* con *standard error* robusti.

In prima approssimazione, i risultati delle stime mostrano che, per entrambe le variabili di risposta esaminate, l'introduzione di schemi di supporto alle RES-E ha generato un incremento della capacità e della produzione di energia elettrica da rinnovabili non idroelettriche: le tre principali variabili d'interesse (FIP, FIT, RPS) fanno registrare dei coefficienti positivi. Al fine di ottenere un'interpretazione omogenea, è importante analizzare i risultati ottenuti in funzione delle variabili di politica energetica costruite e delle variabili dipendenti studiate.

Il primo scenario analizzato fa riferimento alla quota di energia elettrica generata da fonti energetiche rinnovabili non idroelettriche (*Gen-non idro*) i cui risultati empirici sono contenuti nelle tabelle 3.9 e 3.11. Le stime testimoniano che gli strumenti di politica energetica esaminati impattano positivamente il processo di diffusione delle RES-E non idroelettriche: le tariffe finanziarie a premio (FIP), le tariffe a prezzo fisso (FIT) e le quote obbligazionarie (RPS) sono positivamente correlate alla variabile *Gen-non idro* e, *ceteris paribus*, il meccanismo di incentivazione con il coefficiente più elevato è rappresentato dalle *feed-in premium* (FIP). Difatti, in tutte le specificazioni econometriche, il coefficiente β_1 è quello che presenta un valore più elevato. Considerando le stime con *fixed effects* le più accurate, l'implementazione di un meccanismo finanziario di tipo FIP è in grado di generare, in media, un aumento nella quota di energia elettrica generata da rinnovabili non idroelettriche pari a 0.022 (senza effetti temporali) e 0.015 (con effetti temporali). Questo effetto risulta statisticamente

significativo anche quando si utilizzano errori standard robusti. Pertanto, i paesi che hanno adottato questo meccanismo di politica energetica registrano una quota di RES-E non idroelettriche maggiore rispetto ai paesi che non hanno implementato tale meccanismo di *policy*. Anche le tariffe finanziarie a prezzo fisso (FIT) e le quote obbligazionarie (RPS) incidono positivamente sulla variabile *Gen-non idro*. Tuttavia, in linea con i risultati di Carley (2009), Dong (2012) e Kilinc-Ata (2016), il coefficiente associato alle quote obbligazionarie (β_3) è statisticamente significativo solo nelle stime senza effetti fissi. Siamo, dunque, portati a ritenere che, se da un lato, le tariffe di riacquisto a prezzo fisso incidono positivamente sulla produzione di elettricità rinnovabile, dall'altro, le quote obbligazionarie non hanno alcun effetto sulla variabile *Gen-non idro*.

Risultati simili si registrano per il secondo scenario analizzato che si riferisce alla quota annuale della capacità elettrica da rinnovabili non idroelettriche (*Cap-non idro*). Anche in questo contesto, l'introduzione di politiche di supporto finanziarie di tipo *feed-in premium* (FIT) risulta essere la strategia migliore per stimolare la diffusione delle RES-E non idroelettriche: il coefficiente β_1 è quello con il valore più elevato. L'implementazione di un meccanismo finanziario di tipo FIP è in grado di generare, in media, un aumento nella quota di capacità elettrica installata da rinnovabili non idroelettriche pari a 0.027 (senza effetti temporali) e 0.017 (con effetti temporali). Discorso simile vale per le tariffe finanziarie a prezzo fisso (FIT): l'implementazione di un meccanismo finanziario di tipo FIT causa, in media, un aumento nella quota di capacità elettrica installata da rinnovabili non idroelettriche pari a 0.019 (senza effetti temporali) e 0.014 (con effetti temporali). Di contro, i paesi che hanno adottato le quote obbligazionarie (RPS) non sembrano avere dei tassi di diffusione delle RES-E più elevati in quanto il coefficiente β_3 non è statisticamente significativo nelle specificazioni econometriche stimate.

In letteratura sono state individuate molteplici ragioni che potrebbero spiegare la non efficacia delle politiche energetiche obbligazionarie (si veda, in particolare, Kilinc-Ata, 2016). Ad esempio, Carley (2009) sostiene che, negli Stati Uniti, le quote obbligazionarie rappresentano un meccanismo efficace per incrementare la quota totale di energia elettrica da fonti rinnovabili che ricomprende anche l'energia idroelettrica. Carley (2009) sostiene anche che «*weak or inadequately structured policy design*

features, a lack of enforceable penalties for non-compliance, or an inconsistency between demand growth and RPS implementation are all potentially manageable problems that could be addressed at the state level». Pertanto, la scarsa efficacia delle quote nel promuovere le tecnologie non idroelettriche potrebbe essere spiegata, in parte, dai cosiddetti *weak enforceable penalty mechanisms*, ossia dalla mancanza di meccanismi di *enforcement*. Altro elemento da tener in considerazione è la crescita dei consumi energetici e, di conseguenza, della domanda finale di elettricità corroborata da un aumento dell'efficienza nei consumi. In particolare, Kilinc-Ata (2016) sostiene che «*RE policies are often implemented simultaneously with other energy policies, and given a high level of energy consumption, increasing energy efficiency can reduce reliance on fossil energy sources, thus diminishing demand for RE and weakening the effect of quota-based policies*». Per cui, la diffusione delle RES-E potrebbe essere causata da una necessità per far fronte all'aumento dei consumi piuttosto che all'introduzione di politiche energetiche obbligazionarie. Tuttavia, in linea con la maggioranza della letteratura esaminata, la significatività statistica e il segno positivo dei meccanismi finanziari (FIT e FIP) ci suggeriscono l'esistenza di un *driver* politico per la diffusione delle RES-E nel comparto energetico europeo. Pertanto, siamo portati a ritenere che la natura del meccanismo di supporto (finanziario o obbligazionario) generi una difformità nel processo di diffusione delle rinnovabili elettriche: in altre parole, la conformazione dei *support schemes* finanziari, che riconoscono al produttore delle tariffe incentivanti per un periodo medio/lungo, sono delle strategie ottimali per stimolare gli investimenti in risorse energetiche non idroelettriche.

La significatività statistica delle variabili addizionali di controllo (Z), in entrambe le variabili dipendenti, mostra che il fenomeno della diffusione delle RES-E non idroelettriche è fortemente influenzato da fattori di natura energetica, ambientale ed economica. I risultati del *Modello 4* sono in linea con quelli del *Modello 3*, in cui sono state analizzate delle *energy policy variables* di tipo *time-invariant*. In particolare, sia il GDP pro capite che i consumi elettrici pro capite fanno registrare dei coefficienti positivi e statisticamente significativi per tutte le specificazioni funzionali stimate. Di contro, il logaritmo naturale delle emissioni pro capite di anidride carbonica causa una riduzione in entrambi gli indicatori energetici. I coefficienti associati alle variabili espressione della produzione e della capacità di energia elettrica da fonti non rinnovabili

(*Nuclear e Thermal*), in linea ai risultati della letteratura analizzata, fanno registrare dei valori negativi e statisticamente significativi: un aumento nella quota di queste due forme di energia elettrica costituisce una barriera alla diffusione delle RES-E non idroelettriche.

Conclusioni

La diffusione delle rinnovabili elettriche (RES-E) è ormai divenuta uno dei punti focali della politica energetica comunitaria. L'Unione Europea, con l'introduzione della direttiva CE/2009/29, riguardante il sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra, ha stabilito degli obiettivi energetici vincolanti per gli stati membri. In particolare, l'orientamento strategico della politica energetica comunitaria, attraverso il pacchetto clima-energia, è finalizzato al perseguimento di tre macro obiettivi: competitività, sicurezza e sostenibilità. Accanto alla necessità di creare un mercato unico dell'energia altamente competitivo, in cui produttori e distributori siano in grado di contribuire alla riduzione dei costi per gli utenti finali ed accrescere l'efficienza (*obiettivo competitività*), si rileva il bisogno, attraverso adeguati investimenti in nuova capacità produttiva, di garantire la sicurezza degli approvvigionamenti energetici al fine di sopperire all'allevata dipendenza dalle importazioni di gas e petrolio (*obiettivo sicurezza*). Infine, la strategia energetica comunitaria si è tradotta in un impegno vincolante per gli stati membri che hanno implementato degli interventi di politica energetica con l'obiettivo di aumentare la quota di energie rinnovabili (*obiettivo sostenibilità*). In tal senso, la successiva direttiva CE/2011/77 impone che, entro il 2030, il 27% del consumo finale di energia debba essere coperto da fonti energetiche rinnovabili.

Seppur prescrittive, le direttive energetiche comunitarie offrono agli stati membri un certo grado di flessibilità nell'attuazione delle politiche di supporto alle RES-E (Direttiva CE/2009/28). In risposta all'ordinamento comunitario, ogni stato membro ha, infatti, adottato delle strategie energetiche ben definite che sono contenute in un documento denominato National Renewable Energy Action Plan (NREAP). Quest'ultimo costituisce lo strumento generale che fornisce indicazioni dettagliate sulle

azioni che ogni paese vuole porre in atto per il raggiungimento degli obiettivi comunitari.

In questo lavoro ci si è posti come obiettivo principale quello di indagare se all'eterogeneità tra paesi che caratterizza le politiche di supporto alle rinnovabili nel panorama energetico comunitario corrisponda una difformità nel processo di diffusione delle RES-E non idroelettriche. Sulla base dei National Renewable Energy Action Plans (NREAPs) vengono, infatti, individuati tre differenti gruppi di paesi. La distinzione riguarda la presenza di meccanismi incentivanti di tipo obbligazionario (*quota system*) e di tipo finanziario (*feed-in tariff* e/o *feed-in premium*). In letteratura, come la differenza nelle *policy* adottate influenzi la diffusione delle diverse tecnologie energetiche è stata indagata esclusivamente da Dong (2012), per l'energia eolica, e da Garcia-Alvarez *et al.* (2018), per l'energia fotovoltaica. Nel nostro caso abbiamo esteso l'analisi a tutte le tecnologie energetiche rinnovabili non idroelettriche (biomassa, fotovoltaico, geotermico ed eolico). In particolare, utilizzando un panel di ventotto paesi europei, valutati per gli anni 1995-2015, sono stati stimati dei modelli multivariati in cui sono analizzati due differenti indicatori energetici: la quota di energia elettrica generata da fonti energetiche rinnovabili su quella totale (*Gen-no idro*) e la quota della capacità elettrica installata da fonti energetiche rinnovabili sulla capacità elettrica totale (*Cap-non idro*). Entrambi gli indicatori ricomprendono l'energia eolica, geotermica, fotovoltaica e da biomassa. Non viene considerata l'energia idroelettrica in quanto spesso i *support schemes* non sono applicabili a tale tecnologia di produzione di elettricità.

Come abbiamo visto, l'implementazione eterogenea di schemi di supporto alle rinnovabili elettriche ha generato un importante e specifico filone di letteratura (Menz e Vachon, 2006; Carley, 2009; Adelaja e Hailu, 2010; Jenner *et al.*, 2013; Marques *et al.*, 2010; Shrimali e Kniefel, 2011; Bolkesjo *et al.*, 2014; Kilinc-Ata, 2016; Nicolini e Tavoni, 2017; Carley *et al.*, 2017; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). La maggioranza dei contributi, a causa della non disponibilità di dati, ha utilizzato degli approcci quali-quantitativi in cui un indicatore energetico, espressione della diffusione delle rinnovabili elettriche, viene modellato su delle variabili dicotomiche *time invariant* (Dong, 2012; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018) oppure *time variant* (Jenner *et al.*, 2013; Bolkesjo *et al.*, 2014). I risultati di questo filone di letteratura confermano l'ipotesi secondo cui l'analisi

delle determinanti potenziali delle rinnovabili non può prescindere da un'accurata valutazione delle *renewable energy policies*. I risultati empirici del nostro studio sono coerenti con questa ipotesi. Confrontando, infatti, gli esiti delle stime, è possibile confermare che gli schemi di incentivazione svolgono un ruolo fondamentale nel promuovere la diffusione delle RES-E: gli interventi di *energy policy* hanno una forte incidenza sullo sviluppo delle tecnologie rinnovabili non idroelettriche. Considerando gli effetti post-introduzione degli strumenti di supporto alle rinnovabili (*Modello 4*) è, infatti, possibile notare che i *major support instruments* (FIT, FIP, RPS) valutati nei modelli econometrici influenzano fortemente il processo di diffusione delle RES-E nel campione oggetto di studio. Questo risultato, particolarmente robusto per le tariffe di riacquisto (FIT, FIP), è in linea con la letteratura analizzata ed evidenzia come la diffusione di nuove forme di tecnologia energetica non possa prescindere dall'intervento delle autorità governative. Gli elevati costi di investimento iniziali, la presenza di tecnologie consolidate a basso costo, l'intermittenza della produzione e la parziale internalizzazione delle esternalità negative rappresentano degli oneri sociali che possono essere superati solo attraverso l'introduzione di politiche di incentivazione che favoriscano il cambiamento tecnologico, soprattutto per le tecnologie energetiche che danno un contributo positivo al superamento dei vincoli ambientali.

In coerenza con i risultati raggiunti in questo studio, si possono derivare alcune implicazioni di *policy* per promuovere un modello energetico sempre più sostenibile. In primo luogo, ci permettono di individuare quale sia il meccanismo di incentivazione più efficace nel favorire la produzione e la capacità elettrica rinnovabile. Difatti, nelle sezioni precedenti è stato accertato che la forte eterogeneità degli incentivi alle RES-E, caratteristica distintiva dei ventotto paesi europei analizzati, corrisponde a processi di diffusione differenziati. Tali divergenze *cross-country* sono strettamente correlate alla tipologia di *policy* adottata all'interno dei paesi europei: per entrambi gli indicatori energetici analizzati (*Gen-non idro* e *Cap-non idro*), si registra una differenza significativa nei valori attesi delle variabili di risposta. In funzione del meccanismo incentivante adottato, l'analisi econometrica ci mostra un processo di diffusione eterogeneo in quanto al variare del meccanismo incentivante variano anche gli *outcomes* analizzati. A tal fine, i risultati delle stime ci suggeriscono che gli incentivi *price-based* (FIT e FIP), rispetto a quelli *quantity-based* (RPS), costituiscono un importante volano

di sviluppo per le tecnologie energetiche rinnovabili non idroelettriche. Questi risultati non contrastano con la letteratura analizzata (Hass *et al.*, 2011; Dong, 2012, Kitzing *et al.*, 2012; Kilinc-Ata, 2016, Garcia-Alvarez *et al.*, 2018). Inoltre, si sta imponendo un processo di armonizzazione di tipo *bottom-up* nella progettazione delle politiche di supporto alla RES-E da parte dei *policy-maker*. I regimi obbligazionari presentano, invece, elevati costi amministrativi e di gestione mentre i regimi monetari sono di più facile attuazione e si adattano meglio alle tecnologie energetiche non consolidate come il fotovoltaico e il geotermico (Hass *et al.*, 2011). I paesi che utilizzano le tariffe finanziarie come principale strumento di incentivazione hanno registrato i più elevati tassi di crescita nelle nuove installazioni di impianti *green* in Europa. Le esperienze di Spagna e Germania per l'eolico e di Italia e Slovenia per il fotovoltaico ne sono un esempio (Ragwitz *et al.*, 2012).

Un risultato molto interessante della ricerca per le *policy* ambientali riguarda la forte incidenza delle *feed-in premium* (FIP) sulla diffusione delle rinnovabili non idroelettriche. Il meccanismo incentivante più efficace, ossia quello cui corrisponde una quota di elettricità non idroelettrica maggiore, è rappresentato, infatti, dalle tariffe *premium*: sia le stime *Pooled OLS* sia quelle con effetti casuali, mostrano una differenza significativa tra il gruppo di controllo (Belgio, Polonia, Romania, Svezia) ed il gruppo di trattamento (Cypro, Danimarca, Olanda, Finlandia, Estonia, Repubblica Ceca, Germania, Italia, Slovenia e Spagna). Questa differenza permane anche quando sono inserite alcune variabili addizionali di controllo di natura economica (GDP pro capite), ambientale (emissioni pro capite di biossido di carbonio) ed energetica (consumi energetici pro capite, importazioni nette, fonti tradizionali). Il vantaggio comparato delle tariffe finanziarie a premio è confermato anche dai risultati delle regressioni con effetti fissi (*Modello 4*) poiché i coefficienti stimati, per entrambe le variabili dipendenti, mostrano che l'introduzione di un meccanismo FIP registra una performance migliore rispetto alle altre *energy policy* valutate (FIT e RPS). Pertanto, se la letteratura è concorde nel sostenere che le tariffe finanziarie siano più efficaci di quelle obbligazionarie (Jenner *et al.*, 2013; Kilinc-Ata, 2016; Garcia-Alvarez *et al.*, 2018), sulla base dei risultati ottenuti siamo portati a sostenere che gli incentivi finanziari che riconoscono al produttore di energia elettrica da fonti rinnovabili una tariffa incentivante ed un premio tariffario aggiuntivo rappresentano il modo migliore

per aumentare la diffusione delle tecnologie finalizzate alla produzione di energia rinnovabile non idroelettrica.

Sia le tariffe a prezzo fisso sia quelle a premio garantiscono trasparenza, prevedibilità e sicurezza contribuendo a ridurre i rischi di investimento iniziali e i costi di finanziamento futuri. Tuttavia, è stato dimostrato che ogni sistema di incentivi *price-based* presenta vantaggi e svantaggi ben precisi (si vedano, in particolare, i contributi di Couture e Gagnon, 2010; Hass *et al.*, 2011; Ragwitz *et al.*, 2012). Dall'analisi della letteratura, le possibili ragioni per cui si hanno questi differenziali tra schemi di supporto dissimili sono da ricollegare alla conformazione di tali strumenti e, soprattutto, alla capacità di stimolare investimenti efficienti attraverso nuove installazioni di medie e grandi dimensioni (Couture e Gagnon, 2010). D'altronde, con un incentivo variabile ancorato al prezzo di mercato dell'energia elettrica, i meccanismi di tipo *premium* favoriscono degli investimenti maggiormente rischiosi ma, allo stesso tempo, più efficienti in quanto rispondono efficacemente ai segnali del mercato elettrico. Uno dei principali vantaggi potenziali delle *feed in tariff* è legato al fatto che la produzione di energia rinnovabile, nell'ambito di questo regime di sostegno, non reagisce alle fluttuazioni della domanda o ai prezzi del mercato dell'elettricità. Di contro, «*feed-in premium design options are rather innovative instruments that aim to combine the major advantages of feed-in systems with a higher demand orientation and market compatibility of RES generation*» (Ragwitz *et al.*, 2012). Il contributo fisso, comunemente chiamato premio, è visto come una compensazione per il rischio di fronteggiare dei prezzi di mercato bassi. Al contrario dei *support schemes* di tipo FIT, in cui il prezzo pagato ai *producers* è indipendente dal prezzo di mercato, nei meccanismi a premio il prezzo per unità di energia elettrica prodotta dipende dal prezzo di mercato ma, al contempo, è previsto un premio fisso che, a sua volta, può essere fisso o variabile. Nel caso in cui il premio è fisso, ossia *constant feed-in premium* (applicato, ad esempio, in Danimarca e Slovenia), ai produttori viene corrisposto il prezzo di mercato per ogni unità prodotta più un premio che è indipendente dalla variabilità a cui è assoggettato tale prezzo. Di contro, se il premio previsto è variabile, ossia *sliding feed-in premium* (adottato in Germania, Olanda e Finlandia), il premio è ancorato al prezzo di mercato: maggiore è quest'ultimo minore sarà il premio corrisposto e viceversa. In entrambi i casi, gli investitori possono realizzare elevate speculazioni e, poiché si tratta

di investimenti rischiosi, sono incentivati a realizzare impianti da rinnovabili in territori che assicurano un maggior rendimento e dove il prezzo di mercato è prevedibilmente più elevato. I modelli finanziari a prezzo fisso sono in grado di promuovere investimenti maggiormente sicuri grazie alla possibilità di prevedere efficacemente i flussi finanziari futuri coinvolgendo principalmente investitori più avversi al rischio. I sistemi incentivanti a premio, invece, possono garantire delle elevate speculazioni quando il prezzo di mercato dell'elettricità è elevato (Schallenberg-Rodriguez e Hass, 2012). Nel caso dei meccanismi obbligazionari, gli incentivi a produrre elettricità da fonti rinnovabili sono relativamente più bassi in quanto i soggetti coinvolti in questa forma di incentivazione sono le imprese e le attività che producono energia da fonti convenzionali (petrolio, carbone, metano). Pertanto, siamo portati a ritenere che la differenza positiva nella capacità e/o produzione di elettricità da fonti rinnovabili tra gruppi di paesi con meccanismi di supporto finanziari e obbligazionari, sia stimolata dalla presenza di tariffe a premio (fisse o variabili) che inducono gli investitori a realizzare investimenti più produttivi. Questo risultato è anche confermato da un ulteriore controllo sull'efficacia temporale dei tre principali meccanismi di supporto alle RES-E adottati in Europa che mostra come le tariffe a premio siano quelle associate ai più elevati tassi di diffusione.

Ulteriori considerazioni possono essere effettuate in riferimento alle variabili di controllo analizzate nei modelli. Per quanto attiene al GDP pro capite e ai consumi, in linea con i risultati di Nicolini e Tavoni (2017) e Carley *et al.* (2017), si registra una relazione positiva e statisticamente significativa con i due indicatori energetici analizzati: l'aumento del reddito e dei consumi costituiscono due fattori primari per stimolare la produzione e la capacità delle RES-E non idroelettriche. Questo implica, dunque, che l'aumento del reddito e della domanda di elettricità favorisce la diffusione delle rinnovabili incentivate. Di contro, il segno negativo associato alle emissioni pro capite di biossido di carbonio, ci suggerisce che un aumento dell'inquinamento non rappresenta una motivazione sufficientemente solida per favorire gli investimenti in tecnologie RES-E non idroelettriche. Questi risultati potrebbero rafforzare la conclusione secondo cui le tecnologie sostenibili rispondono positivamente in corrispondenza di elevati livelli di inquinamento. In accordo con la maggioranza della letteratura, la produzione e la capacità elettrica da fonti energetiche tradizionali (fossile

e nucleare) costituiscono una barriera allo sviluppo delle RES-E non idroelettriche. Tale effetto può essere riconducibile ad attività di *lobbying* (Marques *et al.*, 2010), prezzi di produzione più bassi (Jenner *et al.*, 2013) oppure alle condizioni del mercato elettrico (Carley *et al.*, 2017) che non facilitano il processo di transizione energetica.

Le nostre considerazioni si basano sia sui risultati ottenuti nelle stime econometriche sia sulla letteratura esistente e mettono in luce alcuni importanti risultati sull'efficacia delle politiche di supporto alle RES-E non idroelettriche. In conclusione, l'analisi della realtà empirica del panorama elettrico europeo ci suggerisce che sta prendendo forma un processo di convergenza tacita nei regimi di sostegno alle RES-E che vede dominare i sistemi incentivanti finanziari per la promozione di quelle tecnologie energetiche caratterizzate da limiti intrinseci come l'intermittenza nella produzione e gli elevati costi di investimento iniziali. Questo processo di tipo *bottom-up* è associato a un utilizzo decentrato dell'energia che favorisce il controllo dal basso da parte delle *utility*, elimina i costi sociali legati all'inquinamento atmosferico, coinvolge le risorse locali e promuove investimenti nell'economia reale. Su scala sovranazionale, la crescita delle rinnovabili non programmabili, prime tra tutte l'eolico e il fotovoltaico, pone l'esigenza, per i *policy-makers*, di accelerare il processo di convergenza e di rafforzare le connessioni sovranazionali al fine di facilitare la programmazione e la gestione dei flussi elettrici.

Bibliografia

- Adelaja, S., Hailu, Y. G., (2010), «Effects of Renewable Portfolio Standards and Other State Policies on Wind Industry Development in the US», in *Journal of Natural Resources Policy Research*, Vol. 2, No.3, pp. 245-262.
- Adewuyi A. O., Awodumi O. A., (2017), «Renewable and non-renewable energy-growth-emission linkages: Review of emerging trends which policy implications», in *Renewable and Sustainable energy Reviews*, Vol. 69, pp. 275–291.
- Agras J., Chapman D., (1997), «Is there an environmental Kuznets curve for energy? An econometric analysis», *working paper* No. 127834, Cornell University, Department of Applied Economics and Management, pp. 1-43.
- Agras J., Chapman D., (1999), «A dynamic approach to the environmental Kuznets curve hypothesis», in *Ecological Economics*, Vol. 28, No. 2, pp. 267-277.
- Aguirre M., Ibikunle G., (2014), «Determinants of renewable energy growth: A global sample analysis», in *Energy Policy*, Vol. 69, pp. 374-384.
- Ahmed A., Uddin G. S., Sohag K., (2016), «Biomass energy, technological progress and the environmental Kuznets curve: evidence from selected European countries», in *Biomass and Bioenergy*, Vol. 90, pp. 202-208.
- Akbostanci E., Turut-Aslk S., Tunc G. I., (2009), «The relationship between income and environment in Turkey: Is there an environmental Kuznets curve?», in *Energy Policy*, Vol. 37, No. 3, pp. 861-867.
- Akella A. K., Saini R. P., Sharma M. P., (2009), «Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems», in *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 390-396.
- Al Mulali U., Saboori B., Ozturk I., (2015), «Investigating the environmental Kuznets Curve Hypothesis in Vietnam», in *Energy Policy*, Vol. 76, pp. 123-131.
- Alagappan L., Orans R., Woo C. K., (2011), «What drives renewable energy development?», in *Energy Policy*, Vol. 39, No. 39, pp. 5099-5104.
- Alam M. J., Begum A. I., Buysse J. Van Huylenbroeck, (2012), «Energy consumption, carbon emissions and economic growth nexus in Bangladesh: Cointegration and dynamic causality analysis», in *Energy Policy*, Vol. 45, pp. 217-225.

- Al-Mulali U., Solarin S. A., Ozturk I., (2016), «Investigating the presence of the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis in Kenya: an autoregressive distributed lag (ARDL) approach», in *Natural Hazards*, Vol. 80, No. 3, pp. 1729–1747.
- Al-Mulali U., Weng-Wai C., Sheau-Ting L., Mohammed A. H., (2015), «Investigating the environmental Kuznets curve (EKC) hypothesis by utilizing the ecological footprint as an indicator of environmental degradation», in *Ecological Indicators*, Vol. 48, pp. 315- 323.
- Alshehry A. S., Belloumi M., (2015), «Energy consumption, carbon dioxide emissions and economic growth: the case of Saudi Arabia», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 237-247.
- Alvarado R., Ponce P., Criollo A., Cordova K., Khan M. K., (2018), «Environmental degradation and real per capita output: New evidence at the global level grouping countries by income levels», in *Journal of Clean Production*, Vol. 189, pp. 13-20.
- Alvarez-Herranz A., Balsalobre-Lorente D., (2015), «Energy Regulation in the EKC model with a Dampening effect», in *Environmental Analytical Chemistry*, Vol. 2, No. 3, pp. 4-10.
- Alvarez-Herranz A., Balsalobre-Lorente D., Shahbaz M., Cantos J. M., (2017), «Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels», in *Energy policy*, Vol. 105, pp. 386-397.
- Andreoni V., Duriavig S., (2011), «The responsibility of CO₂ embodied in Italy-China trade: a consumption-based approach», in *International Journal of Sustainable Economy*, Vol. 3, No. 1, pp. 44-62.
- Ang J. B., (2008), «Economic development pollutant emissions and energy consumption in Malaysia», in *Journal of Policy Modeling*, Vol. 30, No. 2, pp. 271-278.
- Apergis N., Payne E. J., (2009), «CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America», in *Energy Policy*, Vol. 37, No. 8, pp. 3282-3289.
- Apergis N., Payne E. J., Menyah K., Wolde-Rufael Y., (2010), «On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth», in *Ecological Economics*, Vol. 69, No. 11, pp. 2255–2260.

- Apergis N., Payne J. E., (2010), «Renewable energy consumption and growth in Eurasia», in *Energy Economics*, Vol. 32, pp. 1392-1397.
- Apergis N., Payne J. E., (2012), «Renewable and non-renewable energy consumption growth nexus: evidence from a panel error correction model», in *Energy Economics*, Vol. 34, pp. 733-738.
- Arbolino R., (2015), «Energie rinnovabili in Italia: un'analisi esplorativa sull'utilizzo degli incentivi», in *Rivista economica del Mezzogiorno*, anno XXIX, No. 3-4, pp. 505-524.
- Armeanu D. S., Vintila G., Gherghina S. G., (2017), «Does Renewable Energy Sustainable Economic Growth? Multivariate Panel Data Evidence for EU-28 Countries», in *Energies*, Vol. 10, No. 3, pp. 1-21.
- Arrow K., Bolin B., Costanza R., Folke C., Holling C.S., Janson B., Levin S., Maler K., Perrings C., Pimental D., (1995) «Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment», in *Ecological Economics*, Vol. 15, No. 2, pp. 91-95.
- Atici C., (2009) «Carbon emissions in Central and Eastern Europe: environmental Kuznets curve and implication for sustainable development», in *Sustainable Development*, Vol. 17, No. 3, pp. 155-160.
- Baek J., (2015), «Environmental Kuznets Curve for CO₂ emissions: the case of Arctic countries», in *Energy Economics*, Vol. 50, pp. 13-17.
- Baek J., Pride D., (2014), «On the income-nuclear energy-CO₂ emissions nexus revisited», in *Energy Economics*, Vol. 43, pp. 6-10.
- Baiardi D., (2014), «Technological Progress and the Environmental Kuznets Curve in the Twenty Regions of Italy», in *Journal of Economic Analysis & Policy*, Vol. 14, No. 4, pp. 1501-1542.
- Balsalobre-Lorente D., Álvarez-Herranz A., (2016), «Economic growth and energy regulation in the environmental Kuznets curve», in *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23, No. 16, pp. 16478–16494.
- Balsalobre-Lorente D., Alvarez-Herranz A., (2017), «An approach to the effect of Energy Innovation on Environmental Kuznets Curve: An introduction to Inflection Point», in *Bulletin of Energy Economics*, Vol. 4, No. 3, pp. 225-233.

- Balsalobre-Lorente D., Shahbaz M., (2017), «Energy Consumption and Trade Openness in the Correction of GHG Levels in Spain», in *Bulletin of Energy Economics*, Vol. 4. No. 4, pp. 311-322.
- Balsalobre-Lorente D., Shahbaz M., Roubaud D., Farhani S., (2018), «How economic growth, renewable electricity and natural resources contribute to CO₂ emissions?», in *Energy Policy*, Vol. 113, pp. 356-367.
- Baltagi B. H., (2008), *Econometric Analysis of Panel Data*, Terza edizione, Wiley.
- Baum C. F., (2006), *An introduction to modern econometrics using stata*, Stata Press, Texas.
- Baycan I. O., (2013), «Air pollution, economic growth, and the European Union enlargement», in *International Journal of Economics and Finance*, Vol. 5, No. 12, pp. 121-126.
- Beck F., Martinot E., (2004), «Renewable Energy Policies and Barriers», in *Cleveland CJ, Technical report Encyclopedia of Energy*, pp. 365–383.
- Becker B., Fischer D., (2013), «Promoting Renewable Electricity Generation in Emerging Economies», in *Energy Policy*, Vol. 56, pp. 446-455.
- Bengochea A., Faet O., (2012), «Renewable energies and CO₂ emissions in the European Union», in *Energy Sources*, Vol. 7, pp. 121-130.
- Bento C. J., Moutinho V., (2016), «CO₂ emissions, non-renewable and renewable electricity production, economic growth, and international trade in Italy», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 55, pp. 142-155.
- Bhattacharya M., Paramati S. R., Ozturk I., Bhattachary S., (2016), «The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries», in *Applied Energy*, Vol. 166, pp. 733-741.
- Bildirici M., (2012), «The relationship between economic growth and energy consumption», in *Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-10.
- Bilgili F., Kocak E., Bulut U., (2016), «The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: A revisited Environmental Kuznets Curve approach», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 838-845.
- Bird L., Bolinger M., Gagliano T., Wiser R., Brown M., Parson B., (2005), «Policies and market factors driving wind power development in the United States», in *Energy Policy*, Vol. 33, No. 11, pp. 1397-1407.

- Bo S., (2011), «A Literature Survey on Environmental Kuznets Curve», in *Energy Procedia*, Vol. 5, pp. 1322-1325.
- Bolkesjo T. F., Eltvig P. T., Nygaard E., (2014), «An econometric analysis of support scheme effects on renewable energy investments in Europe», in *Energy Procedia*, Vol. 58, pp. 2-8.
- Boluk G., Mert M., (2014), «Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries», in *Energy*, Vol. 74, No. 1, pp. 439-446.
- Boluk G., Mert M., (2015), «The renewable energy, growth and environmental Kuznets curve in Turkey: an ARDL approach», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52, pp. 587–595.
- Borghesi S., (1999), « The Environmental Kuznets Curve: a Survey of the Literature», FEEM Working Paper, pp. 1-29.
- Boschetti B. L., «Il governo dell'incertezza nella politica energetica comunitaria: l'energia tra innovazione e sostenibilità ambientale», in *Amministrare*, anno XXXIX, No. 2, pp. 257-280.
- Bradford D. F., Fender R. A., Shore S. H., Wagner M., (2015), «The environmental Kuznets curve: exploring a fresh specification», in *Contribution to Economic Analysis and Policy*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-40.
- Breusch, T. S., Pagan A. R., (1980), «The Lagrange multiplier test and its applications to model specification in econometrics», in *Review of Economic Studies*, Vol. 47, No. 1, pp. 239-253.
- Brown S. P. A., McDonough I. K., (2016), «Using the Environmental Kuznets Curve to evaluate energy policy: Some practical considerations», in *Energy Policy*, Vol. 98, pp. 453-458.
- Buckman G., (2011), «The effectiveness of renewable portfolio standard banding and carve-outs in supporting high-cost types of renewable electricity», in *Energy Policy*, Vol. 39, No. 7, pp. 4105-4114.
- Caldirola D., «Energia, Clima e generazioni future», in *Amministrare*, anno XXXIX, No. 2, pp. 281-296.

- Campoccia A., Dusonchet L., Telaretti E., Zizzo G., (2014), «An analysis of feed-in tariffs for solar PV in six representative countries of the European Union», in *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 530-542.
- Cappuccio N., Orsi R., (2005), *Econometria*, Il Mulino, Bologna.
- Carley S., (2009), «State renewable Energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness», in *Energy Policy*, Vol. 37, No. 8, pp. 3071-3081.
- Carley S., Baldwin E., MacLean M. L., Brass N. J., (2017), «Global Expansion of Renewable Energy Generation: An Analysis of Policy Instruments», in *Environmental and Resource Economics*, Vol. 68, No. 2, pp 397-440.
- Carson R. T., Jeon Y., McCubbin R. D., (1997), «The relationship between air pollution emissions and income: US data», in *Environment and Development Economics*, Vol. 2, No. 4, pp. 433-450.
- Cassetta E., Monarca U., (2014), «Fonti rinnovabili e politiche dell'energia nei contributi di Energy Policy», in *L'Industria*, anno XXXV, No. 2, pp. 349-354.
- Cassetta E., Surdi G., (2011), «Le politiche per le rinnovabili in Italia tra mercato, ricerca e industria», in *L'Industria*, anno XXXII, No. 2, pp. 283-307.
- Castiglione C., Infante D., Smirnova J., (2012), «Rule of law and the environmental Kuznets curve: evidence for carbon emissions», in *International Journal of Sustainable Economy*, Vol. 4, No. 3, pp. 254-269.
- Castiglione C., Infante D., Smirnova J., (2014), «Is There Any Evidence on the Existence of an Environmental Taxation Kuznets Curve? The Case of European Countries under Their Rule of Law Enforcement», in *Sustainability*, Vol. 6, pp. 7242-7262.
- Castiglione C., Infante D., Smirnova J., (2015), «Environment and economic growth: is the rule of law the go-between? The case of high-income countries», in *Energy, Sustainability and Society*, Vol. 5, No. 26, pp. 1-7.
- Caviglia-Harris J. L., Chambers D., Kahn J. R., (2009), «Taking the "U" out of Kuznets A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation», in *Ecological Economics*, Vol. 68, No. 4, pp. 1149-1159.
- Chien T., Hu J. L., (2008), «Renewable energy: an efficient mechanism to improve GDP», in *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 3045-3052.

- Cole M. A., (2004), «Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: examining the linkages», in *Ecological Economics*, Vol. 48, No. 1, pp. 71-81.
- Cole M. A., Rayner A. J., Bates J. M., (1997), «The environmental Kuznets curve: an empirical analysis», in *Environment and development economics*, Vol. 2, No. 4, pp. 401-416.
- Cook J., Nuccitelli D., Green S. A., Richardson M., Winkler B., Painting R., Way R., Jacobs P., Skuce A., (2013), «Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature», in *Environmental Research letters*, Vol. 8, No. 2, pp. 1-8.
- Couture D. T., Cory K., Kreycik C., (2010), «A Policymaker's Guide to Feed-in Tariff Policy Design», in *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, pp. 1-144.
- Couture T., Gagnon Y., (2010), «An analysis of feed: in tariff remuneration Models: implications for renewable energy investment», in *Energy Policy*, Vol. 38, No. 2, pp. 955-965.
- Culas R. J., (2007), «Deforestation and the Environmental Kuznets Curve: an institutional perspective», in *Ecological Economics*, Vol. 61. No. 2, pp. 84-122.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H., Wheeler, D., (2002), «Confronting the Environmental Kuznets Curve», in *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 16, No. 1, pp. 147-168.
- Del Rio P. & Burguillos M., (2009), «An empirical analysis of the impact of renewable Energy deployment on local sustainability», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 6-7, pp. 1314-1325.
- Dijkgraaf E., Vollebergh H. R., (2001), «A note on testing for environmental Kuznets curves with panel data», *working paper*, Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), pp. 1-27.
- Dinda S., (2004), «Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey», in *Ecological Economics*, Vol. 49, No. 4, pp. 431– 455.
- Dogan E., Turkekul B., (2015), «CO₂ emissions, real output, energy consumption, trade, urbanization and financial development: testing the EKC hypothesis for the

USA», in *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 1203–1213.

- Dogan E., Inglesi-Lotz R., (2017), «Analyzing the effects of real income and biomass energy consumption on carbon dioxide (CO₂) emissions: Empirical evidence from the panel of biomass-consuming countries», in *Energy*, Vol. 138, pp. 721-727.
- Dogan E., Ozturk I., (2017), «The influence of renewable and non renewable energy consumption and real income on CO₂ emissions in the USA: evidence from structural break tests», in *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, No. 11, pp. 10846-10854.
- Dogan E., Seker F., (2016), «Determinants of CO₂ emissions in the European Union: The role of renewable and non-renewable energy», in *Renewable Energy*, Vol. 94, pp. 429-439.
- Dogan E., Seker F., (2016), «The influence of real output, renewable and non-renewable energy, trade and financial development on carbon emissions in the top renewable energy countries», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 60, pp. 1074-1085.
- Dogan E., Seker F., Bulbul S., (2015), «Investigating the impacts of energy consumption, real GDP, tourism and trade on CO₂ emissions by accounting for cross-sectional dependence: A panel study of OECD countries», in *Current Issues in Tourism*, Vol. 20, No. 16, pp. 1701-1719.
- Dogan E., Turkekul B., (2015), «CO₂ emissions, real output, energy consumption, trade, urbanization and financial development: testing the EKC hypothesis for the USA», in *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 1203-1213.
- Dong C. G., (2012), «Feed-in Tariff vs. renewable portfolio standard: An empirical test of their relative effectiveness in promoting wind capacity development», in *Energy Policy*, Vol. 42, pp. 476-485.
- Du L., Wei C., Cai S., (2012), «Economic development and carbon dioxide emissions in China: provincial panel data analysis», in *China Economics Review*, Vol. 32, No. 2, pp. 371-384.

- Dusonchet L., Telaretti E., (2010), «Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in western European Union countries», in *Energy Policy*, Vol. 38, No. 7, pp. 3297-3308.
- Dutt K., (2009), «Governance, institutions and the environment-income relationship: a cross-country study», in *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 11, No. 4, pp. 705-723.
- Eghbal M., (2008), «The Next 11 Emerging Economies», *Euromonitor International*.
- European Environment Agency (EEA), (2016), *Manual for the EEA greenhouse gas data viewer*, pp. 1-11.
- European Environment Agency (EEA), (2016), *Manual for the EEA greenhouse gas data viewer*, pp. 1-11.
- European Environment Agency (EEA), (2016), *Air pollutant emission inventory guidebook*, pp. 1-28.
- Eurostat, (2017), *Climate change – driving forces*, pp. 1-30.
- Eurostat, (2017), *Energy production and imports*, pp. 1-11.
- Eurostat, (2017), *National accounts and GDP*, pp. 1-23.
- Eurostat, (2017), *Renewable energy statistics*, pp. 1-10.
- Eurostat, (2018), *Electricity price statistics*, pp. 1-13.
- Eurostat, (2018), *Air pollution statistics- emission inventories*, pp. 1-30.
- Eurostat, (2018), *Greenhouse gas emission statistics- emission inventories*, pp. 1-6.
- Evans A., Strezov V., Evans T. J., (2009), «Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 1082-1088.
- Fargione J. E., Plevin R. J., Hill J. D., (2010), «The ecological impact of biofuels», in *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, Vol. 41, pp. 351-377.
- Farhani S., Shahbaz M., (2014), «What role of renewable and non-renewable electricity consumption and output is needed to initially mitigate CO₂ emissions in MENA region?», in *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 40, pp. 80–90.
- Fernández P., Villicana Ortiz E., Xiberta Bernat J., (2013), «The Deployment of Electricity Generation from Renewable Energies in Germany and Spain: A

Comparative Analysis Based on a Simple Model», in *Energy Policy*, Vol. 57, pp. 552-562.

- Friedl B., Getzner M., (2003), «Determinants of CO₂ emissions in a small open economy», in *Ecological Economics*, Vol. 45, No. 1, pp 133-148.
- Galich A., Marz L., (2012), «Alternative energy technologies as a cultural endeavor: a case study of hydrogen and fuel cell development in Germany», in *Energy, Sustainability and Society*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-10.
- Garcia-Alvarez M. T., Cabeza-Garcia L., Soares I., (2018), «Assessment of Energy policies to promote photovoltaic generation in the European Union», in *Energy*, Vol. 151, pp. 864-874.
- Green W., «Fixed Effects Vector Decomposition: A Magical Solution to the Problem of Time-Invariant Variables in Fixed Effects Models?», in *Political Analysis*, Vol. 19, pp. 135-146.
- Grossman G. M., Krueger A. B., (1991) «Environmental impacts of a North American Free Trade Agreement», *working paper* No. 3914, *National Bureau of Economic Research*, Cambridge MA.
- Grossman, G. M.; Krueger, A. B., (1995) «Economic growth and the environment», in *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 2, pp. 353-377.
- Halicioglu F., (2009), «An econometric study of CO₂ emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey», in *Energy Policy*, Vol. 37, No. 3, pp. 1156-1164.
- Halkos G. E., Tzeremes N. G., (2014), «The effect of electricity consumption from renewable sources on countries economic growth levels: evidence from advanced, emerginig and developing economies», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, pp. 166-173.
- Hass R., Panzer C., Resch G., Raqwitz M., Reece G., Held A., (2011), «A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 2, pp. 1003-1034.
- Hausman J. A., (1978), «Specification tests in econometrics» in *Econometrica*, Vol. 46, No. 6, pp. 1251-1271.

- He, (2007), «Is the Environmental Kuznets Curve hypothesis valid for developing countries? A survey», *working paper*, Département Economique and GREDI, Faculté d'Administration, Université de Sherbrooke, pp. 1-44.
- Hoechle D., (2007), «Robust standard errors for panel regressions with cross-sectional dependence», in *Stata Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 281-312.
- Hossain M. S., (2011), «Panel estimation for CO₂ emissions, energy consumption, economic growth, trade openness and urbanization of newly industrialized countries», in *Energy Policy*, Vol. 39, No. 11, pp. 6991-6999.
- Inlesi-Lotz R., (2016), «The impact of renewable energy consumption to economic growth: A panel data application», in *Energy Economics*, Vol. 53, pp. 58-63.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2014), Fifth Assessment Report.
- Ispra, (2018), *Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra e altri gas nel settore elettrico*.
- Iwata H., Okada K., Samreth S., (2010), «Empirical study on the environmental Kuznets curve for CO₂ in France: the role of nuclear energy», in *Energy Policy*, Vol. 38, No. 8, pp. 4057-4063.
- Jebli M. B., Youssef S. B., (2015), «Output, renewable and non-renewable energy consumption and international trade: evidence from a panel of 69 countries», in *Renewable Energy*, Vol. 83, pp. 799-808.
- Jebli M. B., Youssef S. B., Ozturk I., (2013), «The Environmental Kuznets Curve: The Role of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption and Trade Openness», *working paper*, Munich Personal RePEc (MPR), pp. 1-17.
- Jenner S., (2012), «Did Feed: in Tariffs work? An Econometric Assessment», *working paper*, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2121261.
- Jenner S., Groba F., Indvik J., (2013), «Assessing the strength and effectiveness of renewable electricity feed: in tariffs in European Union countries», in *Energy policy*, Vol. 52, pp. 385-401.
- Kao C., Chiang M. H., (2000), «On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data», in *Advances in Econometrics*, Vol. 15, pp. 179-222.
- Kao C., Chiang M. H., (2002), «Nonstationary Panel Time Series Using NPT 1.3 - A User Guide», Center for Policy Research, Syracuse University.

- Kasman A., Duman Y. S., (2015) «CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: a panel data analysis», in *Economic Modeling*, Vol. 44, pp. 97-103.
- Kijima M., Nishide K., Ohyam A., (2010), «Economic models for the environmental Kuznets curve: A survey », in *Journal of Economic Dynamics & Control*, Vol. 34, No. 7, pp. 1187–1201.
- Kilinic-Ata N., (2016), «The evaluation of renewable energy policies across EU countries and US states: An econometric approach», in *Energy for Sustainable Development*, Vol. 31, pp. 83-90.
- Kitzing L., Mitchell C., Morthorst E. P., (2012), «Renewable energy policies in Europe: converging or diverging?», in *Energy Policy*, Vol. 51, pp. 192-201.
- Klessman C., Held A., Rathmann M., Ragwitz M., (2011), «Status and perspectives of renewable energy policy and deployment in the European Union-What is needed to reach the 2020 targets?», in *Energy Policy*, Vol. 39, No. 12, pp. 7637-7657.
- Koirala B. S., Li H., Berrens R. P., (2011), «Further Investigation of Environmental Kuznets Curve Studies Using Meta-Analysis», in *International journal of Ecological Economics and Statistics*, Vol. 22, No. 11, pp. 15-32.
- Konstantinos J. C., Ioannidis A., (2007), « Energy supply security in the EU: Benchmarking diversity and dependence of primary energy», in *Applied Energy*, Vol. 1, pp. 465-476.
- Kraft J., Kraft A., (1978), «On the relationship between energy and GNP», in *Journal of Energy and Development*, Vol. 3, No. 2, pp. 401-403.
- Kuznets S., (1955), «Economic Growth and Income Inequality», in *American Economic Review*, Vol. 45, No. 1, pp. 1-28.
- Lamnatou C., Lecoivre B., Chemisana D., Cristofari C., Canaletti J. L., (2018), «Concentrating photovoltaic/thermal system with thermal and electricity storage: CO₂ emissions and multiple environmental indicators», in *Journal of Cleaner Production*, Vol. 192, pp. 376-389.
- Lapinskienė J., Radavičius M., Peleckis K., (2015), «Economic development and greenhouse gas emissions in the European Union countries», in *Journal of Business Economics and Management*, Vol. 19, No. 6, pp. 237-248.

- Leitaó A., (2010), «Corruption and the Environmental Kuznets curve: empirical evidence for sulfur», in *Ecological Economics*, Vol. 69, No. 11, pp. 2191-2201.
- Li T., Wang Y., Zhao D., (2016), «Environmental Kuznets Curve in China: new evidence from dynamic panel analysis» in *Energy Policy*, Vol. 91, pp. 138–147.
- Lin, C. Y. C., Liscow, Z. D., (2013), «Endogeneity in the environmental Kuznets curve: An instrumental variables approach», in *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 95, No. 2, pp. 268-274.
- Liobikiene G., Butkus M., (2017), «Environmental Kuznets Curve of greenhouse gas emissions including technological progress and substitution effects», in *Energy*, Vol. 135, pp. 237-248.
- Lopez R., Mitra S., (2000), «Corruption, pollution and the environmental Kuznets curve», in *Journal of Environment and Development Economics*, Vol. 40, No. 2, pp. 137-150.
- Lopez-Menendez A. J., Perez R., Moreno B., (2014), «Environmental costs and renewable energy: Re-visiting the Environmental Kuznets Curve», in *Journal of Environmental Management*, Vol. 145, pp. 368-373.
- Lorenzoni A., (2009), «La produzione elettrica con fonti rinnovabili per la sostenibilità e la competitività dell'economia italiana», in *L'Industria*, anno XXIX, numero speciale, pp. 125-146.
- Lorenzoni A., (2011), «La sostenibilità come indirizzo agli investimenti nel settore dell'energia», in *L'Industria*, anno XXXII, No. 2, pp. 213-222.
- Luzzati T., Orsini M., (2009), «Investigating the energy-environmental Kuznets curve», in *Energy*, Vol. 34, No. 3, pp. 291-300.
- Magnani N., (2012), «The Green Energy Transition Sustainable Development or Ecological Modernization», in *Sociologia*, Vol. 2, pp. 1-25.
- Mandal S. K., Chakravarty D., (2018), «Role of Energy in estimating turning point of Environmental Kuznets Curve: an econometric analysis of the existing studies», in *Journal of Social and Economic Development*, Vol. 19, No. 2, pp. 387-401.
- Marcellino M., (2006), *Econometria applicata*, Egea, Milano.
- Marques A., Fuinhas J., Manso J., (2011), «A quantile approach to identify factors promoting renewable energy in European countries» in *Environmental and Resource Economics*, Vol. 49, No. 3, pp. 351-366.

- Marques C. A., Fuinhas A. J., Pires Manso J. R., (2010), «Motivations driving renewable energy in European countries: A panel data approach», in *Energy Policy*, Vol.38, No. 11, pp. 6877-6885.
- Marrero G. A., (2010), «Greenhouse gases emissions, growth and the energy mix in Europe», in *Energy Economics*, Vol. 32, No. 6, pp. 1356–1363.
- Mazzoni L., (2011), «Le energie rinnovabili e gli obiettivi di grid parity nel contesto energetico italiano ed europeo», in *L'Industria*, anno XXXII, No. 2, pp. 329-356.
- McConnell K., (1997), «Income and the demand for environmental quality», in *Environment and Development Economics*, Vol. 2, No. 4, pp. 383-399.
- Menz C. F., Vachon S., (2006), «The effectiveness of different policy regimes for promoting wind power: Experiences from states», in *Energy Policy*, Vol. 34, No. 14, pp. 1786-1796.
- Mert M, Boluk G., Buyukylmaz A., (2015), «Fossil & renewable energy consumption, GHGs and economic growth: evidence from a ridge regression of Kyoto annex countries», in *Akdeniz Universitesi Iktisadi ve Idari Bilimler Fakultesi Dergisi*, Vol. 31, pp. 45-69.
- Mitchell C., Bauknecht D., Connor P. M., (2006), «Effectiveness through risk reduction: a comparison of the renewable obligation in England and Wales and the feed-in system in Germany», in *Energy Policy*, Vol. 34, No. 3, pp. 297–305.
- Monarca U., (2008), «Climate action e politica energetica comunitaria», in *L'Industria*, anno XXIX, numero speciale, pp. 147-222.
- Monarca U., (2012), «Costi, benefici e prospettive di sviluppo delle fonti rinnovabili: il caso italiano», in *L'Industria*, anno XXXIII, No. 3, pp. 475-496.
- Moomaw W. R., Unruh G. C., (1997), «Are environmental Kuznets curves misleading us? The case of CO₂ emissions», in *Environment and Development Economics*, Vol. 4, pp. 451-463.
- Mora M., (2012), *L'ambiente nell'economia moderna*, Padova, libreriauniversitaria.it edizioni.
- Musu I., (2007), *Crescita economica*, Bologna, Il Mulino.

- Nasir M., Rehman U. F., (2010), «Environmental Kuznets Curve for carbon emissions in Pakistan: An empirical investigation», in *Energy Policy*, Vol. 39, No. 3, pp. 1857-1864.
- Nicolini M., Tavoni M., (2017), «Are renewable energy subsidies effective? Evidence from Europe», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, pp. 412-423.
- Ocal O., Aslan A., (2013), «Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 494-499.
- Omri A. (2013), «CO₂ emissions, Energy consumption and economic growth nexus in MENA countries: Evidence from simultaneous equations models», in *Energy Economics*, Vol. 40, pp. 657-664.
- Omri A., (2014), «An international literature survey on energy-economic growth nexus: Evidence from country-specific studies», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp. 951-959.
- Omri A., Nguyen D. K., (2014), «On the determinants of renewable energy consumption: International evidence», in *Energy*, Vol. 72, pp. 554-560.
- Orioli A., Di Gangi A., (2017), «Six-years-long effects of the Italian policies for photovoltaic on the grid parity of grid-connected photovoltaic system installed in urban contexts», in *Energy*, Vol. 130, pp. 55-75.
- Ozokcu S., Ozdemir O., (2017), «Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, pp. 639-647.
- Ozturk I., (2010), «A literature survey on energy–growth nexus», in *Energy Policy*, Vol. 38, No. 1, pp. 340-349.
- Pablo-Romero M. P., Sanchez-Braza A., Salvador-Ponce J., Sanchez-Labrador, (2017), «An overview of feed-in tariffs, premiums and tenders to promote electricity from biogas in the EU-28», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, pp. 1366-1379.
- Pacesila M., Burcea G., Colesca S. E., (2016), «Analysis of renewable energies in European Union», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 156-170.

- Panayotou T., (1993), «Empirical Tests and Policy Analysis of The Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development», *working paper*, World Development Programmed Research: Technology and Employment Programmed, pp. 1-45.
- Panayotou T., (1997), «Demystifying the Environmental Kuznets Curve: Turning a Black Box into a Policy tool», in *Environment and Development Economics*, Vol. 2, No. 4, pp. 465–484.
- Panella G., *Economia e politiche dell'ambiente*, Roma, Carocci, 2005.
- Pao H. T., Yu H. C., Yang Y. H., (2011), «Modeling the CO₂ emissions, energy use, and economic growth in Russia», in *Energy*, Vol. 36, No. 8, pp. 5094-5100.
- Papiez M., Smiech S., Frodyma K., (2018), «Determinants of renewable energy development in the EU countries. A 20-year perspective», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 918-934.
- Paudel K. P., Zapata H., Susanto D., (2005), «An empirical test of environmental Kuznets curve for water pollution», in *Environmental and Resource Economics*, Vol. 31, No. 3, pp. 325-348.
- Payne E. J., (2010), «A survey of the electricity consumption-growth literature», in *Applied Energy*, Vol. 87, No. 3, pp. 723-731.
- Pearce D. W., Turner R. K., (1991), *Economia delle risorse naturali e dell'ambiente*, Bologna, Il Mulino.
- Pearce D. W., Turner R. K., I. Bateman, (2003), *Economia ambientale*, Bologna, Il Mulino.
- Pesaran M. H., (2004), «General Diagnostic Tests for Cross Section Dependence in Panels», University of Cambridge, pp. 1-41.
- Raadal H. L., Vold I. B., Myhr A., Nygaard T. A., (2014), «GHG emissions and energy performance of offshore wind power», in *Renewable Energy*, Vol. 66, pp. 314-324.
- Richmond A. K., Kaufmann R. K., (2006), «Is there a turning point in the relationship between income and energy use and/or carbon emissions?», in *Ecological Economics*, Vol. 56, pp. 176-189.
- Roca J., (2003), «Do individual preferences explain Environmental Kuznets Curve?», in *Ecological Economics*, Vol. 45, No.1, pp. 3– 10.

- Roca J., Padilla E., Farrè M., Galletto V., (2001), «Economic growth and atmospheric pollution in Spain: discussing the environmental Kuznets curve hypothesis», in *Ecological Economics*, Vol. 39, No. 1, pp. 85-99.
- Ryan P. T., (2017), «The Paradoxical Relationship between Renewable Energy and Economic Growth: A Cross-National Panel Study, 1990-2013», in *Journal of world-systems research*, Vol. 23, No. 2, pp. 541-564.
- Saboori B., Sulaiman J., (2013), « CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in Association of South east Asian Nations (ASEAN) countries: a cointegration approach», in *Energy*, Vol. 55, pp. 813-822.
- Sadorsky P., (2009), «Renewable energy consumption, CO₂ emissions and oil price in the G7 countries», in *Energy Economics*, Vol. 31, No. 3, pp. 456-462.
- Sahli I., Ben Rejeb J., (2015), «The Environmental Kuznets Curve and Corruption in the Mena Region», in *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 195, pp. 1648-1657.
- Santana de Souza E., Freire F. D. S., Pires J., (2018), «Determinants of CO₂ emissions in the MERCOSURE: the role of economic growth, and renewable and non-renewable energy», in *Environment Science and Pollution Research*, Vol. 25, No. 21, pp. 20769-20781.
- Sarasa-Maestro C. J., Dufo-Lopez R., Bernal-Agustin J. L., (2014), «Photovoltaic remuneration policies in the European union», in *Energy Policy*, Vol. 55, pp. 317-328.
- Sarkodie A. S., (2018), «The invisible hand and EKC hypothesis: what are the drivers of environmental degradation and pollution in Africa?», in *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, No. 22, pp. 21993-22022.
- Saucedo E. J., Pedroza J. D., Parra M. P., (2017), «Estimating Environmental Kuznets Curve: the impact of environmental taxes and energy consumption in CO₂ emissions of OECD countries», in *Dubrovnik International Economic Meeting*, pp. 901-912.
- Say M., Yucel M., (2006), «Energy consumption and CO₂ emissions in Turkey: empirical analysis and future projection based on an economic growth», in *Energy Policy*, Vol. 34, No. 18, pp. 3870-3876.

- Sbrescia M., (2013), «Politiche energetiche, sviluppo sostenibile e integrazione comunitaria: dall'Europa la spinta verso le rinnovabili», in *Rivista giuridica del Mezzogiorno*, anno XXVII, No. 2-3, pp. 195-208.
- Scarlat N., Dallemand J., Monforti:Ferrario F., Banja M., Motola V., (2015), «Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 969-985.
- Schallenberg-Rodriguez J., Hass R., (2012), «Fixed feed-in tariff versus premium: A review of the current Spanish system», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 293-305.
- Schmalensee R., (2012), «Evaluating Policies to Increase Electricity Generation from Renewable Energy», in *Review of Environmental Economics and Policy*, Vol. 6, No. 1, pp. 45-64.
- Seker F., Ertugrul H. M., Cetin M., (2015), «The impact of foreign direct investment on environmental quality: a bounds testing and causality analysis for Turkey», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 347-356.
- Selden, T.M., Song, D., (1994), «Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions?», in *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 27, No. 2, pp. 147-162.
- Sener C., Fthenakis V., (2014), «Energy policy and financing options to achieve solar energy grid penetration targets: accounting for external costs», in *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 32, pp. 854-868.
- Sener S. E. C., Sharp J. L., Anctil A., (2018), «Factors impacting diverging paths of renewable energy: A review», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, No. 2, pp. 2335-2342.
- Shafiei S., Salim R. A., (2014), «Non-renewable and renewable energy consumption and CO₂ emissions in OECD countries: A comparative analysis», in *Energy Policy*, Vol. 66, pp. 547-556.
- Shafik, N., Bandyopadhyay, S., (1992), «Economic Growth and Environmental Quality: Time Series and Cross-Country Evidence», *working paper*, Background Paper for the World Development Report, Washington DC, pp. 1-55.

- Shahbaz M., Mahalik M. K., Shah S. H., Sato J. S., (2016), «Time-varying analysis of CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth nexus: Statistical experience in next 11 countries», in *Energy Policy*, Vol. 98, pp. 33-48.
- Shahbaz M., Sbia R., Hamdi H., Ozturk I., (2014), «Economic growth, electricity consumption, urbanization and environmental degradation relationship in United Arab Emirates», in *Ecological Indicators*, Vol. 45, pp. 622-631.
- Sharma S. S., (2011), «Determinants of carbon dioxide emissions: empirical evidence from 69 countries», in *Applied Energy*, Vol. 88, No. 1, pp. 376-382.
- Shrimali, G., Kniefel, J., (2011), «Are government policies effective in promoting deployment of renewable electricity resources?», in *Energy Policy*, Vol. 39, No. 9, pp. 4726-4741.
- Silvestrini G., (2015), *Innovazioni radicali per vincere la sfida del clima e trasformare l'economia*, Edizioni Ambiente, Milano.
- Sinha A., Bhattacharya J., (2016), «Environmental Kuznets curve estimation for N₂O emission: A case of Indian cities», in *Ecological Indicators*, Vol. 67, pp. 1-11.
- Sinha A., Shahbaz M., Balsalobre D., (2017), «Exploring the relationship between energy usage segregation and environmental degradation in N-11 countries», in *Journal of Cleaner Production*, Vol. 168, pp. 1217-1229.
- Solarin S. A., Al-Mulali U., Ozturk I., (2017), «Validating the environmental Kuznets curve hypothesis in India and China: The role of hydroelectricity consumption», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, pp. 1578-1587.
- Soytaş U., Sari R, Ewing B. T., (2007), «Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States», in *Ecological Economics*, Vol. 62, No. 3-4, pp. 482-489.
- Stern D. I., (2004), «The rise and fall of Environmental Kuznets Curve», 2004, in *World Development*, Vol. 32, No. 8, pp. 1419–1439.
- Stern D., Common M. S., (2001), «Is there Environmental Kuznets Curve for sulfur?», in *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 41, No. 2, pp. 162-178.

- Stern D., Common M. S., Barbier E. B., (1996), «Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development», in *World Development*, Vol. 24, No. 7, pp. 1151-1160.
- Stern, D. I., (1998), «Progress on the environmental Kuznets curve?», in *Environment and Development Economics* , Vol. 3, No. 2, pp. 175– 198.
- Stock J. H., Watson M. W., (2012), *Introduzione all'econometria*, Pearson.
- Sulaiman J., Azman A., Saboori B., (2013), «The potential of renewable Energy: using the environmental Kuznets curve model», in *American Journal of Environment Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 103-112.
- Sun J. M., (1999), «The nature of CO₂ emission Kuznets curve», in *Energy Policy*, Vol. 27, No. 12, pp. 691-694.
- Suri, V., Chapman, D., (1998), «Economic growth, trade and the environment: implications for the environmental Kuznets curve», in *Ecological Economics*, Vol. 25, pp. 195–208.
- Thombs R. P., (2017), «The paradoxical relationship between renewable energy and economic growth: a cross-national panel study, 1990-2013», in *Journal of World-Systems Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 540-564.
- Thombs R. P., (2018), «Has the relationship between non-fossil fuel energy sources and CO₂ emissions changed over time? A cross-national study, 2000–2013», in *Climatic Change*, Vol. 148, pp. 481-490.
- The paradoxical relationship between renewable energy and economic growth: a cross-national panel study, 1990-2013», in *Journal of World-Systems Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 540-564.
- Tiba S., Omri A., (2017), «Literature survey on the relationships between energy, environment and economic growth», in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 1129-1146.
- Tietenberg T., (2006), *Economia dell'ambiente*, Milano, McGraw-Hill.
- Tsurumi T, Managi S., (2010), «Decomposition of the environmental Kuznets curve: scale, technique, and composition effects», in *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol. 11, No. 4, pp. 19–36.
- Tsuzuki Y., (2009), «Comparison of pollutant discharge per capita (PDC) and its relationships with economic development: An indicator for ambient water quality

improvement as well as the Millennium Development Goals (MDGs) sanitation indicator», in *Ecological Indicators*, Vol. 9, No. 5, pp. 971-981.

- Unruh G. C., Moomaw W. R., (1998), «An alternative analysis of apparent EKC-type transitions», in *Ecological Economics*, Vol. 25, No. 2, pp. 221-229.
- Van Ierland E. C., (1993), *Macroeconomic analysis of environmental policy*, Elsevier Science Publishers BV, Amsterdam.
- Varun, Prakash R., Bhat K. I., (2009), «Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems», in *Renewable and Sustainable Energy Rewies*, Vol. 13, No. 9, pp. 2716-2721.
- Verbeek M., (2006), *Econometria*, Zanichelli editore, Bologna.