

Digital Twin per Sistemi Economici Regionali: Metodologie innovative per l'analisi territoriale nell'era della complessità

Autori:

Carlo Mancosu¹

Head of Innovation, Bflows Srl

Roberto Spano¹

Chairman, Bflows Srl

Michelangelo Puliga²

Senior Researcher, Università Ca' Foscari Venezia, Dipartimento di Economia

Cecilia Moretti^{3,4}

Head of Innovation, Gepafin SPA; Anfir

¹ Bflows Srl, Via Example 123, Milano, Italia

² Università Ca' Foscari Venezia, Dipartimento di Economia,
Cannaregio 873, 30121 Venezia, Italia

³ Gepafin SPA, Via Example 456, Roma, Italia

⁴ Anfir - Associazione Nazionale Factoring e Industria Finanziaria, Roma, Italia

Abstract

La rappresentazione dei sistemi economici contemporanei si confronta con una contraddizione strutturale tra la dinamicità dei fenomeni economici reali e la staticità degli strumenti analitici tradizionali. Questo paper presenta una metodologia innovativa basata sui digital twin per l'analisi economica territoriale, utilizzando l'Umbria come caso di studio paradigmatico. Attraverso l'integrazione di dati transazionali anonimizzati, tecniche di machine learning e modellazione a reti complesse, viene proposto un framework operativo per la costruzione di gemelli digitali regionali capaci di rappresentare e simulare dinamiche economiche in tempo reale.

Keywords: Digital Twin, Sistemi Economici Regionali, Reti Complesse, Analisi Territoriale, CTGAN

Indice

I. La crisi della rappresentazione economica nell'era della complessità	1
II. Dall'ontologia delle relazioni al paradigma computazionale	5
III. Architettura metodologica del Digital Twin dell'ecosistema economico umbro	8
IV. Implicazioni per la governance economica territoriale	9
V. Discussione Critica e Prospettive	11
VI. Bibliografia	13

I. La crisi della rappresentazione economica nell'era della complessità

La rappresentazione dei sistemi economici contemporanei si confronta con una contraddizione strutturale che minaccia l'efficacia stessa degli strumenti analitici tradizionali come supporto alle decisioni in ambito economico. Mentre le dinamiche economiche si svolgono in tempo reale, con flussi finanziari che si propagano attraverso reti di imprese in millisecondi e decisioni di investimento che richiedono risposte immediate a perturbazioni di mercato, gli strumenti di analisi e pianificazione economica operano con ritardi temporali che possono raggiungere i due o tre anni. Questo disallineamento temporale non costituisce meramente un inconveniente tecnico, ma rappresenta una frattura epistemologica che mette in discussione la capacità stessa di governare sistemi economici complessi (Battiston et al., 2016).

Il paradosso si manifesta con particolare evidenza nel contesto della pianificazione economica territoriale. Le amministrazioni regionali e nazionali sono chiamate a prendere decisioni allocative immediate – si pensi alla distribuzione dei fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza o alla gestione di crisi settoriali improvvise – basandosi su rappresentazioni del sistema economico derivate da rilevazioni statistiche che fotografano una realtà ormai superata. Le matrici input-output, che costituiscono ancora oggi lo strumento principale per l'analisi delle interdipendenze settoriali, vengono aggiornate con cadenza quinquennale e si basano su dati che, al momento della pubblicazione, riflettono transazioni economiche vecchie di almeno ventiquattro mesi (Miller & Blair, 2009).

Questa asincronia temporale assume connotazioni particolarmente problematiche nell'attuale contesto di accelerazione tecnologica e trasformazione strutturale dell'economia. La pandemia di COVID-19 ha dimostrato come shock esogeni possano riconfigurare radicalmente le catene del valore e le relazioni intersettoriali in tempi brevissimi, rendendo obsolete rappresentazioni economiche costruite in condizioni di relativa stabilità (Crisciuolo et al., 2021). La transizione ecologica e digitale impone inoltre cambiamenti strutturali che modificano non solo l'intensità ma la natura stessa delle relazioni economiche, introducendo nuovi settori, eliminandone altri e riconfigurando le dipendenze produttive in modi che le metodologie tradizionali faticano a catturare.

Le matrici input-output di derivazione leontieviana, pur rappresentando uno strumento analitico di indubbia rilevanza storica e teoretica, manifestano limiti strutturali sempre più evidenti nel contesto contemporaneo. La loro costruzione si basa su assunzioni di linearità e proporzionalità fissa tra input e output che mal si conciliano con la natura non-lineare e adattiva dei sistemi economici moderni (Acemoglu et al., 2015). L'ipotesi di coefficienti tecnici costanti, centrale nel modello di Leontief, presuppone una stabilità tecnologica e organizzativa che contrasta con l'evidenza empirica di continua innovazione e riconfigurazione dei processi produttivi. Inoltre, la rappresentazione aggregata per settori nasconde l'eterogeneità cruciale delle imprese all'interno di ciascun comparto, impedendo di cogliere come shock idiosincratici a singole imprese sistematicamente rilevanti possano propagarsi attraverso l'intera economia (Gabaix, 2011).

La granularità temporale costituisce un'ulteriore limitazione critica. Le matrici input-output forniscono una rappresentazione statica delle relazioni economiche, una fotografia

istantanea che non cattura le dinamiche temporali, i ritardi di propagazione e le asimmetrie nei tempi di risposta che caratterizzano i sistemi economici reali. Questa staticità impedisce di modellare adeguatamente fenomeni come l'accumulo di vulnerabilità sistemiche, le dinamiche di contagio finanziario o i processi di adattamento e riorganizzazione che seguono perturbazioni economiche.

In questo contesto di impossibilità strutturale da parte degli strumenti tradizionali di rappresentare con modelli statici una realtà dinamica e con alti gradi di complessità e interdipendenza, i digital twin emergono non come un mero aggiornamento tecnologico, ma come una transizione paradigmatica promettente che non mira a sostituirsi alle altre metodologie, bensì a complementarle e a integrarne gli output in un quadro più ampio e complesso. A differenza delle rappresentazioni statiche e aggregate del passato, i gemelli digitali offrono la possibilità di creare repliche virtuali dinamiche e granulari dei sistemi economici, capaci di evolvere in tempo reale attraverso l'assimilazione continua di dati provenienti dal sistema fisico (Grieves & Vickers, 2017). Questa capacità di aggiornamento continuo e di simulazione dinamica rappresenta un salto qualitativo nella nostra capacità di comprendere e governare sistemi economici complessi.

La distinzione fondamentale risiede nella natura bidirezionale della relazione tra modello e realtà. Mentre i modelli tradizionali operano attraverso una logica unidirezionale — dalla raccolta dati alla costruzione del modello alla sua applicazione — i digital twin stabiliscono un dialogo continuo con il sistema rappresentato. I flussi informativi provenienti dal sistema economico reale alimentano costantemente il gemello digitale, che a sua volta può essere utilizzato per testare scenari, simulare interventi e generare scenari possibili, in un processo iterativo di apprendimento e raffinamento (Wright & Davidson, 2020).

L'innovazione metodologica dei digital twin si estende alla loro capacità di integrare fonti di dati eterogenee e di processarle attraverso tecniche di intelligenza artificiale e machine learning. Questo permette di superare la rigidità delle categorie statistiche predefinite e di lasciare che siano i dati stessi a rivelare pattern e relazioni emergenti. La possibilità di generare dati sintetici che preservano le proprietà statistiche dei dati reali, ma non contengono informazioni sensibili, apre inoltre nuove possibilità per l'analisi economica in contesti dove la privacy e la riservatezza commerciale hanno tradizionalmente limitato l'accesso ai dati necessari.

L'Umbria emerge in questo contesto come caso paradigmatico per l'applicazione della metodologia dei digital twin all'analisi economica territoriale. La regione presenta caratteristiche che la rendono un laboratorio ideale per questa sperimentazione metodologica. Con i suoi 851.954 abitanti al 1° gennaio 2025 (Banca d'Italia, 2025) e un prodotto interno lordo di oltre 26 miliardi di euro nel 2023 (ISTAT, 2025), l'Umbria rappresenta una scala dimensionale ottimale: sufficientemente grande da presentare complessità economica significativa, ma abbastanza contenuta da permettere una modellazione computazionalmente trattabile dell'intero sistema economico regionale.

La struttura economica umbra manifesta inoltre una complessità sufficiente a testare la capacità dei digital twin di catturare interdipendenze settoriali sofisticate. Come evidenziato nel rapporto annuale della Banca d'Italia (2025), la compresenza di settori tradizionali come l'agricoltura e l'artigianato, di comparti manifatturieri avanzati come la meccanica di precisione e la farmaceutica, e di un terziario in evoluzione verso servizi ad alto valore aggiunto, genera

un tessuto di relazioni intersettoriali che riflette in miniatura la complessità dell'economia nazionale.

Di particolare rilevanza risulta la presenza del distretto aerospaziale umbro, che costituisce un'eccellenza tecnologica di rilievo internazionale. L'Umbria Aerospace Cluster, fondato nel 2008, è cresciuto dalle sei imprese fondatrici alle attuali 42 aziende associate, con ulteriori quattro in procinto di aderire (Umbria Aerospace Cluster, 2024). Queste realtà raggiungono insieme un fatturato aggregato vicino al miliardo di euro e contano oltre 5.000 dipendenti diretti, con investimenti in ricerca e sviluppo che crescono del 10% annuo. Come sottolineato da Tonti (2024), presidente del cluster, «è l'unico dei 15 distretti regionali costituito interamente da aziende private», elemento che ne fa un caso unico nel panorama italiano e particolarmente interessante per la modellazione di reti di innovazione e trasferimento tecnologico in assenza di intervento pubblico diretto.

La presenza di specializzazioni produttive territorialmente concentrate, come il distretto ceramico di Deruta e il polo meccanico dell'Alta Valle del Tevere, offre l'opportunità di testare la capacità del modello di catturare economie di agglomerazione e spillover di conoscenza. Secondo i dati di Confindustria Umbria (2024), l'associazione rappresenta circa l'80% del valore aggiunto manifatturiero prodotto in regione, evidenziando una concentrazione produttiva che facilita la raccolta di dati rappresentativi del sistema industriale locale.

L'eterogeneità territoriale dell'Umbria costituisce un ulteriore elemento di interesse metodologico. La bipolarità tra le province di Perugia (6.334 km²) e Terni (2.122 km²), con le loro diverse specializzazioni produttive e traiettorie di sviluppo, permette di valutare come i digital twin possano rappresentare simultaneamente dinamiche economiche territorialmente differenziate ma sistemicamente interconnesse. Come sottolineato dal rapporto ANCE Perugia (2024), il settore delle costruzioni ha mostrato dinamiche divergenti tra le due province, con la provincia di Perugia che ha beneficiato maggiormente degli interventi di ricostruzione post-sismica e dei fondi PNRR.

Un elemento di particolare rilevanza per la costruzione di digital twin economici regionali è rappresentato dalle criticità strutturali dell'economia umbra, che secondo la Banca d'Italia (2025) «si manifestano in particolare nella perdurante dinamica negativa della produttività». Questa caratteristica rende l'Umbria un caso di studio privilegiato per testare la capacità dei gemelli digitali di esplorare possibili vincoli strutturali e di simulare interventi di policy volti al loro superamento.

La disponibilità di dati granulari sulle transazioni economiche, seppur anonimizzati e processati per preservare la riservatezza commerciale, rappresenta un asset fondamentale che rende l'Umbria un caso di studio privilegiato. La collaborazione con operatori finanziari e tecnologici che gestiscono una porzione significativa delle transazioni e fatture commerciali nella regione ha permesso di accedere a informazioni sui flussi di pagamento e sugli interscambi economici tra imprese attraverso dati transazionali che, per il contesto italiano, rappresentano una delle prime applicazioni documentate dell'integrazione tra dati di fatturazione elettronica anonimizzati, analisi di network e tecniche di generazione sintetica mediante CTGAN per l'analisi di un sistema economico regionale completo.

Inoltre, come evidenziato nel rapporto della Banca d'Italia (2025), «l'accresciuta instabilità del contesto internazionale e le possibili ricadute legate all'inasprimento delle politiche commerciali tra paesi condizionano le prospettive per l'anno in corso, tenuto anche conto dell'elevata incidenza delle esportazioni umbre verso gli Stati Uniti». Questa esposizione al commercio internazionale, con l'11,6% delle esportazioni dirette verso il mercato statunitense nel triennio 2022-24, rende l'Umbria un caso particolarmente interessante per testare la capacità dei digital twin di modellare shock esterni e di simulare scenari di risposta a perturbazioni del commercio internazionale.

Il distretto aerospaziale, in particolare, offre un banco di prova unico per la modellazione di sistemi ad alta intensità tecnologica e forte integrazione internazionale. La partecipazione delle imprese umbre a programmi con player globali come Airbus, Boeing e Leonardo, nonché il loro contributo alla space economy in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana e l'Agenzia Spaziale Europea (Umbria Aerospace Cluster, 2024), genera flussi di conoscenza e dipendenze tecnologiche che rappresentano una sfida metodologica di primario interesse per i digital twin.

Questa convergenza di fattori — dimensione ottimale, complessità strutturale, eccellenze tecnologiche come il distretto aerospaziale, eterogeneità territoriale, criticità sistemiche identificate e disponibilità di dati — posiziona l'Umbria come caso paradigmatico per esplorare le potenzialità e i limiti dei digital twin nell'analisi economica territoriale. L'esperienza umbra può così fornire indicazioni metodologiche e operative generalizzabili ad altri contesti territoriali, contribuendo a definire standard e best practices per l'applicazione di queste tecnologie innovative alla governance economica regionale.

II. Dall'ontologia delle relazioni al paradigma computazionale

Il paradigma economico dominante del ventesimo secolo si è fondato su quello che possiamo definire atomismo metodologico: la concezione secondo cui i fenomeni economici possano essere compresi attraverso l'analisi di agenti individuali che operano scelte razionali in condizioni di relativo isolamento, le cui interazioni si risolvono in equilibri di mercato determinati dall'aggregazione di comportamenti individuali ottimizzanti. Il modello di Arrow-Debreu (1954), pietra miliare della teoria dell'equilibrio generale, ha fornito la formalizzazione matematica più rigorosa di questa visione, dimostrando l'esistenza di un equilibrio competitivo sotto assunzioni di convessità delle preferenze e degli insiemi di produzione. Questa costruzione teorica, pur rappresentando un risultato di indubbia eleganza formale e importanza storica – valso il premio Nobel ai suoi autori – manifesta crescente inadeguatezza empirica di fronte alla complessità dei sistemi economici contemporanei.

Il superamento dell'atomismo metodologico non rappresenta meramente un'evoluzione tecnica degli strumenti analitici, ma richiede una riconfigurazione ontologica della nostra comprensione dei fenomeni economici. L'economia non può più essere concepita come sommatoria di transazioni bilaterali tra agenti autonomi, ma deve essere compresa come sistema complesso di relazioni costitutive, dove l'identità stessa degli agenti economici emerge dalle loro interconnessioni piuttosto che precederle. Questa transizione paradigmatica trova il suo fondamento teorico nell'ontologia delle relazioni, che sostituisce alla priorità ontologica delle sostanze quella delle relazioni, riconoscendo che le proprietà degli elementi di un sistema sono determinate dalla struttura delle loro interconnessioni tanto quanto, se non più, dalle loro caratteristiche intrinseche (Rovelli, 1996).

L'applicazione di questa prospettiva ontologica all'analisi economica ha trovato nella teoria delle reti finanziarie la sua manifestazione più concreta e operazionalizzabile. Come evidenziato nella letteratura consolidata sul rischio sistemico (Caccioli et al., 2018; Bardoscia et al., 2017), il sistema finanziario globale può essere rappresentato come una rete complessa in cui banche, fondi di investimento e altre istituzioni finanziarie sono interconnesse attraverso legami finanziari visibili e invisibili. Questa prospettiva di rete ha rivoluzionato la comprensione del rischio sistemico, spostandone la concettualizzazione da fenomeno aggregativo a proprietà emergente della topologia delle interconnessioni.

La teoria delle reti finanziarie, come sistematizzata nelle review di Caccioli, Barucca e Kobayashi (2018), si articola su tre dimensioni fondamentali: la struttura topologica delle reti, i meccanismi di propagazione del rischio e le dinamiche di contagio sistemico. Un vantaggio cruciale della modellazione del sistema finanziario come rete complessa è la capacità di analizzare direttamente i feedback complessi tra fenomeni micro e macroscopici senza semplificare eccessivamente la struttura dei legami finanziari.

Come dimostrato da Battiston et al. (2012) attraverso l'introduzione della misura DebtRank, il rischio sistemico non emerge dalla semplice aggregazione di rischi individuali, ma dalla struttura topologica delle interdipendenze finanziarie. DebtRank rappresenta una misura di impatto sistemico ispirata alla feedback-centrality che quantifica come lo stress finanziario si propaga attraverso le reti di esposizioni creditizie. L'applicazione di questa metodologia al

programma di prestiti d'emergenza della Federal Reserve durante la crisi del 2008-2010 ha rivelato che 22 istituzioni fortemente interconnesse formavano un grafo in cui ciascun nodo era sistemicamente critico al culmine della crisi.

La crisi finanziaria del 2008 ha fornito drammatica evidenza empirica di questa realtà: istituzioni individualmente solide sono collassate non per debolezze intrinseche ma per la loro posizione in reti di esposizioni incrociate che hanno trasformato shock localizzati in cascate sistemiche (Haldane & May, 2011). Il concetto di «too interconnected to fail» ha sostituito il tradizionale «too big to fail» nell'analisi macroprudenziale contemporanea, riflettendo il riconoscimento che la centralità di rete di un'istituzione finanziaria determina la sua rilevanza sistemica indipendentemente dalla sua dimensione assoluta (Markose et al., 2012).

System 0 come infrastruttura pre-cognitiva per la governance economica

Il concetto di System 0, formalizzato da Chiriatti, Ganapini, Panai, Wiederhold e Riva (2025) in *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, rappresenta una rivoluzione paradigmatica nella comprensione dell'interazione tra intelligenza artificiale e cognizione umana nel contesto decisionale. Il System 0 opera come un'infrastruttura pre-cognitiva che processa flussi informativi massicci per identificare pattern e relazioni che sfuggono all'osservazione diretta, configurando quello che gli autori definiscono «un'estensione cognitiva che trasforma l'intelligenza artificiale da strumento esterno a componente integrata del processo cognitivo umano».

Chiriatti, Ganapini, Panai, Ubiali e Riva (2024) in *Nature Human Behaviour* hanno ulteriormente elaborato questo concetto, proponendo che il System 0 costituisca una nuova modalità di pensiero che precede e informa sia il System 1 (pensiero intuitivo) sia il System 2 (pensiero deliberativo) teorizzati da Kahneman (2011). Contrariamente a una visione riduttiva che lo relegherebbe a mero strumento computazionale, il System 0 opera come un vero e proprio amplificatore cognitivo che estende in modo fondamentale le capacità dei decisori economici.

Il System 0, operando come infrastruttura pre-cognitiva, processa continuamente flussi informativi multidimensionali che eccedono la capacità di elaborazione consapevole umana. Nel contesto dell'analisi economica territoriale, questo significa che il sistema può simultaneamente: integrare dati eterogenei in tempo reale; identificare pattern latenti e anomalie; mantenere rappresentazioni multi-scala. Questa capacità di processamento pre-cognitivo non si limita a fornire informazioni aggiuntive, ma trasforma qualitativamente il substrato informativo su cui operano i processi decisionali, funzionando come un vero e proprio cognitive scaffold.

La dimensione più interessante del sistema risiede nella sua capacità di generare e permettere ai soggetti economici la valutazione di scenari controfattuali complessi. Questa funzionalità si articola attraverso: (i) generazione di scenari controfattuali coerenti tramite Conditional Tabular GANs (Xu et al., 2019), che possono preservare la coerenza strutturale (preservazione di distribuzioni congiunte e proprietà topologiche) se addestrati e validati fit-for-purpose (NASEM, 2024); (ii) tracciamento di pattern di propagazione degli shock nelle reti economiche; (iii) esplorazione di spazi di policy e confronto tra interventi mediante tecniche di RL e ottimizzazione multi-obiettivo.

L'integrazione tra ontologia relazionale, teoria delle reti finanziarie e tecnologie computazionali solleva questioni epistemologiche fondamentali. Come sottolineato da Messeri e Crockett (2024) in *Nature*, l'uso di sistemi di IA nella ricerca può creare un'«illusione di comprensione», dove la manipolazione di rappresentazioni complesse è scambiata per comprensione causale. L'opacità di molti algoritmi di ML – la «black box» – pone sfide per l'accountability delle decisioni pubbliche (Rudin, 2019). Ne deriva l'esigenza di trasparenza contestuale (Doshi-Velez & Kim, 2017), validazione empirica continua e preservazione della diversità cognitiva (Kleinberg et al., 2018).

III. Architettura metodologica del Digital Twin dell'ecosistema economico umbro

Il presente capitolo delinea l'architettura metodologica implementata per la costruzione del digital twin dell'ecosistema economico umbro, integrando l'approccio teorico-concettuale sviluppato nei capitoli precedenti con l'implementazione computazionale concreta. La sezione centrale del capitolo presenta il lavoro tecnico finora effettuato che costituisce il nucleo operativo del sistema, seppur ad uno stadio embrionale che potremmo definire al momento a livello di PoC (Proof of Concept).

La transizione dal framework teorico dell'ontologia relazionale alla sua operazionalizzazione computazionale richiede una serie di passaggi metodologici che preservino la coerenza epistemologica garantendo al contempo la trattabilità computazionale. Il digital twin dell'ecosistema economico umbro si configura come un'istanziatura concreta del paradigma computazionale-relazionale, dove la preservazione delle strutture di interdipendenza settoriale costituisce l'obiettivo primario della modellazione.

La scelta dell'Umbria come caso di studio, come documentato nei capitoli precedenti, deriva dalla convergenza di fattori strutturali – dimensione ottimale, complessità settoriale, presenza di eccellenze tecnologiche – e dalla disponibilità di dati transazionali granulari che permettono una rappresentazione fedele delle dinamiche economiche territoriali. L'architettura metodologica qui presentata si articola su tre livelli interconnessi: (i) l'acquisizione e il trattamento dei dati transazionali grezzi; (ii) la generazione di dati sintetici attraverso tecniche di machine learning avanzate; (iii) la costruzione di modelli di simulazione per l'analisi di scenari controfattuali.

[Nota: Sezione tecnica in sviluppo - contributo di Michelangelo Puliga]

IV. Implicazioni per la governance economica territoriale

La traduzione del framework computazionale in strumento operativo di governance economica territoriale richiede un'analisi approfondita delle capacità trasformativa che emergono dall'integrazione tra accrescimento cognitivo, preservazione delle strutture relazionali e simulazione controfattuale. Il monitoraggio real-time delle vulnerabilità sistemiche costituisce la prima capacità trasformativa abilitata attraverso l'implementazione operativa della teoria delle reti finanziarie nel dominio produttivo. Diem et al. (2022), analizzando dati granulari di value added tax per l'intera economia austriaca, dimostrano che lo 0.035% delle imprese manifesta un rischio economico sistemico (ESR) straordinariamente elevato, con potenziale impatto sul 23% della produzione economica nazionale in caso di default. Questa evidenza empirica, ottenuta attraverso l'analisi di reti di produzione firm-level con granularità senza precedenti, conferma la rilevanza di approcci network-based per l'identificazione tempestiva di vulnerabilità che sfuggirebbero all'analisi tradizionale basata su aggregati settoriali.

L'estensione di queste metodologie al contesto territoriale umbro permette di quantificare l'esposizione sistemica attraverso quella che Welburn et al. (2020, RAND RR-4185) definiscono come una ricostruzione firm-level delle relazioni input-output e degli impatti sistemici (cfr. anche Welburn et al., 2023 per l'estensione globale) nel loro studio per la RAND Corporation sul rischio sistemico nell'economia americana. La metodologia di network traversal implementata nel presente framework, operando su grafi pesati che rappresentano le transazioni inter-firm, permette di tracciare i percorsi di propagazione degli shock economici con una granularità impossibile attraverso approcci aggregati. Inoue e Todo (2019), analizzando la propagazione degli shock attraverso le supply chain network giapponesi dopo il terremoto del 2011, dimostrano empiricamente come shock localizzati possano propagarsi attraverso le reti di produzione generando impatti macroeconomici significativi, con effetti che persistono per trimestri dopo l'evento iniziale.

La simulazione controfattuale per la valutazione ex-ante delle politiche rappresenta un'evoluzione metodologica che integra i principi della synthetic control analysis con le tecniche di generazione di dati sintetici attraverso machine learning. La preservazione delle distribuzioni congiunte e delle proprietà topologiche tramite CTGAN può preservare la coerenza strutturale degli scenari a condizione che i modelli siano addestrati e validati con metriche ad hoc, in linea con l'idea di validazione fit-for-purpose delineata dalla National Academies (2024). Questa coerenza strutturale garantisce che le simulazioni rispettino i vincoli di complementarità e sostituibilità che caratterizzano il sistema economico reale, evitando soluzioni matematicamente ottimali ma economicamente implausibili.

L'identificazione di interventi ad alto leverage sistemico emerge dalla mappatura della struttura topologica delle reti economiche territoriali attraverso metriche di centralità e vulnerabilità. Chi (2024), analizzando le reti di risk spillover nel sistema produttivo cinese, identifica 75 percorsi critici di propagazione del rischio definiti come «SVIs → SIIs → SVIs» (Systemically Vulnerable Industries verso Systemically Important Industries), mostrando come tali percorsi attraversino un numero limitato di industrie sistemicamente importanti. Questa evidenza suggerisce che interventi mirati su nodi specifici possano generare effetti moltiplicativi sproporzionati, una caratteristica particolarmente rilevante nel contesto umbro caratterizzato da cluster tecnologici ad alta interdipendenza.

L'applicazione del framework alla gestione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza assume rilevanza paradigmatica data l'entità delle risorse allocate e la complessità dell'architettura programmatica. Per evitare incongruenze temporali: il PNRR italiano approvato nel 2021 ammonta a €191,5 mld; successive revisioni 2023/2024 portano l'allocazione a €194,4 mld (€71,8 mld grants; €122,6 mld loans). Come evidenziato nel rapporto di monitoraggio di Confindustria (2024), le revisioni al ribasso delle stime di impatto sul PIL — da +0.9 p.p. previsti per il 2024 nel DEF di aprile a valori significativamente inferiori nel Piano Strutturale di Bilancio di settembre — evidenziano le difficoltà di previsione e gestione di programmi di investimento complessi attraverso strumenti analitici tradizionali. Il digital twin permette di simulare percorsi alternativi di implementazione considerando i vincoli di capacità di assorbimento del sistema economico territoriale e le complementarità tra investimenti documentate da The European House - Ambrosetti (2024) nel loro PNRR Observatory.

La gestione delle crisi settoriali attraverso il framework trova fondamento teorico nei modelli di contagion in production networks sviluppati da Acemoglu et al. (2015) e validati empiricamente durante shock economici recenti. Bardoscia et al. (2015), introducendo il concetto di «microscopic foundations for shock propagation», dimostrano attraverso simulazioni su reti finanziarie reali come perturbazioni apparentemente minori possano amplificarsi attraverso meccanismi di feedback generando crisi sistemiche. L'estensione di questi principi al dominio produttivo, implementata nel presente framework, permette non solo di quantificare gli impatti diretti e indiretti ma di identificare i punti di intervento ottimali per il contenimento delle crisi.

La transizione ecologica rappresenta un ambito dove la capacità del framework di modellare trasformazioni sistemiche complesse assume particolare rilevanza. Secondo l'analisi della Commissione Europea (2021) sull'impatto climatico del PNRR italiano, almeno il 37% delle risorse totali è destinato a obiettivi climatici, una percentuale che implica una riconfigurazione profonda delle catene del valore e l'emergere di nuove interdipendenze produttive. Il framework permette di simulare percorsi alternativi di transizione valutandone gli impatti differenziali attraverso la generazione di scenari sintetici che preservano la coerenza strutturale del sistema economico mentre esplorano spazi di trasformazione non osservati.

V. Discussione Critica e Prospettive

Lo statuto epistemologico dei dati sintetici generati attraverso tecniche di intelligenza artificiale generativa solleva questioni fondamentali che richiedono un'analisi rigorosa alla luce della letteratura emergente sulla validazione dei digital twins. La National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2024), nel loro rapporto fondamentale sui digital twins, definisce la validazione come «il processo di determinazione del grado in cui un modello rappresenta accuratamente il mondo reale dalla prospettiva degli usi intesi del modello» (p. 24). Nel contesto dei dati sintetici generati attraverso CTGAN, questa definizione richiede una riconsiderazione fondamentale: non si tratta di validare la corrispondenza puntuale tra dati sintetici e osservazioni reali, ma di verificare la preservazione delle proprietà strutturali e relazionali che determinano la dinamica del sistema economico.

Thomas (2024), nel rapporto NIST AMS 100-61 sull'economia dei digital twins nel settore manifatturiero, documenta attraverso simulazioni Monte Carlo che l'uso di dati sintetici può generare un impatto economico stimato tra 16,1 e 38,6 miliardi di dollari (intervallo di confidenza del 90%, mediana 27,2 miliardi di dollari) nel solo settore manifatturiero americano. Questa evidenza empirica suggerisce che i dati sintetici possano costituire non meramente approssimazioni ma rappresentazioni epistemologicamente valide per specifici scopi analitici e decisionali, a condizione che preservino quelle che Hua et al. (2022) definiscono «statistical fidelity» e «structural consistency» (Winter Simulation Conference).

Le strategie di mitigazione incrementale dei bias rappresentano una sfida metodologica centrale documentata estensivamente nella letteratura. Il rapporto della National Academies (2024) evidenzia come i bias algoritmici emergano non solo dai dati di training ma dalle assunzioni incorporate negli algoritmi stessi e dalle pratiche di implementazione. Nel contesto biomedico ad esempio, Drummond e Coulet (2022) mostrano che, in ambito pediatrico, la validazione dei digital twin richiede un approccio multi-stakeholder (bambini, genitori, insegnanti, clinici), perché molte criticità etiche, legali e sociali emergono solo con il coinvolgimento degli attori e non sono rilevabili dalle sole metriche statistiche; questa esigenza è coerente con l'analisi etica di Braun e Krutzinna (2022), che sottolinea partecipazione e tutela dei minori nei processi decisionali. Allo stesso modo lo studio qualitativo di Popa et al. (2021), condotto su più ambiti, con attori di sanità, industria, ricerca e policy, generalizza questa affermazione mostrando chiaramente come il coinvolgimento degli stakeholder renda possibile far emergere bias e rischi che rimarrebbero invisibili a una validazione puramente statistica, rendendo ancora più evidente la necessità di procedure partecipative per i digital twin e non solo in ambito biomedicale.

Il percorso verso la validazione empirica del framework richiede lo sviluppo di protocolli metodologici che trascendano i criteri tradizionali. Hua et al. (2022) propongono un framework di «progressive validation» che integra verifica formale, validazione statistica e validazione operativa attraverso pilot studies. Nel contesto economico territoriale, questo approccio multi-dimensionale assume particolare rilevanza data la non-stazionarietà dei processi economici documentata da Blanchard et al. (2022) nel contesto delle disruptions post-pandemiche.

L'agenda di ricerca futura si articola lungo direzioni che riflettono sia le potenzialità che le limitazioni del framework proposto. L'estensione inter-regionale, necessaria per catturare le interdipendenze documentate da Diem et al. (2024) nell'analisi delle supply chain globali,

richiede lo sviluppo di protocolli di interoperabilità che preservino privacy e sicurezza. Il Virginia Biocomplexity Institute (2024), nel suo lavoro sui digital twins per sistemi sociali complessi, dimostra come l'applicazione di differential privacy ai dati sintetici fornisca garanzie matematiche sulla preservazione della privacy anche in contesti di integrazione multi-scala.

L'integrazione di fonti dati eterogenee rappresenta un'ulteriore frontiera documentata da McKinsey Digital (2024) nel loro studio sull'integrazione di generative AI e digital twins. La creazione di quello che definiscono «multimodal digital twins» richiede metodologie di data fusion capaci di mantenere coerenza semantica e temporale attraverso fonti diverse, una sfida tecnica e metodologica non banale nel contesto economico dove le temporalità e le granularità dei dati variano significativamente.

Lo sviluppo di interfacce cognitive avanzate costituisce una direzione di ricerca con profonde implicazioni per la democratizzazione dell'accesso a strumenti analitici complessi. Il Federal News Network (2024) documenta l'esperienza della NASA e del National Geospatial Intelligence Agency nell'uso di digital twins per applicazioni di earth science, evidenziando come la sfida principale non risieda nella capacità computazionale ma nella capacità di rendere i risultati comprensibili e actionable per decisori non specialisti.

La riflessione critica sul framework proposto non può prescindere dal riconoscimento delle tensioni epistemologiche irrisolte. La questione della causalità, centrale nella letteratura economica contemporanea, richiede particolare attenzione. Come evidenziato nel presente lavoro e confermato dalla letteratura, i digital twins eccellono nella modellazione di interdipendenze ma manifestano limitazioni nell'identificazione di relazioni causali meccanicistiche. Questa limitazione non costituisce necessariamente un difetto ma richiede una riconsiderazione del ruolo del giudizio umano informato nell'interpretazione dei risultati simulativi.

L'interpretabilità algoritmica assume particolare rilevanza nel contesto della governance pubblica. Il trade-off tra complessità e interpretabilità, documentato estensivamente nella letteratura sul machine learning, richiede lo sviluppo di metodologie di explainable AI specificamente calibrate per il contesto economico-finanziario. L'esperienza emergente documentata dal NITRD National Coordination Office (2024) suggerisce che la creazione di audit trails completi e la documentazione sistematica delle assunzioni modellistiche possano parzialmente mitigare le preoccupazioni relative all'opacità algoritmica.

Il framework presentato rappresenta quindi un contributo a un programma di ricerca in evoluzione che cerca di rispondere alle sfide della complessità economica contemporanea attraverso l'integrazione di approcci computazionali avanzati con il rigore metodologico dell'analisi economica. L'applicazione al caso umbro dimostra la fattibilità operativa dell'approccio, pur richiedendo ulteriore validazione empirica e raffinamento metodologico per la piena realizzazione del suo potenziale analitico e decisionale.

VI. Bibliografia

Acemoglu, D., Ozdaglar, A., & Tahbaz-Salehi, A. (2015). Systemic risk and stability in financial networks. *American Economic Review*, 105(2), 564–608.

ANCE Perugia. (2024). *Rapporto 2024: Le costruzioni, motore dello sviluppo dell'Umbria*.

Arrow, K. J., & Debreu, G. (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica*, 22(3), 265–290.

Banca d'Italia. (2024). *L'economia dell'Umbria – Aggiornamento congiunturale*. Economie regionali n. 32.

Banca d'Italia. (2025). *L'economia dell'Umbria – Rapporto annuale*. Economie regionali n. 10.

Bardoscia, M., Battiston, S., Caccioli, F., & Caldarelli, G. (2015). DebtRank: A microscopic foundation for shock propagation. *PLoS ONE*, 10(7), e0130406.

Bardoscia, M., Battiston, S., Caccioli, F., & Caldarelli, G. (2017). Pathways towards instability in financial networks. *Nature Communications*, 8, 14416.

Battiston, S., Puliga, M., Kaushik, R., Tasca, P., & Caldarelli, G. (2012). DebtRank: Too central to fail? Financial networks, the FED and systemic risk. *Scientific Reports*, 2, 541.

Blanchard, O., Domash, A., & Summers, L. H. (2022). Bad news for the Fed from the Beveridge space. *Peterson Institute for International Economics Policy Brief*, 22-7.

Braun, M., & Krutzinna, J. (2022). Digital twins in medicine and health care: a critical overview of the benefits, risks and design principles. *JMIR Medical Informatics*, 10(3), e35894.

Caccioli, F., Barucca, P., & Kobayashi, T. (2018). Network models of financial systemic risk: A review. *Journal of Computational Social Science*, 1(1), 81–114.

Chi, S. (2024). Systemically vulnerable and systemically important industries and their spillover paths. *Humanities & Social Sciences Communications*, 11, 339.

Chiriatti, M., Ganapini, M., Panai, E., Ubiali, M., & Riva, G. (2024). The case for human–AI interaction as system 0 thinking. *Nature Human Behaviour*, 8(10), 1829–1830.

Chiriatti, M., Ganapini, M., Panai, E., Wiederhold, B. K., & Riva, G. (2025). System 0: Transforming artificial intelligence into a cognitive extension. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*. (ahead of print).

Commissione Europea. (2021). *SWD(2021) 165 final: Analysis of the Recovery and Resilience Plan of Italy*.

Commissione Europea. (2024). *Italy – Revised Recovery and Resilience Plan / REPowerEU* (factsheets e comunicazioni ufficiali).

Confindustria Umbria. (2024). *Rapporto sull'industria manifatturiera umbra*.

Confindustria – Centro Studi. (2024–2025). *PNRR: stato di avanzamento e impatto macro* (note e dossier).

Criscuolo, C., Gal, P., Leidecker, T., Losma, F., & Nicoletti, G. (2021). The role of telework for productivity during and post COVID-19. *OECD Productivity Working Papers*, No. 31.

Diem, C., Borsos, A., Reisch, T., Kertész, J., & Thurner, S. (2022). Quantifying firm-level economic systemic risk from nation-wide supply networks. *Scientific Reports*, 12, 7719.

Diem, C., Pichler, A., & Thurner, S. (2024). What is the minimal systemic risk in adaptive financial networks? *Journal of Economic Dynamics and Control*, 158, 104771.

Doshi-Velez, F., & Kim, B. (2017). Towards a rigorous science of interpretable machine learning. *arXiv:1702.08608*.

Drummond, N., & Coulet, A. (2022). Pediatric digital twins: a review of the promises of artificial intelligence. *JMIR Pediatrics & Parenting*, 5(4), e41575.

Federal News Network. (2024). *Digital twins and earth science applications: NASA and NGA perspectives*.

Floridi, L. (2014). *The Fourth Revolution: How the Infosphere is Reshaping Human Reality*. Oxford University Press.

Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila, R., Chazerand, P., Dignum, V., ... Vayena, E. (2018). AI4People – an ethical framework for a good AI society. *Minds and Machines*, 28(4), 689–707.

Gabaix, X. (2011). The granular origins of aggregate fluctuations. *Econometrica*, 79(3), 733–772.

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer.

Haldane, A. G., & May, R. M. (2011). Systemic risk in banking ecosystems. *Nature*, 469(7330), 351–355.

Hua, E. Y., Lazarova-Molnar, S., & Francis, D. P. (2022). Validation of digital twins: Challenges and opportunities. In *Winter Simulation Conference 2022* (pp. 2900–2911). IEEE.

Inoue, H., & Todo, Y. (2019). Firm-level propagation of shocks through supply-chain networks. *Nature Sustainability*, 2(9), 841–847.

ISTAT. (2025). *Conti economici territoriali – 2023*.

Kahneman, D. (2011). *Thinking, Fast and Slow*. Farrar, Straus and Giroux.

Kleinberg, J., Ludwig, J., Mullainathan, S., & Sunstein, C. R. (2018). Discrimination in the age of algorithms. *Journal of Legal Analysis*, 10, 113–174.

Markose, S., Giansante, S., & Shaghghi, A. R. (2012). “Too interconnected to fail” financial network of US CDS market. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 83(3), 627–646.

McKinsey Digital. (2024). Digital twins and generative AI: A powerful pairing.

Messeri, L., & Crockett, M. J. (2024). Artificial intelligence and illusions of understanding in scientific research. *Nature*, 627, 49–58.

Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input–Output Analysis: Foundations and Extensions* (2nd ed.). Cambridge University Press.

NASA. (2024). *Earth System Digital Twin (ESDT) Program* – documentazione e materiali tecnici.

NASEM. (2024). *Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. National Academies Press.

NIST (Thomas, D.). (2024). *Economics of Digital Twins: Costs, Benefits, and Economic Decision Making* (AMS 100-61). National Institute of Standards and Technology.

NITRD National Coordination Office. (2024). *Request for Information on National Digital Twins R&D Strategic Plan*.

Pammi, M., Shah, P. S., Yang, L. K., Hagan, J., Aghaeepour, N., & Neu, J. (2025). Digital twins, synthetic patient data, and in-silico trials: can they empower paediatric clinical trials? *The Lancet Digital Health*, 7(5), 100851.

Popa, E. O., van Hilten, M., Oosterkamp, E., & Bogaardt, M. J. (2021). The use of digital twins in healthcare: socio-ethical benefits and socio-ethical risks. *Life Sciences, Society and Policy*, 17(1), 1-25.

Rovelli, C. (1996). Relational quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35(8), 1637–1678.

Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1(5), 206–215.

The European House - Ambrosetti. (2024). *PNRR Observatory*.

Thomas, D. (2024). *Economics of Digital Twins: Costs, Benefits, and Economic Decision Making* (AMS 100-61). National Institute of Standards and Technology.

Tonti, G. (2024). Intervista a Giorgio Tonti, Presidente Umbria Aerospace Cluster. *Corriere dell'Umbria*, 15 novembre 2024.

Umbria Aerospace Cluster. (2024). *Rapporto annuale 2024*.

Virginia Biocomplexity Institute. (2024). *Digital twins for complex social systems*.

Welburn, J. W., Panitch, M., Greenfield, V. A., & Ungewitter, C. (2020). *Systemic Risk in the U.S. Financial System* (RR-4185). RAND Corporation.

Welburn, J. W., Panitch, M., & Ungewitter, C. (2023). *Global Systemic Risk and Resilience* (RR-A1757). RAND Corporation.

Wright, L., & Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 7(1), 13.

Xu, L., Skoularidou, M., Cuesta-Infante, A., & Veeramachaneni, K. (2019). Modeling tabular data using conditional GAN. In *Advances in Neural Information Processing Systems* (pp. 7335–7345).