



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI ECONOMIA “GIORGIO FUÀ”

Corso di laurea magistrale in Banche, Mercati e Assicurazioni

UN MODELLO ECONOMETRICO PER LA
GREEN ECONOMY

AN ECONOMETRIC MODEL FOR THE
GREEN ECONOMY

Relatore: Chiar.mo

Prof. Giulio Palomba

Tesi di laurea di:

Francesca Coccia

Anno accademico 2020-2021

Indice

1	Introduzione	5
2	La Green Economy: Rapporto economia-ambiente	9
2.1	Dal paradigma classico all'economia ecologica	9
2.1.1	Gli autori classici e neoclassici	11
2.1.2	La moderna Economia Ambientale	12
2.1.3	I modelli del rapporto tra economia e ambiente	17
2.2	Lo sviluppo sostenibile	25
2.2.1	Sostenibilità debole	25
2.2.2	Sostenibilità forte	26
2.2.3	Gli strumenti dello sviluppo sostenibile	28
2.2.4	Le misure dello sviluppo sostenibile	36
2.2.5	Le energie rinnovabili	44
3	Un modello sulla decarbonizzazione dei mercati	49
3.1	I dati	50
3.2	Modello di volatilità variabile	57
3.3	Stima del modello	59

4	INDICE
3.3.1	1° Step 59
3.3.2	2° Step 63
3.4	Test di <i>break</i> strutturale 66
4	Conclusioni 69
A	Grafici dei rendimenti 73
B	Modelli e specifiche 75
C	Rendimenti e volatilità stimate 77
C.1	Pre-covid 77
C.2	Post-covid 79

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni il termine *Green Economy* è stato utilizzato sempre di più, ma la sua definizione non è univoca, poiché se ne possono dare interpretazioni differenti. In generale sta ad indicare un modello teorico di sviluppo economico che prevede l'impegno nei confronti dell'ambiente naturale. Infatti, l'obiettivo principale della *Green Economy* è raggiungere un grado di sviluppo economico che sia sostenibile, ovvero in grado di non compromettere il delicato equilibrio degli ecosistemi naturali, permettendo tuttavia di continuare a produrre.

In questa tesi vedremo che, al contrario di quanto si possa pensare, i concetti di Economia Verde e sostenibilità risalgono a diversi secoli fa e hanno le loro radici negli studi classici e neoclassici. Questi concetti negli anni si sono evoluti, creando diverse correnti di pensiero tra loro contrapposte. L'esempio più limpido è la differenza tra l'Economia Ambientale e Economia Ecologica, oppure la differenza tra sostenibilità debole e sostenibilità forte, ognuna con una propria visione del rapporto tra l'uomo e la natura.

Negli anni sono stati implementati diversi strumenti per il raggiungimento di uno sviluppo economico che sia sostenibile, come la *cleaner production*, l'*eco-design* o la bioeconomia. Inoltre è sorta la necessità di misurare i progressi fatti dallo sviluppo sostenibile e questo ha portato alla creazione di indici diversi per misurarli.

Se, come abbiamo detto, l'obiettivo della *Green Economy* è quello di assicurare che il nostro pianeta non venga danneggiato dalle attività produttive, allora tra gli obiettivi da perseguire deve esserci anche quello della riduzione dell'inquinamento ambientale, ovvero l'abbattimento delle emissioni di anidride carbonica.

Per raggiungere questi obiettivi, le varie istituzioni internazionali hanno negli anni creato e ratificato diversi documenti come il Protocollo di Kyoto (1997) e l'Accordo di Parigi (2016). Più recentemente si è vista l'approvazione del *Green Deal* europeo (2020) e il patto della conferenza di Glasgow (2021). Tutti questi documenti prevedono obiettivi specifici di decarbonizzazione, intendendo con quest'ultima un processo in grado di ridurre la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario abbattere il livello di dipendenza da fonti energetiche ad alta intensità di carbonio. Questo ha portato negli anni ad intraprendere una graduale transizione energetica, sostituendo le fonti di energia fossili con fonti di energia rinnovabili.

Le energie rinnovabili sono di diverse tipologie (eolica, solare, geotermica), ma sono tutte accomunate dal fatto di non contribuire alle emissioni inquinanti. Negli anni sono quindi nate diverse imprese *green* e ad oggi il mercato propone diverse alternative per avere un approvvigionamento energetico che

sia sostenibile.

Tuttavia, questa transizione energetica si è rivelata essere troppo lenta, in quanto, nonostante la ratificazione ed attuazione degli accordi internazionali, la temperatura media globale ha continuato a crescere, indice del fatto che il processo di transizione non ha portato ancora benefici. La spinta acceleratrice a questo processo sembrerebbe essere stata la pandemia da COVID-19, la quale ha messo in luce la precarietà della nostra situazione. È indubbio infatti che una delle cause della rapida trasmissione di forme virali è proprio il cambiamento climatico, in quanto quest'ultimo modifica la distribuzione biogeografica delle specie animali, aumentando dunque le probabilità di contatto tra l'uomo e specie diverse che risultano essere vettori di queste nuove forme virali (zoonosi).

La mole di informazioni sul cambiamento climatico nel periodo successivo alla pandemia da COVID-19 è aumentata, portando quindi ad una “presa di coscienza” globale. Ciò ha comportato un aumento dell'interesse per il mercato delle energie alternative e più in generale per il mercato *green*, ovvero per quelle imprese che realizzano prodotti a basso impatto ambientale.

L'obiettivo di questo lavoro è comprendere se la progressiva decarbonizzazione dei mercati è stata effettivamente accelerata anche dallo scoppio dell'attuale pandemia.

Nel secondo capitolo viene riportata una visione d'insieme del concetto di *Green Economy* e della sua storia, nel terzo capitolo invece sarà presentata un'analisi empirica sulla “decarbonizzazione dei mercati” e dei relativi effetti generati dalla pandemia da COVID-19. La sezione 4 conclude.

Capitolo 2

La Green Economy: Rapporto economia-ambiente

2.1 Dal paradigma classico all'economia ecologica

Il termine “Green Economy” è stato coniato in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sullo Sviluppo Sostenibile, tenutasi a Rio de Janeiro nel 2012; tale conferenza ha avuto luogo a distanza di vent’anni dal Vertice della Terra, e per questo motivo è rinominata “Rio+20”. Tuttavia, a livello istituzionale sono state fornite definizioni differenti sul concetto di *Green Economy*, talvolta anche contrastanti.

Si tende a guardare alla *Green Economy* come ad un *driver* del cambiamento, che abbia come obiettivo principale quello di garantire la sostenibilità nel lungo periodo, intendendo con sostenibilità un uso più efficiente delle ri-

sorse naturali, la riduzione delle emissioni di anidride carbonica e dei gas serra.

Tenendo conto delle varie definizioni che sono state date di questo concetto, è lecito affermare che lo scopo della *Green Economy* è la salvaguardia del capitale naturale, garantendo al contempo un grado di sviluppo economico tale da consentire un livello della qualità di vita adeguato e più equo per tutti.

Il rapporto del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) del 2011, "Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication" definisce la *Green Economy* come una strada da percorrere, in grado di migliorare il benessere umano e l'equità sociale, riducendo i rischi ambientali e le scarsità ecologiche. Nel documento finale della conferenza di Rio+20 (Pontara Pederiva, 2012) invece si evidenzia che "la Green Economy dovrebbe contribuire ad eliminare la povertà così come ad una crescita economica sostenuta, a migliorare l'inclusione sociale, il benessere umano e a creare opportunità per l'occupazione e il lavoro dignitoso per tutti, pur salvaguardando l'integro funzionamento degli ecosistemi della Terra".

Oggi la *Green Economy* è percepita come un percorso verso la sostenibilità, ma in realtà il concetto ha una storia molto più lunga e complessa. Infatti, sebbene la *Green Economy* sia un concetto tipicamente associato a tempi recenti, lo studio dell'interdipendenza tra l'economia e l'ambiente ha sempre ricoperto un ruolo centrale, con l'obiettivo principale di verificare la possibilità di una crescita economica continua anche in presenza di risorse naturali scarse.

2.1.1 Gli autori classici e neoclassici

Il concetto del rapporto tra economia ed ambiente affonda le sue radici negli studi classici e neoclassici di economia. Il primo fra tutti gli economisti classici ad aver introdotto le prime riflessioni sull'ambiente naturale è Smith (1776). Egli infatti critica la politica commerciale dell'epoca, idealizzando piuttosto uno Stato in grado di assicurare un'equa ed efficiente allocazione delle risorse naturali.

Un altro economista classico che possiamo inquadrare nella storia del rapporto tra economia ed ambiente, è Malthus (1809). Nell'opera *"An Essay on the Principle of Population, as it Effects the Future Improvement of Society"* (1809), Malthus pone le basi per quello che oggi possiamo definire come sviluppo sostenibile. Malthus infatti, notando che la popolazione cresceva secondo una progressione geometrica, mentre la produzione agricola cresceva secondo una progressione aritmetica, arriva a teorizzare che la differenza tra le due avrebbe generato una crisi irreversibile il cui principale effetto sarebbe stato l'arresto dello sviluppo economico.

Nel rapporto tra uomo e natura interviene anche Ricardo (1815), che per primo introduce il concetto di scarsità delle risorse naturali con la teoria della rendita differenziale.

Partendo dal fatto che la terra ha diversi gradi di fertilità, Ricardo arriva ad affermare che all'aumentare della domanda di terra fertile, quest'ultima avrebbe cominciato a scarseggiare, comportando la necessità di mettere a coltura terra di qualità inferiore (terre marginali), con lo scopo di continuare a soddisfare la domanda crescente. La rendita pagata ai proprietari delle

terre, sarebbe stata dunque di tipo differenziale, il cui ammontare dipendeva dalla differente produttività dei due tipi di terreno, quello più fertile e quello meno fertile.

Con Ricardo per la prima volta vediamo concretizzarsi il concetto di scarsità, risorse limitate e più in generale di limiti assoluti naturali. Anche Mill (1871) analizza il concetto di scarsità, arrivando a vedere nello stato stazionario una situazione ideale, in grado di garantire alla popolazione condizioni di naturalità equamente distribuite. Si tenga presente che gli economisti classici si trovano a vivere gli arbori dello sviluppo industriale; al contrario, gli economisti neoclassici si ritrovano in un sistema industriale già affermato e di conseguenza si pongono l'obiettivo di trovare modelli economici in grado di promuovere un uso più efficiente delle risorse disponibili.

Tra i neoclassici occorre citare Walras (1896) inserito all'interno della corrente di pensiero economico del marginalismo. Il modello di Walras è fondato sull'assunto che le utilità degli individui siano funzioni dei prezzi pagati per le merci, escludendo di conseguenza tutta quella gamma di comportamenti di carattere morale, come l'interesse al vivere pacificamente in una comunità garantendo il conservamento delle risorse naturali per l'altrui benessere.

Gli approcci classici e neoclassici al rapporto tra economia e ambiente trattati finora, appartengono al paradigma dell'economia ambientale.

2.1.2 La moderna Economia Ambientale

L'economia ambientale, alimentata proprio dai contributi degli economisti classici e neoclassici, assume che i problemi ambientali quali la scarsità delle

risorse e il degrado degli ecosistemi naturali, siano dovuti all'uso inefficiente che si fa del capitale naturale. Tuttavia, e questo è l'assunto principale dell'economia ambientale, il capitale artificiale, ovvero prodotto dall'uomo, viene considerato un perfetto sostituto del capitale naturale. Dal momento in cui il capitale artificiale e quello naturale sono sostituiti, un cambiamento del sistema economico non viene reputato necessario; tale ipotesi viene chiamata ipotesi di Porter and Van der Linde (1995) ed individua una soluzione *win-win*. Sotto tale ipotesi, la crescita economica e l'uso efficiente delle risorse sono obiettivi che possono essere raggiunti simultaneamente attraverso l'innovazione tecnologica, regimi fiscali, imposte e sanzioni sulle soglie massime di inquinamento prodotto.

Tuttavia, a partire dagli anni 60, comincia ad essere formulata una teoria che per il suo contenuto si contrappone all'economia ambientale. Il motivo di ciò è da ricercare anche nel periodo storico di riferimento. Infatti in quegli anni il mondo usciva da due guerre mondiali che avevano finito per evidenziare quanto il progresso tecnologico potesse essere una minaccia per il genere umano e l'ambiente in generale. Un altro avvenimento che ha inciso in modo profondo sulla concezione del rapporto con l'ambiente e che ha mostrato per la prima volta all'uomo la condizione precaria ed effimera delle risorse naturali, sono state le crisi petrolifere degli anni 70. È dunque in questo clima di incertezza che si sviluppa la cosiddetta "economia ecologica" che, a differenza dell'economia ambientale, non prevede la perfetta sostituibilità tra il capitale artificiale creato dall'uomo e il capitale naturale. Oltre a questo si prende coscienza del fatto che la Terra è soggetta a limiti biofisici, superati i quali l'uomo non sarebbe più in grado di operare in uno spazio sicuro.

Il concetto di limite è ben illustrato da Polanyi (1944) il quale descrive un doppio movimento della società capitalista. Se da un lato infatti possiamo immaginare che la società umana sia sottoposta a spinte continue verso l'espansione e la crescita indefinita, dall'altro nell'individuo prevale un istinto di conservazione tanto sociale quanto individuale. Tale istinto si sostanzia nella consapevolezza di un limite, superato il quale la sopravvivenza non è più garantita.

Un altro importante precursore dell'economia ecologica è senz'altro Jonas (1979). Egli più di tutti forse, sottolinea quanto la sopravvivenza dell'uomo dipenda dalla sopravvivenza della natura stessa.

Secondo Jonas (1979) l'uomo ha una responsabilità nella conservazione della natura, in quanto l'ambiente naturale e le sue risorse sono indispensabili alla sopravvivenza umana ma al contempo si dimostrano fragili e meritevoli di tutela. È innegabile che “la natura extraumana, sia diventata un qualcosa che è dato in custodia all'uomo e avanzi perciò nei nostri confronti una sorta di pretesa morale, non soltanto a nostro ma anche a suo favore e in base ad un proprio diritto” (Jonas, 1979).

L'agire umano deve essere quindi orientato a permettere alle generazioni future di godere degli stessi privilegi di chi vive nel presente, in pratica l'essere umano deve essere in grado di garantire uno stile di vita sostenibile. Jonas evidenzia come “nientemeno che l'intera biosfera del pianeta, è stato aggiunto al novero delle cose per cui dobbiamo essere responsabili, in quanto su di esso abbiamo potere” (Jonas, 1979).

Viene dunque introdotto un nuovo soggetto che mai prima di allora era stato considerato nelle analisi del rapporto tra uomo e ambiente, ovvero la

biosfera. L'uomo è dunque investito di una nuova responsabilità, utilizzare la tecnica di cui dispone per proteggere l'ambiente in cui vive e tutto ciò che lo compone. La presa di coscienza di tale obbligo nei confronti della Terra pone in un certo senso un punto di rottura nella visione antropocentrica del pianeta.

Questa è la base ideologica e morale nella quale si sviluppa l'economia ecologica, i cui fondatori sono Boulding (1966) e Georgescu-Roegen (1986).

Boulding (1966), così come Polanyi (1944), riprende il concetto di limiti. Nel suo *"The Economics of the Coming Spaceship Earth"*, utilizzando l'allegoria dell'economia del cowboy e del cosmonauta, egli propone un sistema più sostenibile in cui dovranno essere posti dei limiti all'uso delle risorse e abbandonare l'idea della crescita indefinita, come alternativa al sistema economico fondato sull'uso estremamente intensivo delle risorse naturali.

Sia Boulding (1966) che Georgescu-Roegen (1986) criticano la visione neoclassica del sistema economico, rifiutando l'idea di risorsa, in quanto mezzo produttivo che produce reddito da reimpiegare a sua volta nel processo produttivo. In particolare, questo viene messo fortemente in luce da Georgescu-Roegen (1986) nella sua opera *"The Entropy Law and Economic Process"*. Egli infatti, applicando le scienze naturali alla scienza economica, sostiene che un ciclo circolare di produzione, tipico del paradigma neoclassico, non sia fattibile, in quanto le risorse naturali sono soggette ad entropia ed in particolare al secondo principio della termodinamica. Tale principio applicato all'ambito produttivo comporterebbe che l'utilizzo di risorse in un qualunque processo economico non è rinnovabile all'infinito poiché al termine del processo si avrebbe un deterioramento del materiale impiegato. Oltre a questo

contributo, vari economisti come Ayres and Kneese (1969), Victor (1991), Daly (1990) e Perrings (1987), hanno cercato di inglobare le leggi della fisica nell'economia e tutti i loro contributi possono essere ricompresi in quella che Victor chiama la scuola "Termodinamica".

Georgescu-Roegen, oltre ad essere un pioniere della scuola Termodinamica, è anche il padre dell'ecologia, una nuova scienza sociale. Tale scienza ha il compito di descrivere i comportamenti e le interconnessioni fra gli abitanti della terra, intendendo con quest'ultimi non soltanto l'essere umano, ma ogni forma di vita. L'ecologia, inoltre, ricomprenderebbe al suo interno anche l'economia, che in quanto scienza che studia l'attività umana volta alla produzione di ricchezza attraverso l'utilizzo di risorse naturali, non può prescindere dal rapporto tra uomo e natura.

Dato ciò che abbiamo appena affermato, per Georgescu-Roegen (1986) non vi può essere sostituibilità tra tecnologia e natura e risulta anche inappropriata l'attribuzione, tipica dell'economia ambientale, di valore monetario alle risorse naturali, in quanto quest'ultime sono fondamentali al buon funzionamento degli ecosistemi sui quali si fonda la vita e il benessere dell'uomo.

Il mutamento di paradigma ha posto anche dubbi circa il concetto di benessere e felicità umana. Se per secoli il paradigma neoclassico ha associato il benessere al possesso di ricchezza, la crisi economica e ambientale alla quale assistiamo richiede un ripensamento del concetto di benessere. Gallegati (2016) tratta questo aspetto in modo approfondito in "Acrescita", criticando la misurazione del benessere di un paese attraverso l'utilizzo del Prodotto Interno Lordo (PIL). In quanto indicatore economico, il PIL non è in grado di quantificare gli effetti che la crescita economica genera sull'ambiente, ne

tantomeno è in grado di misurare gli apporti positivi che gli ecosistemi naturali forniscono al benessere umano. I servizi di supporto alla vita forniti dagli ecosistemi, se degradati, non sono ricostituibili ma il PIL non prende in considerazione tale perdita. Gallegati (2016) prosegue affermando che l'impossibilità di perseguire una crescita indefinita con risorse limitate porterà inevitabilmente al deterioramento e al collasso delle società capitalistiche e ciò richiederà un "progresso sostenibile (che non deteriori cioè le risorse non riproducibili), o meglio un'acrescita sostenibile" (Gallegati, 2016). Da tutto ciò emerge l'urgenza di un nuovo paradigma che consideri l'economia come parte della natura.

La necessità di un ripensamento del rapporto tra l'economia e l'ambiente, dell'utilizzo efficiente delle risorse di produzione e del ruolo dell'uomo sulla Terra, porta alla costruzione di nuovi modelli, il cui fine ultimo è quello di indagare l'impatto ambientale delle azioni umane.

2.1.3 I modelli del rapporto tra economia e ambiente

Ehrlich and Holdren (1971) nel libro "*Impact of population growth*", propongono il modello *IPAT*. Il modello è sostanzialmente semplice, specifica che l'impatto ambientale (I) è uguale al prodotto tra la popolazione (P), il benessere economico (A) e la tecnologia (T), cioè

$$I = PAT. \quad (2.1)$$

In tale modello la numerosità della popolazione e il benessere economico hanno una correlazione diretta con l'impatto ambientale, mentre la tecnologia

mostra una correlazione inversa.

La natura deterministica del modello ne limita le applicazioni, in quanto impedisce la verifica di alcuni test di ipotesi, nonostante ciò si è dimostrato comunque un modello robusto ed attendibile.

Comprendere il perché la popolazione e il benessere economico, inteso come ricchezza pro-capite, presentino una correlazione diretta con la variabile dipendente I è abbastanza semplice. Malthus (1809) aveva già intuito che una crescita demografica non controllata avrebbe comportato un rapido degrado ed esaurimento delle risorse naturali. Andando più nello specifico, il modello *IPAT*, mostra che una crescita demografica come quella odierna contribuisce all'aumento delle emissioni di CO₂ e dei gas serra in maniera piuttosto rilevante. Lo stesso effetto viene generato dal benessere economico, solitamente misurato con il prodotto interno lordo pro-capite, in quanto la crescita della ricchezza contribuisce ad incrementare i consumi che a loro volta generano più produzione e quindi più emissioni inquinanti.

Al contrario, la tecnologia mostra una correlazione inversa con l'impatto ambientale. Di conseguenza, sembra che il miglioramento tecnologico contribuisca alla riduzione delle emissioni inquinanti; tuttavia tale correlazione dovrebbe essere indagata più a fondo.

Il parametro che indica il miglioramento tecnologico (T) può essere riferito ad elementi differenti, infatti all'interno della variabile tecnologica possiamo comprendere l'efficienza energetica, la struttura industriale, i brevetti, la ricerca e sviluppo, lo sviluppo finanziario, l'apertura commerciale, le eco-innovazioni e così via. Questa ampia gamma di fattori può determinare un diverso grado della correlazione a seconda della situazione che stiamo

analizzando.

Anche la variabile che indica la numerosità della popolazione può incidere in modo diverso sull'impatto ambientale a seconda del paese che stiamo considerando, tanto è vero che, oltre alla numerosità della popolazione, bisogna tenere conto della composizione, intendendo con quest'ultima l'età anagrafica, le abitudini di consumo, la dimensione dei nuclei familiari e l'area di residenza. I risultati delle analisi infatti possono variare a seconda delle aree urbane o delle zone rurali. Tutte queste caratteristiche possono influenzare i comportamenti della popolazione e dunque il loro impatto ambientale. Il modello di Ehrlich and Holdren (1971), essendo un modello deterministico non è adatto per la verifica di alcune ipotesi. Di conseguenza Dietz and Rosa (1997) lo hanno rielaborato in forma stocastica, chiamandolo modello *STIRPAT*.

Tale modello, maggiormente flessibile e adattabile a varie situazioni, permette di testare empiricamente alcune ipotesi sui fattori che lo compongono. Il modello *STIRPAT* è espresso dall'equazione di tipo Cobb-Douglas

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i, \quad (2.2)$$

dove $i = 1, 2, \dots, h$ indica il paese, b , c e d sono parametri di effetti ambientali, mentre a rappresenta un termine costante. Il parametro e è il termine di errore stocastico.

Tale modello, nella sua forma loglineare, è stato utilizzato per studiare le emissioni di CO₂ di 111 paesi e verificare l'esistenza di una correlazione tra la numerosità della popolazione e l'impatto ambientale misurato dall'aumento

delle emissioni di CO₂ (Dietz and Rosa, 1997).

L'aumento della domanda di beni e servizi da parte della popolazione e il conseguente incremento nell'utilizzo di combustibili per la produzione, determinano un innalzamento delle emissioni inquinanti. Inoltre l'incremento della popolazione contribuisce alla deforestazione per fare spazio a nuove aree urbane. Tuttavia i risultati emergenti dall'applicazione di questo modello, risultano essere non omogenei tra paesi.

In prima battuta si osserva spesso che paesi più avanzati e ad alto reddito, i quali dispongono di maggiore innovazione tecnologica, presentano livelli di emissioni di CO₂ inferiori rispetto ai paesi economicamente più arretrati o in via di sviluppo. In particolare, è stato possibile osservare che per livelli di prodotto interno lordo superiori ad una certa soglia, ulteriori incrementi dello sviluppo economico a livello regionale comportano un minore livello del degrado ambientale (Lv and Li, 2021). Tale risultato è in linea con l'ipotesi della curva di Kuznets ambientale¹. Da un punto di vista grafico tale relazione può essere rappresentata come una parabola con la concavità rivolta verso il basso come mostra la Figura 2.1. Sull'asse delle ascisse viene rappresentato il grado di sviluppo economico, utilizzando come indicatore il reddito pro-capite, mentre sull'asse delle ordinate viene riportato il livello di inquinamento o degrado ambientale. L'ipotesi sottostante al grafico è che all'aumentare dello sviluppo economico otteniamo un maggior degrado ambientale. Ciò è dovuto ovviamente alle motivazioni che già conosciamo,

¹Kuznets (1955) descrive la relazione tra il reddito pro-capite di un paese e il livello di disuguaglianza economica utilizzando una curva a forma di U rovesciata. Successivamente questa curva è stata utilizzata anche per descrivere la relazione tra lo sviluppo economico e i livelli del degrado ambientale di un paese. Questa rielaborazione è definita ipotesi della curva ambientale di Kuznets (Panayotou *et al.*, 1993).

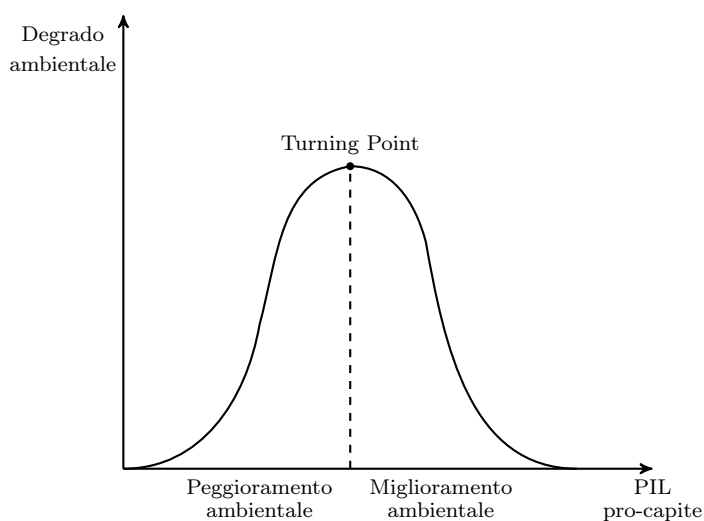


Figura 2.1: Curva EKC.

ovvero l'incremento della ricchezza pro-capite comporta un aumento dei consumi, ciò determina un utilizzo maggiore di combustibili fossili ed energia elettrica per aumentare la produzione, di modo che le industrie nazionali siano in grado di soddisfare la domanda crescente. Logicamente tutto questo processo contribuisce ad incrementare le emissioni inquinanti.

Tuttavia, quello che è interessante notare graficamente è che, da un certo punto in poi, questa relazione si inverte, il che significa che aumenti successivi del reddito pro-capite comporteranno una riduzione del livello del degrado ambientale. Come si spiega questo effetto? I fattori che intervengono sono molteplici, ma potremo riassumerli brevemente in questo modo: all'inizio la produzione è maggiormente basata sull'agricoltura e l'industria pesante e le conseguenze dirette di questi metodi produttivi sono deforestazione, cementificazione ed emissioni inquinanti dovute all'uso di fonti di energia ad alta intensità di carbonio.

Paesi in via di sviluppo come quelli dell'Asia Meridionale e alcune zone

dell’Africa sono ancora fortemente dipendenti da fonti di energia non rinnovabili e dannose per gli ecosistemi, nonostante dispongano delle risorse naturali per utilizzare fonti di energia più pulite.

Ad esempio, il Nepal ha un enorme potenziale di utilizzo di energia idroelettrica ma, nonostante ciò, il suo sviluppo economico è subordinato alle importazioni di combustibili fossili. Studiando l’eventuale esogeneità attraverso la procedura di Granger-Causalità e il metodo di Toda-Yamamoto (1995), Nepal and Paija (2019) si pongono l’obiettivo di mostrare il nesso tra reddito, energia e ambiente in Nepal.

Lo studio individua una causalità unidirezionale dalle emissioni di CO₂ alla crescita economica. Ciò indica che nel paese l’aumento del livello di inquinamento è collegato all’espansione economica, ma tale fatto non deve sorprendere, in quanto nei paesi in via di sviluppo la produzione è basata principalmente sull’industria pesante. Il settore industriale utilizza per lo più fonti di energia basate sulla combustione del carbonio, mentre la maggior parte della popolazione dipende dalla biomassa come principale fonte di energia per cucinare e riscaldarsi (Nepal and Paija, 2019).

È chiaro che l’utilizzo di queste fonti di energia generi esternalità negative in termini di salute per l’uomo e per l’ambiente. La migliore soluzione attuabile è l’incentivazione all’utilizzo di fonti di energia alternative, rinnovabili e più pulite come l’energia idroelettrica o eolica.

Tornando alla curva ambientale di Kuznets, quando lo sviluppo economico raggiunge un certo livello, la domanda di beni di consumo durevoli è ragionevolmente saturata, allora la produzione si sposta verso il settore dei servizi piuttosto che sui beni materiali. Di conseguenza, questo non arresta, ma per

lo meno contribuisce, a rallentare l'aumento delle emissioni inquinanti.

Dopo una certa soglia di reddito, chiamata *turning point* che coincide con il massimo della parabola, l'economia ha raggiunto un grado di sviluppo tale da potersi concentrare sull'implementazione di nuove tecnologie che le permettano di ottimizzare la produzione. Si assiste dunque allo sviluppo di brevetti *green*, eco-innovazioni, infrastrutture *green*, creazione di processi per l'efficientamento energetico e così via. A questo punto le industrie cominciano ad adottare modelli produttivi più sostenibili come la *lean-production*² e l'economia circolare. Studi successivi hanno constatato che se le economie sono ancora posizionate alla sinistra del *turning point*, le innovazioni tecnologiche di tipo *green* non contribuiscono a ridurre i livelli delle emissioni inquinanti (Du *et al.*, 2019). Di conseguenza i paesi in via di sviluppo non hanno convenienza ad adottare tecnologie *green* o eco-innovazioni.

Tuttavia, da quanto evidenzia lo studio di Lv and Li (2021), tali paesi possono comunque beneficiare di un effetto *spillover*. Utilizzando un campione di 97 paesi, lo studio mostra non soltanto che le emissioni inquinanti hanno una dipendenza spaziale positiva tra i vari paesi, ma anche che gli effetti positivi generati dalle innovazioni tecnologiche si ripercuotono sui paesi limitrofi.

Nell'analisi viene utilizzato il modello *STIRPAT*, disaggregando il parametro del miglioramento tecnologico (T) in efficienza energetica, struttura industriale, sviluppo finanziario e apertura commerciale. Utilizzando il mo-

²Il termine *lean production* è da attribuirsi a Krafcik (1988) "*Triumph of the lean production system*". È stato poi ripreso da Womack, Jones and Toos (1991) nel libro "La macchina che ha cambiato il mondo" in riferimento al sistema produttivo Toyota incentrato sulla minimizzazione degli sprechi, il miglioramento dei rapporti interni all'azienda e l'ottimizzazione della produzione.

dello spaziale di Durbin (2003) vengono mostrati empiricamente gli effetti diretti dei fattori oggetto di studio e l'effetto *spillover* generato da questi fattori.

Dall'interpretazione dei risultati emerge che lo sviluppo finanziario di un paese ha effetti diretti significativamente positivi sulle emissioni inquinanti, il che significa che un maggiore incremento di sviluppo finanziario finisce inevitabilmente per peggiorare il degrado ambientale. Tuttavia, visto quando abbiamo affermato finora, questo risultato non è poi così sorprendente, infatti un maggiore sviluppo finanziario contribuisce ad accrescere la ricchezza pro-capite ed il conseguente consumo pro-capite dei residenti. I risultati mostrano che l'effetto *spillover* è significativamente negativo e di gran lunga superiore all'effetto diretto dello sviluppo finanziario. Quindi la somma degli effetti diretti, positivi e dell'effetto *spillover* (negativo), ci permette di avere un effetto totale negativo. Ciò suggerisce che le emissioni di CO₂ di un paese possono essere bilanciate dallo sviluppo finanziario ed economico dei paesi limitrofi. È possibile infatti che i paesi confinanti, più sviluppati a livello economico contribuiscano alla diffusione di tecnologia più avanzata e a flussi di capitale da impiegare nello sviluppo di tecnologie verdi.

L'esportazione di capacità tecnologiche e capitale nei paesi adiacenti migliora anche la *governance* dei paesi riceventi e riduce le esternalità negative, con conseguenti riduzioni delle emissioni inquinanti.

Tali risultati sono piuttosto importanti, in quanto ci possono far pensare che paesi che si trovano ancora a sinistra del *turning point* della curva ambientale di Kuznets possono comunque tentare di mitigare il degrado ambientale, sfruttando l'effetto *spillover* generato dai paesi limitrofi economicamente e

tecnologicamente più avanzati.

2.2 Lo sviluppo sostenibile

Come abbiamo accennato all'inizio di questo capitolo, uno dei principali obiettivi della *Green Economy* è assicurare uno sviluppo sostenibile, intendendo con questo termine la capacità di garantire una crescita economica e uno stabile livello di consumo, assicurando al contempo che i limiti imposti dalla relativa scarsità delle risorse naturali siano rispettati. Tale crescita economica deve essere raggiunta dunque tenendo in considerazione i limiti biofisici del pianeta, oltrepassati i quali l'uomo non sarebbe in grado di operare in uno spazio sicuro.

Tuttavia, all'interno del campo economico si è cercata a lungo una definizione onnicomprensiva di sviluppo sostenibile. Tale ricerca ha condotto alla definizione di due concetti differenti che, per alcune loro caratteristiche, possono essere ricondotti ai paradigmi già analizzati dell'economia ambientale e dell'economia ecologica. Tali concetti sono la sostenibilità forte e la sostenibilità debole.

2.2.1 Sostenibilità debole

Così come per l'economia ambientale, la sostenibilità debole implica un perfetto grado di sostituzione tra il capitale artificiale o umano e il capitale naturale. In base a tale concezione una crescita economica infinita è possibile anche con risorse naturali esauribili.

Una critica che può essere sollevata su questo concetto riguarda il fatto che il capitale naturale viene trattato come un unico aggregato, non distinguendo di conseguenza tra quello che può essere considerato capitale naturale critico e non critico, dove il capitale naturale critico è quello reputato essenziale per il benessere umano e il buon funzionamento degli ecosistemi (ad esempio il paesaggio, lo spazio vitale, i cicli biogeochimici), mentre il capitale naturale non critico è quello che può essere sostituito dal capitale artificiale.

Da ciò discende di conseguenza il fatto che il capitale naturale venga considerato soltanto per la sua utilità di fattore produttivo disponibile in quantità limitata. Nessuna menzione viene fatta circa il suo ruolo di servizio fondamentale di supporto alla vita. Infatti “quanto più è facile sostituire il capitale fabbricato per le risorse in via di esaurimento o per un ambiente degradato, tanto minore sarà la preoccupazione per la capacità dell’ambiente di sostenere lo sviluppo” Victor (1991). Se infatti l’obiettivo principale è la preservazione dell’ambiente e della sua biodiversità, la capacità di sostituire facilmente le risorse naturali reputate scarse con capitale realizzato artificialmente, può portare ad attribuire scarsa importanza alla salvaguardia degli ecosistemi.

2.2.2 Sostenibilità forte

La sostenibilità forte al contrario assume che il capitale artificiale o umano e quello naturale sono complementari, ma non illimitatamente intercambiabili. In base a tale concetto, il capitale naturale svolge funzioni che il capitale artificiale non potrebbe svolgere. In particolare, si fa riferimento al capitale

naturale cosiddetto “critico”, o più semplicemente non sostituibile, in quanto forza motrice di ecosistemi differenti e dunque meritevole di maggiori tutele. Oltre ad introdurre la distinzione tra capitale naturale critico e non, la sostenibilità forte tratta il concetto di equità intergenerazionale, intendendo con questa la capacità di lasciare alle generazioni future uno *stock* di capitale naturale tale da permettere loro di goderne allo stesso modo delle generazioni presenti (si veda in proposito la sezione 2.1.1).

Il concetto di scarsità è spesso ricorrente nella letteratura riguardante l'economia verde ed è facile notare come sia una delle preoccupazioni principali riguardanti la crescita sostenibile. L'economia di per sé è fondata sul concetto di scarsità, definita dal celebre enunciato di Robbins (1935) come “la scienza che studia il comportamento umano come rapporto tra fini e mezzi scarsi che hanno usi alternativi”. Tuttavia il concetto di scarsità è approcciato diversamente dalla sostenibilità forte e debole. Se infatti nel caso della sostenibilità debole il paradigma socio-economico prevalente è ancora quello delle economie di consumo improntate comunque a una crescita continua, seppur sostenibile, nel caso della sostenibilità forte gli obiettivi sono differenti. Prevale la ricerca di prosperità piuttosto che di crescita economica e la tendenza a ricercare uno stato stazionario nel quale le esternalità negative siano ridotte o addirittura del tutto eliminate.

Da un lato abbiamo quindi una visione ecocentrica la quale individua nell'azione umana, nella crescita e nello sviluppo economico una potenziale fonte di distruzione della biosfera. Dall'altra abbiamo una visione tecnocentrica più razionale ed orientata ad una crescita controllata. Questo dibattito ha origine nella letteratura economica classica con le differenti visioni di eco-

nomia ambientale, tipica del paradigma neoclassico e l'economia ecologica sviluppatasi più di recente come risposta ai primi movimenti ambientalisti e alle crisi petrolifere. È questa natura duale del rapporto tra economia e ambiente ad aver portato all'ideazione di concetti, approcci e strumenti molto differenti tra loro per comprendere, attuare e misurare i risultati della rivoluzione *green*.

2.2.3 Gli strumenti dello sviluppo sostenibile

Quando si parla di sostenibilità, i metodi e gli strumenti per raggiungerla possono essere molteplici. Alcuni approcci, che vengono già adottati dai primi anni 90, possono essere ricondotti alla sostenibilità debole mentre altri, riconducibili alla sostenibilità forte sono più recenti.

Cleaner Production e Lean Production

Nell'ambito della sostenibilità debole possiamo inserire la *cleaner production*, definita dall'UNEP (2011) come "la continua applicazione di una strategia ambientale integrata a processi, prodotti e servizi per aumentare l'efficienza e ridurre i rischi per l'uomo e l'ambiente".

La *cleaner production* è dunque uno strumento strategico utilizzabile dalle aziende il cui utilizzo risulta piuttosto vario, in quanto può essere applicato al prodotto o al processo produttivo. In principio la definizione di *cleaner production* era applicata esclusivamente al prodotto, di conseguenza tale strategia era orientata alla realizzazione di prodotti cosiddetti *green*. Gli interventi dunque riguardavano i componenti del singolo prodotto o il *pac-*

kaging. Con l'obiettivo di sistematizzare l'applicazione di questa tipologia di strategia ambientale, l'UNEP recentemente ha ampliato la definizione di *cleaner production*, includendo in quest'ultima l'efficienza produttiva dell'utilizzo delle risorse; in questo modo è stato possibile spostare l'attenzione sullo sviluppo di tecnologie pulite e meno inquinanti.

In quest'ottica possiamo inserire anche la *lean production*, pensata originariamente per ottenere il massimo valore aggiunto. Ma dato che questo obiettivo si ottiene attraverso l'identificazione degli sprechi e la loro successiva minimizzazione, è un tipo di produzione che si inserisce bene nell'ambito ecologico. Infatti l'integrazione del concetto di *lean production* con l'economia *green*, permette di ottenere processi di produzione sostenibili dal punto di vista economico, sociale ed ambientale (Saetta and Caldarelli, 2020).

Eco-design

Un approccio sistematico ad una produzione più pulita ed efficiente è conosciuto come *eco-design*. Come è stato sostenuto sopra, la *cleaner production* inizialmente poneva enfasi solamente sul prodotto in sé e solo successivamente è stata estesa al processo produttivo, di modo da renderlo più pulito. Tuttavia negli anni si è andata sviluppando la consapevolezza che il degrado ambientale dipende non soltanto dai processi produttivi che possono generare emissioni inquinanti, ma anche dall'uso del prodotto da parte del consumatore finale e il relativo smaltimento.

L'*eco-design* prevede sia prodotti verdi cosiddetti "incrementali", il cui fine ultimo è la riduzione di problemi ambientali specifici, sia prodotti sistematici

la cui progettazione ha lo scopo di ridurre globalmente gli effetti negativi sull'ambiente derivanti dall'utilizzo del prodotto.

Sulla base di queste considerazioni, l'*eco-design* è sicuramente un approccio fortemente sistematico che permette di generare zero rifiuti, grazie all'attenzione posta nelle fasi di progettazione, ritiro e riutilizzo dei prodotti.

La bioeconomia

Un approccio più recente allo sviluppo sostenibile è quello della bioeconomia, definita dall'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OECD, 2009) come un concetto "che include tutte le attività economiche legate allo sviluppo e all'uso di prodotti e processi biologici". Una definizione ulteriore e più recente di bioeconomia è stata data anche dalla Commissione Europea (2012): "La bioeconomia può essere definita come un'economia basata sull'utilizzazione sostenibile di risorse naturali rinnovabili e sulla loro trasformazione in beni e servizi finali o intermedi". Particolare attenzione nell'ambito delle bioeconomie è posta sui settori delle biotecnologie e bioenergie. Tali settori rivestono un'importanza fondamentale nella lotta al cambiamento climatico e all'inquinamento. La biotecnologia interviene nella produzione primaria come l'allevamento e l'agricoltura, nel settore farmaceutico e industriale permettendo di ridurre la dipendenza da risorse non rinnovabili.

Gli approcci menzionati finora rientrano tutti nell'ambito della sostenibilità debole infatti, sebbene siano volti a ridurre le emissioni inquinanti e all'ottimizzare l'uso delle risorse naturali, sono comunque processi produttivi che non possono prescindere da quest'ultime. In aggiunta, queste sono solu-

zioni inseribili in un ambito microeconomico dato che non ambiscono ad un cambiamento strutturale a livello sociale.

La gerarchia dei rifiuti

A metà tra la sostenibilità debole e forte possiamo collocare la gerarchia dei rifiuti (*Waste Hierarchy*), definita nella direttiva 98 del 2008 della Commissione Europea come un ordine di priorità per il trattamento dei rifiuti. Tale gerarchia prevede la prevenzione, la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio, il recupero di altro tipo e infine lo smaltimento. La prevenzione è l'opzione da preferire, ma ove risultasse inattuabile, si passa alle opzioni successive.

Per prevenzione si intende la volontà di gestire un materiale prima che questo sia diventato un rifiuto vero e proprio. In quanto approccio preventivo, l'attuazione di tale misura comincia nelle fasi di progettazione del prodotto.

La misura successiva alla prevenzione, ovvero la preparazione per il riutilizzo, permette di trattare materiali che sono già diventati rifiuti, ma in modo tale da renderli nuovamente utilizzabili attraverso processi di pulizia, riparazione e aggiornamento. Grazie al riciclaggio, vengono recuperati i materiali del prodotto che potranno essere indirizzati o allo scopo originale oppure ad altre tipologie di prodotti finali. Nella fase di riciclaggio è possibile attuare un *up-cycling* ottenendo prodotti di qualità superiore all'originale, oppure un *down-cycling* che permette di avere prodotti di qualità inferiore all'originale. Le ultime due fasi riguardano prettamente lo smaltimento corretto e sicuro del prodotto, intendendo con questo che è da preferire il ritorno al sito iniziale di produzione.

La direttiva del 2008 permette di migliorare l'efficienza delle risorse produttive, ridurre la necessità e di chiudere il ciclo dei materiali. Con riguardo a quest'ultima opzione la direttiva introduce proprio una nuova metodologia concettuale definita *Life Cycle Thinking* (LCT), in base alla quale nell'attuazione della strategia di *Waste Hierarchy* bisogna porre attenzione all'intero ciclo di vita dei prodotti, ovvero dall'estrazione delle risorse naturali per la realizzazione fino alla gestione e smaltimento del residuo, "from cradle to grave".

Il motivo per cui la strategia di *Waste Hierarchy* può essere considerata una misura intermedia tra la sostenibilità debole e la sostenibilità forte è che contribuisce a ridurre la produzione, sebbene talvolta possa generare anche incentivi per nuove tipologie di investimento; oltre a ciò ha dei tratti in comune con la *cleaner production* ma, a differenza di questa, pone maggiore attenzione alla riduzione dei rifiuti contribuendo dunque alla salvaguardia degli ecosistemi.

Product Service System

Nell'ambito della sostenibilità forte troviamo il concetto di *product service system* (PSS), che in sostanza può essere definito come un insieme di "prodotti tangibili e servizi intangibili progettati e combinati in modo da essere congiuntamente in grado di soddisfare esigenze specifiche del cliente" (Tukker, 2004).

Il PSS è un sistema che permette non soltanto di perseguire uno sviluppo economico più sostenibile ma è anche un mezzo volto al raggiungimento di una maggiore competitività sul mercato. Permette infatti di raggiungere

simultaneamente obiettivi diversi come la personalizzazione dei prodotti e servizi per il cliente, instaurare relazioni uniche con i clienti e ottenere una loro maggiore fidelizzazione, generare valore aggiunto per le imprese con un uso minimo di materiali e minori emissioni.

Tutti questi vantaggi sono legati alla natura intrinseca di questo sistema, ovvero un metodo produttivo a bassa intensità di materiali, il quale può essere raggiunto con modelli di business differenti. In particolare è possibile individuare otto modelli di business archetipici (*Product related*, *Advice and consultancy*, *Product lease*, *Product renting/sharing*, *Product pooling*, *Activity management*, *Pay per service unit*, *Functional result*) di PSS raggruppabili in tre categorie principali:

1. servizi orientati al prodotto. In questa categoria il modello di business è ancora fortemente basato sulla vendita del prodotto ma il fornitore può comunque garantire una serie di servizi al consumatore finale atti a migliorare l'esperienza di utilizzo. Qui troviamo il *Product related* e l'*Advice and consultancy*.
2. servizi orientati all'uso. Rientra sicuramente in maniera più specifica nell'ambito dello sviluppo sostenibile in quanto il modello di business non è orientato alla vendita del prodotto. La proprietà di quest'ultimo rimane in capo al fornitore benché il consumatore finale abbia diritto ad usufruirne. Qui troviamo il *Product lease*, il *Product renting/sharing* e il *Product pooling*.
3. servizi orientati al risultato. Delle tre è indubbiamente quella che meglio si inserisce nella logica della sostenibilità forte dato che non prevede

l'esistenza di prodotti predeterminati, ma soltanto di un accordo tra il fornitore e il cliente con l'obiettivo di ottenere un determinato tipo di servizio. Qui troviamo l'*Activity management*, il *Pay per service unit* e il *Functional result*.

L'economia circolare

Sempre nell'ambito della sostenibilità forte troviamo l'economia circolare, definita dalla Fondazione Ellen MacArthur (2012) come “un termine generico per definire un'economia pensata per potersi rigenerare da sola. In un'economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera e quelli tecnici, destinati ad essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera”.

L'economia circolare agisce in modo sistemico, permettendo alle risorse di mantenere il loro valore più a lungo. A differenza dell'economia lineare che prevede lo smaltimento del prodotto al termine dell'utilizzo, l'economia circolare riporta la risorsa all'interno del ciclo produttivo. Di notevole importanza è anche il fatto che l'economia circolare non agisce esclusivamente a livello microeconomico della singola impresa, ma permette alle aziende di cooperare nella progettazione dei flussi delle risorse, creando sinergie a livello regionale se non addirittura globale.

Nature-Based Solutions

Se dovessimo pensare agli approcci fin qui analizzati come se fossero inseriti in una struttura gerarchica, dal meno sostenibile al più sostenibile dal punto di vista ambientale, all'apice potremo presumibilmente posizionare le

nature-based solutions. La stessa Commissione Europea ha visto in queste soluzioni una risposta alla necessità di spostarsi verso uno sviluppo fortemente sostenibile, ed è per questo motivo che ha deciso di sfruttare parte delle risorse del programma di finanziamento Horizon 2020 per investire in soluzioni *nature-based*. Una definizione del concetto di soluzioni *nature-based* è stata data proprio dalla Commissione Europea, definendole come “soluzioni ispirate, continuamente supportate e utilizzate dalla natura, progettate per affrontare le varie sfide della società in modo efficiente sotto il profilo delle risorse e adattabile per fornire contemporaneamente benefici economici, sociali e ambientali”.

Più concretamente, le soluzioni *nature-based* prevedono un metodo di produzione meno incentrato sull'utilizzo di input di capitale naturale non rinnovabile e maggiormente finalizzato ad investimenti in processi naturali rinnovabili. Questo approccio ha un duplice obiettivo: da un lato, si cerca di tutelare l'ambiente e lo *stock* di capitale naturale, riducendo l'inquinamento ambientale e, dall'altro, si pone come obiettivo anche di aumentare lo *stock* di capitale naturale. Tuttavia le soluzioni *nature-based* richiedono determinati requisiti per essere attuate. Se infatti vi è la volontà di tutelare il capitale naturale, vi è anche l'obiettivo di mantenere inalterata la produzione. Questa duplice necessità potrà essere soddisfatta solo nella misura in cui le fonti di energia non rinnovabili possono essere sostituite senza diminuire la produzione attuale. Perché ciò sia possibile è importante una continua ed approfondita sinergia con l'ambito politico, economico e scientifico. Un altro aspetto di notevole importanza è dato dal fatto che le soluzioni *nature-based* necessitano di innovazioni ecologiche, tecnologie *green* e di conseguenza un

livello di sviluppo economico tale da consentire l'implementazione di tutti questi processi. È piuttosto probabile che soluzioni di questo tipo siano dunque difficilmente attuabili in paesi in via di sviluppo che non posseggono ancora capacità tecnologiche sufficienti.

Un esempio di soluzione *nature-based* è quello delle infrastrutture *green* (IG). Le IG rappresentano una rete pianificata di aree naturali e seminaturali che costituiscono un valido sostituto alla classica struttura urbana. Rispetto a quest'ultima presentano numerosi vantaggi; innanzitutto non costituiscono un limite allo sviluppo urbano ma piuttosto promuovono uno sviluppo naturale e sostenibile che permette all'uomo di vivere in simbiosi con la natura circostante, permettono la creazione di aree abitative autosufficienti grazie all'uso di energia rinnovabile e sono in grado di integrare spazi naturali verdi o blu (nel caso di ecosistemi acquatici) con contesti rurali o urbani.

Ovviamente soluzioni di questo genere richiedono un cambiamento profondo e fortemente strutturale della società, in quanto coinvolgono modifiche a lungo termine e richiedono investimenti sostanziosi. Tali azioni e strumenti non sono soltanto di difficile implementazione; spesso infatti risulta difficoltoso anche misurarne l'efficacia. Diversi indicatori sono stati proposti per misurare la sostenibilità e l'efficacia delle misure volte ad assicurare uno sviluppo sostenibile. Di seguito presenteremo i più rilevanti.

2.2.4 Le misure dello sviluppo sostenibile

Dai primi anni 90 in poi, numerosi sforzi sono stati fatti con l'obiettivo di identificare indicatori adeguati di sviluppo sostenibile e metodologie che

permettessero di inserire nei conti nazionali il cosiddetto capitale naturale.

Il primo contributo in tal senso è quello di un lavoro di Victor (1991), nel quale viene trattata la relazione esistente tra sviluppo sostenibile e teoria del capitale. Dopo aver sintetizzato le peculiarità delle principali scuole economiche, a partire da quella neoclassica fino a quella da lui definita “termodinamica”, Victor passa ad illustrare il potenziale della funzione di produzione di Dasgupta and Heal (1979) come possibile indicatore di sviluppo sostenibile. Per rappresentare l’*output* produttivo Dasgupta and Heal (1979) utilizzano una Cobb-Douglas del tipo

$$Y = K^a R^b L^c \quad \text{se } a, b, c > 0 \quad \text{e } a + b + c = 1 \quad (2.3)$$

Dove Y rappresenta la quantità prodotta, K la quantità di capitale artificiale, R la quantità di risorse naturali impiegate e L il numero di lavoratori.

Nella funzione di produzione di Dasgupta and Heal (1979) le risorse naturali vengono assunte come essenziali per la produzione ma si permette la sostituzione del capitale naturale con quello artificiale. Con questa ultima assunzione risulta quindi possibile mantenere inalterata la produzione finale (Y).

Fondamentali in questa funzione di produzione sono i coefficienti tecnici applicati ai fattori produttivi (esponenti), in quanto a e b risultano essere le elasticità della produzione Y rispetto al capitale artificiale K e quello naturale R . In base a ciò, quando $a > b$ è possibile continuare ad avere un livello di *output* permanente per un tempo indefinito, in quanto vi è un alto grado di sostituzione tra il capitale artificiale e quello naturale.

Victor (1991) tuttavia muove anche alcune critiche a questo modello produttivo. La prima riguarda la forma funzionale scelta per rappresentare la relazione tra la produzione e i fattori produttivi. Se è vero che per garantire una produzione continua è necessario che le due tipologie di capitale siano altamente sostituibili, è anche vero che la Cobb-Douglas presenta un grado di sostituzione costante, complicando l'analisi della sostituibilità tra i due fattori.

Un secondo aspetto sulla quale Victor (1991) si sofferma è il deprezzamento del capitale; se una risorsa presenta un tasso di deprezzamento costante allora quella risorsa è essenziale e non è sostituibile. Infine il modello di Dasgupta and Heal (1979) trascura il fatto che per produrre il capitale artificiale sia necessario il capitale naturale, di conseguenza una diminuzione del secondo comporterà un' analoga diminuzione del primo e risulterà impossibile mantenere costante la produzione con risorse naturali esauribili.

Victor (1991) identifica dunque nei coefficienti dell'equazione (2.3) possibili indicatori di sviluppo sostenibile, in particolare con una forma funzionale differente rispetto alla Cobb-Douglas l'elasticità di sostituzione avrebbe un potenziale maggiore come indicatore. Passando poi alla scuola "termodinamica", riporta quattro principi operativi stabiliti da Daly (1990) in ambito di sostenibilità.

1. La somma della composizione demografica e del livello di consumo pro-capite non deve essere superiore alla capacità di carico dell'ambiente. Tale principio tuttavia è di difficile attuazione in quanto, benché sia possibile misurare la composizione demografica e il consumo pro-capite, diverso è il discorso per la capacità di carico.

2. Il progresso tecnologico deve migliorare l'efficienza piuttosto che aumentare la disponibilità di risorse. Anche questo principio è di difficile misurazione, in quanto andrebbe analizzato il rendimento totale di un'economia.
3. La raccolta e l'uso delle risorse naturali non devono superare la capacità di rigenerazione di quest'ultime. Inoltre le emissioni di rifiuti non dovrebbero superare la capacità dell'ambiente di assorbirle. A differenza dei primi due principi questo presenta fattori di più semplice misurazione.
4. Il tasso di raccolta delle risorse deve essere mantenuto al di sotto del tasso di rigenerazione in modo tale da compensare l'esaurimento delle risorse non rinnovabili.

Non è difficile notare come il modello di produzione di Dasgupta and Heal (1979), appartenente alla scuola neoclassica, sia più vicino al concetto di sostenibilità debole, mentre invece i principi operativi di Daly (1990), appartenente alla scuola termodinamica e al paradigma dell'economia ecologica, siano più in linea con il concetto di sostenibilità forte. Tuttavia il modello di Dasgupta and Heal (1979) presenta un'operatività nettamente superiore rispetto ai principi di Daly (1990), i quali appunto essendo dei principi dovrebbero essere utilizzati, a detta di Victor (1991), come base per la creazione di indicatori di sviluppo sostenibile.

Il lavoro di Victor (1991) viene successivamente ripreso da Pearce and Atkinson (1993) con l'obiettivo di individuare un indicatore di sviluppo sostenibile in grado di fornire dei risultati empirici e non soltanto speculativi.

Nel loro lavoro adottano una posizione neoclassica, assumendo di conseguenza la sostituibilità tra il capitale naturale e quello artificiale, con un'elasticità di sostituzione tra i due input maggiore di uno. Per costruire l'indice di sostenibilità debole Pearce and Atkinson (1993) prendono spunto dalla cosiddetta "regola del risparmio" o regola di Hartwick-Solow, già utilizzata da Solow (1974) e Hartwick (1977) con lo scopo di individuare una metodologia in grado di assicurare un flusso di consumo pro-capite costante nel tempo per un periodo indefinito.

La regola assume che, per avere uno *stock* di capitale costante, è necessario che il risparmio sia maggiore o uguale alla somma dei tassi di deprezzamento del capitale naturale e del capitale artificiale. Analiticamente questo implica che

$$Z > 0 \quad \text{se} \quad S > (\delta_A + \delta_N), \quad (2.4)$$

dove Z è l'indice di sostenibilità, S il tasso di risparmio, δ_A il tasso di deprezzamento del capitale artificiale e δ_N il tasso di deprezzamento del capitale naturale. L'indice di sostenibilità assoluto si ottiene come differenza tra il tasso di risparmio e la somma dei due tassi di deprezzamento. Dividendo poi tutti i membri per il reddito nazionale Y si ottiene la deviazione dalla sostenibilità marginale, cioè

$$Z_M = \frac{S}{Y} - \frac{\delta_A}{Y} - \frac{\delta_N}{Y}. \quad (2.5)$$

Benché la costruzione di questo indice rappresenti un primo grande sforzo nella direzione della realizzazione di indicatori di sviluppo sostenibile, è

possibile muovere alcune critiche nei confronti di questo indicatore.

Le assunzioni alla base del concetto infatti sono eccessivamente restrittive; innanzitutto viene assunto un alto grado di sostituibilità tra il capitale naturale e il capitale artificiale. Tuttavia questo presupposto ha alla base diverse lacune: non viene riconosciuta l'essenzialità delle risorse naturali per la produzione del capitale artificiale; sulla base di ciò è difficile supporre che l'elasticità di sostituzione tra il capitale naturale e quello artificiale sia maggiore di uno.

La seconda lacuna riguarda il grado di aggregazione degli input; è abbastanza intuitivo il fatto che le risorse naturali siano diverse e svolgano compiti diversi all'interno dell'economia, eppure vengono considerate in un unico aggregato sotto la definizione di "capitale naturale". Di conseguenza, per migliorare l'operatività dell'indice, sarebbe opportuno introdurre una qualche forma di disaggregazione, ad esempio distinguendo tra capitale naturale critico e capitale naturale non critico. Introducendo livelli di disaggregazione maggiori delle risorse naturali, sarebbe possibile studiare le varie elasticità tra le diverse tipologie. Infine, Victor (1991) afferma che assumere un'elevata sostituibilità tra il capitale artificiale e il capitale naturale devia da uno degli obiettivi dello sviluppo sostenibile. Se è vero infatti che uno degli obiettivi dello sviluppo sostenibile è garantire una crescita economica indefinita anche con risorse esauribili, l'altro obiettivo riguarda la salvaguardia dell'ambiente e degli ecosistemi naturali fondamentali per la vita, ma la facilità di sostituzione del capitale naturale con quello artificiale porterebbe minore preoccupazione per l'ambiente e per la sua capacità di sostenere lo sviluppo.

Victor (1991) e Pearce and Atkinson (1993) sono stati i pionieri nell'ambito della creazione di indicatori di sviluppo sostenibile. Numerosi indicatori sono stati sviluppati successivamente anche grazie alle spinte dell'Agenda 21 e del Piano d'Azione adottato dalla Conferenza sull'Ambiente e lo Sviluppo delle Nazioni Unite (1992). In queste conferenze infatti si è insistito molto circa la necessità da parte delle varie organizzazioni internazionali e delle istituzioni di sviluppare indicatori che tracciassero i progressi verso il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile. Come è risultato evidente nel caso dell'indice di Pearce and Atkinson (1993), realizzare un indicatore di sviluppo sostenibile onnicomprensivo è complesso se non impossibile. Infatti nell'ambito di sviluppo sostenibile vengono coinvolte aree tematiche differenti e di conseguenza questo ha portato alla creazione di un numero elevato di indicatori.

Per comprendere tuttavia le performance ambientali a livello globale, è necessario che vengano definiti indicatori di sviluppo sostenibile compositi. Tali indicatori possono essere costruiti seguendo modelli differenti; ad oggi i modelli più utilizzati a tale scopo sono di tre tipi e prevedono due fasi successive: nella prima viene introdotta una serie di indicatori di sviluppo sostenibile, nella seconda vengono valutate eventuali combinazioni di questi indicatori. Tali modelli sono:

- PSR (pressione-stato-risposte), basato su un nesso causale specifico tra i tre elementi. Le attività umane esercitano una qualche forma di pressione sull'ambiente che concorre a modificare la qualità ambientale, ovvero ne modifica lo stato. A tali cambiamenti la società risponde attraverso politiche ambientali.

- DPISR (determinanti-pressioni-stato-impatto-risposte), è un'estensione del precedente. A differenza del primo, qui vengono considerati i comportamenti umani (le determinanti) e il loro relativo effetto sull'ambiente. Tali determinanti aumentano la pressione sullo stesso modificandone lo stato; diventa dunque possibile quantificare l'impatto ovvero le alterazioni prodotte dall'azione umana sull'ambiente.
- Il terzo modello utilizzato dal *Joint Research Center* (JRC), servizio scientifico interno alla Commissione Europea, consiste in una serie di fasi successive come la scelta degli indicatori, l'individuazione dei dati mancanti, l'analisi della correlazione incrociata e delle componenti principali. Il JRC utilizza questa metodologia per la realizzazione di un audit statistico circa l'*Environmental Performance Index* (EPI). Tale indice fornisce una sintesi dello sviluppo sostenibile a livello globale, classifica 180 paesi in termini di salute ambientale e vitalità degli ecosistemi, utilizzando 32 indicatori di prestazione applicati a 11 categorie di problemi.

Complementare all'EPI, è l'*Environmental Sustainability Index* (ESI), creato nel 2002. Questo indice ha lo scopo di tracciare le performance dei paesi a livello ambientale, che si muovono verso la sostenibilità. È basato su una serie di 68 indicatori individuali che vengono aggregati per costruire 21 indicatori principali. L'ESI di ogni paese si ottiene come valore medio di questi 21 indicatori principali. È complementare all'EPI perché, mentre questo misura i risultati derivanti dagli sforzi dei paesi nel ridurre le pressioni sull'ambiente, l'ESI si concentra invece sul grado di sostenibilità ambientale.

Quando parliamo di indicatori di sviluppo sostenibile facciamo riferimento a diverse categorie e aree tematiche; esistono infatti indicatori relativi alla sostenibilità nell'ambito dell'innovazione e dello sviluppo tecnologico, indici di mercato sostenibile, indici di performance ambientale per le imprese e così via. Una famiglia di indici di mercato relativi alla sostenibilità delle aziende sono i *Dow Jones Sustainability Group Indices* (1999), che permettono di valutare le performance delle aziende quotate in borsa, sulla base di principi differenti come quello tecnologico, sociale e di governance. Un indice utile a valutare gli effetti prodotti dall'azione dell'uomo sugli ecosistemi naturali è l'*Ecological Footprint* (Wackernagel and Rees, 1997). La domanda crescente di beni e servizi mette a dura prova le capacità di assorbimento degli ecosistemi e finisce per superarla. Di conseguenza l'*Ecological Footprint* cerca di individuare i quantitativi di terra e mare che permettono di sostenere uno standard di vita adeguato per un tempo indefinito. La misurazione della sostenibilità ecologica attraverso questo indice è data dal rapporto tra le risorse richieste e le risorse disponibili; quando tale rapporto è maggiore di uno allora lo sviluppo risulta insostenibile.

2.2.5 Le energie rinnovabili

È ormai opinione condivisa che il cambiamento climatico è un problema da affrontare con la massima tempestività. I cambiamenti climatici hanno sempre interessato il nostro pianeta, ma la situazione che stiamo vivendo da poco più di un secolo sembra essere atipica rispetto a ciò che si è verificato nelle precedenti ere geologiche.

Una delle maggiori cause che contribuisce ad innalzare le temperature in modo anomalo provocando il cosiddetto *global warming* è l'effetto serra antropico. L'effetto serra è un fenomeno naturale generato dall'energia Solare. I raggi del sole attraversando l'atmosfera vengono catturati dai gas ad effetto serra, come il metano e l'anidride carbonica, che trattengono il calore. Questo fenomeno permette di mantenere sul pianeta una temperatura ideale per il buon funzionamento di interi ecosistemi. L'effetto serra antropico invece è dovuto alle ingenti masse di anidride carbonica generate dalle attività umane. Tali quantità di emissioni inquinanti contribuiscono ad innalzare la temperatura.

Le varie istituzioni internazionali negli ultimi anni si sono impegnate, con vari accordi, nella lotta contro il cambiamento climatico. Dalla firma del Protocollo di Kyoto (1997) all'Accordo di Parigi (2015), le istituzioni hanno cercato di contenere i danni derivanti dalle attività umane. L'obiettivo principale di questi accordi è la decarbonizzazione, un processo volto alla riduzione delle emissioni di CO₂. Recentemente il Consiglio e la Commissione Europea hanno istituito un regolamento (2021) per il raggiungimento, entro il 2050, della neutralità climatica, ovvero il punto di equilibrio tra le emissioni di gas serra e la capacità della terra di assorbirle.

I suddetti obiettivi possono essere raggiunti riducendo le emissioni di CO₂ con la produzione di energia pulita, il miglioramento dell'efficienza energetica, l'adozione di sistemi di economia circolare (si veda in merito la sezione 2.2.3) e compensando le emissioni inevitabili attraverso la protezione delle foreste e degli ecosistemi e investimenti in ricerca e sviluppo.

Per quanto riguarda il settore privato, molte aziende hanno scelto di im-

plementare sistemi produttivi che diminuiscano le emissioni di CO₂ attraverso l'utilizzo di energia pulita e rinnovabile, come quella eolica, idrica e geotermica. Negli ultimi anni, a seguito anche della pandemia da COVID-19, si è resa evidente la necessità immediata di questa transizione energetica. A seguito di questa presa di coscienza, le aziende produttrici di energia rinnovabile, hanno visto nell'anno 2020 un incremento del loro fatturato rispetto agli anni precedenti. Questo dimostra anche l'interesse degli investitori nel decarbonizzare i loro portafogli propendendo per *asset* provenienti da imprese *clean*. Molti studi in materia fino ad oggi hanno dimostrato che le performance finanziarie delle società che producono fonti di energia alternative possono beneficiare dall'aumento dei prezzi del petrolio greggio (Bondia *et al.*, 2016), ed è stato anche dimostrato che un aumento della volatilità del prezzo del petrolio rende più volatili i titoli di società produttrici di energia pulita (Dutta, 2017). Un'ulteriore correlazione interessante è quella tra i prezzi delle azioni di aziende che producono energia pulita e i prezzi delle azioni di aziende tecnologiche (Sadorsky, 2012), poiché queste correlazioni appaiono più elevate rispetto a quelle tra i prezzi delle azioni di energia pulita e i prezzi del petrolio.

Alla luce di questi studi è possibile dunque dire che i mercati delle energie rinnovabili possono beneficiare degli effetti di *spillover* di mercati differenti. Tuttavia potrebbe essere interessante comprendere l'evoluzione dei mercati *green* in base allo spostamento delle preferenze degli investitori, istituzionali e *retail*, tenendo anche conto della recente pandemia da COVID-19, per comprendere se tutti gli eventi anomali a cui stiamo assistendo (eventi climatici estremi come alluvioni e terremoti, diffusione di nuovi virus, dete-

rioramento della qualità dell'acqua, eccetera), stiano riuscendo ad accelerare la transizione verso un'economia più sostenibile.

Capitolo 3

Un modello sulla decarbonizzazione dei mercati

Come è stato ampiamente spiegato nel primo capitolo, con il passare degli anni e con la presa di coscienza da parte degli individui dei danni arrecati dal cambiamento climatico, la necessità di uno sviluppo più sostenibile si è fatta più evidente. Il bisogno di questo cambiamento radicale interessa ogni ambito, da quello sociale a quello politico ed economico.

Da un punto di vista economico e finanziario, questo cambiamento è stato intrapreso attraverso gli investimenti in attività di imprese *green* o sostenibili. Investire infatti in questa tipologia di imprese permette di possedere portafogli cosiddetti “decarbonizzati”. La rapida diffusione dell’interesse degli investitori per il *green*, ha portato ad una progressiva “decarbonizzazione dei mercati”. L’obiettivo di questo lavoro è studiare tale decarbonizzazione e comprendere se la pandemia da COVID-19 e le recenti normative introdotte in materia di sostenibilità abbiano influenzato i mercati delle energie

rinnovabili, accelerando in qualche maniera la “svolta *green*”. Il capitolo è strutturato in questo modo: nella prima sezione viene riportata l’analisi dei dati relativi alle serie oggetto di studio, nella seconda sezione viene riportato il modello utilizzato, nella terza sezione sono riportati i risultati delle stime effettuate, infine nella quarta sezione viene effettuato un test di ipotesi per verificare la validità dei risultati ottenuti.

3.1 I dati

L’analisi è condotta sui prezzi di chiusura giornalieri di imprese *green*, ottenibili da Yahoo Finance (<https://finance.yahoo.com>). Con imprese *green* intendiamo quelle aziende che partecipano alla produzione di energie rinnovabili. In senso ampio vengono anche considerate compagnie che realizzano prodotti sostenibili volti a ridurre le emissioni di CO₂. Il set di dati utilizzato è piuttosto eterogeneo e rappresentativo, in quanto comprende 13 aziende operanti in settori differenti, quali

- energia solare (SunPower, Jinko Solar, First Solar, Enphase),
- energia eolica (Vestas),
- energia geotermica (Albioma),
- combustibili *green* (Green Plains, Clean Energy Fuels Corp, Plug Power),
- motori *green* (Tesla, Capston Turbine Corporation, Ballard Power System),

- energia elettrica (Eni).

Tali serie sono state selezionate per diversi motivi; innanzitutto si tratta di aziende appartenenti a settori diversi legati al *green* e alle energie alternative. In secondo luogo, durante la fase di raccolta dei dati si sono rivelate essere quelle che, a differenza di altre della medesima tipologia, non presentavano valori mancanti (*missing*). Infine, si tratta di aziende geograficamente differenti; infatti alcune aziende sono americane, altre europee ed altre asiatiche, anche se quotate tuttavia in mercati americani.

Il periodo oggetto di studio va dal 30 Dicembre 2014 al 31 Dicembre 2021; la scelta di tale periodo è dovuta alla necessità di uniformare il *dataset*, ovvero avere valori giornalieri completi per ogni serie, in quanto molte aziende *green* sono state quotate recentemente nei mercati finanziari.

Per ottenere le serie dei rendimenti percentuali sono state applicate le differenze prime dei logaritmi dei prezzi (p_t), ovvero

$$r_t = 100 \ln \left(\frac{p_t}{p_{t-1}} \right). \quad (3.1)$$

Preliminarmente, allo scopo di assicurarci che i rendimenti siano stazionari, sono stati condotti alcuni test di radice unitaria; i risultati, riportati in Tabella 3.1, confermano che effettivamente si tratta di processi di tipo I(0). Guardando le statistiche descrittive in Tabella 3.2, notiamo che tutte le serie presentano una distribuzione leptocurtica (curtosi maggiore di 3), caratteristica tipica delle serie finanziarie. Lo scarto quadratico medio indica che alcune serie come ENPH (5,26%) e CGRNE (5,12%) sono mediamente più volatili di altre.

	ADF(20)	<i>p</i> -value	PPtest	<i>p</i> -value	KPSS(5)
SPWR	-41.8760	0.0000	-41.9039	0.0000	0.0548
VWDRY	-18.6048	0.0000	-43.6254	0.0000	0.0693
ABIO.PA	-17.5301	0.0000	-43.1650	0.0000	0.0670
GPRE	-11.7160	0.0000	-44.9224	0.0000	0.0523
E	-13.5188	0.0000	-45.3102	0.0000	0.0509
JKS	-29.0325	0.0000	-43.6549	0.0000	0.0340
FSLR	-23.3771	0.0000	-43.3244	0.0000	0.0371
TSLA	-16.2002	0.0000	-42.0415	0.0000	0.0666
CGRNE	-16.2392	0.0000	-41.6016	0.0000	0.0858
CLNE	-18.0836	0.0000	-45.8489	0.0000	0.0411
PLUG	-16.3845	0.0000	-43.9031	0.0000	0.0521
ENPH	-11.5161	0.0000	-43.2324	0.0000	0.1364
BLDP	-45.2486	0.0000	-45.1989	0.0000	0.0706

Tabella 3.1: Test di radice unitaria dei rendimenti (p-value in parentesi). Il valore critico del KPSS al 10% è 0.119.

	Media	Mediana	SQM	Asimmetria	Curtosi	Massimo	Minimo
SPWR	0.01085	0.0000	4.2750	-0.1934	6.1483	21.679	-36.016
VWDRY	0.0823	0.1283	2.3376	-0.6461	6.6947	11.736	-17.837
GPRE	0.0235	0.0000	3.7380	-1.4757	33.0200	26.709	-56.480
ABIO.PA	0.0512	0.0000	1.7032	-0.1491	6.8716	11.764	-12.868
E	0.0071	0.0542	1.9113	-1.7384	24.9630	12.681	-24.632
JKS	0.0475	0.0681	4.3471	-0.2036	5.0917	25.029	-34.258
FSLR	0.0368	0.0428	2.8244	-0.0166	4.8610	18.520	-16.203
TSLA	0.1724	0.1260	3.3362	-0.0281	5.5109	18.145	-20.552
CGRNE	-0.2112	0.0000	5.1290	0.2628	6.0077	31.237	-30.748
CLNE	0.0098	-0.3241	4.5866	0.7088	12.5610	38.046	-42.547
PLUG	0.1202	0.0000	4.5731	1.4188	15.5570	54.857	-21.579
ENPH	0.1393	0.0271	5.2696	-0.0984	9.8686	35.378	-46.786
BLDP	0.0986	0.0000	4.2683	0.9477	15.1080	47.222	-24.706

Tabella 3.2: Statistiche descrittive dei rendimenti

Per migliorare l'analisi verranno utilizzate due variabili indipendenti aggiuntive: i volumi di scambio di due grandi ETF, l'iShares Global Clean Energy (ICLN) e l'iShares MSCI ACWI Low Carbon Target (CRBN). Dato che per definizione l'ETF replica l'andamento di un mercato, questi verranno inseriti come regressori in varianza nella stima dei GARCH univariati, permettendo ai volumi di influenzare le volatilità.

Le motivazioni che hanno portato a questa scelta sono molteplici; primo fra tutti perché si tratta di ETF fortemente connessi alla tipologia di serie analizzate. L'iShares Global Clean Energy è inerente al mercato delle fonti di energia alternativa, mentre l'iShares MSCI ACWI Low Carbon Target è un ETF progettato per replicare la performance dell'*MSCI ACWI Low Carbon Target Index*, un *benchmark* per gli investitori che desiderano gestire i rischi potenziali associati alla transizione energetica verso un'economia decarbonizzata. I volumi rappresentano il numero di transazioni all'interno di un determinato mercato in grado, come accennato, di contribuire a spiegare la volatilità dei mercati. Questa relazione tra la volatilità dei mercati e i volumi di scambio è stata empiricamente mostrata, tra gli altri, da Karpoff (1987). Inoltre analizzare i volumi di scambio è un elemento chiave per identificare lo spostamento dell'interesse degli investitori verso altri mercati (*trend*).

In Figura 3.1 sono riportati gli andamenti nel tempo dei volumi degli ETF nominati precedentemente. Già da una prima analisi grafica possiamo notare che l'interesse degli investitori per le energie alternative è stato notevole, soprattutto per l'ICLN, negli anni tra il 2020 e il 2021, periodo cruciale per la transizione *green*.

La necessità di una svolta in ambito climatico era già presente, ma non

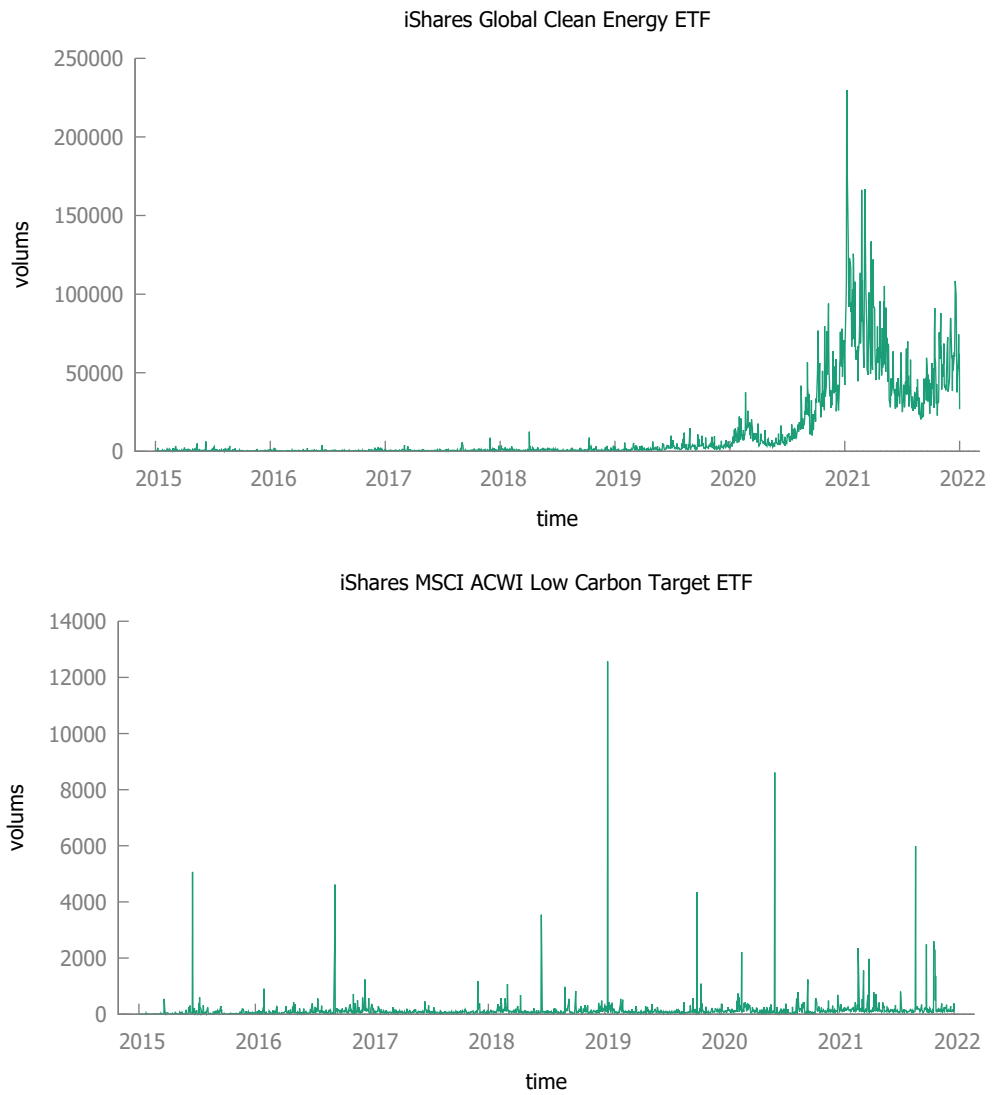


Figura 3.1: Volumi dell'iShares Global Clean Energy ETF e dell'iShares MSCI ACWI Low Carbon Target ETF.

è stata percepita correttamente dai mercati fino a questo periodo. Infatti, i volumi dell'iShares Global Clean Energy ETF hanno mantenuto pressoché lo stesso andamento per anni, per assistere poi ad un incremento notevole tra il 2020 e il 2021. Le motivazioni che hanno spinto i mercati a dirottare le proprie attenzioni verso le energie *clean* possono essere molteplici. La pandemia è stata sicuramente un fattore importante, così come il fatto che il 2021 è stato l'anno in cui si era stabilito di iniziare ad applicare le misure previste dall'accordo di Parigi ratificato nel 2016. Si tenga presente che tra queste misure vi è quella di contenere l'aumento medio della temperatura globale sotto i 2°C, puntando non oltre gli 1.5°C, attraverso la riduzione delle emissioni inquinanti. Il 2020, invece, è stato l'anno in cui è stato approvato il Green Deal europeo, una legge vincolante per tutti i Paesi dell'UE, che ha sancito il raggiungimento della neutralità delle emissioni inquinanti entro il 2050. Nello specifico, la legge intende decarbonizzare il settore energetico, in quanto quest'ultimo rappresenta il 75% delle emissioni inquinanti.

Un ulteriore evento importante che può aver determinato un aumento così repentino nei volumi di scambio di questi due ETF, è il fatto che dal 31 Ottobre al 13 Novembre 2021 si è tenuta a Glasgow la Cop26, ovvero la conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici e, tra le decisioni principali contenute nel Patto di Glasgow, configurano gli obiettivi di decarbonizzazione, i quali richiedono un taglio del 45% delle emissioni di anidride carbonica da attuarsi entro il 2030, oltre al raggiungimento di zero emissioni nette intorno alla metà del secolo. Proprio questa impellente necessità, sottolineata dal documento finale della conferenza di Glasgow, di raggiungere un'economia *low carbon*, può aver determinato l'aumento nei volumi di scam-

bio dell'iShares MSCI ACWI Low Carbon ETF nel periodo immediatamente successivo allo scoppio della pandemia.

Per quanto riguarda le serie dei rendimenti, queste presentano *outlier* (grafici in Appendice A). Tali valori potrebbero creare problemi nella stima delle varianze condizionali, in quanto shock di notevole entità potrebbero creare una situazione di persistenza nei valori della volatilità. Questi *outlier* sono particolarmente evidenti per Green Plains, Eni, e Clean Energy. In particolare, i valori dei rendimenti mostrano una flessione negativa notevole a partire dal 9 Marzo 2020 per la serie relativa ai rendimenti di Eni. Tale fenomeno può essere facilmente spiegato ricordando che in quella data l'Italia è stato il primo paese europeo a dichiarare un *lockdown* nazionale, seguita nei giorni immediatamente successivi da numerosi altri paesi europei. Di conseguenza nelle serie dei rendimenti possiamo osservare una sorta di effetto contagio nei mercati che ha portato ad avere ampi rendimenti negativi per molti titoli.

Per ovviare a questa situazione è stata inserita una dummy come regressore esogeno nell'equazione della media dei rendimenti. L'utilizzo di questa variabile permette di ottenere un'informazione aggiuntiva da inserire nella legge di moto dei rendimenti, ma comporta il fatto che il valore atteso dei rendimenti condizionato all'informazione disponibile (set informativo I_{t-1}), non sia più $E(r_t|I_{t-1} = 0)$. Quando questo accade, significa che il rendimento non si comporta più come una differenza di martingala, cioè di fatto non è più imprevedibile, violando dunque la teoria dei mercati efficienti nella sua versione *strong*.

3.2 Modello di volatilità variabile

Per mostrare come i mercati delle energie rinnovabili e, più in generale, delle imprese *green*, hanno risposto alla spinta verso la decarbonizzazione e alla pandemia da COVID-19, verrà utilizzato il DCC-GARCH, un modello multivariato per lo studio delle dinamiche delle covolatilità. L'obiettivo principale è quello di verificare se, recentemente, l'attenzione degli investitori si stia spostando verso un mercato più sostenibile.

Il modello DCC-GARCH (*Dynamic Conditional Correlation GARCH*) fu introdotto da Engle e Sheppard (2001) ed è un'estensione del modello presentato da Bollerslev (1990), ovvero il CCC-GARCH (*Constant Conditional Correlation GARCH*). La differenza rispetto al modello di Bollerslev sta nel fatto che il DCC-GARCH permette alla struttura delle correlazioni di essere dinamica e variare nel tempo, inoltre il DCC-GARCH rispetto ad altri modelli GARCH multivariati permette di stimare matrici di covarianze di ampie dimensioni.

La stima del nostro modello prevede l'implementazione di due *step*; nel primo *step* sono state effettuate stime di modelli GARCH(p, q) univariati per ogni serie dei rendimenti r_t . I modelli GARCH che sono stati stimati in questa fase sono il GARCH standard (Black, 1976), il Taylor/Schwert GARCH (Taylor, 1986 e Schwert, 1990), il GJR GARCH (Glosten *et al.*, 1993), il TARARCH (Zakoian, 1994), il NARCH (Fan and Yao, 2005), l'APARCH (Higgins and Bera, 1992) e l'EGARCH (Nelson, 1991). Per ciascuna serie sono stati specificati i modelli associati ai criteri informativi più bassi (Akaike, Schwarz e Hannan-Quinn) e ne sono stati salvati i residui standardizzati

$\hat{u}_t = \hat{\varepsilon}_t/h_t^{1/2}$, dove $\hat{\varepsilon}_t$ è il residuo del modello e h_t la volatilità stimata. Da tali residui è stata calcolata la matrice \mathbf{Q}_0 ovvero la loro matrice di correlazione statica.

Nel secondo step, viene stimata la matrice delle covarianze condizionali o covolatilità definita come

$$\mathbf{H}_t = \mathbf{V}_t^{1/2} \mathbf{R}_t \mathbf{V}_t^{1/2} \quad (3.2)$$

dove \mathbf{V}_t è una matrice diagonale, i cui elementi sono dati dalle radici quadrate delle varianze condizionali al tempo t , ovvero $h_{i,t}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), \mathbf{R}_t è la matrice dinamica delle correlazioni ed è definita come

$$\mathbf{R}_t = \tilde{\mathbf{Q}}_t^{-1/2} \mathbf{Q}_t \tilde{\mathbf{Q}}_t^{-1/2} \quad (3.3)$$

dove

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_t &= \mathbf{\Gamma} + \mathbf{A} \odot (\boldsymbol{\varepsilon}_{t-1} \boldsymbol{\varepsilon}'_{t-1} - \mathbf{\Gamma}) + \mathbf{B} \odot (\mathbf{Q}_{t-1} - \mathbf{\Gamma}) \\ &= (\boldsymbol{\nu}_n \boldsymbol{\nu}'_n - \mathbf{A} - \mathbf{B}) \odot \mathbf{\Gamma} + \mathbf{A} \odot \boldsymbol{\varepsilon}_{t-1} \boldsymbol{\varepsilon}'_{t-1} + \mathbf{B} \odot \mathbf{Q}_{t-1}, \end{aligned}$$

è la matrice della dinamica DCC e \odot è il prodotto di Hadamard. Il modello prevede dunque la stima di diversi parametri associati alle matrici $\mathbf{\Gamma}$, \mathbf{A} e \mathbf{B} . La matrice $\mathbf{\Gamma}$ è la matrice di covarianza incondizionata delle innovazioni, simmetrica con valori unitari lungo la diagonale principale, contenente $\frac{n(n-1)}{2}$ parametri non ripetuti. Le matrici \mathbf{A} e \mathbf{B} possono contenere un numero diverso di parametri in base a come vengono riparametrizzate. Le modalità di riparametrizzazione più comunemente utilizzate sono:

- Modello generale, dove \mathbf{A} e \mathbf{B} sono piene e i parametri da stimare ammontano a $2n^2$,
- **Cholesky**, dove $\mathbf{A} = \mathbf{C}_A \mathbf{C}'_A$ e $\mathbf{B} = \mathbf{C}_B \mathbf{C}'_B$ e le matrici \mathbf{C}_A e \mathbf{C}_B sono matrici triangolari basse; i parametri da stimare ammontano a $n^2 + n$,
- **Rango-1**, dove $\mathbf{A} = \mathbf{a}\mathbf{a}'$ e $\mathbf{B} = \mathbf{b}\mathbf{b}'$, \mathbf{a} e \mathbf{b} sono vettori n -dimensionali; in questo caso si hanno $2n$ parametri da stimare,
- **Scalare**, dove $\mathbf{A} = \alpha \mathbf{t}_n \mathbf{t}'_n$ e $\mathbf{B} = \beta \mathbf{t}_n \mathbf{t}'_n$; α e β sono due scalari, di conseguenza occorre stimare 2 parametri.

3.3 Stima del modello

3.3.1 1° Step

Per la stima del modello DCC-GARCH, come è stato spiegato nella sezione 3.2, sono stati stimati diversi GARCH(p, q) univariati, la cui scelta è ricaduta su quelli con i criteri di Akaike, Hannan-Quinn e Schwarz più bassi.

Dato che l'obiettivo di questa tesi è studiare l'evoluzione dei mercati *green*, non solo in relazione alla necessità di decarbonizzare l'economia, ma anche riguardo all'impatto del COVID-19, il campione è stato preliminarmente suddiviso in *pre-covid* e *post-covid* e, successivamente, sono stati stimati i modelli per entrambe le situazioni.

Il primo modello (*pre-covid*) è relativo al periodo dal 30 Dicembre 2014 al 10 Febbraio 2020. Il secondo modello (*post-covid*) va dal 10 Febbraio 2020 al 31 Dicembre 2021. Il motivo per il quale è stato scelto come *break* il

10 Febbraio 2020 è dovuto al fatto che tale data è ad un mese di distanza dalla divulgazione da parte dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) della notizia circa l'esistenza di un nuovo ceppo di coronavirus. Le stime dei GARCH univariati sono riportati in Appendice B in Tabella B.2

Le serie Tesla ed Enphase, sono state opportunamente detrendizzate, in quanto le varianze condizionali stimate, in assenza di tali *trend*, risultavano essere non stazionarie. Per Tesla è stata anche inserita una dummy relativa al 3 Febbraio 2020 e al 5 Febbraio 2020, giorni nei quali i rendimenti della serie presentavano un'ampia flessione rispettivamente negativa e positiva, dovute probabilmente all'apertura dell'azienda ad una fascia di mercato più ampia grazie alla produzione di veicoli elettrici più economici.

Dalle stime possiamo vedere che i coefficienti relativi ai volumi degli ETF iShares Global Clean Energy e iShares MSCI ACWI Low Carbon, benché molto piccoli, sono significativi per 9 serie su 13, testimonianza di come l'andamento del mercato influenzi le varianze condizionali delle serie, coerentemente con quanto affermato da Karpoff (1987). Tuttavia l'elemento innovativo sta nel fatto che tale informazione aggiuntiva non viene apportata dai volumi di scambio dei singoli titoli, ma dai volumi di scambio degli ETF *green*.

L'ICLN, utilizza come *benchmark* lo *S&P Global Clean Energy Index* il quale è un indice progettato per replicare le performance di circa 100 società, a maggiore capitalizzazione, operanti nei settori dell'energia alternativa, tra le quali configurano anche le 13 serie utilizzate nel nostro modello. La significatività di tali volumi, per l'equazione della varianza condizionale, contribuisce a mostrare che i mercati delle energie alternative risultano connessi

tra di loro. Per quanto riguarda invece il CRBN, come già anticipato, sfrutta come *benchmark* l'*MSCI ACWI Low Carbon Target Index*, il quale, sovrappesando le società con basse emissioni effettive e potenziali di carbonio, riflette un'esposizione ad esso inferiore rispetto a quella del mercato generale. Risulta dunque essere un valido strumento per quegli investitori che desiderano possedere portafogli decarbonizzati. Inoltre, a differenza dell'ICLN, questo ETF non replica l'andamento del mercato delle energie alternative, poiché al suo interno troviamo aziende non *green*, ma che risultano comunque sostenibili, in quanto producono basse emissioni di CO₂. Dato che i volumi di scambio di questo ETF risultano significativi per la volatilità delle serie, è probabile che il mercato *green* presenti legami anche con mercati differenti, i quali perseguono obiettivi di sviluppo economico sostenibile.

Viste queste considerazioni i volumi di questi due ETF possono essere interpretati un un'ottica di *green sentiment*, ovvero riescono a riflettere un interesse per gli *asset* di tipo *green*, che prescinde dai loro fondamentali economici.

Un modo per misurare il *green sentiment*, attraverso l'uso degli ETF, è sfruttare il differenziale dei flussi in ETF *green* rispetto agli ETF convenzionali, con l'obiettivo di osservare flussi anomali (Briere and Ramelli, 2021). Il motivo per cui vengono utilizzati i volumi degli ETF piuttosto che i singoli titoli è dovuto al fatto che, essendo questi posseduti per lo più da investitori *retail*, sono più inclini a rappresentare il *sentiment* di mercato. Inoltre, dato che gli ETF contengono più informazione rispetto al singolo volume della serie, permettono un'analisi più esaustiva.

Sulla base di queste considerazioni, i risultati emergenti dall'utilizzo dei

volumi degli ETF *green* come regressori esogeni, suggeriscono non solo che i mercati delle energie rinnovabili risultano essere connessi, ma anche che gli investitori hanno spostato il loro interesse verso questa tipologia di titoli, spinti dalle informazioni disponibili sui costi del cambiamento climatico e dalle normative in materia di sostenibilità.

Dal 10 Febbraio 2020 (*post-covid*) la significatività degli ETF, in media, si riduce, indice di una diminuzione della loro capacità di spiegare i movimenti della volatilità, conseguentemente ad una crescita dell'incertezza. Questo probabilmente è dovuto agli shock che la pandemia ha generato nei vari mercati i quali hanno determinato per il nostro modello la necessità di inserire delle dummy per le serie di Eni, Green Plains e Clean Energy. Tale variabile è stata inserita per la data del 9 marzo 2020, giorno nel quale l'Italia ha dichiarato lo stato di *lockdown* nazionale. Nelle date immediatamente successive molti altri paesi europei e non, hanno seguito l'esempio italiano. Di conseguenza la significatività di questa variabile in media, è indice proprio del fatto che l'effetto generato dalla notizia del COVID-19 è stato tale da portare gli investitori ad avere aspettative circa ampi rendimenti negativi dei titoli, comportando un aumento della percezione del rischio e dunque della volatilità.

La pandemia da COVID-19 ha messo in luce nuovi aspetti sul cambiamento climatico, generando nella maggior parte degli individui la consapevolezza della necessità di una vera e propria rivoluzione *green*. Infatti è proprio l'alterazione degli equilibri naturali del pianeta che contribuisce ad alterare la trasmissione di malattie virali, come appunto il COVID-19.

È abbastanza facile comprendere quindi che lo scoppio della pandemia

ha generato un aumento di "coscienza sociale", il quale probabilmente ha determinato il notevole incremento nei volumi dell'ICLN successivo al 2019. Allo stesso tempo però la pandemia ha creato incertezza sui mercati, inclusi quelli *green*, e questo può contribuire a spiegare come mai le stime relative al periodo *post-covid* riportino livelli di significatività inferiori per i volumi degli ETF.

Per concludere il primo step, sono stati condotti il test di Ljung Box (Ljung and Box, 1978) sui residui standardizzati e un test di radice unitaria sulle varianze stimate, riportati in Appendice B in Tabella B.1, i quali confermano l'assenza di autocorrelazione nei residui per le stime *pre-covid* e *post-covid*, nonché la stazionarietà delle varianze condizionali stimate; di conseguenza i modelli GARCH univariati sembrano essere ben specificati da questo punto di vista.

3.3.2 2° Step

Utilizzando i criteri informativi di Akaike, Hannan-Quinn e Schwarz come metriche di valutazione, è stato selezionato il modello DCC-GARCH scalare tra le diverse riparametrizzazioni delle matrici \mathbf{A} e \mathbf{B} .

La stima dei modelli è stata effettuata attraverso il metodo della massima verosimiglianza, utilizzando le derivate analitiche (si veda Caporin, Lucchetti e Palomba, 2020), in quanto risultano essere uno strumento che permette di ottenere una velocità computazionale maggiore rispetto alle derivate numeriche.

La matrice $\hat{\mathbf{\Gamma}}$ riportata di seguito contiene i parametri stimati dal *modello*

pre-covid e le relative significatività; i coefficienti ci danno informazioni sul grado di interdipendenza dei mercati delle energie alternative. Generalmente i mercati risultano essere interconnessi, tuttavia a noi interessa l'entità di tale connessione. Queste relazioni tra i mercati dipendono dal tipo di output che viene realizzato (in questo caso le energie alternative), così come dagli input utilizzati dalle imprese nella produzione. Dato che i mercati sono legati da questi elementi comuni, nel momento in cui si genera uno shock su un determinato mercato, questo si ripercuote sugli altri.

Da un'analisi generale sembrerebbe che i mercati non siano fortemente interconnessi tra di loro, dal momento che i coefficienti di $\hat{\Gamma}$ non sono elevati. Gli effetti di spillover tra le coppie di serie sono significativi, indice del fatto che c'è un effetto contagio degli shock, ma questi effetti non sono di notevole entità.

$\hat{\Gamma} =$

1																					
0.1975*** 0.0319	1																				
0.1259*** 0.0342	0.2170*** 0.0264	1																			
0.2457*** 0.0274	0.2506*** 0.0261	0.63 ***	1																		
0.2069*** 0.0255	0.1609*** 0.0327	0.188 ***	0.2223*** 0.0221	1																	
0.3472*** 0.0201	0.5208*** 0.0148	0.1566*** 0.0292	0.1797*** 0.028	0.3484*** 0.0227	1																
0.0849*** 0.0202	0.1772*** 0.0314	0.1248*** 0.0276	0.016 0.0315	0.1371*** 0.0281	0.1097*** 0.0345	1															
0.1212*** 0.0278	0.2232*** 0.0271	0.0961 *** 0.028	0.1784*** 0.0269	0.073** 0.0323	0.1197*** 0.03	0.0893*** 0.0287	1														
0.073** 0.031	0.0837*** 0.0288	0.121 *** 0.0292	0.09*** 0.03	0.1614*** 0.0269	0.3474*** 0.0215	0.121 *** 0.0275	0.2268*** 0.0273	1													
0.1413*** 0.0292	0.1525*** 0.0292	0.3117*** 0.0226	0.1322*** 0.0249	0.1332*** 0.0253	0.2602*** 0.0258	0.1826*** 0.0256	0.2849*** 0.0236	0.1811*** 0.0253	1												
0.138*** 0.0309	0.3256*** 0.0224	0.1751*** 0.0247	0.166*** 0.0285	0.3104*** 0.0245	0.224*** 0.027	0.1416*** 0.0297	0.1618*** 0.0311	0.1913*** 0.0274	0.3164*** 0.0222	1											
0.1734*** 0.0276	0.2184*** 0.0248	0.1654*** 0.0289	0.1453*** 0.0338	0.2427*** 0.0253	0.2144*** 0.029	0.3 *** 0.0191	0.5146*** 0.0157	0.08 ** 0.0312	0.0956*** 0.0308	0.1671*** 0.0291	1										
0.137*** 0.0221	0.2371*** 0.0277	0.1726*** 0.0261	0.1778*** 0.0269	0.1327*** 0.0306	0.1728*** 0.0247	0.2377*** 0.0239	0.1566*** 0.0271	0.2176*** 0.0255	0.179*** 0.0241	0.2201*** 0.0268	0.2899*** 0.0232	1									

Figura 3.2: Livello di significatività *** 1%, ** 5%, * 10%

La riparametrizzazione scalare ci fornisce i parametri relativi all'effetto ARCH e l'effetto GARCH, rispettivamente $\alpha = 0.0079$ e $\beta = 0.8176$, che catturano l'effetto della correlazione dinamica. I suddetti parametri risultano

statisticamente significativi ad un livello dell'1% (gli *standard error* sono pari a 0.0024 e 0.076).

Essi indicano l'effetto degli *shock* tra i titoli nel breve periodo e gli effetti di *spillover* della volatilità nel lungo periodo. Il parametro α ha un valore molto basso; questo indica una scarsa sensitività agli shock, mentre il valore di β indica un elevato valore di persistenza della correlazione. Inoltre entrambi i parametri rispettano la condizione $\alpha + \beta < 1$.

Guardando la stima relativa al *modello post-covid*, sembrerebbe che la pandemia da COVID-19 e le normative introdotte tra il 2020 e il 2021 per favorire la svolta *green* abbiano incrementato le relazioni tra queste tipologie di mercati, dal momento che vi è stato un aumento degli effetti di contagio tra le serie.

Ciò che emerge dalla stima delle matrici Γ , è che le imprese che presentavano già forti interdipendenze, le hanno mantenute. Quelle che invece presentavano un grado di interdipendenza minore o irrilevante, hanno subito un aumento notevole di tale grado, dal momento che i coefficienti stimati sono talvolta raddoppiati e triplicati.

Inoltre i parametri relativi all'effetto ARCH e l'effetto GARCH, sono statisticamente significativi (gli *standard error* sono pari a 0.0041 e 0.0523) ed ammontano a $\alpha = 0.0123$ e $\beta = 0.8681$. Oltre a garantire che la loro somma sia inferiore ad 1, ci permettono di confrontare il sistema con il *modello pre-covid*.

È interessante notare come il parametro relativo agli effetti di *spillover* degli shock tra mercati (α) e il parametro relativo all'impatto della volatilità nel lungo periodo (β) siano aumentati. Tale aumento riflette un incremento

$\hat{\Gamma} =$												
1												
0.3314***	1											
0.0450												
0.2141***	0.332***	1										
0.0537	0.0408											
0.2764***	0.5434***	0.6864***	1									
0.047	0.0311	0.0229										
0.3733***	0.3775***	0.4159***	0.559***	1								
0.0472	0.0461	0.0417	0.03									
0.6819***	0.6382***	0.4053***	0.1875***	0.2366***	1							
0.0188	0.0261	0.0313	0.0523	0.0491								
0.3583***	0.3355***	0.2438***	0.2615***	0.28***	0.2951***	1						
0.0359	0.0454	0.0532	0.0506	0.0529	0.0459							
0.3546***	0.3226***	0.0447	0.1172**	0.2153***	0.1946***	0.2043***	1					
0.0441	0.0459	0.0537	0.0507	0.0556	0.0528	0.0525						
0.1521***	0.1013*	0.1703***	0.2117***	0.1818***	0.4383***	0.3495***	0.2891***	1				
0.0540	0.0531	0.053	0.0525	0.0516	0.0358	0.0465	0.0414					
0.2554***	0.3221***	0.4162***	0.3623***	0.2958***	0.2737***	0.2599***	0.2699***	0.1739***	1			
0.047	0.041	0.0357	0.0474	0.0465	0.0467	0.0547	0.042	0.0559				
0.1939***	0.3785***	0.2308***	0.1496***	0.1624***	0.4397***	0.523***	0.4398***	0.4855***	0.7419***	1		
0.05	0.0453	0.0553	0.0556	0.0524	0.0391	0.034	0.037	0.0352	0.0167			
0.5311***	0.4771***	0.3303***	0.3153***	0.3952***	0.4406***	0.5658***	0.5833***	0.3075***	0.2262***	0.4186***	1	
0.035	0.0355	0.042	0.0496	0.043	0.0475	0.0263	0.0292	0.0459	0.0514	0.0381		
0.413***	0.3474***	0.3336***	0.4308***	0.351***	0.2736***	0.4499***	0.3298***	0.3356***	0.528***	0.5046***	0.5847***	1
0.0483	0.0403	0.0455	0.0381	0.04	0.0449	0.0398	0.0484	0.0547	0.0287	0.0307	0.0301	

Figura 3.3: Livello di significatività *** 1%, ** 5%, * 10%

generale dell'incertezza, risultato già osservato nel primo step, confermando la sensitività agli *shock* unita ad una persistenza nella correlazione.

3.4 Test di *break* strutturale

Per poter confermare l'ipotesi che il COVID-19 abbia generato un *break* strutturale nelle covolatilità dei titoli analizzati è stato condotto un test per la matrice multivariata delle varianze e covarianze (Aue *et al.*, 2009). Per eseguire il test vengono sfruttate le matrici di covolatilità \mathbf{H}_t risultanti dalla stima del DCC *post-covid* e da un modello DCC sulla totalità del campione, le cui stime non vengono riportate per una questione di semplicità di esposizione e perchè il fine ultimo di questa stima è quello di ottenere la matrice \mathbf{H}_t in assenza di *break*, da confrontare appunto con la matrice risultante dall'uso del *break*.

La struttura del test è la seguente

$$S_j = \frac{j}{\sqrt{T}} \left(\frac{1}{j} \sum_{t=1}^j \text{vech}(\mathbf{H}_t \mathbf{H}_t') - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{vech}(\mathbf{H}_t \mathbf{H}_t') \right) \quad (3.4)$$

dove $1 \leq j \leq T$, j è l'osservazione dove abbiamo inserito il *break*, T l'ampiezza campionaria, *vech* è l'operatore che costruisce un vettore disponendo in una colonna tutti gli elementi non ripetuti delle colonne della matrice simmetrica¹

\mathbf{H}_t e $\frac{j}{T}$ è un fattore di standardizzazione. L'ipotesi nulla del test indica che nessun *break* strutturale è avvenuto in prossimità dell'osservazione j -esima, di conseguenza se i risultati visti fin'ora risultano validi, ci aspettiamo di rifiutare l'ipotesi nulla.

Per campioni di numerosità dove $T \geq 500$, la statistica test si distribuisce asintoticamente come una normale standardizzata, di conseguenza confronteremo il risultato del test per un intervallo di confidenza al 95% con valore critico 1.64. Dal momento in cui il test ci restituisce come valore $S_j = 175.74$ possiamo, ampiamente, rifiutare l'ipotesi nulla, confermando l'ipotesi iniziale per la quale il COVID-19 ha determinato un cambiamento strutturale nelle correlazioni, implicando dunque un aumento della volatilità per questi mercati.

Alla luce dei risultati ottenuti, l'ipotesi secondo la quale i mercati afferenti alle energie rinnovabili siano stati influenzati dalla pandemia da COVID-19 e dalle spinte normative a livello internazionale, può essere confermata. Il

¹Ad esempio, si ipotizzi $H_t = \begin{bmatrix} h_{1,t} & \sqrt{h_{12,t}} & \sqrt{h_{13,t}} \\ \sqrt{h_{12,t}} & h_{2,t} & \sqrt{h_{23,t}} \\ \sqrt{h_{13,t}} & \sqrt{h_{23,t}} & h_{3,t} \end{bmatrix}$ allora $\text{vech}(H_t) = [h_{1,t} \quad \sqrt{h_{12,t}} \quad \sqrt{h_{13,t}} \quad h_{2,t} \quad \sqrt{h_{23,t}} \quad h_{3,t}]'$

grado di interdipendenza di questi mercati ad oggi è aumentato, permettendo lo sviluppo del processo di “decarbonizzazione” anche nei mercati finanziari; questo consente di fare un passo in più verso un’economia più sostenibile. Un ulteriore risultato che rafforza questa considerazione è dato dall’uso dei volumi di scambio degli ETF *green* come regressori esogeni, in quanto mostrano un impatto significativo ai fini della stima delle varianze condizionali. Dato che gli ETF replicano l’andamento di un intero mercato, il fatto che i volumi di quest’ultimi siano in grado di spiegare, in parte, la volatilità di un titolo *green*, ci portano a desumere che questi mercati sono indubbiamente connessi tra di loro.

Tale risultato innovativo può essere utilizzato dagli investitori nelle scelte di portafoglio di breve termine per avere informazione aggiuntiva, atta a modellare modelli previsionali più efficienti.

Come ultimo elemento di analisi, in Appendice C, sono stati riportati i grafici relativi ad un VaR (Value-at-Risk) con un livello di significatività del 95%. Dato che il lavoro non si è concentrato sulla definizione di un portafoglio ottimo, lo scopo di queste rappresentazioni è quello di dimostrare la bontà previsiva dei modelli, sia prima dello scoppio della pandemia che dopo.

Dai grafici possiamo osservare che i rendimenti dei titoli rientrano nell’intervallo di confidenza che abbiamo assegnato e, anche in presenza di forti perturbazioni, la volatilità stimata risulta abbastanza precisa. Non possiamo affermare con certezza che portafogli interamente decarbonizzati siano sicuri, tuttavia è piuttosto probabile che non siano associabili a grosse perdite, costituendo dunque un’opportunità per gli investitori che vogliono possedere portafogli più sostenibili.

Capitolo 4

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro è studiare la decarbonizzazione dei mercati per capire l'evoluzione del mercato *green* negli ultimi anni. Inoltre abbiamo cercato di capire se la pandemia da COVID-19 ha accelerato lo sviluppo di questi mercati.

Da un'analisi empirica effettuata sulle serie storiche di società operanti nel mercato delle energie alternative e del *green* sono emersi risultati piuttosto interessanti.

In prima battuta è stato osservato un effetto significativo dei volumi di scambio degli ETF iShares Global Clean Energy e iShares MSCI ACWI Low Carbon Target sui rendimenti delle serie. Questo risultato è piuttosto interessante, sia perché potrebbe contribuire a migliorare i modelli previsionali per le scelte di portafoglio, sia perché mostra quanto i mercati delle energie alternative risultino connessi, non soltanto tra mercati della stessa tipologia, ma anche con mercati completamente differenti, in quanto l'iShares MSCI ACWI Low Carbon Target non contiene al suo interno titoli di imprese *clean*.

Questo ci porta a concludere che effettivamente il mercato ha cominciato a recepire la necessità della transizione energetica e si sta progressivamente decarbonizzando. Infatti, la crescente necessità di una regolamentazione ad hoc, ha portato le istituzioni internazionali a vagliare l'imposizione di regole volte principalmente al contenimento delle emissioni di CO₂.

Attualmente il fabbisogno energetico mondiale viene per la maggior parte soddisfatto dall'utilizzo dei combustibili fossili, ma la crescita delle energie alternative è evidente agli occhi di tutti. Ciò rende possibile pensare che nei prossimi anni arriveranno a coprire una buona percentuale di questo fabbisogno.

L'altro risultato importante che abbiamo ottenuto, è stato poter confermare che la pandemia da COVID-19 abbia dato una spinta notevole alla transizione verso un'economia più sostenibile, in quanto durante gli ultimi anni le notizie sui cambiamenti climatici hanno avuto una diffusione molto ampia. Questo ha contribuito a generare una sorta di "coscienza sociale" circa la necessità di cambiare il proprio stile di vita. Di conseguenza anche gli investitori hanno visto nelle energie rinnovabili un'opportunità per contribuire al processo di decarbonizzazione. È anche vero che la pandemia ha contribuito a creare turbolenze sui mercati, ma questo è un aspetto che probabilmente tenderà a svanire nel tempo.

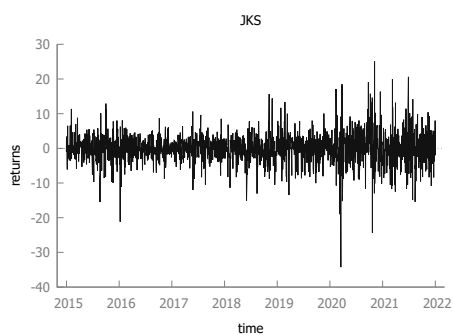
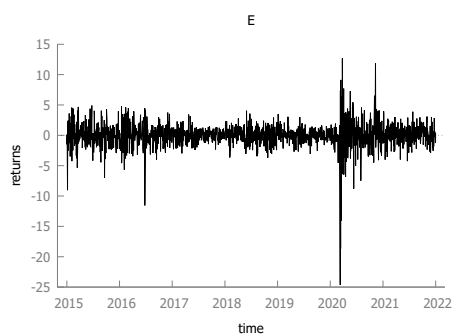
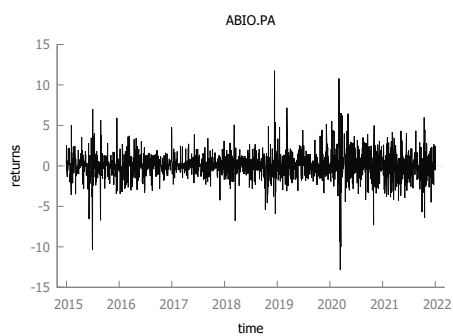
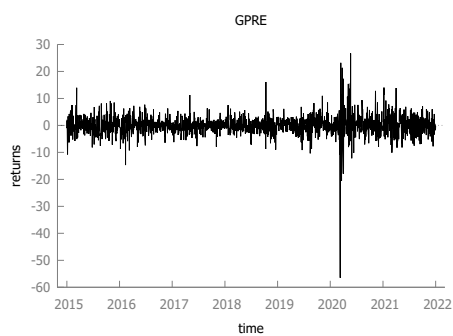
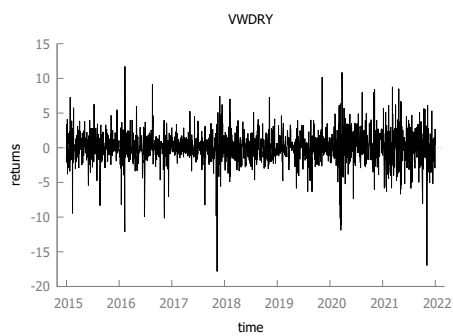
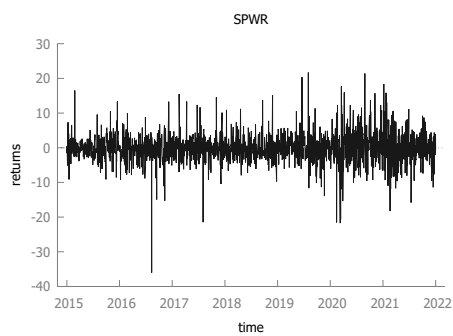
Nonostante ciò i mercati delle energie rinnovabili si sono mostrati discretamente stabili, in quanto, benché la persistenza della volatilità e la sensibilità agli *shock* siano aumentate, tale aumento non è tale da generare eccessive preoccupazioni.

Portare avanti studi più approfonditi sulla decarbonizzazione dei mercati

potrebbe essere interessante e al contempo utile, in quanto permetterebbero agli investitori la costruzione di portafogli alternativi, che da un lato possano fornire buoni rendimenti e dall'altro possano favorire il raggiungimento di un sistema economico sostenibile.

Appendice A

Grafici dei rendimenti



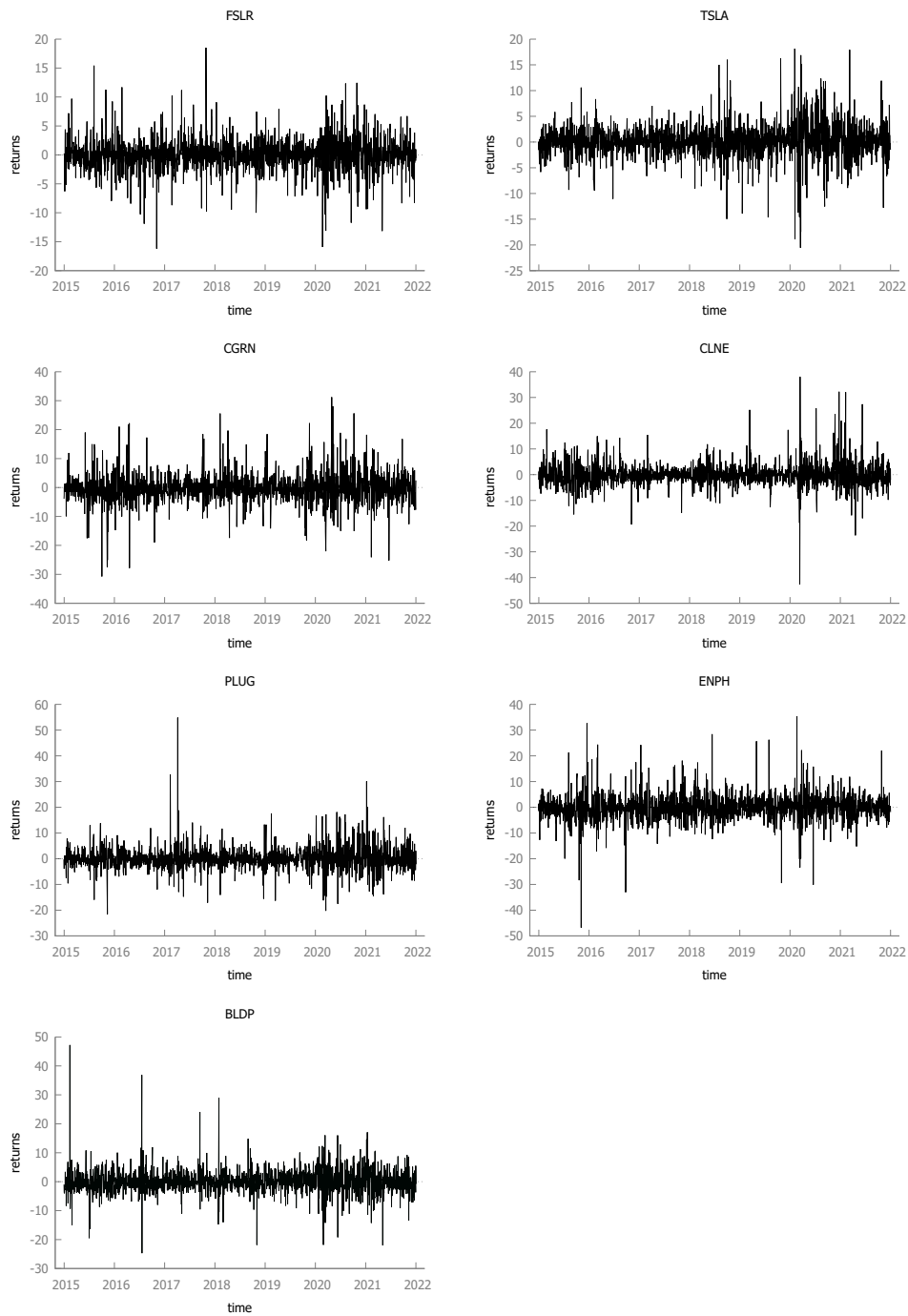


Figura A.1

Appendice B

Modelli e specifiche

	pre-covid				post-covid			
	LB(6)	<i>p</i> -value	ADF(20)	<i>p</i> -value	LB(6)	<i>p</i> -value	ADF(20)	<i>p</i> -value
SPWR	5.0108	0.5424	-14.8467	0.0000	7.0122	0.3197	-4.5662	0.0001
VWDRY	4.3378	0.6311	-9.9360	0.0000	7.6753	0.2629	-6.3701	0.0000
GPPE	5.9119	0.4331	-3.4340	0.0000	2.8433	0.8282	-4.7760	0.0000
ABIO.PA	7.7596	0.2562	-9.9783	0.0000	9.5989	0.1426	-5.3380	0.0000
E	1.6821	0.9465	-3.8473	0.0002	5.6300	0.4659	-4.4077	0.0021
JKS	7.9973	0.2383	-7.8037	0.0000	4.8960	0.5572	-6.6286	0.0000
FSLR	9.8142	0.1327	-20.7585	0.0000	11.302	0.0795	-6.4059	0.0000
TSLA	3.2112	0.7819	-12.9480	0.0000	5.7280	0.4543	-4.0919	0.0064
CGRN	3.3657	0.7617	-10.6470	0.0000	16.494	0.0113	-5.7594	0.0000
CLNE	4.8432	0.5641	-9.6951	0.0000	11.3579	0.0779	-8.7970	0.0000
PLUG	4.4860	0.6112	-5.9209	0.0000	10.4024	0.1087	-6.9040	0.0000
ENPH	7.6344	0.2661	-8.5353	0.0000	4.927	0.5532	-4.2241	0.0006
BLDP	5.3238	0.5030	-9.9267	0.0000	4.5347	0.6047	-4.7376	0.0000

Tabella B.1: Test di autocorrelazione per i residui standardizzati e test di stazionarietà per le varianze condizionali dei GARCH univariati

	μ	d_1	ω	$ICLN_v$	$CRBN_v$	α	γ	β	δ
pre-covid									
SPWR (NARCH(1, 1))	-0.1542*** 0.0019		5.30426*** 0.9088	1.8e-8 4.7e-8	-1.8e-7 5.9e-7	0.0785*** 0.0116		0.5348*** 0.0688	0.0301 0.0902
VWDY (TARCH(1, 1))	0.0544 0.0527		0.7093*** 0.1239	-6.7e-8 8e-8	1e-7 6.9e-7	0.1599*** 0.0185	0.324*** 0.0729	0.7132*** 0.0414	
GPPE (TARCH(1, 1))	-0.0749 0.071		0.1453*** 0.0328	8.7e-8* 5e-8	-2.2e-6*** 6.5e-7	0.0277*** 0.0051	1.2781*** 0.3124	0.9632*** 0.0059	
ABIO.PA (TARCH(1, 1))	0.0229 0.0363		0.2805*** 0.0378	1.8e-7*** 6.2e-8	9.1e-7* 5.2e-7	0.1586*** 0.0174	0.3863*** 0.0653	0.7388*** 0.0281	
E (TARCH(1, 1))	-0.0148 0.0338		0.0364*** 0.0105	-2.9e-8 1.8e-8	-2.7e-7 1.8e-7	0.0627*** 0.0076	0.431*** 0.0855	0.9377*** 0.0084	
JKS (GARCH(1, 1))	-0.0202 0.0969		0.8038*** 0.2006	3.9e-7 4.6e-7	-2.7e-6 3.2e-6	0.0684*** 0.0117		0.8684*** 0.0205	
FSLR (TARCH(1, 1))	0.0027 0.0726		4.5451*** 0.518	-8.5e-7*** 2.8e-7	1e-5*** 2.9e-6	0.2117*** 0.0243	-0.2947*** 0.0884	0.1675** 0.0807	
TSLA (NARCH(1, 1))	0.0762 0.0728	1.785** 0.8014	4.0997*** 1.2978	-2.5e-6 2.3e-6	-4.2e-6 3.3e-6	0.0169*** 0.01643		0.453*** 0.1381	4.7119*** 1.2967
CGRN (TS-GARCH(1, 1))	-0.3931*** 0.0975		4.1037*** 0.4206	-1.9e-6*** 5.3e-7	3.9e-5*** 8.2e-6	0.2682*** 0.0189		0.6137*** 0.0253	
CLNE (TARCH(1, 1))	-0.1251 0.0913		3.1098*** 0.4175	-1.4e-6*** 3e-7	-1.4e-6 2.2e-6	0.1381*** 0.0169	-0.3487*** 0.0932	0.6817*** 0.0384	
PLUG (GARCH(1, 1))	0.0346 0.0813		0.08 0.0541	-3.7e-7** 1.7e-7	1.2e-5*** 3.2e-6	0.0682*** 0.0045		0.9309*** 0.0033	
ENPH (NARCH(1, 1))	0.0756 0.0475		4.5374*** 0.5848	-5.4e-7** 2.5e-7	-5.5e-6* 3e-6	0.1286*** 0.0162		0.7423*** 0.0267	0.4965*** 0.1516
BLDP (NARCH(1, 1))	0.0014 0.0145		1.5341*** 0.1624	-2.8e-7* 1.5e-7	-1.9e-6 -2.8e-7	0.1308*** 0.0092		0.8051*** 0.0138	0.3859*** 0.1105
post-covid									
SPWR (TS-GARCH(1, 1))	0.1806 0.2177		3.7259** 1.4826	1.50e-7*** 4.90e-8	-8.52e-6 9.37e-6	0.1427*** 0.0387		0.7482*** 0.0728	
VWDY (TS-GARCH(1, 1))	0.0863 0.1192		0.7185** 0.299	5.6e-8*** 1.8e-8	1.5e-05*** 4.2e-6	0.0896*** 0.0276		0.7829*** 0.0635	
GPPE (GARCH(1, 1))	0.3606** 0.1781	-46.2182*** 2.0357	1.7890** 0.7175	9.9e-08 7.0e-8	-6.3e-6 1.4e-5	0.18*** 0.0396		0.7218*** 0.0559	
ABIO.PA (GJR(1, 1))	0.0533 0.0964		0.4785** 0.2263	-2.2e-9 1.9e-8	-1.6e-6 2e-6	0.0992*** 0.0284	0.2589** 0.1269	0.796*** 0.0623	
E (GARCH(1, 1))	0.0807 0.0877	-18.5938*** 1.2387	0.1805** 0.0839	-1.7e-8** 7e-9	1.1e-6 1.7e-6	0.1071*** 0.0143		0.87*** 0.0188	
JKS (GARCH(1, 1))	0.1362 0.2536		4.6412** 1.8829	-5.1e-8 1.4e-7	-3.1e-5** 1.5e-5	0.1353*** 0.041		0.7636*** 0.07208	
FSLR (TS-GARCH(1, 1))	0.1026 0.1515		1.135** 0.4987	2.9e-8** 1.3e-8	1.1e-5** 5.3e-6	0.10*** 0.0369		0.80*** 0.0683	
TSLA (GARCH(1, 1))	0.3263** 0.1535		0.6337*** 0.2293	4.8e-8 3.9e-8	-1.05e-5*** 2.1e-6	0.16*** 0.0305		0.8168*** 0.16	
CGRN (GARCH(1, 1))	-0.0807 0.2526		7.4854*** 1.5655	-2.1e-8 1.4e-7	-3.6e-5*** 9.04e-6	0.1473*** 0.03		0.6779*** 0.0432	
CLNE (EGARCH(1, 1))	0.0082 0.2091	-16.0659*** 2.2743	0.2248** 0.1052	1.8e-8*** 6.6e-9	1.1e-6 1.01e-6	0.6252*** 0.0623	0.1435*** 0.0422	0.7847*** 0.034	
PLUG (GARCH(1, 1))	0.3827 0.2711		7.594*** 2.4772	7.2e-7*** 1.9e-7	-2.2e-5 3.4e-5	0.1686*** 0.0562		0.5281*** 0.1234	
ENPH (EGARCH(1, 1))	0.2815 0.2062		0.9867*** 0.2175	3.4e-9 7.9e-9	2.3e-6*** 6.1e-7	0.0386 0.0671	-0.2272*** 0.0432	0.712*** 0.0668	
BLDP (GARCH(1, 1))	0.0513 0.2093		6.9*** 1.6845	3.5e-7** 1.7e-7	-2.6e-5 2e-5	0.1784*** 0.0447		0.5026*** 0.0925	

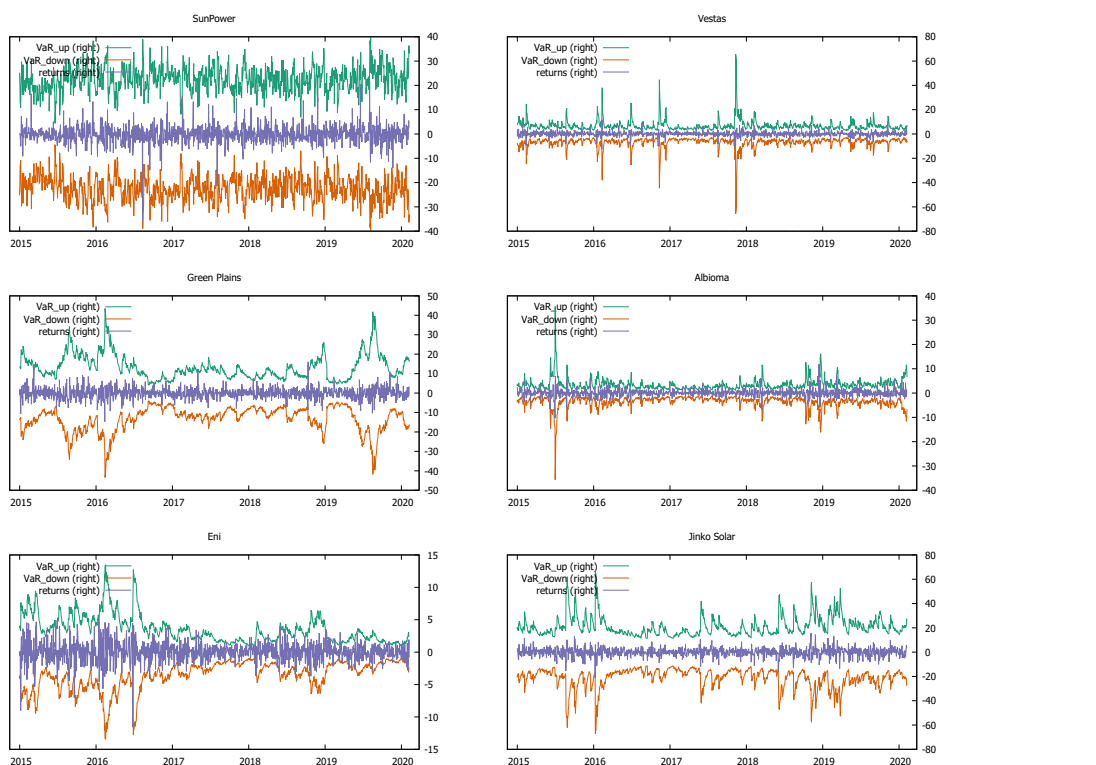
Tabella B.2: Stime DCC (1° step)

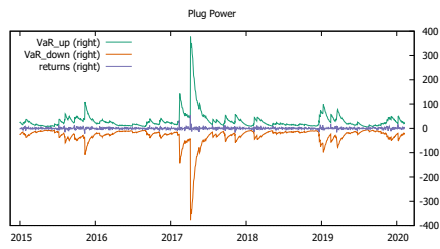
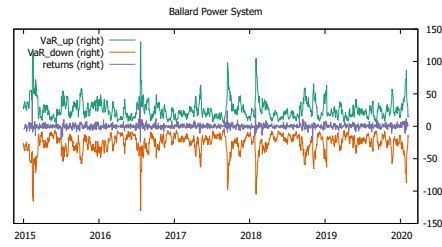
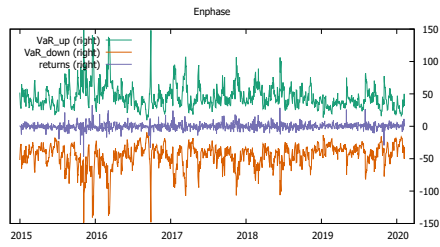
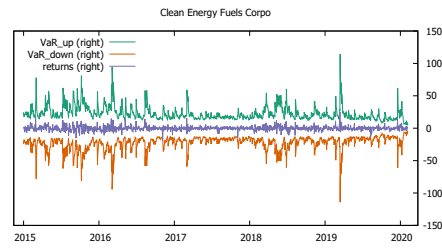
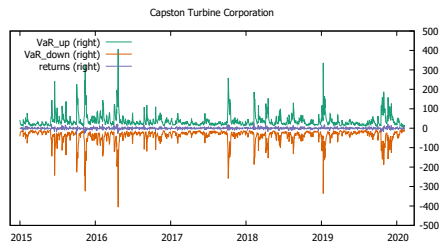
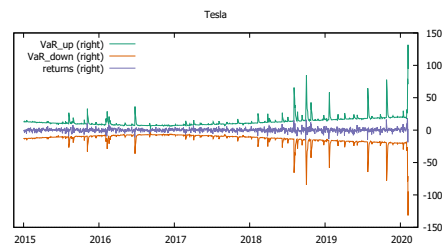
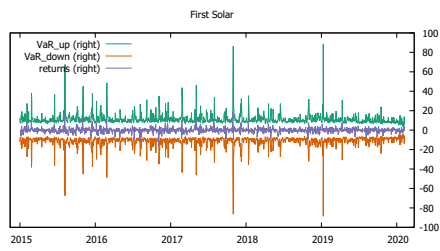
- GARCH(p, q) con regressori in varianza, $h_t = \omega + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j}$
- TS-GARCH(p, q) con regressori in varianza, $h_t^{1/2} = \omega + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j}^{1/2}$
- GJR(p, q) con regressori in varianza, $h_t = \omega + \sum_{i=1}^q (\alpha_i \varepsilon_{t-i}^2 + \gamma \varepsilon_{t-i}) + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j}$
- TARCH(p, q) con regressori in varianza, $h_t^{1/2} = \omega + \sum_{i=1}^q [\alpha_i |\varepsilon_{t-i}| + \gamma_i 1(\varepsilon_{t-i} < 0)] + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j}^{1/2}$
- NARCH(p, q) con regressori in varianza, $h_t^\delta = \omega + \sum_{i=1}^q \alpha_i (|\varepsilon_{t-i} + \gamma_i \varepsilon_{t-i}|)^\delta + \sum_{j=1}^p \beta_j h_{t-j}^\delta$
- EGARCH(p, q) con regressori in varianza, $\log(h_t) = \omega + \sum_{i=1}^q \alpha_i g(u_{t-i}) + \sum_{j=1}^p \beta_j \log(h_{t-j})$

Appendice C

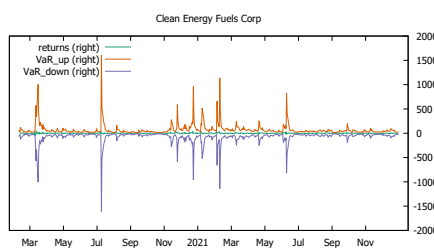
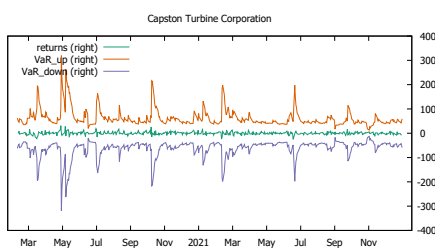
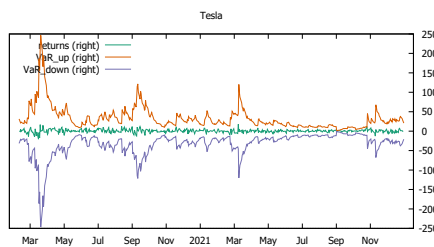
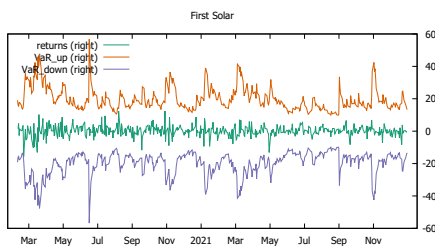
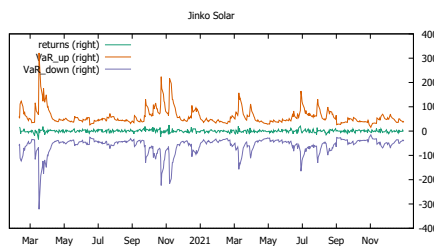
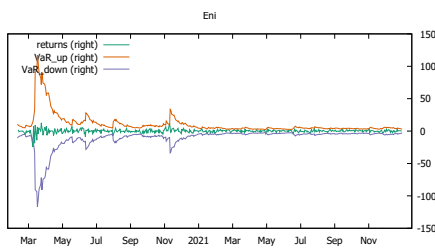
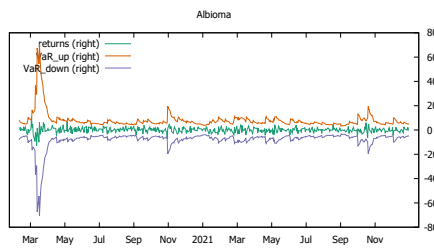
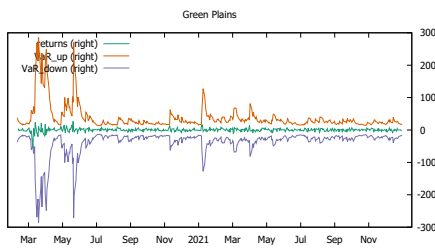
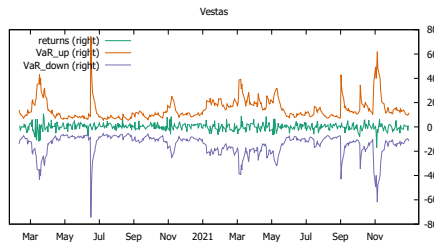
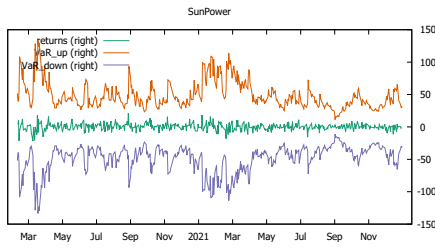
Rendimenti e volatilità stimate

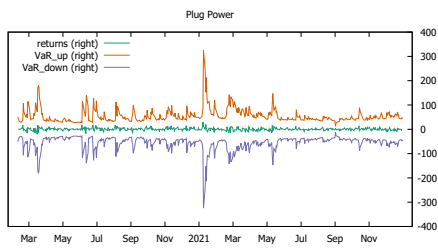
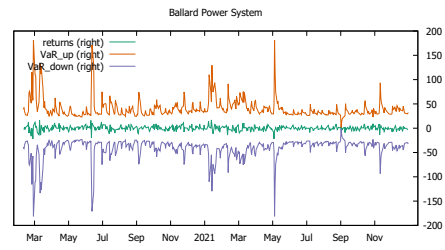
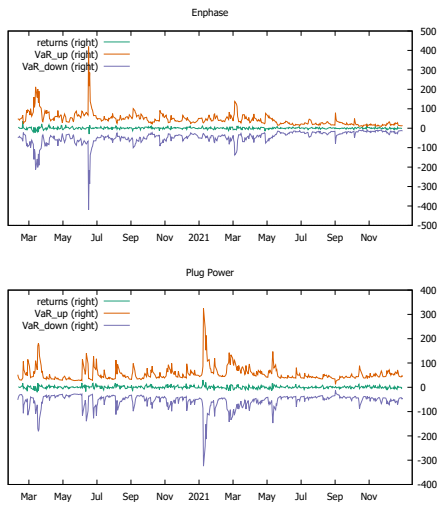
C.1 Pre-covid





C.2 Post-covid





Bibliografia

AUE, A., S. HÖRMANN, L. HORVÁTH AND M. REIMHERR (2009), “Break detection in the covariance structure of multivariate time series models”, *The Annals of Statistics*, 37(6B), pp. 4046–4087.

AYRES, R. U. AND A. V. KNEESE (1969), “Production, consumption, and externalities”, *The American Economic Review*, 59(3), pp. 282–297.

BINA, O. (2013), “The green economy and sustainable development: an uneasy balance?”, *Environment and Planning C: Government and Policy*, 31(6), pp. 1023–1047.

BLACK, F. (1976), “Studies of stock market volatility changes”, *1976 Proceedings of the American statistical association business and economic statistics section*.

BOLLERSLEV, T. (1990), “Modelling the coherence in short-run nominal exchange rates: a multivariate generalized ARCH model”, *The review of economics and statistics*, pp. 498–505.

BONDIA, R., S. GHOSH AND K. KANJILAL (2016), “International crude oil prices and the stock prices of clean energy and technology companies: Evi-

- dence from non-linear cointegration tests with unknown structural breaks”, *Energy*, 101, pp. 558–565.
- BOULDING, K. E. (1966), “The economics of the coming spaceship earth”, *New York*.
- BRIERE, M. AND S. RAMELLI (2021), “Green Sentiment, Stock Returns, and Corporate Behavior”, *Available at SSRN 3850923*.
- CANCILA, E., F. ORECCHINI AND F. ZECCA (2011), “Oltre il Pil Nuovi indicatori di benessere e sostenibilità dello sviluppo”, .
- CAPORIN, M., R. J. LUCCHETTI AND G. PALOMBA (2020), “Analytical gradients of dynamic conditional correlation models”, *Journal of Risk and Financial Management*, 13(3), p. 49.
- CARATÙ, F., M. MAZZANTI AND F. NICOLLI (2016), “Emissioni di gas serra, brevetti ambientali ed effetti di spillover nelle province italiane”, *Argomenti*, 5, pp. 57–76.
- COMMISSIONE EUROPEA, C. E. (2021), “REGOLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO che istituisce il quadro per il conseguimento della neutralità climatica e che modifica il regolamento (CE) n. 401/2009 e il regolamento (UE) 2018/1999 (“Normativa europea sul clima”)", <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-27-2021-INIT/it/pdf>.
- DALY, H. E. (1990), “Sustainable development: from concept and theory to operational principles”, *Population and development review*, 16, pp. 25–43.

- DASGUPTA, P. S. AND G. M. HEAL (1979), *Economic theory and exhaustible resources*, Cambridge University Press.
- DIETZ, T. AND E. A. ROSA (1997), “Effects of population and affluence on CO2 emissions”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(1), pp. 175–179.
- DU, K., P. LI AND Z. YAN (2019), “Do green technology innovations contribute to carbon dioxide emission reduction? Empirical evidence from patent data”, *Technological Forecasting and Social Change*, 146, pp. 297–303.
- DUTTA, A. (2017), “Oil price uncertainty and clean energy stock returns: New evidence from crude oil volatility index”, *Journal of Cleaner Production*, 164, pp. 1157–1166.
- EHRlich, P. R. AND J. P. HOLDREN (1971), “Impact of population growth”, *Science*, 171(3977), pp. 1212–1217.
- ENGLE, R. F. AND K. SHEPPARD (2001), “Theoretical and empirical properties of dynamic conditional correlation multivariate GARCH”, .
- EUROPEA, U. (2008), “Direttiva 2008/98/Ce del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive”, .
- FAN, J. AND Q. YAO (2005), “Spline methods”, *Nonlinear time series: nonparametric and parametric methods*. New York: Springer, p. 247.
- FERRARI, K., R. GAMBERINI AND B. RIMINI (2016), “The waste hierarchy: A strategic, tactical and operational approach for developing coun-

- tries. the case study of Mozambique”, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 11(5), pp. 759–770.
- FRITZ, M. (2014), “Green Infrastructure-Enhancing Europe’s Natural Capital”, *Budapest, Hungary: The European Commission, CEEweb Academy*.
- GALLEGATI, M. (2016), *Acrescita*, Giulio Einaudi Editore.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1986), “The entropy law and the economic process in retrospect”, *Eastern Economic Journal*, 12(1), pp. 3–25.
- GIORGI, S., M. LAVAGNA AND A. CAMPIOLI (2017), “Economia circolare, gestione dei rifiuti e life cycle thinking: fondamenti, interpretazioni e analisi dello stato dell’arte”, *Ingegneria dell’Ambiente*, 4(3).
- GLOSTEN, L. R., R. JAGANNATHAN AND D. E. RUNKLE (1993), “On the relation between the expected value and the volatility of the nominal excess return on stocks”, *The journal of finance*, 48(5), pp. 1779–1801.
- GUTÉS, M. C. (1996), “The concept of weak sustainability”, *Ecological economics*, 17(3), pp. 147–156.
- HARTWICK, J. M. (1977), “Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources”, *The american economic review*, 67(5), pp. 972–974.
- HIGGINS, M. L. AND A. K. BERA (1992), “A class of nonlinear ARCH models”, *International Economic Review*, pp. 137–158.

- JONAS, H. (1979), *Il principio responsabilità*, Vol. 468, Giulio Einaudi Editore.
- KARPOFF, J. M. (1987), “The relation between price changes and trading volume: A survey”, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 22(1), pp. 109–126.
- KRAFCIK, J. F. (1988), “Triumph of the lean production system”, *Sloan management review*, 30(1), pp. 41–52.
- KUZNETS, S. (1955), “Economic growth and income inequality”, *The American economic review*, 45(1), pp. 1–28.
- LEWIS, M. A. (2006), “Lean production and sustainable competitive advantage”, *Supply Chains and Total Product Systems: A Reader*, pp. 306–326.
- LJUNG, G. M. AND G. E. BOX (1978), “On a measure of lack of fit in time series models”, *Biometrika*, 65(2), pp. 297–303.
- LOISEAU, E., L. SAIKKU, R. ANTIKAINEN, N. DROSTE, B. HANSJÜRGENS, K. PITKÄNEN, P. LESKINEN, P. KUIKMAN AND M. THOMSEN (2016), “Green economy and related concepts: An overview”, *Journal of cleaner production*, 139, pp. 361–371.
- LV, Z. AND S. LI (2021), “How financial development affects CO2 emissions: a spatial econometric analysis”, *Journal of Environmental Management*, 277, p. 111397.

- MAES, J. AND S. JACOBS (2017), “Nature-based solutions for Europe’s sustainable development”, *Conservation letters*, 10(1), pp. 121–124.
- MALTHUS, T. R. (1809), *An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society*, Vol. 2, J. Johnson, Londra.
- MILL, J. S. (1871), *Principles of political economy: with some of their applications to social philosophy*, Vol. 1, Longmans, Green, Reader, and Dyer.
- NELSON, D. B. (1991), “Conditional heteroskedasticity in asset returns: A new approach”, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 347–370.
- NEPAL, R. AND N. PAIJA (2019), “A multivariate time series analysis of energy consumption, real output and pollutant emissions in a developing economy: New evidence from Nepal”, *Economic Modelling*, 77, pp. 164–173.
- PANAYOTOU, T. *et al.* (1993), “Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development”, Technical report, International Labour Organization.
- PARAMATI, S. R., D. MO AND R. HUANG (2021), “The role of financial deepening and green technology on carbon emissions: evidence from major OECD economies”, *Finance Research Letters*, 41, p. 101794.
- PAREGLIO, S. (2007), *Il valore dell’ambiente*, Vol. 21, Vita e Pensiero.

- PEARCE, D. W. AND G. D. ATKINSON (1993), “Capital theory and the measurement of sustainable development: an indicator of “weak” sustainability”, *Ecological economics*, 8(2), pp. 103–108.
- PERRINGS, C. *et al.* (1987), “Economy and environment”, *Cambridge Books*.
- POLANYI, K. (1944), “The great transformation: the political and economic origins of our time”, *New York: Rinehart*.
- PONTARA PEDERIVA, M. T. (2012), “Assemblea dei vescovi della Comunità europea (Comece): Rio+ 20; il futuro che vogliamo”, *Rivista di teologia morale*, 44(4), pp. 661–665.
- PORTER, M. AND C. VAN DER LINDE (1995), “Green and competitive: ending the stalemate”, *The Dynamics of the eco-efficient economy: environmental regulation and competitive advantage*, 33.
- RICARDO, D. (1815), “An Essay on the Influence of a Low Price of Corn on the Profits of Stock”, *originally published*, pp. 1951–1973.
- ROY, R. (1994), “The evolution of ecodesign”, *Technovation*, 14(6), pp. 363–380.
- SADORSKY, P. (2012), “Correlations and volatility spillovers between oil prices and the stock prices of clean energy and technology companies”, *Energy economics*, 34(1), pp. 248–255.
- SAETTA, S. AND V. CALDARELLI (2020), “Lean production as a tool for green production: the Green Foundry case study”, *Procedia Manufacturing*, 42, pp. 498–502.

SCHWERT, G. W. (1990), "Stock volatility and the crash of 1987", *The review of financial studies*, 3(1), pp. 77–102.

SINGH, R. K., H. R. MURTY, S. K. GUPTA AND A. K. DIKSHIT (2009), "An overview of sustainability assessment methodologies", *Ecological indicators*, 9(2), pp. 189–212.

SMITH, A. (1776), *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations: Volume One*, London: printed for W. Strahan; and T. Cadell, 1776.

SOLOW, R. M. (1974), "Intergenerational equity and exhaustible resources", *The review of economic studies*, 41, pp. 29–45.

TAYLOR, S. J. (1986), *Modelling financial time series*, world scientific.

TUKKER, A. (2004), "Eight types of product–service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet", *Business strategy and the environment*, 13(4), pp. 246–260.

UNEP (2011), "Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication", Technical report, United Nations Environment Programme.

UNFCCC (1997), "Kyoto protocol", *UNFCCC Website. Available online: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php (accessed on 1 January 2011)*.

- UNFCCC (2015), “Paris agreement”, *Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris)*. Retrived December.
- VICTOR, P. A. (1991), “Indicators of sustainable development: some lessons from capital theory”, *Ecological economics*, 4(3), pp. 191–213.
- WACKERNAGEL, M. AND W. E. REES (1997), “Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective”, *Ecological economics*, 20(1), pp. 3–24.
- WALRAS, L. (1896), *Éléments d'économie politique pure, ou, Théorie de la richesse sociale*, F. Rouge.
- WOMACK, J., D. JONES AND D. TOOS (1991), “La macchina che ha cambiato il mondo, Milano, Rizzoli”, *Cerca con Google*.
- ZAKOIAN, J.-M. (1994), “Threshold heteroskedastic models”, *Journal of Economic Dynamics and control*, 18(5), pp. 931–955.
- ZHOU, Y., J. JIANG, B. YE AND B. HOU (2019), “Green spillovers of outward foreign direct investment on home countries: Evidence from China's province-level data”, *Journal of cleaner production*, 215, pp. 829–844.