



# ScuDo

Scuola di Dottorato ~ Doctoral School

WHAT YOU ARE, TAKES YOU FAR

Doctoral dissertation  
Doctoral Program in Civil and Environmental Engineering  
(XXXIII cycle)

## **Networks for change: methodologies to track and address global performances of innovation and sustainability**

by

**Carla Sciarra**

### **Supervisors:**

Prof. Francesco	LAIO,	Supervisor
Prof. Luca	RIDOLFI,	Co-Supervisor
Prof. Guido	CHIAROTTI,	Co-Supervisor

### **Doctoral examination committee:**

Prof. Enrico BERTUZZO, Università Ca' Foscari Venezia  
Dr. Tommaso CIARLI, University of Sussex  
Prof. Silvana DALMAZZONE, Università degli Studi di Torino  
Prof. Fabio FAGNANI, Politecnico di Torino  
Dr. Luz FERNANDEZ GARCIA, United Nations Country Office Perú  
Dr. Emanuele PUGLIESE, EU Joint Research Centre Sevilla

---

**Politecnico di Torino**

**Spring 2021**

---

# Abstract

Network science is a mathematical theory that aims at disentangling the complex relationships among the entities in a system. Any system in which connections are present can be interpreted as a *network*: a group of friends, airplane transportation, or river basins. Graphically, the network representation constitutes nodes (i.e., the entities) and links (i.e., the connections). Mathematically, a network is described through a matrix. The clarity of its representation and its versatility have let network science rise in popularity across many fields, ranging from sociology to epidemiology, from economics to engineering, from neuroscience to hydrology. For example, network science has helped us understand the power of 'super-spreaders' during the Covid-19 pandemic. But what if its own popularity would compromise the power of such an important tool?

The increasing popularity of network theory also generated several debates about its methodologies and their contexts of applications. Among the most discussed methodologies figure the ones for measuring centrality. Centrality is the feature of being relevant in a network. Many conceptualizations of centrality metrics have been proposed over time. Nevertheless, all the methodologies depend on the particular aims and applications for which they have been idealized. For example, the degree and eigenvector centrality have been introduced to study power and hierarchies in social networks. However, these metrics do not account for the feature of topological distance among the nodes, which other measures as the closeness and betweenness centrality do, instead.

The heterogeneity in the results offered by different measures of centrality is a recurrent problem in the literature. In fact, centrality is often referred to as an instrument to rank the entities in the system and, the differences among the available methodologies unavoidably create differences in the obtained rankings even within the same application. This is the case, for example, of the Economic Complexity theory, a network framework for export data through which explore countries' performances in innovation. Another relevant example of the application of network science frames within the field of sustainable development. The theory has been shown to help unfold the synergies and trade-offs among its sectors. Nevertheless, such a tool's potential has not been fully exploited to rank countries for their status' in achieving sustainable development.

---

Against this background, in this thesis, we address the need for a common definition in the field of centrality measures by approaching the problem in three manners: firstly, in its general mathematical description; secondly, its application to the area of economic complexity; finally, we introduce a neat centrality framework within the context of sustainable development aimed at measuring countries' status concerning the United Nations' Agenda 2030.

Therefore, this thesis contributes to multidisciplinary literature in network science, economics, innovation, and sustainable development. We introduce a statistical perspective that uniquely defines centrality metrics and compares the information they provide about the network topology. Within this statistical framework, we also introduce multi-dimensional centrality metrics to account for the network's many structural features. Thanks to this multi-dimensional setting on centrality metrics, we reconcile the most notorious economic complexity metrics, i.e., the *Method of Reflections* and the *Fitness and Complexity* algorithm. Therefore, we present the *Generalized Economic comPlexity* – GENEPEY – index: a unique, data-driven, multi-dimensional index of innovation framed within economic complexity. The GENEPEY index can track the trajectories of growth of countries without the need to add exogenous information about countries' economies (as, e.g., e Gross Domestic Product). Finally, we introduce the network representation of the Agenda 2030 of sustainable development and, in particular, the countries –Sustainable Development Goals system. Thanks to this representation, we also introduce the use of centrality metrics, especially the GENEPEY ones, to shed new light on countries' efficacy in sustainable development.

Hence, our results contribute to defining methodologies to track and address global performances of innovation and sustainability.

---

# Contenuto

La teoria delle reti è una branca della matematica che ha come obiettivo quello di indagare e spiegare le relazioni complesse tra gli enti in un sistema. Qualsiasi sistema in cui gli enti sono collegati tra di loro può essere rappresentato e interpretato sotto forma di *rete*: le relazioni in un gruppo di amici, le rotte che formano il trasporto aereo o l'idrografia di un bacino fluviale. Dal punto di vista grafico, una rete è descritta da nodi (gli enti), collegati tramite linee che ne descrivono il tipo di connessione tra di essi. Dal punto di vista matematico, una rete è descritta per mezzo di una matrice. La chiarezza della rappresentazione e il suo essere adattabile a diversi contesti spiegano perchè tale teoria sia divenuta uno strumento matematico sempre più presente nella letteratura scientifica, con applicazioni che vanno dalle scienze umane all'epidemiologia, dall'ingegneria alla biologia. Ad esempio, grazie all'utilizzo della teoria delle reti è stato definito il ruolo dei 'super-contaminatori' nella diffusione del virus che ha provocato la pandemia Covid-19.

La crescente popolarità di questa branca della matematica ha generato però anche diversi dibattiti scientifici per l'utilizzo delle sue metodologie e dei suoi contesti di applicazione. Tra le più dibattute metodologie in teoria delle reti vi sono quelle di misura della centralità. La centralità è la caratteristica che definisce l'importanza di un ente all'interno della rete e la sua definizione non è univoca, in quanto dipendente dagli scopi per i quali ciascuna specifica misura di centralità è stata ideata. Per esempio, le centralità secondo il grado o secondo l'autovettore sono state introdotte in letteratura per studiare le gerarchie e le scale di potere nei sistemi sociali. Queste due metriche però non tengono conto della distanza topologica tra i nodi, di cui invece tengono conto le misure di centralità dette *closeness* e *betweenness*.

L'eterogeneità dei risultati generati da diverse misure di centralità è un problema ricorrente nella letteratura scientifica. Le misure di centralità vengono spesso utilizzate per stilare delle classifiche di importanza degli enti nel sistema, e l'uso di diverse metriche di centralità genera differenze a livello di risultati anche nella stessa applicazione. Questo è il caso dell'Economia Complessa, un campo in cui la teoria delle reti è usata per rappresentare i dati riguardanti il commercio internazionale e ricavare informazioni circa la capacità di innovazione delle nazioni.

---

Un altro esempio rilevante di applicazione di tale teoria è quello dello sviluppo sostenibile, campo in cui si è rivelata utile per svelare e comprendere le sinergie e i compromessi tra i vari settori che lo compongono. La teoria però non è mai stata sfruttata per stilare una classifica dei paesi per il loro status in sviluppo sostenibile.

Alla luce di tutto ciò, questa tesi ha l'obiettivo di contribuire alla definizione matematica delle metodologie di centralità in teoria delle reti, soprattutto per quanto riguarda le sue applicazioni nel campo dell'economia complessa e dello sviluppo sostenibile, più specificatamente nell'ambito dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite.

Il primo risultato di tale contributo consiste nell'introduzione di una prospettiva statistica sulle misure di centralità dei nodi in una rete. Tale prospettiva consente di confrontare diverse misure a seconda delle informazioni statistiche che queste forniscono sulla rete. Grazie a questa interpretazione statistica, si introducono indicatori multi-dimensionali di centralità come soluzione univoca al problema di definizione della centralità. Tale prospettiva costituisce anche il punto di partenza per l'armonizzazione delle misure di centralità oggi usate nel campo dell'economia complessa. Infatti, grazie alla definizione degli indicatori multi-dimensionali viene introdotto l'indice GENEPY, *GENERALIZED Economic comPlexity index*, un indicatore che unisce le misure di centralità ottenute dal *Metodo delle Riflessioni* e dall'algoritmo *Fitness and Complexity* e che univocamente definisce lo status di innovazione dei paesi. L'indice GENEPY, misurando l'acquisizione di capacità tramite le similitudini nelle tipologie di prodotti esportati dalle nazioni, è in grado di tracciare le traiettorie dei paesi lungo il loro percorso di crescita economica e di innovazione senza dover ricorrere ad informazioni esogene riguardanti l'economia delle nazioni (p.es., il prodotto interno lordo). L'ultimo contributo offerto da questo lavoro di tesi riguarda l'introduzione delle metriche di centralità nell'ambito dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite. In questa tesi viene infatti presentata l'interpretazione dell'Agenda 2030 come un sistema complesso di paesi e degli Obiettivi dello Sviluppo Sostenibile (OSS). Questa interpretazione permette di utilizzare le metriche di centralità e del GENEPY al fine di studiare l'efficacia dei paesi nel loro percorso verso la sostenibilità.

Riassumendo, questo lavoro di tesi propone un insieme di metodologie per tracciare e indirizzare le performance globali di innovazione e sostenibilità.