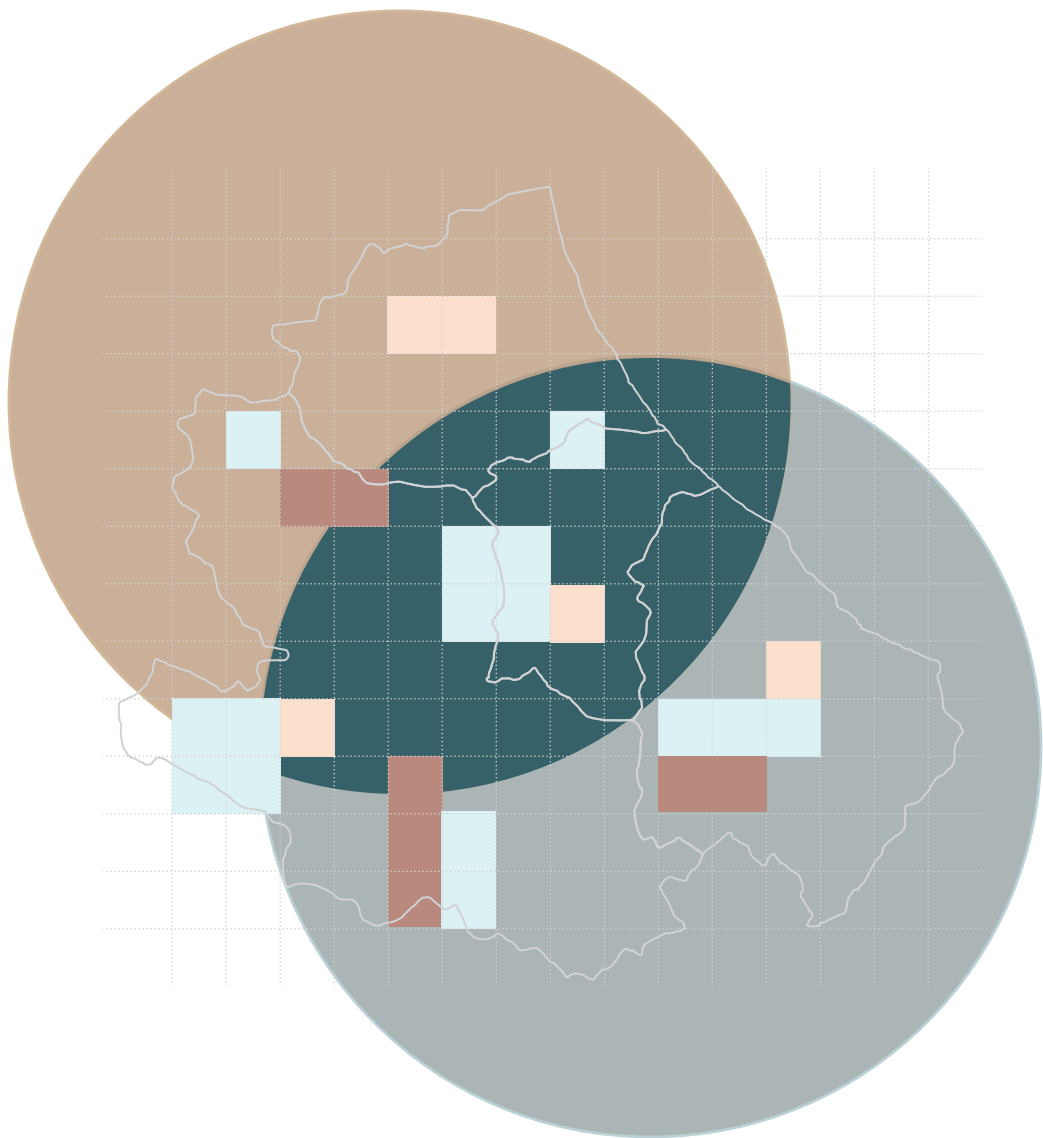


**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, EDILE-ARCHITETTURA, AMBIENTALE
CURRICULUM INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA
XXXVIII CICLO**

TESI DI DOTTORATO IN

**POTENZIALITÀ DEL DIGITAL TWIN PER LE CONOSCENZE E
LA PIANIFICAZIONE DEL RISCHIO DA DISASTRI**

SSD: CEAR-12/B



Tutor
Prof. Donato Di Ludovico

Co-Tutor
Prof.ssa Antinisca Di Marco

Dottoranda
Sara Sacco

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE, EDILE-ARCHITETTURA, AMBIENTALE

CURRICULUM INGEGNERIA EDILE-ARCHITETTURA

XXXVIII CICLO

TESI DI DOTTORATO IN

Potenzialità del Digital Twin per le conoscenze e la pianificazione del rischio da disastri

SSD: CEAR-12/B

Coordinatore del Corso
Prof. Federico De Matteis

Dottoranda
Sara Sacco

Tutor
Prof. Donato Di Ludovico
Co-Tutor
Prof.ssa Antiniscia Di Marco

ABSTRACT

The evolution of Information and Communication Technologies (ICT) enables the development of innovative tools, such as the Digital Twin (DT), to support territorial planning within the frameworks of Disaster Risk Assessment (DRA), Disaster Risk Management (DRM), and multi-risk analysis. Static and dynamic data derived from Internet of Things (IoT) components, together with risk-related information from official sources such as Civil Protection Agencies, offer significant opportunities for simulation, management, prediction, and response processes, thereby supporting more efficient and informed planning practices. This research contributes to the debate on the application of emerging digital technologies in territorial planning, with particular attention to multi-risk contexts, emphasizing preventive risk management rather than focusing exclusively on emergency response phases. The study was conducted within a research fellowship funded by the Italian National Recovery and Resilience Plan (PNRR) under DM 351/2022 M4C1 – Investment 4.1 “Doctorates for Public Administration.” The research framework included institutional collaboration with the Abruzzo Regional Civil Protection Agency, an international research period at the Facultad de Planeación Urbana y Regional of the Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), and an additional collaboration with the Barcelona Supercomputing Center (BSC). The Digital Twin is conceived as a digital replica of a physical system capable of integrating predictive technologies—such as IoT, Big Data, 5G, Cloud computing, Artificial Intelligence, and AR/VR—with georeferenced information systems (BIM, CIM, GIS). This integration enables the development of a multiscale, dynamic model capable of providing real-time information, advanced analyses, scenario simulations, and continuous interaction with the physical environment. As such, DTs can foster more flexible, adaptive, and rapidly updatable territorial planning processes, supporting intelligent and sustainable governance, citizen engagement, and participatory decision-making. The main objective of the research is to investigate the relationship between Digital Twins, traditional territorial planning, and disaster risk planning, with a focus on DRM, in order to accelerate analytical processes, prevent potential risks and damages, optimize operations, and enhance planning and design performance at the territorial scale. In line with the UNDRR framework and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, the study adopts an integrated understanding of hazard, exposure, vulnerability, and response capacity as the foundation for effective risk prevention and mitigation strategies. Within this context, Disaster Risk Assessment is identified as a key instrument for identifying critical scenarios and supporting adaptive planning. The research proposes a methodology aimed at shifting risk planning from an emergency-driven approach to a preventive, informed,

and multirisk-oriented framework. Specifically, it develops a model for a Civil Protection Risk Management Plan (Piano di Gestione del Rischio – PGR), which simultaneously defines a formalizable structure for a Regional Digital Twin (RDT). The RDT is presented as a theoretical–conceptual model, supported by empirical experiences and collaborative activities conducted during the research period. The proposed RDT model addresses key challenges such as large-scale data management, heterogeneous data integration, and regional-scale adaptability, contributing to bridging the gap in existing literature, which is predominantly focused on urban and smart city applications. Overall, the study provides theoretical and methodological contributions to territorial-scale disaster risk management and preventive planning through the use of Digital Twin technologies.

INDICE

1. INTRODUZIONE

2. LA RICERCA NEL CAMPO DEL DIGITAL TWIN E DELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

2.1. IL CONCETTO DI DIGITAL TWIN NEL PANORAMA SCIENTIFICO

2.2. I CAMPI DI APPLICAZIONE DEL DT

2.2.1. ICT , Big Data, DT

2.3. I TIPI DI URBAN-DT, CITY-DT, LOCAL-DT

2.3.1. Smart Cities, Urban Digital Twin e integrazione dei dati

2.4. TECNOLOGIE E STRUMENTI PER IL DT

2.4.1. IL Data Lake

2.5. BIG DATA E NUOVI DIRITTI DI CITTADINANZA

2.6. DT E PIANIFICAZIONE

3. LA PIANIFICAZIONE DEL RISCHIO

3.1. IL CONCETTO DI RISCHIO NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA

3.2. IL CONCETTO DI MULTIRISCHIO NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA

3.3. IL DISASTER RISK ASSESSMENT – DRA

3.4. IL DISASTER RISK MANAGEMENT- DRM

3.5. GLI STRUMENTI URBANISTICI UTILI ALLA GESTIONE DEL RISCHIO IN ITALIA

3.5.1. Divario tra gestione del rischio e pianificazione e tentativi di integrazione tra conoscenza del rischio e pianificazione territoriale in Italia

3.5.2. I Digital Twin come potenziali strumenti per la pianificazione e la gestione dei rischi

4. IL DIGITAL TWIN E IL PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEL RISCHIO: DEFINIZIONE METODOLOGICA DELLO STRUMENTO TRA ANALISI, DECISIONI E AZIONI

4.1. DALL'URBAN DIGITAL TWIN – UDT AL REGIONAL DIGITAL TWIN – RDT

4.2. IL REGIONAL DIGITAL TWIN- RDT E IL PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEL RISCHIO- PRGR

4.2.1. La metodologia generale della ricerca: l'integrazione tra RDT e PRGR

5. LE ATTIVITA' DI RICERCA NEL CONTESTO INTERNAZIONALE E IL CASO SPERIMENTALE NAZIONALE

5.1. IL CONTESTO INTERNAZIONALE:

Los Estados Unidos de México, Estado De México, Toluca de Lerdo. La Conoscenza dei rischi

5.1.1. Dati e fonti della Protección Civil de México, Estado de Mexico a confronto

5.2. IL CONTESTO EUROPEO:

Spagna, Catalunya, Barcellona.

Il Barcelona Digital Twin, e l'analisi di scenari di rischio

5.2.1. IL Barcelona Supercomputing Center - BSC

5.3. IL CASO STUDIO SPERIMENTALE NAZIONALE:

Italia, Regione Abruzzo. La Protezione Civile e il Piano Regionale di Protezione Civile

5.3.1. Il Piano Regionale di Protezione Civile

5.3.2. Descrizione degli scenari di rischio nel Piano Regionale Di Protezione Civile

6.IL PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEL RISCHIO: METODOLOGIA, APPLICAZIONE E RISULTATI RELATIVI AL CASO SPERIMENTALE NAZIONALE DELLA REGIONE ABRUZZO

6.1. INTEGRAZIONE TRA PREVISIONE, PREVENZIONE, DISASTER RISK ASSESSMENT E DISASTER RISK MANAGEMENT NEL SISTEMA DI PROTEZIONE CIVILE

6.2. ARTICOLAZIONE METODOLOGICA

6.3. IL DRA – fase 1 fase 2 fase 3

6.3.1.FASE 1:

La costruzione del Sistema delle Conoscenze

6.3.2. DRA - FASE 2:

La definizione degli scenari Multi-Rischio

6.3.3.DRA-FASE 3:

Gli hotspot territoriali

6.3.3.1. L'automazione dell'algorithmo del multi-rischio.

Il contributo del gruppo NHaRA- BSC

6.4. IL DRM - FASE 4:

Il set di azioni per il recupero degli hotspot

6.5 LE POTENZIALITÀ DEL RDT PER LA PIANIFICAZIONE DEL RISCHIO

7 DISCUSSIONI

8 CONCLUSIONI

9 GLOSSARIO

10 BIBLIOGRAFIA

11 ALLEGATI

1. INTRODUZIONE

L'evolversi delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione- ICT permette di pensare ad innovativi strumenti, come il Digital Twin, a supporto della pianificazione urbanistica e territoriale. Le potenzialità di delle nuove tecnologie per la raccolta, l'analisi e la gestione dei dati, sono innumerevoli e tra queste si annovera sicuramente il campo del supporto alle trasformazioni urbana e territoriali e alla valutazione del loro impatto. La presente ricerca si colloca in questo ambito, con particolare riferimento alle potenzialità delle nuove tecnologie, e segnatamente dello sviluppo del Digital Twin, per la pianificazione regionale della gestione del rischio. E' il campo di ricerca del Disaster Risk Assessment -DRA e del Disaster Risk Management - DRM ma anche del Pre-disaster recovery planning. I dati statici e dinamici ottenibili dalle componenti connesse all'IoT, e quelli prodotti da fonti istituzionali e scientifiche, ci offrono l'opportunità di sviluppare strumenti finalizzati ad una gestione urbana e territoriale più consapevole dei fattori ambientali, supportati da tool informatici che ne rendono più efficace l'applicazione, in special modo nelle fasi di pianificazione delle azioni preventive di recupero e restauro territoriale, il cosiddetto pre-disaster planning.

In questo contesto, la ricerca da un contributo rispetto all'utilizzo delle nuove tecnologie nel contesto pianificatorio territoriale e soprattutto nell'ambito del multirischio, dando rilievo alle fasi preventive di gestione e non solamente alle fasi di risposta in contesti emergenziali.

Attraverso la borsa di ricerca finanziata dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza- PNRR attraverso il DM 351/2022 M4C1 – Inv. 4.1,“Dottorati per la Pubblica Amministrazione”, è stato possibile approfondire il concetto delle potenzialità che possono avere le nuove tecnologie all'interno dei contesti di pianificazione e in relazione al supporto che possono fornire alle amministrazioni competenti. Infatti la borsa ha previsto fin dal primo anno la convenzione con Regione Abruzzo – Agenzia Regionale di Protezione Civile, e un periodo obbligatorio all'estero presso la Facultad de Planeación Urbana y Regional, de la Universidad Autónoma del Estado de México - UaMex, Toluca de Lerdo, México da svolgere entro il triennio , a cui è stato aggiunto un ulteriore periodo di collaborazione estera presso il centro di ricerca Barcelona Supercomputing Center-BSC, Catalunya, Espana.

La possibilità di avere uno strumento come il Digital Twin - DT può contribuire ad una pianificazione territoriale più flessibile, dinamica e velocemente aggiornabile. Il DT, infatti, è una replica (o prototipo) digitale di un “oggetto fisico”, che attraverso l'utilizzo e l'interazione delle tecnologie per modelli predittivi (come l'IoT, i Big Data, il 5G, il Cloud, l'AI, AR/VR) con i sistemi informativi georeferenziati (BIM, CIM, GIS), genera un modello multiscale in grado di fornire non solo informazioni in tempo reale, ma

anche di sviluppare analisi, simulazioni e interagire con la controparte fisica stessa. Questo strumento, quindi, può contribuire al processo di pianificazione strutturando una governance intelligente e sostenibile dei territori, in grado di coinvolgere i cittadini, e di supportare un processo di pianificazione democratica. Inoltre, può essere di sostegno nel semplificare e rendere flessibili i metodi e i modelli di pianificazione, attraverso proiezioni, visualizzazione di scenari e implicazioni dei cambiamenti, aiutando i processi partecipativi e collaborativi a supporto di urbanisti, progettisti urbani, e il pubblico in generale, diventando uno strumento di collaborazione, comunicazione e di supporto alle decisioni. Lo scopo generale quindi è di individuare le possibili relazioni tra il DT, la pianificazione tradizionale, e in particolare la pianificazione della gestione del rischio, Disaster Risk Management-DRM, per accelerare le tempistiche di analisi, prevenire rischi e danni potenziali, ottimizzare le operazioni e aumentare l'efficienza e la performance della pianificazione/progettazione ad una scala territoriale.

La ricerca adotta una metodologia articolata in quattro fasi strettamente interconnesse, che costituiscono sia l'impianto concettuale del Piano Regionale di Gestione del Rischio – PRGR sia l'architettura di un prototipo di Digital Twin territoriale, definito come Regional DigitalTwin – RDT. Tali fasi rappresentano, al contempo, specifici approcci applicativi ai principi del Disaster Risk Assessment – DRA e del Disaster Risk Management – DRM. In particolare, le prime tre fasi — i) il Sistema delle Conoscenze, ii) la definizione degli Scenari Multi-rischio e iii) l'individuazione degli Hotspot territoriali — declinano operativamente i concetti propri della DRA. La quarta fase, iv) la definizione di un Set di Azioni Operative, si colloca invece nell'ambito della DRM, traducendo i risultati analitici in strumenti di supporto alle decisioni, come mostrato nella Figura 1.

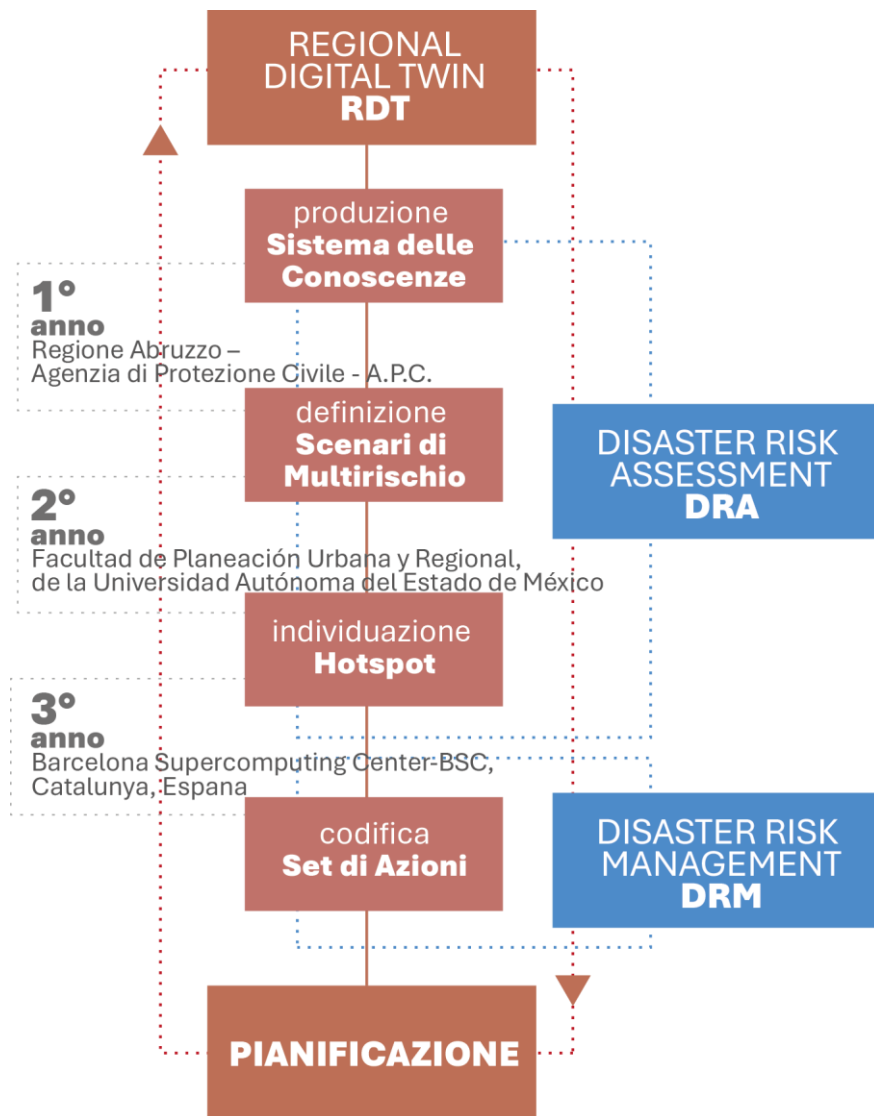


Figura 1: Schema della ricerca

I risultati attesi dall'applicazione della metodologia qui proposta convergono verso la definizione di un impianto analitico replicabile e scalabile, capace di restituire una conoscenza integrata e olistica del contesto urbano/ territoriale di riferimento. Tale approccio consente di evidenziare la compresenza e l'interazione di rischi concomitanti, nonché di individuare le aree caratterizzate da elevati livelli di esposizione e vulnerabilità, sulle quali orientare interventi prioritari. In questo quadro, la ricerca persegue un duplice obiettivo. Da un lato, intende fornire delle linee guida analitico - operative a supporto degli enti competenti e dei processi decisionali, favorendo azioni di prevenzione e mitigazione finalizzate alla riduzione degli impatti nelle fasi emergenziali, attraverso il Piano Regionale di Gestione del Rischio – PRGR. Dall'altro, mira a definire la struttura per il Regional Digital Twin – RDT che, per le sue caratteristiche dinamiche e

integrate, può accelerare i modelli di analisi e, conseguentemente, i processi decisionali applicativi.

L'approccio metodologico sviluppato nella ricerca viene approfondito attraverso la sua applicazione a un caso studio nazionale, riferito alla Regione Abruzzo introdotto, nel capitolo 6. Tale contesto ha rappresentato un ambito di sperimentazione centrale grazie alla collaborazione con l'Agenzia Regionale di Protezione Civile, che ha accompagnato il lavoro di ricerca nel corso del triennio di dottorato, consentendo l'accesso a dati, alle conoscenze e alle pratiche operative utili alla definizione del Piano Regionale di Gestione del Rischio – PRGR e della Regional Digital Twin – RDT.

A supporto del caso studio italiano, la ricerca include due ulteriori casi studio, analizzati nel capitolo 5. Il primo riguarda un contesto internazionale presso la Facultad de Planeación Urbana y Regional, de la Universidad Autónoma del Estado de México - UaMex, Toluca de Lerdo, México, oggetto di attività di collaborazione scientifica volta ad approfondire il tema del rischio in relazione alla presenza di tipologie differenti dal contesto italiano. Il secondo si colloca in ambito europeo ed è riferito all'esperienza presso il centro di ricerca Barcelona Supercomputing Center – BSC, con lo scopo di approfondire il ruolo delle tecnologie avanzate nella costruzione di scenari di rischio complessi.

La tesi restituisce il percorso di ricerca sviluppato nei tre anni di dottorato e si articola progressivamente da una fase di inquadramento teorico a una fase metodologico- applicativa. Dopo il capitolo introduttivo, il capitolo 2 inquadra la ricerca nel campo del Digital Twin e della pianificazione territoriale, analizzando l'evoluzione del concetto, le tecnologie emergenti e le implicazioni per i sistemi urbani e la pianificazione. Il capitolo 3 affronta invece il tema della pianificazione del rischio, introducendo i concetti di Rischio – R e Multirischio – M-R, nonché i riferimenti teorici del Disaster Risk Assessment – DRA e del Disaster Risk Management – DRM. Il capitolo 4 inquadra il rapporto tra Digital Twin e Piano Regionale di Gestione del Rischio, delineando il passaggio dall'Urban Digital Twin – UDT al Regional Digital Twin – RDT e il ruolo delle conoscenze del PRGR nella costruzione del modello. Il capitolo 5 è dedicato ai casi studio, mentre il capitolo 6 presenta i risultati e l'applicazione della metodologia articolata attraverso le quattro fasi del PRGR e nonché della struttura del RDT. La tesi infine si conclude con le considerazioni finali, le conclusioni ed una bibliografia seguita da allegati.

2. LA RICERCA NEL CAMPO DEL DIGITAL TWIN E DELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

La ricerca nel campo del Digital Twin è attualmente uno dei temi più attivi e strategici nell'ambito della trasformazione digitale e dell'Industria 5.0. Un Digital Twin - DT (in italiano "gemello digitale") è una replica digitale di un oggetto fisico, sistema o processo, aggiornata in tempo reale e continuamente interconnessa con la sua controparte reale o di prototipo attraverso dati provenienti da sensori, dispositivi IoT, o database. Nel contesto urbano il DT è una simulazione virtuale dinamica che rappresenta il complesso sistema di un'area, una città o un territorio. Si tratta quindi di un modello composto da edifici, infrastrutture, flussi di traffico, rete idrica, qualità dell'aria, comportamenti dei cittadini, e molto altro. Le caratteristiche principali possono essere ad esempio la connessione in tempo reale con il mondo fisico, la simulazione e analisi predittiva per scenari futuri, il supporto decisionale per governi e urbanisti, la visualizzazione 3D e interfacce interattive. Ad oggi però, i modelli esistenti non riescono ancora del tutto a gestire sistemi complessi come ad esempio i sistemi urbani. È necessario quindi affrontare questioni connesse alla validazione dei dati e alla loro all'interpretabilità, alla quantificazione dell'incertezza, alla loro capacità adattiva soprattutto in condizioni estreme (in emergenza) o situazioni imprevedute (Weil et al. 2023). Questi aspetti riguardano anche la difficoltà nella visualizzazione dei dati. Vi è infatti una difficoltà nel presentare i risultati delle simulazioni, spesso di natura differente, in ambienti comprensibili ad un pubblico eterogeneo (Marcucci et al. 2020). Nonostante queste complessità si sta avanzando sempre di più verso nuovi obiettivi, in parallelo all'implementazione delle nuove tecnologie, per via del grande potenziale che i DT potrebbero apportare. Nella figura 1 è rappresentato uno schema generale e riassuntivo dei DT che saranno in seguito approfonditi, riportando le tecnologie di cui si avvalgono, i campi d'applicazione in cui operano le sfide da colmare per renderli sempre più operativi ed attuali nei diversi settori, le possibili implementazioni rispetto all'uso dell'Intelligenza Artificiale – AI e le nuove frontiere a cui possono aspirare.

TECNOLOGIE

Internet of Things - IoT
sensori e dispositivi che raccolgono dati dal mondo fisico

Edge e Cloud Computing
per il trattamento dei dati in tempo reale o in ambienti distribuiti

Machine Learning / AI
per analisi predittive, manutenzione predittiva, e ottimizzazione

Simulazione in tempo reale
con modelli numerici o basati su AI.

CAMPI D'APPLICAZIONE

Manifattura intelligente
ottimizzazione della produzione, manutenzione predittiva, controllo

Automotive e Aerospazio
test virtuali, simulazione del ciclo di vita dei prodotti, gestione remota

Energia
monitoraggio delle reti, efficienza energetica

Smart Cities
modellazione BIM + DT per gestione e manutenzione di edifici e infrastrutture

SFIDE

Integrazione dati eterogenei
dati da sensori, CAD, modelli fisici e ML

Standardizzazione e interoperabilità
mancano ancora standard universali

Aggiornamento in tempo reale
sincronizzazione continua con il sistema fisico

Sicurezza e privacy dei dati
protezione delle informazioni sensibili nei gemelli digitali

Validazione e affidabilità
come garantire che il modello digitale sia un "gemello" accurato

DIGITAL TWIN E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

Twins autonomi
sistemi capaci di auto-apprendere e ottimizzare i processi

Explainable AI nei Twins
per aumentare la trasparenza delle decisioni automatizzate

Digital Twin evolutivi
modelli che si adattano dinamicamente alle condizioni reali

NUOVE FRONTIERE

Digital Twin nei sistemi complessi
per simulazioni globali, resilienza

Digital Twin ambientali o territoriali
per monitoraggio ambientale, gestione del rischio climatico

Figura 2: Il contesto attuale del Digital Twin

2.1. IL CONCETTO DI DIGITAL TWIN NEL PANORAMA SCIENTIFICO

Con lo sviluppo delle tecnologie emergenti, dell'informazione e della comunicazione ICT, lo strumento Digital Twin, DT, sta avendo un ruolo sempre più rilevante in svariati campi d'applicazione nonostante sia da tempo presente nella letteratura scientifica.

Ad oggi infatti, il DT ha sempre più possibilità di emergere nel panorama internazionale andando oltre i contesti d'applicazione da cui avuto origine, come ad esempio il campo spaziale, automobilistico o manifatturiero, spostandosi così verso nuovi contesti come il campo sanitario, della sicurezza, dell'adattamento al cambio climatico, delle smart cities o dello sviluppo, gestione e pianificazione nel settore urbanistico e territoriale. Il primo prototipo

di DT si colloca in ambito spaziale con Micheal Vickers che nel 1970 lo utilizza per effettuare simulazioni. Anni più tardi, nel 2002 è Michael Grieves che lo propone per la gestione del ciclo di vita di un prodotto industriale (Grieves & Vickers, 2017). Da un'analisi della letteratura scientifica è emerso come si configura lo strumento gemello digitale e quali sono le caratteristiche che lo costituiscono. Il concetto di DT è caratterizzato da un elemento fisico reale o di un prototipo, della sua riproduzione interattiva virtuale e necessariamente di un rapporto biunivoco tra le due parti. Questo rapporto bidirezionale tra le parti avviene attraverso lo scambio e la trasmissione di dati, e ha come obiettivo quello di evolversi in un sistema il più possibile automatizzato, discostandosi così da modelli come il Digital Model che si configura come semplice riproduzione visiva del oggetto reale e privo di connessioni tra le due parti; o il Digital Shadow che ha una connessione univoca dall'oggetto digitale al reale. La figura 3 mostra uno schema di sintesi delle differenze tra un Digital Model, un Digital Shadow e un Digital Twin, relative all'interazione tra prototipo o oggetto reale e la propria controparte digitale.

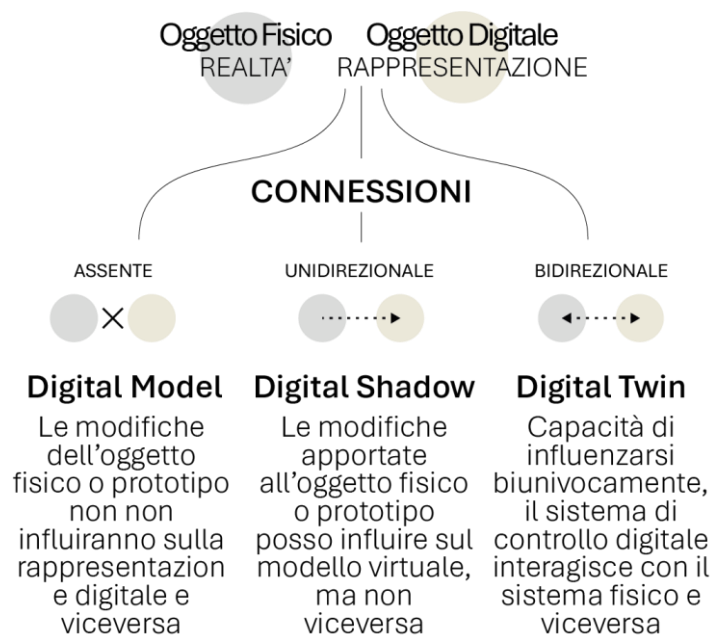


Figura 3: Differenze tra Digital Model, Digital Shadow, Digital Twin

Ciò che rende sempre più concreta la configurazione del gemello digitale, e che consente una sua possibile applicazione in diversi campi sono le sue componenti tecnologiche: Big Data e Cloud per effettuare le analisi di dati, 5G per la trasmissione dei quest'ultimi, Internet of Thing - IoT per la raccolta dati, realtà aumentata- AR e virtuale - VR, l'High Performance Computer - HPC per le simulazioni, intelligenza artificiale e Machine Learning utili alla predizione (Greco, 2023), ottimizzazione e supporto alle decisioni. Il DT quindi può generare simulazioni e scenari predittivi della realtà

costantemente aggiornabili attraverso il continuo scambio di dati, può ottimizzare le prestazioni di un sistema attraverso modelli adattivi, dati condivisi e visualizzazione avanzata, potenziando inoltre la velocità di svolgimento di un processo e riducendo il rischio associato a progetti complessi (Terenzi, 2022).

2.2. I CAMPI DI APPLICAZIONE DEL DT

Un altro concetto importante è la differente costruzione e visualizzazione dello strumento DT a seconda del contesto tematico per cui viene utilizzato. La definizione del livello di dettaglio di un Digital Twin è strettamente connessa alla scala di osservazione e al campo di applicazione di riferimento. Le scale spaziali e funzionali — dalla dimensione micro-atomica e micro-scalare, fino alle scale macro-geometrica, di quartiere, urbana, locale, sovracomunale e di sub-area — determinano il grado di risoluzione geometrica, informativa e semantica richiesto al modello digitale. Analogamente, i diversi ambiti applicativi, quali il manifatturiero, l'aerospaziale, l'automobilistico, il sanitario, l'agricoltura, i settori delle costruzioni e delle infrastrutture, la smart city e l'ingegneria, richiedono rappresentazioni differenziate in funzione degli obiettivi di analisi, simulazione e supporto decisionale. In questo quadro, i livelli di dettaglio del Digital Twin possono essere ricondotti alla classificazione dei Level of Detail – LOD, comunemente adottata negli standard CityGML, da LOD0 a LOD4. Tali livelli consentono di modulare progressivamente il grado di astrazione del modello, passando da rappresentazioni territoriali e volumetriche semplificate a modelli tridimensionali ad elevata complessità geometrica e informativa. La scelta del LOD non rappresenta tuttavia unicamente una questione di accuratezza visiva, ma assume un ruolo centrale nella gestione della complessità del sistema. All'aumentare della scala di dettaglio cresce infatti in modo significativo la quantità di dati da acquisire, integrare e aggiornare, così come il carico computazionale richiesto per l'elaborazione, la simulazione e la visualizzazione del modello. La relazione tra scala, livello di dettaglio e complessità gestionale rende quindi necessario un approccio selettivo e multi-scalare nella progettazione dei Digital Twin, in grado di bilanciare precisione rappresentativa, sostenibilità computazionale e finalità operative. In questo senso, l'adozione consapevole dei LOD consente di adattare il Digital Twin alle diverse esigenze applicative, evitando modelli eccessivamente complessi rispetto agli obiettivi analitici e garantendo al contempo l'efficacia dei processi decisionali (Batty, 2018; Biljecki et al.,

All'interno di questo quadro, le Information and Communication Technologies - ICT svolgono un ruolo abilitante necessario. Le ICT comprendono l'insieme di strumenti, infrastrutture e applicazioni che rendono possibile la comunicazione, l'elaborazione e lo scambio digitale delle informazioni tra sistemi eterogenei (Kitchin, 2014). La Tabella 2 organizza le ICT secondo le principali categorie tecnologiche di riferimento.

CATEGORIA	DESCRIZIONE	ESEMPI
Hardware	dispositivi fisici	computer, server, sensori, smartphone
Software	programmi e sistemi operativi	GIS, BIM, database, simulatori
Reti	infrastrutture di comunicazione	internet, fibra ottica, 5g, wi-fi
Cloud Computing	archiviazione e calcolo remoto	Amazon AWS, Microsoft Azure, Google Cloud
IoT	oggetti connessi in rete	sensori ambientali, videocamere, semafori intelligenti
AI e Big Data	analisi avanzata e automazione	ML, previsioni urbane, dashboard

Tabella 2: Tipi di ICT

Le ICT, infatti, non solo abilitano la raccolta e la trasmissione delle informazioni, ma costituiscono anche il mezzo attraverso cui le grandi quantità di dati, Big Data, possono essere gestite, integrate e rese utilizzabili per analisi complesse (Kitchin, 2014). La Tabella 3 sintetizza alcune fonti di dati che contribuiscono all'alimentazione del Digital Twin, evidenziando l'importanza dell'integrazione di informazioni eterogenee. Le fonti considerate comprendono dati di natura istituzionale, dati generati da sensori e dispositivi connessi, open data e informazioni prodotte da utenti o da processi digitali.

BIG DATA ANALYTICS NEI DIGITAL TWIN	
Data Mining	individuazione di pattern e anomalie nei sistemi
Machine Learning	previsioni
Deep Learning	riconoscimento immagini, video, voce
Predictive Analytics	manutenzione predittiva
Prescriptive Analytics	suggerimento di azioni ottimali basate sui dati

Tabella 3: Uso dei Big Data per i DT

Questa varietà di sorgenti riflette la logica stessa dei Big Data, caratterizzati da elevata eterogeneità e volume, e costituisce una condizione essenziale per la rappresentazione e l'aggiornamento continuo del gemello digitale (Batty, 2018). L'integrazione di tali fonti consente al Digital Twin di disporre di dataset ampi e diversificati, nei quali dati statici e dati dinamici concorrono alla costruzione di una base informativa complessa. Questo patrimonio informativo permette non solo una descrizione più accurata del sistema fisico, ma anche lo sviluppo di analisi avanzate, l'individuazione di

pattern ricorrenti e la definizione di modelli previsionali, attraverso l'applicazione di tecniche di data analytics, machine learning e data mining (Biljecki et al., 2021). Nel loro insieme, le fonti di dati descritte nella Tabella 4 evidenziano come la relazione tra Digital Twin e Big Data non sia solo quantitativa, ma strutturale:

DIGITAL TWIN	BIG DATA
Rappresentazione digitale e interconnessa con l'oggetto reale o prototipo	Grande volume di dati generato da utenti, sensori, ambiente
Simula, monitora, predice	Informazioni per alimentare, addestrare, aggiornare i modelli
Richiede aggiornamento in tempo reale	Dati in tempo reale da fonti IoT, social, ambientali, industriali

Tabella 4: Potenzialità tra Big Data e DT

il Digital Twin si configura infatti come un ambiente capace di raccogliere, integrare e valorizzare grandi quantità di dati eterogenei, trasformandoli in informazione e conoscenza utile. In questo senso, i Big Data rappresentano la materia prima su cui si basano i processi di simulazione, analisi e supporto alle decisioni, rendendo possibile un'evoluzione del modello digitale da strumento descrittivo a sistema dinamico e orientato alla predizione.

2.3. I TIPI DI URBAN-DT, CITY-DT, LOCAL-DT

Come anticipato l'analisi della letteratura scientifica sul concetto di Digital Twin consente di mettere in evidenza come le diverse tipologie di DT siano fortemente influenzate dalla scala di dettaglio, dal campo di applicazione e dalla natura dei dati — statici e dinamici — che ne costituiscono la base informativa. In relazione a tali fattori, emergono Digital Twin di carattere generale, applicabili trasversalmente a diversi ambiti disciplinari, e Digital Twin più specifici, strettamente connessi al contesto urbano, che risultano maggiormente pertinenti rispetto agli obiettivi della presente ricerca.

Come proposto in sintesi nella Figura 5, in questo quadro è possibile individuare una prima macro-categorizzazione che comprende le tipologie di Digital Twin di base, indipendenti dal dominio applicativo. In questo insieme rientrano il DT Prototype – DTP, il DT Instance – DTI, il DT Aggregate – DTA e il DT Environment – DTE (Qian et al., 2022), vedere sezione Allegati. Tali modelli, nati in ambito industriale, costituiscono la struttura fondativa del Digital Twin e ne definiscono l'evoluzione lungo il ciclo di vita dell'oggetto fisico. Il DTP rappresenta il prototipo virtuale e raccoglie le informazioni necessarie alla progettazione e produzione della controparte reale, contiene i set di informazioni necessari per descrivere e produrre una versione fisica che duplichi la versione virtuale. I set riguardano i modelli 3D,

i materiali, i processi, i servizi, lo smaltimento. Il DTI è associato a una specifica istanza fisica e ne accompagna l'intero ciclo di vita, integrando modelli geometrici, informazioni sui materiali, processi, operazioni e gli stati operativi acquisiti dai dati effettivi dei sensori, attuali, passati e previsti per il futuro. Il DTA e il DTE operano invece a un livello superiore, consentendo analisi aggregate, interrogazioni multi-dominio e simulazioni predittive su insiemi di istanze o sull'ambiente fisico di riferimento (Grieves & Vickers, 2017; Yao et al., 2023). Nella fase di prototipo, la previsione riguarderebbe l'analisi del comportamento del prodotto progettato con componenti che variano dimensionalmente, al fine di accertare che il prodotto così come progettato soddisfi i requisiti proposti. Dall'altra con scopo interrogativo applicato ai DTI. Le istanze di Digital Twin potrebbero essere interrogate per reperire la cronologia attuale e passata, indipendentemente da dove si trovi la loro controparte fisica nel mondo.

Oltre alle tipologie di Digital Twin di base, nella letteratura scientifica è possibile individuare una seconda categoria di Digital Twin maggiormente orientata alla scala urbana, all'interno della quale si collocano l'Urban Digital Twin – UDT, il City Digital Twin – CDT, il Local Digital Twin – LDT e il Participatory Digital Twin – PDT. Queste declinazioni permettono di estendere il concetto originario di Digital Twin, nato in ambito industriale, a sistemi spaziali complessi caratterizzati da elevata eterogeneità funzionale, multi-scalarità e pluralità di attori coinvolti (Batty, 2018; Dembski et al., 2020).

L'Urban Digital Twin – UDT viene generalmente inteso come un modello digitale dinamico del sistema urbano, finalizzato a supportare processi di pianificazione, simulazione e monitoraggio in ambiti quali la mobilità, l'energia, l'ambiente e la sicurezza. Esso integra dati statici e dinamici provenienti da fonti eterogenee e opera su scale che spaziano dal quartiere all'intera area urbana, ponendosi come strumento di supporto alle decisioni per le amministrazioni pubbliche (Kandt & Batty, 2021). Tuttavia, nella letteratura l'UDT viene spesso utilizzato come sinonimo del concetto di smart city, includendo piattaforme digitali che non sempre soddisfano i requisiti fondamentali di un Digital Twin. In modo analogo, il City Digital Twin – CDT viene frequentemente impiegato per descrivere rappresentazioni digitali tridimensionali della città, basate su modelli GIS e BIM integrati, utilizzate per visualizzazione, analisi spaziale e simulazioni di scenario. Anche in questo caso, non risulta una vera e propria distinzione tra modelli urbani avanzati e veri e propri Digital Twin, soprattutto rispetto al concetto di connessione bidirezionale e in tempo quasi reale tra il modello digitale e la controparte fisica (Biljecki et al., 2021). Il Participatory Digital Twin – PDT pone al centro il coinvolgimento attivo della popolazione attraverso pratiche

di partecipazione digitale, introduce una prospettiva principalmente legata alla governance dei dati e ai modelli di partecipazione.

Un aspetto particolarmente rilevante nel dibattito sui Digital Twin urbani e territoriali riguarda il Local Digital Twin – LDT, che introduce una chiave di lettura innovativa basata non solo sulla scala urbana di riferimento, ma soprattutto sui modelli di governance dei dati e sugli attori coinvolti nella loro produzione, gestione e aggiornamento.

In questo quadro (Kogut et al., 2021) propongono una classificazione del Local Digital Twin articolata in quattro configurazioni principali, che riflettono differenti assetti di controllo, apertura e distribuzione dei dati. Il Closed LDT caratterizzato da un modello fortemente centralizzato, in cui la produzione, la gestione e l'accesso ai dati sono controllati prevalentemente da un singolo attore istituzionale, generalmente un ente pubblico. Tale configurazione garantisce elevati livelli di controllo, affidabilità e sicurezza dei dati, risultando particolarmente adatta a contesti regolati o a processi decisionali critici, ma presenta limitate capacità di integrazione di contributi esterni.

Il Network-Oriented LDT si fonda invece su una rete di attori istituzionali e tecnici che collaborano alla costruzione e all'aggiornamento del Digital Twin. In questo modello, i dati sono condivisi tra diversi soggetti pubblici e privati secondo protocolli e standard comuni, favorendo l'interoperabilità e una maggiore ricchezza informativa. Tuttavia, la governance rimane prevalentemente top-down e richiede un elevato livello di coordinamento organizzativo e tecnologico. Il Network-Owned LDT introduce una ulteriore evoluzione, configurandosi come un Digital Twin gestito collettivamente da una rete di attori che condividono la proprietà e la responsabilità dei dati. In questo caso, la governance è distribuita e negoziata, e il valore del Digital Twin risiede nella capacità di integrare competenze, risorse differenti. Tale modello risulta particolarmente rilevante in contesti complessi e multi-livello, ma pone sfide significative in termini di standardizzazione, responsabilità e sostenibilità nel lungo periodo. Infine, il Network-Enabled LDT rappresenta la configurazione più aperta e partecipativa, in cui il Digital Twin è concepito come una piattaforma abilitante per il coinvolgimento attivo della popolazione, oltre che degli attori istituzionali e privati. In questo modello, i cittadini contribuiscono direttamente alla produzione e all'aggiornamento dei dati attraverso strumenti digitali, sensori diffusi e pratiche di crowdsourcing. Il Network-Enabled LDT amplia significativamente il potenziale informativo del Digital Twin e rafforza i processi di trasparenza e inclusione, ma richiede al contempo solide strategie di validazione dei dati, gestione della qualità e tutela della privacy.

DIGITAL TWIN	TIPO GENERICO	
	DTP - Digital Twin Prototype	
	DTI - Digital Twin Instance	
	DTA - Digital Twin Aggregate	
	DTE - Digital Twin Environment	
	TIPO URBANO	
	CS - DT - City - State Digital Twin	
	PDT - Participatory Digital Twin	
	UDT - Urban Digital Twin	
	CDT - City Digital Twin	
	LDT - Local Digital Twin	
	the Closed LDT	<i>tipo di</i>
	the Network- Oriented LDT	<i>partecipanti</i>
	the Network- Owned LDT	<i>alla creazione e</i>
	the Network- Enable LDT	<i>gestione di dati</i>

Figura 5: I DT generici e urbani

Nel loro insieme, queste declinazioni evidenziano da una parte come non si possa prescindere dalla definizione di un chiaro modello di governance dei dati e dei processi informativi. Dall'altra come sia diffusa la mancanza di definizioni univoche in relazione alle scale di rappresentazione e di analisi dei Digital Twin urbani. UDT, CDT e LDT vengono infatti spesso utilizzati come sinonimi di smart city, trascurando un elemento distintivo del Digital Twin, ovvero la necessità di una connessione bidirezionale, continua e dinamica tra la controparte virtuale e quella reale, presupposto fondamentale affinché il modello digitale non si limiti a una funzione descrittiva o visuale, ma assuma un ruolo attivo nei processi di simulazione, previsione e supporto alle decisioni (Grieves & Vickers, 2017). A livello globale, numerose città stanno implementando DT urbani come strumenti operativi per la gestione delle risorse, della mobilità dell'energia e della sicurezza. Tra i principali e i più sviluppati ci sono:

Helsinki Digital Twin

Helsinki è tra le città più avanzate nell'adozione del Digital Twin. Il progetto Helsinki 3D+ integra modelli LOD2 e LOD3 basati su CityGML, con applicazioni che includono:

- simulazioni energetiche sugli edifici,
- modellazione delle ombre e dei consumi stagionali,
- analisi microclimatiche,
- simulazioni del traffico,
- pianificazione di infrastrutture verdi,
- monitoraggio del potenziale solare.

Il Digital Twin di Helsinki è stato uno dei primi a integrare modelli BIM con modelli GIS tridimensionali, formando un vero ecosistema digitale per la pianificazione urbana.



Figura 6: Helsinki DT



Figura 7: Helsinki DT

Zurigo Digital Twin per mobilità e qualità dell'aria

La città di Zurigo utilizza il DT come strumento integrato per:

- modellazione del traffico in tempo reale,
- ottimizzazione della rete dei trasporti pubblici,
- analisi degli inquinanti atmosferici,
- simulazioni microclimatiche sui quartieri,
- scenari di sviluppo urbano eco-sostenibile.

L'integrazione con sensori IoT permette di aggiornare il modello ogni 60 secondi, garantendo un quadro dinamico e accurato della città.



Figura 8: Zurigo Digital Twin



Figura 9: Zurigo Digital Twin

Rotterdam Digital Twin per resilienza climatica

Rotterdam, tra le città europee più vulnerabili all'innalzamento del livello del mare, ha sviluppato uno dei più avanzati Coastal Digital Twins. Le sue applicazioni includono:

- modellazione idrodinamica,
- analisi delle mareggiate,
- simulazioni sull'erosione costiera,
- valutazione delle infrastrutture critiche,
- scenari previsionali per eventi meteo estremi.

Il DT costiero è utilizzato come piattaforma di supporto decisionale nelle strategie di adattamento climatico.

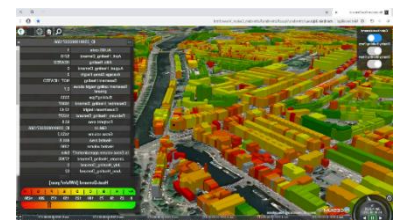


Figura 10: Rotterdam Digital Twin



Figura 11: Rotterdam Digital Twin

Singapore Virtual Singapore

Il progetto Virtual Singapore è considerato uno dei Digital Twin più avanzati. Le sue caratteristiche includono:

- un modello 3D multi-layer ad alta risoluzione,
- integrazione di dati di traffico, ambiente, energia, social

analytics,

- simulazioni sulla morfologia urbana,
- modelli di mobilità multimodale,
- supporto alle politiche pubbliche e alle infrastrutture strategiche.

Virtual Singapore rappresenta un prototipo globale di Smart Nation basata su un Digital Twin nazionale.

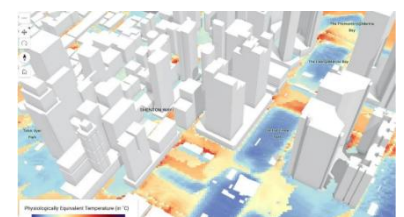


Figura 12: Virtual Singapore



Figura 13: Virtual Singapore

Genova – Geoportale Digital Twin

Il Digital Twin di Genova integra:

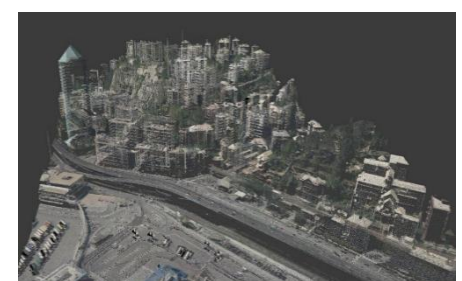


Figura 14: Genova – Geoportale Digital Twin

- modelli 3D LOD2 e LOD3,
- dati LiDAR e fotogrammetria,
- modelli idraulici e idrogeologici,
- simulazioni strutturali,
- dati IoT sulla mobilità,
- analisi microclimatiche,
- pianificazione urbana integrata.

È uno dei primi DT italiani a supportare attivamente la pianificazione e la protezione civile.

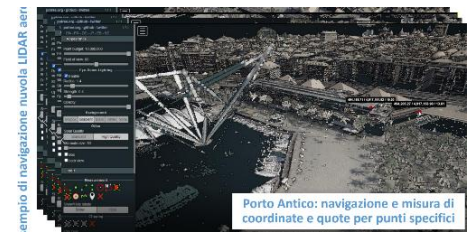


Figura 15: Genova – Geoportale Digital Twin

Digital Twin e governance: il caso DUET

Il progetto europeo DUET (Digital Urban European Twins) definisce un nuovo modello di governance urbana, introducendo il concetto di policy Digital Twin.

Le sue funzioni includono:

- simulazioni del traffico urbano,
- test virtuali di nuove politiche pubbliche,
- modellazione della qualità dell'aria,
- scenari di mobilità scolastica,
- valutazioni sull'impatto delle restrizioni veicolari,
- modelli previsionali basati su AI.

DUET dimostra che il Digital Twin non è solo uno strumento tecnico, ma anche uno strumento politico, capace di migliorare trasparenza, partecipazione e qualità decisionale.

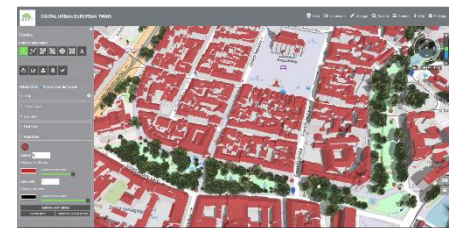


Figura 16: Digital Twin e governance: il caso DUET

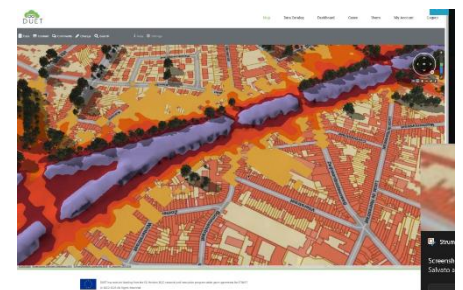


Figura 17: Digital Twin e governance: il caso DUET

Ulteriori esempi sono proposti nelle schede riportate nella sezione Allegati.

2.3.1. SMART CITIES, URBAN DIGITAL TWIN E INTEGRAZIONE DEI DATI

L'UDT - Urban Digital Twin, che riguarda il livello urbano esteso, insieme di quartieri, cioè la città, è un concetto generalmente associato a quello di Smart City e la rassegna della letteratura scientifica mostra che questo modello è quello a cui si fa più spesso riferimento. Il concetto emergente di Urban Digital Twin -UDT sta direzionando la pianificazione urbana - territoriale verso nuovi modelli ed approcci. L'UDT che si identifica come il DT di una Smart City, può essere utilizzato non solo per la simulazione delle dinamiche urbane ma anche per la progettazione e pianificazione (Weil et al. 2023; Ferrè-Bigorra, Casals & Gangoles 2022). L'UDT può trasformare il modo in cui le città possono essere modellate rispetto ai loro sistemi fisici,

utilizzando una modellazione geometrica 3D utile sia in fase di input che di output, fino al dettaglio del BIM, e integrando una varietà di dati che possono essere analizzati anche attraverso l'intelligenza artificiale - AI, all'Internet of Things - IoT cioè dispositivi smart connessi a una rete che inviano e ricevono grandi quantità di dati, da elaborare, da e verso altri dispositivi), ai Big Data e all'Edge Computing (l'EC è una strategia di elaborazioni dati, attraverso la quale i dati raccolti, ad esempio attraverso l'IoT, vengono elaborati in loco anziché inviarli ad un data center o al cloud) (Weil et al. 2023; Deren, Wenbo & Zhenfeng 2021). L'UDT può rappresentare l'insieme e l'integrazione di tutti i dati necessari che possono essere utilizzati nei contesti di gestione e pianificazione urbana - territoriale. Da questi concetti si evince come sia necessaria l'interazione dei dati provenienti da diverse fonti, si parla quindi di interoperabilità, ovvero la capacità di due o più sistemi, componenti o processi di scambiare informazioni contestualizzate in modo da poter agire su queste informazioni per raggiungere migliori decisioni operative e risultati predittivi (Weil et al. 2023). Per l'interoperabilità dei sistemi stanno emergendo i Data Lake, grandi archivi di dati, che contengono dati dinamici grezzi derivanti da diverse fonti, il che li rende la scelta ideale per le enormi quantità di dati forniti dall'IoT, da dispositivi, sensori e attuatori e altri. Questo consente di aggregare dati di caratteristiche e strutture diverse, e permette una visione completa dei sistemi o degli oggetti rappresentati dai gemelli digitali e integrare le simulazioni. Nella letteratura scientifica vi è però una carenza di approfondimenti della tematica rappresentando una delle difficoltà nell'implementazione degli UDT e necessita dello sviluppo di interfacce interoperabili tra i diversi settori di ricerca delle scienze urbane (Bauer et al. 2021). Le simulazioni nell'ambito dei UDT utilizzando essenzialmente una integrazione tra modelli tradizionali (ad esempio basati sulla fisica) e modelli data-driven degli organismi urbani, sfruttando per quanto possibile i più recenti sviluppi nel Machine Learning - ML , Deep Learning - DL nell'Intelligenza Artificiale - AI, ma siamo ancora nelle fasi iniziali, in particolare a causa della povertà dei dati.

Inoltre la difficoltà rispetto la validazione dei dati e lo loro interpretazione, così come la loro capacità adattiva soprattutto in condizioni d'emergenza o situazioni impreviste (Weil et al. 2023), la loro difficile rappresentazione in ambienti comprensibili ad un pubblico eterogeneo (Marcucci et al. 2020) rendono il quadro generale ancora più complesso.

2.4. TECNOLOGIE E STRUMENTI PER IL DT

In merito al quadro generale delineato nei paragrafi precedenti, che evidenzia il ruolo degli Urban Digital Twin come sistemi complessi fondati

sull'integrazione di modelli, dati e tecnologie eterogenee, si evidenzia come l'evoluzione di tali strumenti sia strettamente legata allo sviluppo delle tecnologie emergenti. In particolare, il possibile superamento di una condizione statica della riproduzione di contesti urbani dipende dalla capacità di connettere in modo continuo e bidirezionale il dominio fisico e quello digitale, garantendo aggiornamenti, coerenza e affidabilità delle informazioni. In questo contesto, il DT non si configura più come un semplice modello visualizzazione e simulazioni, ma come un ecosistema dinamico in cui modelli informativi tradizionali, dati statici e flussi informativi in tempo reale concorrono alla costruzione di strumenti avanzati per l'analisi, la previsione dei fenomeni e il supporto alla pianificazione.

Il tema della tecnologie emergenti svolge quindi un ruolo di grande rilievo in questo contesto. Infatti, considerando la caratteristica di biunivocità di trasmissione di informazioni, che identifica il concetto di gemello digitale, rapportato al tema territoriale, nonché scopo della ricerca, il DT può esistere attraverso l'interazione tra modelli tradizionali, come i modelli informativi geospaziali che derivano da attività istituzionali e scientifiche di formazione delle conoscenze, e ciò che concerne il mondo IoT cioè le componenti digitali utili a fornire dati in tempo reale. Questi ultimi sono proprio gli elementi necessari all'applicazione del modello di interscambio bidirezionale di informazioni. I modelli tradizionali sopracitati si nutrono e generano i dati statici. Ad esempio il modello informativo geospaziale CityGML fornisce un modello semantico e uno geometrico generale. L'uso del modello di superficie lo rende adeguato alle nuvole di punti e alle immagini aeree. Inoltre, ha la capacità di gestire diversi Level of Detail LOD, configurandosi quindi come un supporto necessario alla rappresentazione dei dati dinamici ottenibili, ad esempio, da sensori o simulazioni.

I dati dinamici riguardano invece tutto ciò che utilizza la tecnologia dell'IoT, indirizzata alla costituzione di modelli predittivi. Lo strumento ha quindi la capacità di relazionarsi con il suo oggetto fisico in tempo reale effettuando operazioni di raccolta dati, monitoraggio, gestione, analisi, controllo, visualizzazione, pianificazione, simulazione, predizione e decisione .

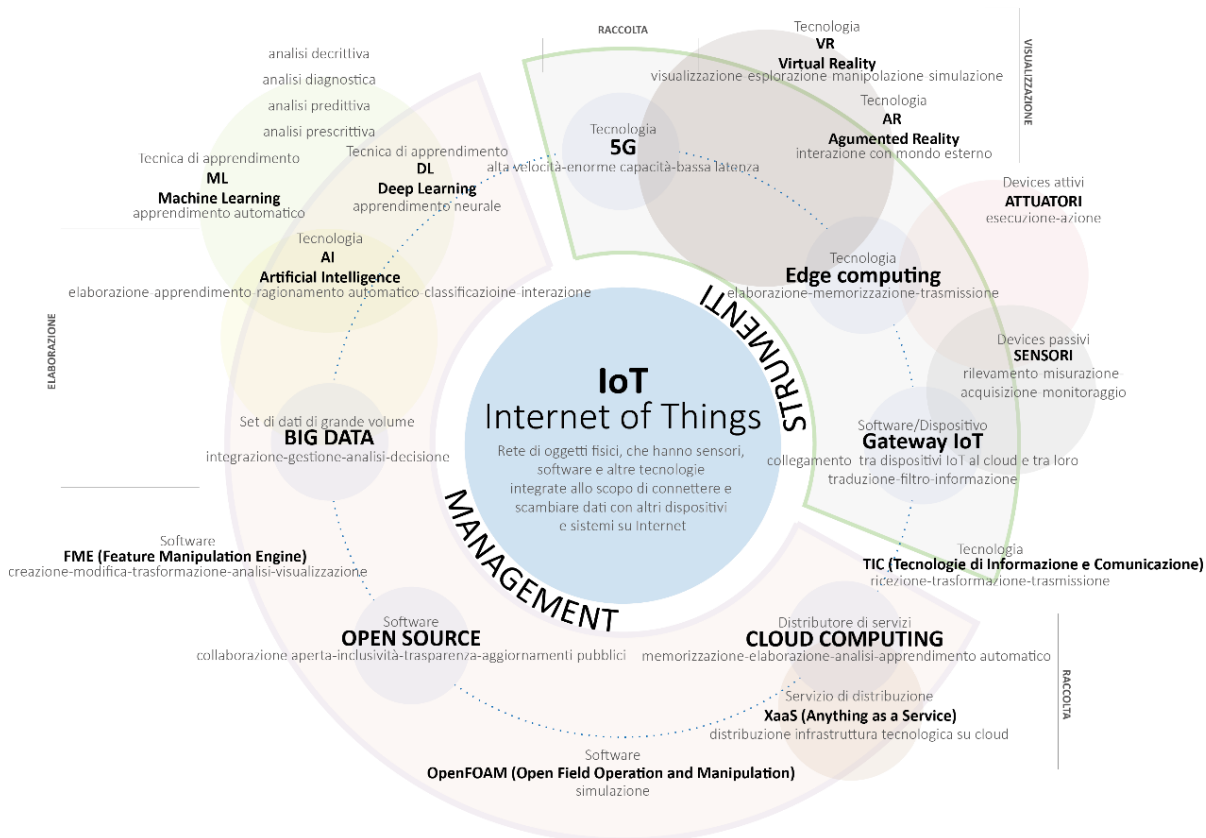


Figura 18: Le tecnologie emergenti necessarie allo sviluppo dei dati dinamici

La Figura 18 evidenzia come lo sviluppo dei dati dinamici sia il risultato dell'interazione sinergica di un insieme articolato di tecnologie emergenti, organizzate attorno al ruolo centrale dell'Internet of Things - IoT. Quest'ultimo costituisce l'elemento abilitante della connessione tra il sistema fisico e la sua controparte digitale, consentendo non solo la raccolta continua di informazioni attraverso i sensori, ma anche il monitoraggio costante delle condizioni del sistema e l'attuazione di azioni sul mondo reale mediante attuatori. L'ecosistema tecnologico rappresentato è caratterizzato da tre ambiti funzionali principali, la struttura, la gestione/management e l'elaborazione, che descrivono il ciclo di vita del dato dinamico e le operazioni che su di esso possono essere effettuate. L'ambito strutturale comprende le tecnologie interessate alla raccolta, al monitoraggio e alla trasmissione dei dati, tra cui sensori, attuatori, gateway IoT e infrastrutture di rete. In questo contesto, le Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione – ICT, le reti ad alta velocità come il 5G e l'edge computing rivestono un ruolo fondamentale, consentendo una prima gestione e analisi dei dati in prossimità della fonte, riducendo la latenza e rendendo possibile il controllo del sistema in tempo

reale, aspetto particolarmente rilevante in applicazioni critiche o in elaborazione di scenari.

Il livello di gestione/management riguarda in modo più esteso la gestione, la memorizzazione e la distribuzione dei dati raccolti. Le infrastrutture di cloud computing e i modelli XaaS (Anything as a Service) permettono di scalare le risorse computazionali e di supportare operazioni complesse di analisi, visualizzazione e pianificazione, rendendo i dati accessibili a diversi attori e livelli decisionali. L'adozione di soluzioni open source favorisce la collaborazione, l'interoperabilità e la trasparenza dei processi, mentre strumenti di simulazione avanzata contribuiscono alla simulazione dei fenomeni e alla valutazione di scenari alternativi.

L'ambito dell'elaborazione rappresenta infine il livello in cui i dati dinamici vengono trasformati in conoscenza e in supporto all'azione. L'integrazione dei Big Data con tecniche di Intelligenza Artificiale - AI, Machine Learning - ML e Deep Learning - DL consente di affrontare differenti livelli di analisi, da quella descrittiva e diagnostica fino a quella predittiva e prescrittiva. In questo modo, il sistema acquisisce la capacità di supportare processi di predizione e decisione, fornendo indicazioni utili per l'orientamento delle strategie di gestione e delle scelte. Nel complesso, la figura restituisce una visione sistemica dell'ecosistema tecnologico necessario alla gestione dei dati dinamici, evidenziando come la loro efficacia derivi dall'integrazione di componenti eterogenee piuttosto che dall'adozione di singole tecnologie. Tale integrazione consente di coprire l'intero spettro di operazioni – dalla raccolta alla decisione – costituendo la base operativa per l'implementazione dei Digital Twin e, in particolare per questo contesto, degli Urban Digital Twin, rendendo possibile una rappresentazione urbana e territoriale dinamica, adattiva e orientata alla previsione.

2.4.1. IL Data Lake

Considerando l'eterogeneità dei dati, sopracitati, e come già spiegato, il linguaggio delle informazioni deve essere ricondotto ad un linguaggio univoco. A tal proposito si utilizza il Data Lake, un sistema di archiviazione che consente di memorizzare tutti i dati grezzi, indipendentemente dal formato o dalla fonte. Le sue caratteristiche sono la scalabilità (cloud-native, distribuito), la capacità di Supportare dati strutturati, semi-strutturati e non strutturati, la prestazione ottimale per analisi predittive e machine learning (Esempi: Amazon S3 + Athena, Azure Data Lake, Hadoop, Databricks Delta Lake). Il Data Lake può essere definito come un repository centralizzato capace di raccogliere e archiviare grandi volumi di dati eterogenei, strutturati e non strutturati, mantenendoli nel loro formato originario e consentendone l'uso flessibile per analisi multiple (Hai et al., 2021; Azzabi et al., 2024).

2.5. BIG DATA E NUOVI DIRITTI DI CITTADINANZA

Con queste possibilità emergono non solo benefici ma anche complessità di tipo etico. Il tema dei dati in generale e ancor più nei processi di pianificazione e progettazione urbanistica e territoriale supportati da un DT, è dunque centrale e ci sta conducendo a rilevare nuovi aspetti del diritto alla città e alla cittadinanza, un tema ampiamente analizzato nelle scienze sociali e urbane (Lefebvre 2014; Blokland et al 2015; Harvey 2012; Plyushteva 2009; Purcell 2003) e che per il modello sociale attuale va riconsiderato (Di Ludovico 2021). In tema di diritti alla città, una tematica sulla quale si riscontra un gap significativo nella letteratura scientifica e che coinvolge direttamente i DT, riguarda le tecnologie innovative. In particolare, riguarda la generazione e l'utilizzo dei dati, i cosiddetti Big Data e le loro infrastrutture, che hanno sviluppato nuove forme di connessione sociale (di tipo 'digitale'), nuove polarizzazioni ma anche nuove esclusioni, rispetto ai gruppi marginalizzati. In questo contesto di nuove tecnologie, DT, pianificazione urbana e territoriale sono molte le questioni che si aprono in merito ai fruitori delle città, i cittadini. L'identità digitale e la rappresentanza del cittadino ad esempio rispetto al cittadino che può avere un "gemello digitale" che rappresenta la sua identità nei servizi pubblici (es. sanità, welfare, mobilità), o i diritti di privacy, autodeterminazione digitale e controllo dei dati diventano centrali e si aprono nuovi dibattiti su in merito a chi gestisce il gemello digitale del cittadino, o come viene protetta la libertà individuale in ambienti digitali governati da algoritmi. Ancora, il tema dei Digital Twin delle Smart Cities e la Partecipazione Civica. Le città intelligenti usano Digital Twin urbani per simulare e ottimizzare traffico, inquinamento, sicurezza, pianificazione, gestione dei rischi, ad oggi riesce il cittadino a partecipare consapevolmente e attivamente alla governance digitale della città? Si attivano così altri quesiti relativi ad esempio al diritto alla trasparenza, alla partecipazione e alla non discriminazione algoritmica. Altri temi emersi riguardano il limite tra sorveglianza e protezione; nel caso i Digital Twin possano abilitare sistemi di monitoraggio sociale ad esempio per persone o famiglie vulnerabili, deve essere gestito un controllo dei comportamenti, e accentuare l'uso etico dei Digital Twin. Ad oggi non esiste un quadro normativo europeo o internazionale specifico per i Digital Twin dei cittadini, però possiamo partire dal General Data Protection Regulation - GDPR (Regolamento UE 2016/679) per dati personali, la Carta dei Diritti Digitali dell'UE, Principi di giustizia algoritmica e AI Act europeo. Queste tematiche riguardano i Diritti Digitali di Cittadinanza, dall' Accesso universale alla rete, alla Protezione da

profilazione, al Diritto all'off (disattivazione di sistemi automatizzati) e sono sempre più emergenti nella letteratura. In questa sede sono solo state presentate come monito di spunto di riflessione rispetto a nuovi quesiti che virano su concetti multi tematici.

2.6. DT E PIANIFICAZIONE (stato dell'arte)

Ad oggi, risulta ancora difficile ottenere un DT in grado di riprodurre e interagire in modo completo con un sistema complesso come quello urbano o territoriale, sia esso una città, un'area vasta o una regione. La letteratura scientifica evidenzia come le applicazioni attualmente sviluppate siano prevalentemente settoriali o monotematiche, concentrate su singoli sottosistemi urbani – quali la mobilità, l'energia, le infrastrutture o il monitoraggio ambientale – piuttosto che su modelli integrati capaci di rappresentare la città nella sua dimensione sistemica e multidimensionale (Batty, 2018; Kandt & Batty, 2021). Tale frammentazione riflette la difficoltà di costruire un modello unitario che tenga conto delle interazioni dinamiche tra componenti fisiche, sociali, economiche e ambientali del sistema urbano.

Le principali criticità sono riconducibili alla raccolta e integrazione di dati eterogenei, spesso prodotti da fonti diverse e caratterizzati da differenti scale spaziali e temporali, nonché all'assenza di standard condivisi per la loro interoperabilità e gestione (Deng et al., 2021). A ciò si aggiungono i problemi legati alla validazione e all'aggiornamento continuo di grandi volumi di dati, che risultano essenziali per garantire l'affidabilità del Digital Twin nel tempo (Lu et al., 2020). La difficoltà di trasformare tali informazioni in rappresentazioni operative e dinamiche dei processi urbani limita ulteriormente la capacità del DT di supportare in modo efficace le decisioni di pianificazione, soprattutto in contesti complessi e in continua evoluzione. Queste problematiche risultano ancora più evidenti se si considera la scala territoriale e regionale, e legati ai rischi naturali, in cui interagiscono simultaneamente aspetti ambientali, antropici spesso caratterizzati da dinamiche non lineari e da elevati livelli di incertezza (Ferrari et al., 2022). In tale contesto, l'uso dei Digital Twin come strumento di supporto alla pianificazione integrata rimane un ambito di ricerca ancora poco esplorato. Sono infatti limitati gli studi che affrontano in modo sistemico il rapporto tra DT, governance multilivello e strumenti di pianificazione territoriale, evidenziando come la complessità computazionale e la difficoltà di coordinamento tra attori istituzionali rappresentino ostacoli rilevanti alla loro piena implementazione (Allam & Dhunny, 2019; Bibri et al., 2020). Nonostante tali limiti, l'integrazione del Digital Twin nei processi di pianificazione urbana rappresenta un'evoluzione significativa rispetto agli strumenti tradizionali. Il DT introduce infatti la possibilità di costruire scenari simulati e predittivi, utili a valutare anticipatamente gli effetti delle scelte urbanistiche e territoriali, superando una logica prevalentemente statica della pianificazione (Batty, 2020). Il Digital Twin consente di simulare scenari di trasformazione urbana, valutare l'impatto delle infrastrutture, modellare la mobilità e le

sue interazioni con l'ambiente, verificare l'efficacia delle politiche pubbliche, analizzare la qualità degli spazi pubblici e ottimizzare la localizzazione dei servizi (Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, 2022). La simulazione tridimensionale, integrata con dati storici e in tempo reale, permette inoltre di confrontare più alternative progettuali, valutandone la sostenibilità, la resilienza e la capacità di adattamento nel medio-lungo periodo (Kandt & Batty, 2021; Cimino et al., 2023). Tuttavia, affinché tali potenzialità possano tradursi in strumenti effettivamente operativi per la pianificazione, risulta necessario un ulteriore avanzamento sia sul piano tecnologico sia su quello metodologico e istituzionale.

3. LA PIANIFICAZIONE DEL RISCHIO

Il concetto di rischio da disastri è sempre più presente negli ambiti scientifico, sociale e di pianificazione dei territori (APAT, 2007; UNDRR, 2019; IPCC, 2022). L'aumento delle urbanizzazioni e l'espandersi degli insediamenti anche in aree potenzialmente esposte a rischi, il cambiamento climatico e la pressione antropica sugli ecosistemi naturali sono solo alcuni dei fattori che rendono le comunità sempre più esposte a danni dovuti da eventi estremi (Wisner et al., 2004; Hallegatte et al., 2020). Le conseguenze derivanti dal propagarsi di questi eventi sono dovute non solo all'intensità con cui si manifestano, ma soprattutto alla relazione con i fattori di vulnerabilità della popolazione e del territorio e all'esposizione delle comunità a rischio (Cutter et al., 2010; UNDRR, 2019). Il rischio da disastri naturali ha quindi delle dirette ripercussioni e amplificazioni all'interno di strutture sociali, economiche ed istituzionali di una comunità, per questo a volte si parla di disastri socio-naturali (Wisner et al., 2004). Un evento calamitoso ha un differente impatto in termini di danni e perdite di vite a seconda dell'interazione che vi è con il contesto – popolazione, edifici, infrastrutture – ad esempio se avviene in un'area ad alta densità abitativa rispetto a una disabitata si avranno conseguenze differenti (Coviello et al., 2021; Hallegatte et al., 2020). Risulta evidente l'importanza del ruolo del fattore umano nell'acquisizione degli strumenti adatti ad affrontare o almeno a mitigare i fenomeni (Berti et al., 2007; Norris et al., 2008). Questo è possibile attraverso un approccio preventivo e sistemico. Considerando che il fenomeno naturale non può essere controllato, i fattori di vulnerabilità, esposizione e anche capacità di risposta possono essere adattati per mitigare il livello di rischio (Wisner et al., 2004; UNDRR, 2019). Per cui una gestione del rischio più efficiente non deve limitarsi solamente alla fase emergenziale, bensì deve poter prevenire, preparare,

rispondere e ricostruire, secondo una logica ciclica di gestione del disastro (UNDRR, 2019; OECD, 2020).

Questo processo può essere concretizzato con strumenti come i Piani Regolatori comunali aggiornati, una profonda conoscenza dei rischi e soprattutto l'introduzione di questi nella pianificazione, l'uso di sistemi di allerta precoci e la partecipazione della cittadinanza (APAT, 2007; Meerow et al., 2016). Questi approcci quindi riguardano strumenti strutturali che rendono le città più adattabili e sicure, come il miglioramento delle condizioni degli edifici o delle infrastrutture, o ancora attraverso l'integrazione di verde urbano o sistemi che riducano l'impermeabilizzazione dei suoli (Coviello et al., 2021; IPCC, 2022).

Metodi non strutturali invece sono rivolti alla popolazione, ricordando quanto sia importante una comunità resiliente che sia in grado di anticipare, resistere e rispondere a un evento calamitoso (Norris et al., 2008; Meerow et al., 2016). Alcuni di questi possono essere una migliore governance, l'informazione e la formazione rivolte alle comunità per una maggiore consapevolezza dei rischi e l'uso di buone pratiche di comportamento, o il sostegno alle reti di volontariato (Berti et al., 2007; UNDRR, 2019). Attraverso una migliore pianificazione territoriale del rischio si può contribuire ad analizzare e gestire l'interazione tra fenomeni naturali e fattori socioeconomici, avvalendosi di politiche come il Disaster Risk Assessment – DRA e il Disaster Risk Management – DRM (UNDRR, 2019; OECD, 2020). Oggi questi modelli sono possibili anche grazie all'utilizzo delle nuove tecnologie, che forniscono strumenti di analisi in grado di effettuare valutazioni e previsioni di eventi naturali (Batty, 2018). Con i dati satellitari, ad esempio, si ottengono monitoraggi continui di eventi come incendi e dissesti idrogeologici, mentre con i Sistemi Informativi Geografici – GIS si possono integrare dati di differente tipo – ambientali, demografici e territoriali – ottenendo così mappe di rischio valide per identificare le aree maggiormente esposte e supportare le scelte pianificatorie (Coviello et al., 2021; ESRI, 2023). Anche i modelli predittivi rappresentano un ulteriore potenziale di sostegno, potendo generare e simulare scenari futuri; in questo contesto, anche i Digital Twin, grazie alla loro capacità di interagire con il sistema reale, potranno offrire possibili soluzioni che vanno oltre la semplice previsione (Batty, 2018; Boje et al., 2020). In questo quadro, inoltre, emerge con crescente rilevanza il ruolo del Pre-Disaster Recovery Planning, inteso come l'insieme di strategie e strumenti finalizzati a pianificare in anticipo le modalità di recupero e ricostruzione, prima che un evento calamitoso si verifichi. La letteratura sottolinea come anticipare le scelte relative al recovery consenta di ridurre l'improvvisazione decisionale nella fase post-disastro, migliorare il coordinamento tra attori istituzionali e locali e limitare il rischio che l'emergenza si traduca in una crisi prolungata

nel tempo (Schwab et al., 1998; FEMA, 2017; Di Ludovico et al., 2023). Il Pre-Disaster Recovery Planning si inserisce pienamente nella logica ciclica della gestione del rischio, rafforzando il legame tra prevenzione, preparedness e recupero, e contribuendo al principio del Build Back Better promosso dal Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030 (UNDRR, 2015). In tal senso, pianificare il recovery in fase pre-evento non significa solo prepararsi alla ricostruzione fisica, ma anche alla ricostruzione sociale, economica e istituzionale, aumentando la resilienza dei territori e la capacità delle comunità di adattarsi e trasformarsi positivamente dopo eventi di crisi (UNDRR, 2019; Di Ludovico et al., 2023).

3.1. IL CONCETTO DI RISCHIO NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA

Il rischio di disastri connessi a eventi naturali calamitosi costituisce una tematica che coinvolge molte aree geografiche e comunità, per questo ha una forte rilevanza a livello globale. Risulta essere una tematica centrale per le discipline come la gestione del rischio da disastri, la pianificazione territoriale e le politiche di adattamento al cambiamento climatico (Wisner et al., 2004; UNDRR, 2019; IPCC, 2022). Una definizione generalistica identifica il rischio come la probabilità del manifestarsi di un evento pericoloso e delle sue conseguenze negative su persone, beni, infrastrutture e ambiente (UNDRR, 2022). Il rischio quindi non è inteso come una caratteristica intrinseca del fenomeno naturale, bensì come il risultato dell'interazione tra pericolosità, esposizione e vulnerabilità (Wisner et al., 2004; Cutter et al., 2008).

La letteratura sottolinea come il rischio non possa essere interpretato esclusivamente in termini probabilistici o fisici, ma debba essere analizzato come un fenomeno socio-naturale, fortemente influenzato da fattori economici, sociali, istituzionali e culturali. Tale approccio ha portato a superare visioni deterministiche, riconoscendo che eventi naturali simili possono produrre effetti profondamente diversi a seconda del contesto territoriale e della struttura sociale coinvolta (Blaikie et al., 1994; Wisner et al., 2004).

In generale, nella letteratura scientifica, i fenomeni naturali possono essere classificati secondo la loro tipologia di origine, distinguendo tra fenomeni endogeni ed esogeni (APAT, 2007; Smith, 2013).

I fenomeni di origine endogena, sono legati principalmente all'energia geotermica e ai movimenti tettonici della crosta terrestre, possono essere improvvisi e devastanti, difficili da prevedere con precisione, e colpiscono aree geografiche ben precise (aree vulcaniche, sismiche). Alcuni esempi possono essere terremoti causati dallo spostamento delle placche

tettoniche, eruzioni vulcaniche, dovute alla liberazione di magma e gas dalla crosta terrestre, maremoti (tsunami) spesso sismo indotti o il fenomeni di bradisismo ovvero il sollevamento o abbassamento lento del suolo (UNDRR, 2019).

I fenomeni di origine esogena sono generalmente causati da agenti atmosferici, processi superficiali o condizioni meteorologiche, come alluvioni dovute a piogge intense, frane e smottamenti cioè movimenti del terreno dovuti a pioggia o instabilità del suolo, fenomeni di erosione derivanti dall'usura del suolo, vento o ghiaccio. Altri fenomeni sono la siccità quando sussistono lunghi periodi con assenza di precipitazioni, ondate di calore quando le temperature elevate in un data area geografica si verificano per un intervallo di tempo prolungato. Ma anche tempeste, uragani e tornado definiti come fenomeni atmosferici estremi, o valanghe, distacchi di manti nevosi su versanti montani (IPCC, 2022; Coviello et al., 2021). C'è da precisare nuovamente che solo alcuni di questi possono essere previsti, e più in generale i fenomeni possono essere aggravati dall'impatto antropico, come un eccessivo uso di suolo, o la deforestazione.

A tal proposito, dando rilievo alla presenza del fattore umano, la definizione del rischio di disastro come combinazione di pericolosità, esposizione, vulnerabilità e capacità di risposta o resilienza (IPCC, 2022; UNDRR, 2015), è sicuramente più specifica.

Ad oggi nel campo scientifico sono state sviluppate diverse metodologie per la determinazione del rischio, che possono essere ricondotte a tre principali approcci, quantitativo, qualitativo e integrato.

Gli approcci quantitativi si basano su dei modelli probabilistici e statistici che stimano la frequenza e l'intensità dei possibili eventi catastrofici, combinandoli con dati relativi all'esposizione e alla vulnerabilità. Tali modelli sono ad esempio utilizzati per le valutazioni dei rischi sismico e idraulico, e consentono di produrre indicatori numerici e mappe di rischio utili come supporto decisionale (FEMA, 2018; UNDRR, 2019). Gli approcci qualitativi, invece, si riferiscono principalmente ad analisi relative alle condizioni sociali, istituzionali e territoriali che inficiano sul fattore vulnerabilità, spesso attraverso indicatori combinati e analisi partecipative. Questi metodi risultano utili a comprendere quegli aspetti difficilmente quantificabili, come la percezione del rischio, la governance e il capitale sociale (Cutter et al., 2008; Norris et al., 2008).

Gli approcci integrati combinano analisi quantitative e qualitative, riconoscendo la natura multidimensionale del rischio. In questo contesto si collocano gli approcci di Disaster Risk Assessment – DRA e il Disaster Risk Management – DRM, promossi a livello internazionale come quadri di riferimento per l'analisi, la gestione e la riduzione del rischio durante tutto

il ciclo del disastro, dalla prevenzione, preparazione, risposta e infine alla ricostruzione (UNDRR, 2019; OECD, 2020).

Questi approcci metodologici sono stati ulteriormente implementati negli ultimi anni, attraverso l'impiego di tecnologie digitali, come i Sistemi Informativi Geografici – GIS, il telerilevamento satellitare e i modelli predittivi, che consentono di integrare dati ambientali, territoriali e socioeconomici e di simulare scenari futuri. Più recentemente, strumenti come i Digital Twin stanno emergendo come ambienti dinamici potenzialmente capaci di supportare analisi integrate del rischio, tentando di passare dalla valutazione, alla sperimentazione di strategie di mitigazione e adattamento in contesti complessi e in continua evoluzione (Batty, 2018; Boje et al., 2020).

Anche l'United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) definisce il rischio come la potenziale perdita di vite umane, lesioni o danni a beni o cose che potrebbero verificarsi a un sistema, a una società o a una comunità in un determinato periodo di tempo, definito in modo probabilistico in funzione delle seguenti componenti:

- **HAZARD- H**

Quando e quanto intenso sarà il fenomeno

Per pericolosità – hazard si intende un fenomeno naturale o indotto dall'uomo potenzialmente in grado di provocare danni a persone, beni, infrastrutture e ambiente (UNDRR, 2022). Essa esprime la probabilità di accadimento di un evento e la sua intensità in un determinato intervallo temporale e in una specifica area geografica. La valutazione della pericolosità si basa quindi sull'analisi della frequenza e della magnitudo degli eventi attesi. È inoltre necessario sottolineare come il cambiamento climatico stia contribuendo a modificare l'intensità e la frequenza di alcuni fenomeni estremi, introducendo ulteriori elementi di incertezza nella stima dell'hazard (IPCC, 2022).

- **VULNERABILITY – V**

Quanto un contesto e una comunità sono fragili

Il concetto di vulnerabilità indica la proclività di un sistema naturale o umano a subire danni in seguito al verificarsi di un evento pericoloso. Si tratta di un fattore multidimensionale, che comprende componenti fisico-strutturali, sociali, economiche, ambientali e istituzionali (Wisner et al., 2004; UNDRR, 2022). La vulnerabilità consente di comprendere come gruppi sociali differenti possano subire impatti profondamente diversi a parità di esposizione e pericolosità. In particolare, essa evidenzia come i

gruppi più vulnerabili tendano a subire effetti più distruttivi e duraturi dai disastri rispetto a comunità caratterizzate da una maggiore capacità di adattamento e risposta (IPCC, 2022).

- **EXPOSURE - E**

Chi e cosa si trova in pericolo

Il fattore esposizione riguarda l'insieme degli elementi presenti in aree potenzialmente a rischio, includendo popolazione, beni materiali e immateriali, attività economiche, infrastrutture, risorse ambientali e servizi essenziali di supporto e sussistenza (UNDRR, 2015). L'esposizione è fortemente influenzata dalle scelte di sviluppo e di pianificazione territoriale; in particolare, processi quali le espansioni urbane non pianificate o la crescita incontrollata di alcune aree contribuiscono ad aumentare il numero di beni e persone esposte a disastri derivanti da rischi naturali, amplificando così le potenziali conseguenze degli eventi calamitosi.

RESPONSE CAPACITY- C

Come mitigare il rischio

La response capacity - capacità di risposta rappresenta la capacità di una comunità o di un'istituzione di prepararsi, rispondere e recuperare in modo efficace a seguito di un evento disastroso (Twigg, 2015). Essa comprende la disponibilità di risorse materiali e finanziarie, la qualità dei sistemi di governance, l'efficacia degli strumenti di pianificazione e il livello di partecipazione civica. Una capacità di risposta adeguata consente di ridurre sia i danni diretti sia quelli indiretti, di migliorare i tempi di recupero e di rafforzare la resilienza complessiva delle comunità coinvolte (UNDP, 2010). Il rischio deve essere interpretato come un fenomeno sistemico, in quanto deriva da interazioni complesse tra persone, ambiente e istituzioni (IPCC, 2022) (UNDRR, 2015). Questo si configura quindi come il risultato di un'interazione multidimensionale tra le diverse componenti che lo definiscono. In questa prospettiva, l'obiettivo delle politiche di valutazione e gestione dei rischi non dovrebbe limitarsi alla previsione e alla conoscenza degli eventi potenzialmente dannosi, ma orientarsi verso una riduzione complessiva del rischio, adottando una visione integrata e di lungo periodo. Tale obiettivo può essere perseguito intervenendo sui fattori che concorrono alla determinazione del rischio: la conoscenza e il monitoraggio della pericolosità, la mitigazione della vulnerabilità, la riduzione dell'esposizione e il potenziamento della capacità di risposta possono infatti ridurre in modo significativo l'impatto degli eventi calamitosi sui sistemi potenzialmente coinvolti e favorirne una ripresa più

efficace. Questa impostazione evidenzia come la comprensione del rischio da disastri naturali non costituisca esclusivamente un problema di natura fisica o ambientale, ma anche una questione sociale e politica, strettamente connessa alle scelte di sviluppo, pianificazione e governance (Wisner et al., 2004). Inoltre, con l'espressione disastro socio-naturale si sottolinea come la vulnerabilità sociale giochi un ruolo centrale nella trasformazione di un evento naturale in disastro (Olori, 2024). La localizzazione di insediamenti in zone sismiche, la cementificazione di aree alluvionali, la deforestazione e la mancata manutenzione del territorio rappresentano alcune delle principali criticità che contribuiscono ad accrescere l'esposizione delle comunità a livelli di rischio più elevati (Carnelli et al., 2015). A questi fattori si aggiungono condizioni di marginalità economica, debolezza istituzionale e carenza di informazione, che rendono alcune popolazioni più vulnerabili di altre. I disastri, dunque, non colpiscono tutti allo stesso modo e spesso finiscono per accentuare disuguaglianze preesistenti, confermando la natura profondamente sociale del rischio.

3.2. IL CONCETTO DI MULTIRISCHIO NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA

Nonostante i disastri naturali derivino da eventi di diversa origine, quali i rischi geofisici, idro-meteorologici e biologici, essi non si manifestano quasi mai come fenomeni isolati, ma risultano inseriti all'interno di sistemi di multirischio. Nella letteratura scientifica e nei documenti istituzionali internazionali, il termine multirischio – multi-risk o multi-hazard indica una condizione in cui più eventi pericolosi, anche di natura differente, interagiscono tra loro nello spazio e nel tempo, manifestandosi in modo simultaneo o concatenato e determinando un'amplificazione dell'impatto complessivo (UNDRR, 2022; European Commission–JRC, 2017). In questa ottica, il rischio non è più considerato come la semplice somma di singoli pericoli, ma come il risultato di interazioni complesse tra eventi naturali, sistemi territoriali e componenti socio-economiche. Esempi ricorrenti di multirischio includono un maremoto – tsunami innescato da un sisma, una frana sismo-indotta, oppure un'alluvione che colpisce un'area precedentemente interessata da incendi boschivi, con conseguente aumento della suscettibilità del suolo e della pericolosità idraulica (UNDRR, 2022; European Environment Agency, 2024). Questo approccio al multirischio ha assunto un ruolo sempre più centrale negli studi recenti, poiché consente di elaborare scenari integrati più realistici, in grado di supportare in modo più efficace la pianificazione territoriale, la gestione del rischio e le attività di Protezione Civile (European Commission–JRC, 2017; UNDRR, 2019). L'adozione di una prospettiva multi-hazard riflette una

visione olistica del problema, evidenziando come i fenomeni estremi raramente agiscano in modo indipendente e come le loro interazioni possano generare effetti non lineari, spesso difficili da prevedere. Inoltre, l'analisi del multirischio non si limita alla sola simultaneità delle diverse pericolosità, ma considera anche le relazioni spaziali, temporali e funzionali tra gli eventi e i sistemi coinvolti. Ciò implica che la mancata considerazione di tali sinergie può condurre a una sottostima della portata reale degli impatti, rendendo i territori e le comunità ancora più vulnerabili (UNDRR, 2022; IPCC, 2022). Una visione del rischio limitata al singolo evento risulta quindi riduttiva e inadeguata a rappresentare la complessità delle interazioni tra sistemi naturali e sistemi sociali.

In base alle modalità con cui tali interazioni si manifestano, la letteratura distingue diverse tipologie di multirischio.

- **Multirischio Simultaneo**

Si verifica quando eventi distinti, anche di natura diversa, si manifestano contemporaneamente nello stesso contesto territoriale, come nel caso di un terremoto che avviene durante un evento alluvionale, aggravando le difficoltà di risposta e gestione dell'emergenza (European Commission-JRC, 2017).

- **Multirischio Concatenato**

È noto anche come effetto domino o a cascata, si configura quando un evento iniziale ne innesca o amplifica uno successivo, generando una sequenza di impatti interdipendenti. Un esempio emblematico è rappresentato da un'eruzione vulcanica che provoca una frana, la quale a sua volta può attivare uno tsunami, con conseguenze estese nello spazio e nel tempo (UNDRR, 2022).

- **Multirischio Cumulativo**

Riguarda invece la ripetizione di eventi nel tempo, che contribuisce a un progressivo deterioramento delle condizioni di vulnerabilità dei territori esposti. Fenomeni come stagioni consecutive di piogge intense o ondate di calore ripetute possono indebolire infrastrutture, ecosistemi e capacità di risposta delle comunità, aumentando la probabilità e la gravità dei danni futuri (IPCC, 2022; European Environment Agency, 2024).

- **Multirischio Sistemico**

Descrive situazioni in cui gli impatti di un evento si propagano attraverso sistemi interconnessi, come reti di trasporto, sistemi energetici, servizi sanitari o catene di approvvigionamento. In questi casi, il disastro non si limita all'area direttamente colpita, ma genera effetti a cascata su scala più ampia, mettendo in crisi il funzionamento complessivo della società (UNDRR, 2022; European Commission–JRC, 2025).

Alcuni eventi multirischio di grande impatto sia nel contesto internazionale che relativi al contesto italiano, sono riportati nelle Tabella 5 e Tabella 6.

EVENTO	DATA E LUOGO	EVENTO SCATENANTE	COMBO MULTIRISCHIO	CONSEGUENZE PRINCIPALI	FONTI
Terremoto e tsunami di Kamchatka	2025, Kamchatka, Russia	Terremoto sottomarino M8.8	Sismico + tsunami + evacuazioni	Evacuazioni costiere e danni infrastrutturali	USGS
Collasso diga di Brumadinho	2019, Minas Gerais, Brasile	Cedimento diga di sterili	Collasso + colata di fanghi + contaminazione fluviale	270 vittime	Brazilian Government, UN Environment
Incendi e frane post-incendio	2017–2018, California, USA	Incendi boschivi estremi	Incendi + erosione + frane + colate detritiche	Danni variabili, con ampie aree urbane e rurali	USGS, CAL FIRE, NOAA
Terremoto, tsunami e crisi nucleare di Fukushima	2011, Tōhoku, Giappone	Terremoto megathrust M9.0	Sismico + tsunami + nucleare	ca. 15.000 vittime e contaminazione	IAEA, USGS
Uragano Katrina	2005, New Orleans, USA	Uragano cat. 5	Meteorologico + idraulico + infrastrutturale + sociale	1.392 vittime ca. 652 dispersi ca. 125 miliardi di \$ di danni	FEMA, NOAA, US Army Corps of Engineers
Terremoto e tsunami Oceano Indiano	2004, Sumatra-Andamane	Megaterremoto sottomarino	Sismico + tsunami transoceanico	ca. 230.000 vittime in più paesi	NOAA, USGS
Ondate di calore europee	2003, Europa occidentale	Ondata di calore estrema	Climatico + sanitario + energetico	ca. 72.000 vittime in più paesi	WHO, IPCC, Eurostat

Tabella 5: esempi eventi multi-rischio mondiali

EVENTO	DATA E LUOGO	TIPI DI RISCHIO COINVOLTI	DINAMICA MULTIRISCHIO	CONSEGUENZE PRINCIPALI	FONTI
Alluvione Emilia-Romagna	23/05/2023 Emilia-Romagna	piogge persistenti> esondazioni> frane diffuse	precipitazioni prolungate saturano i suoli causando esondazioni e frane	vittime > 15 danni > 10 mld €	Protezione Civile, ISPRA, Regione Emilia-Romagna
Alluvione e frana Ischia	26/11/2022 Ischia, Napoli	pioggia estrema> frana> alluvione	nubifragio concentrato innesca frana e colata dedritica	vittime 12 danni urbani consistenti	Protezione Civile, ISPRA
Valanga di Rigopiano	18/01/2017 Farindola, Pescara	sisma> valanga> collasso strutturale> isolamento	neviccate eccezionali e sismicità favoriscono il distacco nevoso	vittime 29	Protezione Civile, Commissione Parlamentare 2018
Alluvione Livorno	9-10/09/2017 Livorno	nubifragio> allagamenti> crisi infrastrutturale	pioggia intensa supera la capacità idraulica urbana	vittime 8 danni urbani gravi	ISPRA, Protezione Civile
Frane Sarno e Quindici	5-6/05/1998 Livorno	piogge intense> frane> colate rapide	versanti instabili investono i centri abitati	vittime 161	ISPRA, Protezione Civile
Disastro Vajont	09/10/1963 Longarone, Belluno	frana> onda di piena> inondazione	distacco e frana nel bacino artificiale e superamento diga	vittime ca. 1917	ISPRA, Protezione Civile

Tabella 6: esempi eventi multi-rischio in Italia

La classificazione di eventi multirischio consente di definire degli scenari di rischio più realistici, migliorare la prevenzione e pianificare strategie di risposta più efficaci e flessibili. La complessità del tema non è data solo dalle caratteristiche e dalle conoscenze del fenomeno ma anche dalla necessità di utilizzare degli strumenti avanzati e di avere un approccio il più possibile interdisciplinare. Attraverso strumenti come il GIS e telerilevamento si possono effettuare analisi in grado di delineare degli hotspot di rischio, o si possono generare delle simulazioni di eventi a catena e stimare impatti combinati con i modelli probabilistici e scenari. Anche l'utilizzo di Big data e dell'intelligenza artificiale possono essere utili ad

analizzare serie storiche, dati ambientali e comportamenti umani in tempo reale, tutti elementi utili ad una visione integrata dei possibili impatti e quindi delle possibili azioni. A livello internazionale, le istituzioni come l'UNDRR e il Joint Research Centre (JRC) dell'UE stanno promuovendo piattaforme e linee guida per la valutazione integrata del multirischio.

3.3. IL DISASTER RISK ASSESSMENT – DRA

Nel contesto attuale, caratterizzato da una crescente complessità dei fenomeni calamitosi e dalla frequente interazione tra rischi di diversa natura, il Disaster Risk Assessment – DRA assume un ruolo strategico per affrontare il tema del multirischio in modo strutturato e operativo. L'approccio multi-hazard richiede infatti strumenti capaci di analizzare non solo singoli eventi, ma anche le loro interazioni, concatenazioni e propagazioni sistemiche nel tempo e nello spazio. In questo quadro, il DRA rappresenta il principale strumento conoscitivo a supporto della pianificazione territoriale e della gestione del rischio, poiché consente di integrare le diverse componenti del rischio in una visione unitaria e comparabile. La sua applicazione permette di superare una lettura settoriale del rischio, orientando le scelte pianificatorie verso strategie preventive e adattive, fondamentali per ridurre la vulnerabilità dei territori e aumentare la resilienza dei sistemi urbani e territoriali.

Il Disaster Risk Assessment (Greiving et al., 2021) è un processo chiave per l'identificazione, la quantificazione e l'analisi dei rischi associati ai potenziali disastri. La valutazione del rischio si basa sulle quattro componenti fondamentali già citate: la pericolosità (hazard), che rappresenta la probabilità che un evento si verifichi con una certa intensità; la vulnerabilità (vulnerability), che descrive il grado di danno che elementi esposti possono subire; e l'esposizione (exposure), che indica il valore e la distribuzione di persone, infrastrutture e risorse presenti nelle aree a rischio (Cardona et al., 2012), (IPCC, 2015) e la capacità di risposta (response capacity) cioè la capacità di un sistema di far fronte alle sollecitazioni prodotte dall'evento calamitoso (Torre et al., 2006).

Il DRA costituisce la base del processo di gestione del rischio (Disaster Risk Management- DRM), ed è uno strumento utile ai governi territoriali, come agli enti di Protezione Civile. Come dichiarato Secondo il Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015–2030), la comprensione e valutazione dei rischi rappresenta il primo passo nella riduzione del rischio di disastri. Con il DRA quindi si utilizza un approccio conoscitivo del rischio totale analizzandone le componenti che lo costituiscono secondo la funzione $R = f(H, V, E, C)$.

Ad esempio con la valutazione della pericolosità si analizzano la frequenza e l'intensità del possibile evento, attraverso modelli probabilistici o simulazioni per scenari specifici. Per la vulnerabilità si analizzano i fattori sociali (popolazione fragile, condizioni economiche, o livelli di istruzione), i fattori strutturali (condizione degli edifici, l'epoca di costruzione, centri storici), i fattori ambientali (aree protette, aree naturali degradate) e molto altro a seconda dei dati ufficiali disponibili, anche se spesso non sono aggiornati. Con l'esposizione si tenta non solo di localizzare le possibili aree coinvolte ma anche di quantificarne gli elementi, alcuni strumenti a supporto possono essere i sistemi informativi geografici GIS o il telerilevamento necessari ad ottenere rappresentazioni cartografiche. Le analisi sulla Capacità di risposta riguardano ad esempio gli approfondimenti sulle misure e sulle risorse di sistemi esistenti di riduzione delle conseguenze degli eventi, il livello di conoscenza sui temi da parte della popolazione, o i sistemi di allerta di Protezione Civile.

Il Disaster Risk Assessment – DRA può avvalersi di differenti metodologie di valutazione e approcci, come illustrato nel paragrafo 3.1. Un approccio di tipo qualitativo si basa su interviste, consultazioni con esperti o scale soggettive di interpretazione del rischio; un approccio semi-quantitativo restituisce informazioni attraverso indicatori integrati e sistemi di punteggio; mentre una valutazione quantitativa utilizza modelli matematici o statistici e simulazioni per la stima delle perdite e dei danni attesi, come l'Expected Annual Loss – EAL (UNDRR, 2019; World Bank, 2021). All'interno delle valutazioni quantitative e probabilistiche, l'uso di modelli di catastrofe – Catastrophe Models consente di stimare in modo più accurato la probabilità di perdite severe e la distribuzione degli impatti nel tempo e nello spazio (OECD, 2018). Tra gli strumenti più diffusi rientrano HAZUS, sviluppato dalla Federal Emergency Management Agency per la valutazione dei rischi sismici, idrologici e meteorologici negli Stati Uniti (FEMA, 2023), CAPRA, promosso dalla Banca Mondiale per l'analisi probabilistica del rischio in contesti multi-hazard, in particolare nei Paesi in via di sviluppo (World Bank, 2021), e RiskScape, piattaforma nazionale della Nuova Zelanda per la valutazione integrata dei rischi naturali e delle perdite potenziali (NIWA & GNS Science, 2020). In Italia, esempi di applicazione del DRA si riscontrano nelle attività di enti come l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV e il Dipartimento della Protezione Civile, che utilizzano valutazioni di rischio e scenari probabilistici per supportare l'analisi dei rischi sismici e idrogeologici e la pianificazione di emergenza a scala nazionale e locale (Dipartimento della Protezione Civile, 2021; INGV, 2022). In ambito internazionale, un caso rilevante è rappresentato dalla città di Medellín – Colombia, dove l'integrazione di sistemi informativi geografici – GIS è utilizzata per la valutazione del rischio da frana nei

quartieri informali, a supporto delle politiche di prevenzione e riqualificazione urbana (UNDRR, 2019). Analogamente, in Bangladesh, il DRA è impiegato per identificare le aree più esposte ai cicloni tropicali e orientare la localizzazione di rifugi anti-ciclone e infrastrutture resilienti, riducendo significativamente il numero di vittime negli eventi estremi più recenti (World Bank, 2020; UNDRR, 2022).

Sebbene il DRA rappresenti un punto di partenza fondamentale per una migliore conoscenza, pianificazione e gestione del rischio da disastri, esso risulta ad oggi un approccio ancora complesso, anche a causa di lacune conoscitive, di disponibilità e qualità dei dati e di integrazione tra i diversi settori coinvolti. Alcuni di questi gap possono essere così sintetizzati:

GAP DEI DATI

Le difficoltà sono dovute, ad esempio, alla scarsità dei dati necessari, al loro aggiornamento o alla loro accessibilità. Sono inoltre presenti criticità legate alla mancanza di standardizzazione dei dati, che non agevola l'interoperabilità tra enti e istituzioni differenti, limitando l'efficacia delle valutazioni di rischio (UNDRR, 2019; European Commission–JRC, 2017).

GAP DI INTEGRAZIONE DEL MULTI-RISCHIO

La complessità di integrare i diversi rischi fa sì che molte valutazioni analizzino i rischi in modo isolato, escludendo un fattore più realistico rappresentato dall'interazione e dalla concatenazione tra eventi potenzialmente pericolosi, con conseguente sottostima degli impatti complessivi (UNDRR, 2022).

GAP DEI DATI DINAMICI

La difficoltà dei modelli dinamici è legata alla complessità di incorporare dati eterogenei relativi ad esempio alle variazioni climatiche, demografiche o territoriali, nonché all'utilizzo di scenari previsionali. Ciò conduce spesso a valutazioni statiche, difficilmente aggiornabili in tempi brevi e poco rappresentative dell'evoluzione reale del rischio (IPCC, 2022).

GAP DELLE TECNOLOGIE EMERGENTI

Oltre a un marcato divario digitale tra diverse aree geografiche e gruppi sociali, strumenti innovativi come i Big Data, l'Intelligenza Artificiale, la sensoristica IoT e il Machine Learning risultano ancora poco integrati nei sistemi istituzionali (European Commission–JRC, 2025; UNDRR, 2022).

GAP DELLA VULNERABILITÀ SOCIALE

Non è ancora disponibile una metodologia unificata e standardizzata per l'analisi della vulnerabilità sociale e della capacità di risposta delle

popolazioni. Spesso le valutazioni non includono indicatori fondamentali per comprendere la struttura sociale delle comunità, come il livello di istruzione, la presenza di persone fragili, il tasso di povertà, le disuguaglianze di genere o la composizione dei nuclei familiari, elementi che risultano invece determinanti nella capacità di affrontare e recuperare da un evento disastroso (Wisner et al., 2004; UNDRR, 2019).

GAP DELLA PARTECIPAZIONE E COMUNICAZIONE

La limitata partecipazione delle comunità locali nei processi di raccolta e validazione dei dati, insieme alla difficoltà di lettura e comprensione dei risultati, spesso caratterizzati da un elevato tecnicismo, riduce la consapevolezza del rischio e ostacola l'effettivo coinvolgimento dei cittadini nei processi decisionali (UNDRR, 2019).

GAP ISTITUZIONALE

Gli enti locali incontrano difficoltà nell'aggiornamento delle analisi di DRA a causa della carenza di risorse economiche, competenze tecniche e dotazioni tecnologiche. Inoltre, le valutazioni di rischio risultano spesso poco integrate all'interno delle politiche pianificatorie, limitandone l'efficacia operativa. Nonostante ciò, le tecnologie emergenti, l'integrazione con la pianificazione urbano-territoriale e gli approcci di adattamento ai cambiamenti climatici, così come il coinvolgimento partecipativo delle comunità, rappresentano opportunità rilevanti per l'evoluzione dell'approccio di DRA (European Commission, 2023; UNDRR, 2022).

Il Disaster Risk Assessment si configura pertanto come uno strumento che necessita di un aggiornamento continuo e di una piena integrazione nei processi decisionali. Esso dovrebbe svilupparsi attraverso una collaborazione strutturata tra conoscenze scientifiche, istituzioni e comunità locali, al fine di supportare politiche di riduzione del rischio più efficaci, inclusive e resilienti.

3.4. IL DISASTER RISK MANAGEMENT- DRM

Nel contesto del multirischio, in cui eventi di diversa natura possono interagire, concatenarsi e propagarsi attraverso sistemi territoriali complessi, risulta necessario superare una visione settoriale della gestione delle emergenze. Il Disaster Risk Management – DRM rappresenta il quadro operativo entro cui le conoscenze prodotte dal Disaster Risk Assessment vengono tradotte in azioni concrete di pianificazione, prevenzione e gestione del rischio. In particolare, l'integrazione del DRM nei processi di pianificazione territoriale consente di affrontare il multirischio in modo

sistemico, coordinando politiche, strumenti e attori su diverse scale. Relazionare DRM e multirischio significa quindi riconoscere che la riduzione del rischio non può limitarsi alla risposta all'emergenza, ma deve essere incorporata stabilmente nelle strategie di governo del territorio, orientando le scelte verso modelli di sviluppo più sicuri, resilienti e sostenibili. Le politiche di Disaster Risk Management - DRM, si basano sul processo di DRA e mirano ad affrontare i rischi da catastrofi attraverso delle azioni di prevenzione, preparazione, risposta e recupero con l'obiettivo di ridurre l'impatto di eventi avversi. Non a caso la Commissione Europea sta considerando il tema del rischio come di fondamentale rilevanza per aiutare le autorità a prendere decisioni più consapevoli e a proteggere i cittadini, i mezzi di sussistenza e l'ambiente avvalendosi della partecipazione al meccanismo della protezione civile. Una strategia europea in atto è l'individuazione di cinque obiettivi da perseguire: l'anticipazione, la preparazione, l'attenzione, la risposta e la sicurezza (European Commission, 2023).

Il DRM è quindi un processo sistemico e integrato di azioni necessario a gestire e ridurre i rischi associati a disastri naturali o antropici. L'obiettivo è di ridurre e minimizzare l'impatto possibile sulle vite umane, sull'ambiente, sulle infrastrutture e le economie.

L' United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR definisce questo approccio come "il processo attraverso il quale si identificano, analizzano e gestiscono i rischi di disastri, con l'obiettivo di prevenire o ridurre l'impatto di eventi catastrofici sulle comunità, sugli ecosistemi e sulle infrastrutture." (UNDRR, 2015, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction).

E ancora, "Il Disaster Risk Management è l'insieme di politiche, strategie e pratiche volte a prevenire nuovi rischi, ridurre quelli esistenti e gestire efficacemente i rischi residui, attraverso la preparazione, la risposta e il recupero dai disastri." (UNDRR, 2015, Sendai Framework for Disaster Risk Reduction).

Questo approccio prevede l'insieme di politiche, strategie e pratiche che si articolano in quattro fasi tra loro interconnesse, continue e circolari.

La prima fase riguarda la PREVENZIONE e la MITIGAZIONE, questa si concentra sulla probabilità di danno dell'impatto del possibile evento calamitoso, si avvale di interventi e azioni rivolti a minimizzare il fattore di vulnerabilità, attraverso ad esempio le normative edilizie, la tutela ambientale, o il miglioramento della struttura sociale

Il secondo punto è la PREPARAZIONE per migliorare la capacità di risposta e la gestione delle emergenze. In questo caso si utilizzano strumenti come la pianificazione d'emergenza, l'allertamento precoce, la formazione di figure specifiche o le campagne di sensibilizzazione rivolte alla comunità.

La fase di RISPOSTA riguarda le azioni operative per salvare vite e contenere i danni, si applicano durante il disastro o subito dopo l'evento. In generale si parla di azioni operative di evacuazione, soccorso e assistenza sanitaria. Infine, con la fase di RECUPERO si tenta di tornare ad uno stato di normalità migliorato, aumentando il concetto di resilienza, operando sul ripristino delle condizioni di normalità, sulla ricostruzione tanto delle infrastrutture quanto degli edifici, e offrendo un supporto psicologico e sociale. Inoltre in questa fase è importante effettuare una nuova valutazione del rischio per poter migliorare le future strategie di gestione utilizzando l'esperienza vissuta, i dati raccolti e le testimonianze.

Nonostante il DRM nella pianificazione sia un processo di grande utilità, esistono ancora molte difficoltà affinché venga ufficialmente utilizzato. Alcuni di questi limiti sono di seguito esposti:

GAP DI COORDINAMENTO

Evidenzia la difficoltà di integrazione tra enti governativi, organizzazioni non governative e comunità locali. La frammentazione delle competenze e la mancanza di meccanismi di cooperazione strutturata compromettono l'efficacia delle strategie di gestione del rischio, rendendo complessa l'attuazione di azioni coerenti e condivise su più livelli decisionali (Birkmann et al., 2014).

GAP PARTECIPATIVO

E' dovuto allo scarso coinvolgimento delle comunità locali vulnerabili che apporterebbero maggiori conoscenze del contesto, e informazioni fondamentali ad una migliore gestione del rischio. Tale criticità è spesso il risultato di approcci decisionali di tipo top-down, che limitano la partecipazione attiva dei cittadini nei processi di pianificazione e gestione del rischio (Cutter et al., 2016).

GAP TECNICO

Riguarda l'assenza, in alcuni territori, di strumenti adeguati, risorse economiche e competenze specialistiche necessarie per l'applicazione di strategie efficaci di Disaster Risk Management. Questa carenza limita la capacità degli enti locali di implementare misure preventive e di aggiornare in modo continuativo le valutazioni di rischio (UNISDR, 2019).

GAP COMUNICATIVO

Deriva da una comunicazione del rischio tardiva, incompleta o inefficace. Una comunicazione non tempestiva o non adeguatamente strutturata può aumentare la vulnerabilità degli elementi esposti e rallentare significativamente le fasi di risposta all'emergenza, incidendo

negativamente sulla capacità di protezione delle comunità coinvolte (Lindell & Perry, 2012).

GAP CLIMATICO

Riguarda la scarsa integrazione delle strategie di Disaster Risk Management con i nuovi rischi legati al cambiamento climatico. L'assenza di un approccio orientato al lungo periodo può compromettere la capacità di adattamento e di risposta futura dei territori, aumentando l'esposizione e la vulnerabilità delle comunità agli eventi estremi (IPCC, 2022).

GAP PIANIFICATORIO

E' dovuto alla difficoltà di tradurre le conoscenze del rischio in scelte urbanistico territoriali concrete e applicative.

La mancanza di dati aggiornati o accessibili comporta un utilizzo di rappresentazioni cartografiche obsolete o non consultabili dagli enti.

I limiti degli enti territoriali nell'interpretare e utilizzare i dati inerenti al rischio, generano pianificazioni non integrate, come tra i Piani Urbanistici Comunali - PUC (nuovi Piani Regolatori Generali) e Piani di Protezione Civile. Alcune scelte politiche antepongono interessi di sviluppo economico e politico a breve termine alla gestione del rischio e del territorio, aumentando conseguentemente la vulnerabilità e l'esposizione di una comunità.

Inoltre la discontinuità tra scala di analisi del rischio territoriale e scala di pianificazione locale genera una sovrapposizione di competenze tra enti diversi con indirizzi diversi di gestione del territorio (Regione, Provincia, Comune), che comporta una frammentazione nel processo di pianificazione e attuazione. O ancora, la complessità nel trasformare le proiezioni dei piani in azioni concrete, o ritardi nella realizzazione di opere previste. Tutte queste problematiche aumentano l'impatto di danno dell'evento calamitoso, provocando un maggior dispendio di risorse economiche nelle fasi di post-disastro come ricostruzione e indennizzi, generando una dipendenza con la gestione emergenziale e non di prevenzione, e trascurando l'importanza di una resilienza urbana e territoriale utile nella fase di recupero. Per colmare queste lacune nella gestione del rischio in relazione alla pianificazione territoriale bisogna attuare delle strategie e convertire la prevenzione in una pratica ordinaria della pianificazione. Potrebbe rivelarsi utile una pianificazione integrata tra piani urbanistici, ambientali e di Protezione Civile, stabilire delle norme vincolanti sul recepimento dei vincoli di rischio, aumentare le risorse economiche per applicare le azioni previste, diffondere mappe di rischio comprensibili, aggiornate e consultabili, migliorare le competenze dei tecnici locali e coinvolgere la comunità nelle scelte territoriali. In sintesi,

l'approccio del Disaster Risk Management ha come obiettivi la riduzione del rischio con misure preventive utili a proteggere vite e beni materiali, il potenziamento della resilienza delle comunità per renderle in grado di assorbire, adattarsi e riprendersi dall'evento calamitoso, e se integrato nei processi di sviluppo e pianificazione può mitigare la vulnerabilità. I danni derivanti da disastri naturali non sono solo eventi estremi, ma il risultato di scelte e di gestione sociale e territoriale. Affrontare il rischio in questa prospettiva significa promuovere una pianificazione più consapevole, politiche inclusive, una diffusione capillare delle conoscenze e un rafforzamento della capacità adattiva, al fine di costruire comunità in grado non solo di rispondere alle crisi, ma anche di trasformarsi positivamente nel post-disastro. In un contesto caratterizzato da crescita demografica, rapida urbanizzazione e cambiamento climatico, un approccio multidisciplinare e integrato alla gestione del rischio rappresenta una sfida imprescindibile.

3.5. GLI STRUMENTI URBANISTICI UTILI ALLA GESTIONE DEL RISCHIO IN ITALIA

In Italia, alcuni strumenti normativi e pianificatori, possono contribuire in modo significativo alla gestione del rischio da disastri, incidendo su aspetti chiave come la riduzione della vulnerabilità, la regolazione dell'uso del suolo, la prevenzione dei danni e l'organizzazione della risposta. Gli strumenti elencati, se correttamente applicati e integrati tra loro, consentono di conoscere meglio le pericolosità, limitare l'esposizione di persone e beni nelle aree a rischio, definire standard di sicurezza per le costruzioni, programmare misure di adattamento e supportare procedure operative di Protezione Civile.

In particolare, strumenti come le norme tecniche e la classificazione sismica possono migliorare la sicurezza del costruito; i piani di bacino e i piani di stralcio contribuiscono a individuare aree idrogeologicamente critiche e a orientare vincoli e interventi; i piani di adattamento climatico supportano strategie di riduzione della vulnerabilità ai nuovi rischi; i piani territoriali e urbanistici, infine, possono tradurre tali conoscenze in scelte di localizzazione e regole di trasformazione del territorio, mentre i piani di Protezione Civile, a diverse scale, rafforzano la capacità di preparazione e risposta. Nel complesso, l'elenco mostra quindi un insieme di strumenti che, se coordinati, possono rendere la gestione del rischio più preventiva, integrata e coerente con le politiche di pianificazione.

LIVELLO NAZIONALE:

- **NTC 2018** (Norme Tecniche per le Costruzioni)

Ente: MIT (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti)

Norme che rappresentano la più avanzata espressione normativa tutela della pubblica incolumità nel settore delle costruzioni (GAZZETTA UFFICIALE, 2009) definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2018).

- **Classificazione sismica** (aggiornata al 2025)

Ente: Dipartimento di Protezione Civile

L'azione dello Stato si è concentrata sulla classificazione del territorio, in base all'intensità e frequenza dei terremoti del passato, e sull'applicazione di speciali norme per le costruzioni nelle zone classificate sismiche. Suddivide il territorio nazionale in quattro zone dalla più pericolosa classificata come zona 1 in cui la probabilità che capiti un forte terremoto è alta, alla meno pericolosa, zona 4, in cui la probabilità che capiti un terremoto è molto bassa (Dipartimento della Protezione Civile, 2024).

- I **PAI** (Piani di Assetto Idrogeologico) e **PSDA** (Piani di Stralcio Difesa Alluvioni)

Ente: Autorità di Bacino Distrettuali, ISPRA

Sono strumenti territoriali che individuano e valutano le aree a rischio idrogeologico come frane, alluvioni e erosione in determinati bacini idrografici. Hanno lo scopo di definire misure per la prevenzione e la mitigazione dei rischi, come la regolamentazione dell'uso del suolo e la realizzazione di opere di difesa (Autorità di Bacino Distrettuali, ISPRA, 2021).

- **PNACC** (Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici)

Ente: Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica

Linee guida per l'adattamento al cambiamento climatico, con questo si tenta di contenere la vulnerabilità dei sistemi naturali, sociali ed economici agli impatti dei cambiamenti climatici e aumentarne la resilienza, ed è a supporto delle istituzioni (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2023).

LIVELLO REGIONALE:

- Il **PTR** (Piano Territoriale Regionale)

Ente: Regione

E' lo strumento di programmazione con il quale la Regione definisce gli obiettivi per assicurare lo sviluppo e la coesione sociale, garantire la valorizzazione delle risorse sociali ed ambientali, identifica e valuta gli elementi di vulnerabilità del territorio, come i rischi idrogeologici, sismici, ambientali e quelli legati all'uso del suolo (Regione Lazio, 2001).

- **Le Leggi regionali sul governo del territorio,**

Ente: Regione

Deliberate dal Consiglio Regionale regolano a cascata gli strumenti comunali come i PUC, PGT, PRG, (Regione Lombardia, 2005).

- **I Piani AIB (Antincendio Boschivo)**

Ente: Regione, Protezione Civile

Sono piani triennali, a revisione annuale, di programmazione delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi (Dipartimento della Protezione Civile, 2022).

- **I Piani Regionali di Protezione Civile**

Ente: Protezione Civile

Definiscono le azioni operative e il coordinamento di risorse nelle fasi d'emergenza dovute a eventi calamitosi affinché ci siano riposte tempestive e integrate (Dipartimento della Protezione Civile, 2018).

LIVELLO PROVINCIALE / METROPOLITANO

- **Il PTCP (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale)**

Ente: Provincia, Città Metropolitana

Definisce le strategie del territorio e fornisce delle linee guida a livello comunale assicurando una coerenza con il provinciale e tutelando l'ambiente ed il paesaggio (Provincia / Città Metropolitana, 2009).

LIVELLO COMUNALE

- **Il PUC (Piano Urbanistico Comunale), il PGT (Piano di Governo del Territorio), e il PRG (Piano Regolatore Generale)**

Ente: Comune

Definiscono l'uso del territorio, gli standard urbanistici, le previsioni di sviluppo e recepiscono i vincoli degli strumenti regionali (INU, 2014).

- **Piano di Protezione Civile Comunale**

Ente: Protezione Civile, Comune

come per quello regionale definisce le linee guida da utilizzare in fase emergenziale (Dipartimento della Protezione Civile, 2019).

Altri strumenti utili possono essere ad esempio la Valutazione Ambientale Strategica - VAS, che analizza gli impatti ambientali di piani e programmi prima che vengano approvati, o le Carte di pericolosità che identificano attraverso rappresentazioni cartografiche il livello di rischio di determinati fenomeni naturali.

3.5.1. Divario tra gestione del rischio e pianificazione e tentativi di integrazione tra conoscenza del rischio e pianificazione territoriale in Italia

La pianificazione territoriale rappresenta uno strumento strategico fondamentale per orientare lo sviluppo sostenibile del territorio e garantire la sicurezza delle comunità. Tuttavia, in Italia persiste un divario significativo tra la conoscenza dei rischi naturali e la loro effettiva integrazione negli strumenti urbanistici, spesso definito in letteratura come *risk gap* o *gap del rischio*, che contribuisce ad aumentare la vulnerabilità delle aree urbane e rurali (UNDRR, 2019; OECD, 2020; ISPRA, 2023). Il *gap del rischio* evidenzia la debole relazione tra le analisi dei rischi naturali e le decisioni di pianificazione territoriale. In effetti, enti istituzionali come Comuni e Regioni dispongono di strumenti consolidati per individuare e classificare le aree soggette a rischio, tra cui la classificazione sismica del territorio, i Piani di Assetto Idrogeologico – PAI, i Piani di Protezione Civile e altri dispositivi conoscitivi e normativi. Il problema emerge quando tali conoscenze non vengono tradotte in vincoli urbanistici efficaci, scelte localizzative coerenti o azioni di prevenzione strutturale e non strutturale, rimanendo spesso confinate a un livello meramente conoscitivo (ISPRA, 2021; UNDRR, 2019). Questa mancata integrazione produce effetti rilevanti, tra cui l'aumento dell'esposizione e della vulnerabilità di persone e beni, l'incremento dei costi sociali ed economici legati alla ricostruzione e ai risarcimenti, nonché una gestione del rischio prevalentemente emergenziale e reattiva, anziché preventiva e pianificata (OECD, 2020; European Commission, 2023). Le conseguenze di tale approccio risultano evidenti e ricorrenti: ogni evento catastrofico riporta all'attenzione delle comunità e delle istituzioni l'insufficiente considerazione del rischio nei processi di pianificazione. Eventi come le alluvioni di Genova (2011 e 2014), Livorno (2017), le frane in Campania o i danni post-sismici nel Centro Italia mostrano come molte delle aree colpite fossero già state individuate e mappate come ad alta pericolosità, senza che ciò avesse prodotto un'effettiva riduzione dell'esposizione o della vulnerabilità (ISPRA, 2018; Protezione Civile, 2020). Come evidenziato dalla letteratura, tali limiti sono anche riconducibili alla difficoltà di accesso, aggiornamento e

interpretazione dei dati, alla carenza di competenze tecniche specialistiche a livello locale, alla frammentazione delle competenze tra enti e alla sovrapposizione di responsabilità nella gestione del territorio. A ciò si aggiungono criticità operative, quando le misure di mitigazione individuate non vengono effettivamente attuate o integrate negli strumenti urbanistici vigenti (UNDRR, 2019; OECD, 2020). Infine, occorre considerare che il territorio italiano è esposto a una complessa combinazione di rischi naturali, sismici, idraulici, idrogeologici, vulcanici, ed è caratterizzato da un modello di urbanizzazione fragile, storicamente sviluppato anche in aree ad alta pericolosità e con un patrimonio edilizio spesso obsoleto e vulnerabile. In questo contesto, diventa imprescindibile limitare nuove espansioni in aree a rischio, ridurre la vulnerabilità esistente e integrare in modo sistematico strategie di adattamento ai fenomeni naturali e ai rischi emergenti legati al cambiamento climatico, rafforzando il ruolo della pianificazione territoriale come strumento di prevenzione e resilienza (IPCC, 2022; European Commission, 2023; ISPRA, 2023).

Nonostante la difficoltà di interazione tra la conoscenza del rischio e la pianificazione territoriale rappresenti una debolezza strutturale reale nel sistema italiano, esistono alcuni casi che mostrano dei primi approcci di integrazione. Rappresentano buone pratiche, tuttavia da implementare:

- **PROVINCIA DI BOLZANO. INTEGRAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO NEI PIANI URBANISTICI COMUNALI**

Tema:

Aree montane soggette a frane, valanghe e alluvioni.

Buona pratica:

- La Provincia centralizza e coordina la pianificazione comunale.
- Le mappe di pericolosità elaborate dalla Protezione Civile provinciale sono vincolanti e devono essere recepite da ogni PUC.
- Il Piano delle Zone di Pericolo - PZP, esistente dal 2007, è parte integrante della pianificazione urbanistica (Provincia autonoma di Bolzano, 2007).

Obiettivo:

La Pianificazione territoriale limita le costruzioni in aree instabili o esposte mitigando l'impatto di eventi naturali dannosi e proteggendo la popolazione e i beni materiali e il territorio.

- **COMUNE DI MILANO. RISCHIO CLIMATICO INTEGRATO NEL PGT E NEL PIANO ARIA CLIMA**

Tema:

Impatti del cambiamento climatico come ondate di calore, allagamenti urbani, isole di calore.

Buona pratica:

Il Piano di Governo del Territorio – PGT prevede:

- Obbligo di invarianza idraulica
- Aumento di superfici verdi e permeabili,
- Tutela delle aree agricole periurbane.

Il Piano Aria Clima (2022) è uno strumento a tutela della salute e dell'ambiente, finalizzato a ridurre l'inquinamento atmosferico e a rispondere all'emergenza climatica (Comune di Milano, 2022).

Obiettivo:

Pianificazione urbana integrata con strategie ambientali, transizione ecologica reale e misure preventive contro eventi estremi.

• REGIONE TRENINO. PIANO URBANISTICO E CARTA DI SINTESI DELLA PERICOLOSITÀ INTEGRATI**Tema:**

Aree esposte a rischi.

Buona pratica:

- I PUC dei comuni devono rispettare la Carta di Sintesi di Pericolosità - CSP contenuta nel Piano Urbanistico Provinciale - PUP con valore vincolante.
- Il Comune non può pianificare nuove edificazioni in aree definite dalla CSO ad alta pericolosità.
- Se un intervento urbanistico cade in zona CSP a rischio, il Comune deve allegare uno studio di compatibilità e verificare che il rischio può essere mitigato (Provincia autonoma di Trento, 2019).

Obiettivo:

Approccio vincolante nel PUC.

I fattori che accomunano questi casi sono schematizzati nella Tabella 7.

TEMA	BUONA PRATICA
Conoscenza tecnica	dati aggiornati, microzonazione, mappe PAI e climatiche usate correttamente
Governo multilivello	coordinamento efficace tra enti locali, regionali e nazionali
Norme vincolanti	rischi devono essere vincolanti e non indicativi
Monitoraggio e aggiornamento	piani periodicamente aggiornati e integrati con scenari futuri, e temi climatici
Coinvolgimento pubblico	partecipazione dei cittadini e trasparenza decisionale
Accesso a fondi	risorse dedicate alla prevenzione, anche da fondi europei

Tabella 7: Sintesi di buone pratiche utilizzate

Questi casi mostrano che disporre solo degli strumenti non è sufficiente. Serve un'azione coordinata, coerente e lungimirante che sappia tradurre le conoscenze tecniche in scelte pianificatorie efficaci avvalendosi di norme più chiare e vincolanti, una formazione continua per i tecnici comunali, un accesso a dati aggiornati, della partecipazione della cittadinanza e di fondi strutturali per la prevenzione. Una pianificazione che integra la gestione del rischio investe a lungo termine sulla sicurezza territoriale, sociale, economica e permette uno sviluppo sostenibile.

3.5.2. I Digital Twin come potenziali strumenti per la pianificazione e la gestione dei rischi

Nel campo della pianificazione urbana e territoriale, gli Urban Digital Twin - UDT sono comunemente considerati un'evoluzione dei sistemi tradizionali di analisi e rappresentazione del territorio. Essi si configurano come rappresentazioni digitali dinamiche della città, o di sue parti significative, capaci di integrare modelli tridimensionali, dati geospaziali, reti di sensori, Big Data e strumenti analitici, con l'obiettivo di simulare il comportamento del sistema urbano e di interagire, almeno in parte, con la sua controparte fisica. In relazione al quadro concettuale del Disaster Risk Management - DRM, il contributo degli UDT si colloca oggi prevalentemente nella fase di Disaster Risk Assessment - DRA. Essi risultano quindi particolarmente efficaci nel supportare attività di prevenzione, mitigazione e preparazione, fornendo basi conoscitive avanzate per l'analisi del rischio e per l'elaborazione di politiche pubbliche informate. Al tempo stesso, il loro impiego resta ancora limitato sul piano operativo, risultando poco integrato nei processi decisionali in tempo reale e nelle scelte tipiche delle fasi emergenziali, dove il controllo umano e i sistemi tradizionali di gestione continuano a svolgere un ruolo centrale.

Inoltre, la definizione degli UDT diventa significativamente più complessa quando l'obiettivo è l'integrazione del concetto di multirischio, inteso come

la coesistenza e l'interazione di più rischi e dei relativi effetti a concomitanti. Le principali difficoltà risiedono nella limitata disponibilità e integrazione di dati in tempo reale. Sebbene in teoria un UDT possa essere alimentato da flussi continui di dati provenienti da sensori, reti IoT e sistemi informativi eterogenei, nella pratica urbana emergono limiti legati a interoperabilità, affidabilità dei flussi, privacy, cybersecurity e la responsabilità istituzionale, che limitano l'adozione di flussi informativi continui e condivisi tra attori pubblici e privati (Living-in.EU, 2023). Altri limiti derivano dalla scarsa interoperabilità tra sistemi settoriali come l'ambiente, le infrastrutture, l'operatività della Protezione Civile, o la sanità, e dalla complessità di rappresentazione coerente con le interdipendenze tra sistemi urbani, popolazioni e processi urbani.

La letteratura sottolinea come la maggior parte delle applicazioni di UDT si basi ancora su dataset statici o aggiornati con bassa frequenza, rendendo difficile un utilizzo operativo durante eventi complessi e repentini (European Commission, 2021).

Dal punto di vista della gestione del rischio, il multirischio rappresenta una sfida particolarmente rilevante. Le agenzie internazionali evidenziano come i disastri reali siano sempre più caratterizzati da interazioni tra pericoli naturali, vulnerabilità ed esposizione dei sistemi sociali e infrastrutturali, generando impatti composti e non lineari, difficilmente rappresentabili attraverso modelli settoriali isolati (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017; Joint Research Centre, 2025).

In questo contesto, i casi UDT che si stanno sviluppando, e che considerano il tema del rischio, risultano incentrati su singole tipologie di rischio, riducendo la capacità di supportare decisioni in scenari complessi e concatenati.

Di conseguenza, sebbene i DT applicati alla pianificazione e gestione del rischio siano ancora relativamente poco sviluppati sul piano operativo e del multirischio, alcune esperienze emergenti mostrano delle interessanti potenzialità.

Nel panorama internazionale alcuni casi si distinguono perché integrano analisi di rischio all'interno dei gemelli digitali, fornendo un supporto alle decisioni di pianificazione, in particolare nelle fasi di prevenzione, mitigazione e preparazione, pur restando ancora distanti da un impiego pienamente automatizzato o in tempo reale nelle fasi emergenziali. Il porto di Rotterdam rappresenta un caso emblematico nell'ambito dei rischi costieri, poiché il suo DT è costruito attorno a un sistema fisico estremamente complesso e ad alta criticità strategica. L'Autorità Portuale descrive la propria infrastruttura "smart" come un ecosistema integrato di dati e sistemi che consente di monitorare e gestire il porto in modo più informato, includendo variabili operative e ambientali rilevanti per la

sicurezza, la navigazione e l'efficienza logistica (Port of Rotterdam Authority, 2022). In termini di pianificazione e gestione del rischio, questo DT opera principalmente come strumento di preparazione, permettendo di valutare in anticipo come condizioni meteo-marine estreme, quali variazioni del livello idrico, vento o limitazioni operative, possano influenzare le catene logistiche e le decisioni strategiche. Il suo ruolo rimane tuttavia prevalentemente di supporto decisionale: il sistema fornisce informazioni e scenari utili, ma non attiva automaticamente soluzioni o risposte al rischio. Un altro esempio riguarda il tema delle ondate di calore di Barcellona costituisce un esempio significativo di utilizzo del DT in relazione a rischi urbani e sanitari. La città ha avviato iniziative per lo sviluppo di un UDT in collaborazione con l'amministrazione e attori tecnico-scientifici, con l'obiettivo di valutare gli impatti delle politiche urbane e migliorare la capacità di analisi di fenomeni complessi (Ajuntament de Barcelona, 2022). Parallelamente, attraverso l'ecosistema cittadino ha sottolineato il potenziale del gemello digitale per anticipare gli effetti delle trasformazioni urbane e supportare decisioni future (Mobile World Capital Barcelona, 2025). All'interno della gestione del rischio, il contributo principale è riconducibile alle fasi di mitigazione e adattamento, attraverso la mappatura delle vulnerabilità e la simulazione di misure quali rifugi di calore, incremento del verde urbano, uso di materiali e riconfigurazione degli spazi pubblici. Anche in questo caso, però, il DT tende a configurarsi come una rappresentazione statica di scenari, utile per orientare le scelte ma non per attuarle automaticamente. Il Munich Digital Twin si colloca in una prospettiva analogica, venendo presentato come un asset strategico per la pianificazione urbana e per casi d'uso legati al clima, in particolare all'individuazione delle isole di calore e al supporto a strategie di adattamento (Stadt München, n.d.). Ciò si traduce in un approccio volto a una riduzione del rischio graduale e strutturale, che agisce sulla forma urbana, sulle superfici, sulle alberature, sugli standard edilizi e sugli spazi pubblici per ridurre esposizione e vulnerabilità al caldo estremo. Nel caso del Digital Twin Victoria, a scala più ampia, il gemello digitale assume il ruolo di infrastruttura informativa ufficiale per la rappresentazione del rischio, in particolare quello alluvionale. La piattaforma viene utilizzata come contenitore e canale di diffusione di informazioni istituzionali sulla pericolosità, ad esempio attraverso la flood mapping e il supporto alla pianificazione in aree allagabili (Government of Victoria, Australia, 2025). In questo caso, l'utilizzo della piattaforma è utile per le fasi di prevenzione e mitigazione, poiché rende la base conoscitiva più accessibile e interoperabile. Anche in questo caso, tuttavia, il DT resta una piattaforma abilitante, non un sistema decisionale autonomo.

Questi esempi mostrano come i DT si collochino prevalentemente nella fase pre-evento del DRM e quindi nel Disaster Risk Assessment - DRA. Essi rendono il rischio più leggibile e comunicabile, permettono simulazioni e confronti tra alternative e supportano la priorità di investimenti e politiche. Questa impostazione è coerente con una visione istituzionale del DT come strumento di supporto alla decisione pubblica. La Commissione Europea, nel definire i Digital Twins, sottolinea infatti che la loro efficacia dipende dalla disponibilità, qualità e interoperabilità dei dati, oltre che da adeguati modelli di governance (European Commission, 2021). In assenza di tali condizioni, l'operatività del DT tende a fermarsi alla simulazione.

Tra le difficoltà rilevanti risultano da una parte la difficoltà dell'uso di dati in tempo reale. Sebbene in teoria un DT possa essere continuamente aggiornato tramite sensori, dati IoT e fonti geospaziali, nella pratica urbana ciò implica problemi di interoperabilità con sistemi legacy, affidabilità dei flussi, continuità del segnale, tutela della privacy, cybersecurity e attribuzione delle responsabilità. Come evidenziato a livello europeo, queste criticità sono spesso di natura organizzativa e culturale, oltre che tecnica, e rendono il real-time difficile da implementare e governare su scala urbana (Living-in.EU, 2023).

Dall'altra la difficoltà è legata al multirischio, poiché i disastri reali raramente si manifestano come eventi isolati. Le istituzioni internazionali sottolineano come i rischi possano interagire e propagarsi, generando impatti composti difficili da rappresentare con approcci settoriali (Joint Research Centre, 2025; United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017). Nonostante il DT nasca come strumento di integrazione, nella pratica esso viene spesso sviluppato per singoli domini, limitando la capacità di affrontare scenari concatenati e interdipendenti.

Alla luce di queste considerazioni, il limite strutturale dei casi osservati appare evidente come gli UDT siano oggi prevalentemente descrittivi, estremamente utili per pianificare e decidere, ma raramente prescrittivi. Un DT più avanzato dovrebbe essere in grado di proporre soluzioni ottimizzate, integrare feedback e apprendimento e, in alcuni ambiti specifici, supportare azioni semi-automatiche sotto supervisione umana. La transizione verso questa fase è tuttavia rallentata proprio dalle difficoltà legate al real-time e al multirischio, che richiedono standard condivisi, governance dei dati e solide responsabilità pubbliche.

4. IL DIGITAL TWIN E IL PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEL RISCHIO: DEFINIZIONE METODOLOGICA DELLO STRUMENTO TRA ANALISI, DECISIONI E AZIONI

Nell'ambito della pianificazione e gestione del rischio, il Digital Twin si configura come uno strumento potenziale per affrontare la complessità e la dinamicità dei fenomeni di rischio, offrendo un quadro integrato di conoscenze a supporto di decisioni informate su più livelli di scala; in prospettiva, la sua evoluzione verso forme di interazione più strette con il sistema reale apre alla possibilità di supportare non solo le fasi di Disaster Risk Assessment, ma anche quelle di Disaster Risk Management vero e proprio, attraverso l'attivazione coordinata di azioni operative e meccanismi di feedback tra analisi, decisione e intervento in tempo reale. Il Digital Twin applicato alla pianificazione e alla gestione del rischio può essere visto come una specifica declinazione del più ampio concetto di Digital Twin per la pianificazione urbana e territoriale. Questo perché il rischio è, per sua natura, un tema transcalare, che obbliga a confrontarsi con più livelli di scala e con la complessità della pianificazione a diverse dimensioni. Il rischio è inteso come uno dei principali contenuti che strutturano il piano. Tale caratteristica mette in evidenza alcuni limiti dell'Urban Digital Twin - UDT, che è uno strumento pensato principalmente per la scala urbana. Il DT tematico dedicato ai rischi di origine naturale, così come le esperienze di ricerca multi-scalari, portano infatti ad ampliare lo sguardo oltre la città, includendo territori rurali, naturali e semi-naturali, che giocano un ruolo fondamentale nella dinamica dei rischi. Per affrontare il rischio nelle sue componenti dinamiche e transcalari, diventa quindi necessario estendere il concetto di Urban Digital Twin a quello di Regional Digital Twin - RDT e, di conseguenza, superare una visione esclusivamente urbana della pianificazione a favore di una pianificazione territoriale. Questa estensione solleva una questione centrale per la teoria della pianificazione: quanto le componenti del Digital Twin siano effettivamente scalabili e integrabili, in modo da garantire la coerenza delle conoscenze e delle decisioni tra strumenti di pianificazione che operano a scale diverse, dal livello più dettagliato fino alla pianificazione territoriale. Dall'analisi della letteratura scientifica emerge che gli studi esplicitamente dedicati al Regional Digital Twin sono ancora molto limitati. I principali contributi disponibili sono riconducibili alle ricerche sviluppate dall'Università degli studi dell'Aquila (Sacco et al., 2024; Bianchi et al., 2022). Altri lavori fanno riferimento a concetti coerenti con questa ricerca, come il Land Digital Twin (Ugliotti et al., 2023), o il Territorial Digital Twin (Chioni et al., 2023; Cédric et al., 2024). Tuttavia, questi contributi né affrontano in modo diretto il tema dell'integrazione con la pianificazione, né del rischio, concentrandosi

principalmente sugli aspetti teorici dei Digital Twin, sul ruolo del modello geometrico e della rappresentazione tridimensionale, o su temi specifici come la partecipazione dei cittadini.

4.1. DALL'URBAN DIGITAL TWIN – UDT AL REGIONAL DIGITAL TWIN – RDT

Il salto di scala da “Urban” a “Regional” Digital Twin non rappresenta un problema rilevante dal punto di vista delle tecnologie del Digital Twin, ma pone due questioni principali.

La prima riguarda la multi-scalarità della conoscenza e, quindi, dei dati; la seconda è legata alla multi-scalarità della pianificazione (Moroni,2025). Sono questioni che riguardano, da un lato, la disponibilità e l'adeguatezza dei dati necessari per costruire i gemelli digitali e, dall'altro, gli obiettivi e l'uso dei DT nei processi decisionali. Queste questioni mettono in evidenza alcuni limiti strutturali nell'applicazione dei Digital Twin alla pianificazione. Il tema dei dati è particolarmente rilevante. I Digital Twin urbani e quelli regionali si basano infatti su livelli di dettaglio molto diversi. Nel contesto urbano è possibile utilizzare dati ad alta risoluzione, come i modelli BIM, mentre alla scala territoriale questo approccio non è facilmente riproponibile, (si pensi, ad esempio, all'impossibilità di costruire un modello BIM del suolo). Come anticipato nel secondo capitolo il livello di dettaglio dei dati varia quindi in funzione del campo d'applicazione e quindi della scala considerata, per cui una delle caratteristiche necessarie di un RDT è la capacità di integrare dati multi-scalari, potenzialmente con l'uso del Data Lake, che consentirebbe di unificare il sistema delle conoscenze sia dell'UDT sia dell'RDT. Infatti il passaggio di scala tra UDT e RDT non può essere risolto attraverso una semplice estensione geometrica del modello urbano, ma richiede un cambio di paradigma nel modo in cui dati, informazioni e decisioni vengono organizzati e messi in relazione. La scalabilità del Digital Twin, infatti, non riguarda l'estensione spaziale del modello, ma la capacità di integrare e coordinare rappresentazioni, analisi e processi decisionali che operano a scale differenti, mantenendo coerenza informativa tra i livelli di pianificazione (European Commission, 2021).

Un primo elemento chiave per affrontare questa transizione è la separazione concettuale tra il livello dei dati e il livello dei modelli. In questo senso, l'adozione di un Data Lake territoriale rappresenta una soluzione strutturale per garantire l'integrazione tra UDT e RDT. Come anticipato nel paragrafo 2.6.1, Il Data Lake può essere definito come un repository centralizzato capace di raccogliere e archiviare grandi volumi di dati

eterogenei, e applicato al contesto territoriale, questo può rendere interoperabili dataset geospaziali, ambientali, infrastrutturali, socio-economici e sensoriali, preservando le diverse risoluzioni spaziali e temporali proprie di ciascuna scala (European Commission, 2022).

All'interno di questa architettura, UDT e RDT devono essere intesi come modelli complementari che interrogano lo stesso ecosistema informativo secondo logiche differenti. L'UDT opera prevalentemente a scala urbana, con un elevato livello di dettaglio geometrico e tematico, e può essere orientato all'analisi delle vulnerabilità, dell'esposizione e delle dinamiche locali. L'RDT, al contrario, lavora su una scala territoriale più ampia, integrando sistemi urbani, rurali e naturali e concentrandosi sulle dinamiche di sistema, sulle connessioni funzionali. La possibilità di interrogare una base dati comune riduce duplicazioni e incoerenze e garantisce l'allineamento delle analisi tra i diversi livelli di pianificazione (Living-in.EU, 2023). L'integrazione tra UDT e RDT avviene quindi attraverso meccanismi bidirezionali di scambio informativo. Da un lato, l'RDT fornisce all'UDT il quadro di riferimento territoriale entro cui interpretare i fenomeni urbani, ad esempio in termini di bacini idrografici, reti ecologiche, infrastrutture strategiche o corridoi di rischio. Dall'altro lato, l'UDT restituisce all'RDT informazioni dettagliate sulle condizioni locali, sulle vulnerabilità specifiche e sugli effetti delle politiche urbane, contribuendo a migliorare la qualità delle analisi a scala regionale. Questo flusso continuo di informazioni consente di mantenere coerenza decisionale tra strumenti di pianificazione che operano a scale differenti (Sawadogo & Darmont, 2021).

Dal punto di vista operativo, il data lake svolge inoltre una funzione fondamentale nel supportare il multirischio. La possibilità di integrare dati provenienti da settori diversi – ambiente, infrastrutture, protezione civile, sanità, mobilità – consente di costruire catene informative intersettoriali che attraversano le scale e rendono visibili le interdipendenze e gli effetti a cascata tra sistemi urbani e territoriali (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017; Joint Research Centre, 2025). In questo senso, il passaggio da UDT a RDT non si limita a una generalizzazione spaziale, ma diventa uno strumento per rappresentare e analizzare i processi di propagazione del rischio. Infine, questa architettura integrata basata su un Data Lake condiviso crea le condizioni per l'evoluzione del Digital Twin da strumento prevalentemente analitico a dispositivo di supporto operativo. L'allineamento tra modelli a scale diverse e la disponibilità di una base dati comune permettono, almeno in prospettiva, di collegare le simulazioni del Digital Twin con sistemi reali di gestione e risposta, favorendo il passaggio dalla Disaster Risk Assessment alla Disaster Risk Management (European Commission, 2021; United Nations Development Programme, 2023). In questo scenario, l'UDT può

supportare azioni operative localizzate, mentre l'RDT garantisce il coordinamento territoriale e la coerenza strategica degli interventi. In sintesi, la risoluzione del passaggio di scala tra UDT e RDT non risiede nella costruzione di un unico modello "più grande", ma nella progettazione di un ecosistema di Digital Twin interoperabili, fondato su un Data Lake condiviso, su regole di integrazione chiare e su meccanismi di scambio informativo capaci di mantenere allineate conoscenze e decisioni tra città e territorio. La seconda questione riguarda il rapporto tra i diversi livelli di pianificazione. Nella teoria urbanistica questo rapporto viene tradizionalmente affrontato attraverso tre concetti: conformità, compatibilità e coerenza. La conformità indica il rispetto delle previsioni della pianificazione sovraordinata ed è generalmente prevista dalla normativa. La compatibilità riguarda invece la sostenibilità ambientale delle scelte di piano e la valutazione dei loro effetti sull'ambiente. La coerenza fa riferimento all'allineamento generale delle previsioni di un piano con altri strumenti di pianificazione, sia dello stesso livello sia di livelli differenti; a differenza della conformità, non richiede una corrispondenza puntuale, ma una congruenza complessiva delle scelte. Questi criteri si applicano sia alle politiche socio-economiche, spesso espresse attraverso indicatori, sia alle politiche spaziali, che si concretizzano in interventi capaci di trasformare i territori. Tuttavia, nelle attuali sperimentazioni di Digital Twin, tali informazioni non risultano ancora pienamente integrate e, soprattutto, non sono strutturate in modo sistematico come le conoscenze di base. Inoltre, come accade per queste ultime, anche le politiche presentano livelli di dettaglio diversi a seconda della scala del piano. In questo contesto, le informazioni relative alle politiche multi-scalari assumono un ruolo centrale nella valutazione della coerenza con le altre pianificazioni tematiche sul rischio. Ad ogni modo un prototipo di Regional (R) Digital Twin, si definisce innanzitutto attraverso DT base (già approfonditi nel paragrafo 2.3. I TIPI DI URBAN-DT, CITY-DT, LOCAL-DT) ottenendo l' (R)DTP, l' (R)DTI, l'(R)DTA, l' (R)DTE. La sua controparte fisica con cui avviene lo scambio bidirezionale di dati e informazioni può riguardare una provincia, una regione o un territorio. È uno strumento che si confronta e integra con la scala territoriale relazionandosi ad almeno sei campi d'applicazione, che ne definiscono la scala, di cui due già emersi nella letteratura scientifica come il campo delle infrastrutture e della smart city/smart land, e altre quattro che riguardano il contesto rurale, dell'insediamento, ambientale e del multirischio. Le componenti che costruiscono e alimentano il RDT sono rappresentate da dati statici, tra cui modelli informativi geospaziali con una modellazione multiscala LOD 0 e LOD1, e dati dinamici, definibili con l'utilizzo dell'IoT e delle sue tecnologie complementari. In aggiunta a questi è presente l'implementazione di dati

inerenti al concetto di rischio acquisibili da fonti ufficiali come l’Agenzia di Protezione Civile , Figura 19.

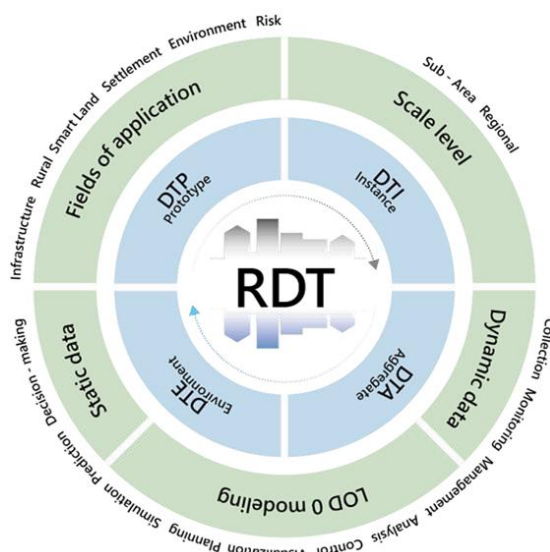


Figura 19:caratteristiche generali di un RDT

In questa ricerca oltre ad individuare le caratteristiche generali di un generico RDT, si è delineata una struttura specifica che segue il processo del Piano Regionale di Gestione del Rischio

4.2. IL REGIONAL DIGITAL TWIN E IL PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEL RISCHIO

Il Piano Regionale di Gestione del Rischio – PRGR si identifica come un potenziale strumento di pianificazione innovativo, orientato alla fase pre-evento calamitoso, capace di integrare conoscenza, valutazione e operatività alla scala regionale. Nonostante l’ampia attenzione internazionale verso il Disaster Risk Management, la dimensione della Management Risk Planning risulta essere spesso marginale rispetto alle fasi di valutazione del rischio, gestione dell’emergenza e risposta al disastro. Il PRGR è concepito come un piano che non si limita a descrivere o mappare i rischi, ma che costruisce un sistema conoscitivo strutturato in grado di rappresentare in modo integrato il multi-hazard, la multi-vulnerability e la multi-exposure, arrivando così alla definizione di scenari di multi-rischio. Il rischio viene interpretato come il risultato dell’interazione tra pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, secondo una lettura spaziale e strutturale che consente di evidenziare le aree territoriali più critiche. (Di Ludovico et al., 2020).

Un elemento centrale del Piano Regionale di Gestione del Rischio è l'individuazione degli Hotspot territoriali in cui la concentrazione di più fattori di rischio rende prioritari gli interventi di prevenzione e mitigazione. Su queste aree il piano agisce attraverso i Prevention and Spatial Recovery Projects – PSRP, progetti spaziali che rappresentano lo strumento operativo del PRGR e che traducono le analisi di rischio in azioni concrete a supporto della prevenzione, della mitigazione e del recupero territoriale.

Il piano in questione si distingue dai tradizionali piani di Protezione Civile o dai Piani Settoriali poiché integra esplicitamente la dimensione della pianificazione territoriale e paesaggistica. Il piano non è concepito come uno strumento isolato, ma come un dispositivo di co-pianificazione, capace di coordinarsi con altri livelli e tipi di pianificazione, in particolare con il Piano Paesaggistico Regionale. In questo senso, la gestione del rischio viene interpretata non solo come riduzione delle perdite, ma come occasione per orientare trasformazioni territoriali coerenti con obiettivi di tutela, qualità del paesaggio e sviluppo sostenibile.

Un ulteriore aspetto qualificante del Piano Regionale di Gestione del Rischio è il suo carattere dinamico e circolare. Questo infatti non viene inteso come un piano statico, ma come un processo che si alimenta nel tempo attraverso l'aggiornamento del sistema conoscitivo, l'affinamento degli scenari di rischio e i feedback derivanti dai progetti e dalle azioni implementate. In questa prospettiva, il piano diventa uno strumento di governance del rischio, capace di supportare decisioni strategiche di lungo periodo e di migliorare il coordinamento tra attori istituzionali diversi.

In sintesi, il Piano Regionale di Gestione del Rischio è uno strumento di pianificazione integrata che:

- opera principalmente nella del fase pre-disastro
- si fonda su un sistema conoscitivo multi-rischio
- individua priorità territoriali di intervento
- traduce l'analisi del rischio in azioni spaziali di prevenzione e mitigazione
- si coordina con gli altri strumenti di pianificazione territoriale e paesaggistica
- rafforza la capacità di governance e gestione del rischio a scala regionale.

Nel paragrafo seguente sarà approfondita la metodologia generale di integrazione del Regional Digital Twin con il Piano Regionale di Gestione del Rischio.

4.2.1. La metodologia generale della ricerca: l'integrazione del RDT e del PRGR

La metodologia adottata per la definizione del prototipo di Regional Digital Twin - RDT si basa sulla struttura del Piano Regionale di Gestione del Rischio- PRGR, che segue i principi del Disaster Risk Assessment - DRA e del Disaster Risk Management - DRM. Il prototipo di RDT è quindi concepito come uno strumento operativo coerente con l'impianto concettuale e procedurale del Piano di Gestione del Rischio a scala regionale. L'obiettivo è delineare l'architettura di uno strumento in grado di supportare la pianificazione territoriale e la gestione del rischio, fornendo un contributo operativo a soggetti istituzionali quali la Protezione Civile, le amministrazioni regionali e gli enti locali. Un RDT sviluppato in coerenza con i principi della pianificazione, seguendo il modello di PRGR, può infatti contribuire a rendere più flessibili ed efficaci i metodi e i modelli tradizionali di pianificazione territoriale. L'individuazione delle caratteristiche e delle componenti strutturali del prototipo di RDT consente di costruire un quadro conoscitivo del rischio, utile a orientare le decisioni in contesti caratterizzati da scenari multi-scala e multi-rischio (Sacco et al., 2024). La struttura di base del modello è pensata come replicabile e adattabile, in funzione della disponibilità e della qualità dei dati nei diversi contesti territoriali. In termini generali, l'architettura del RDT può quindi essere descritta attraverso quattro fasi metodologiche consecutive e tra loro integrate, da una parte delinea la costruzione del modello di PRGR, dall'altra definisce la struttura di uno strumento operativo per la pianificazione e la gestione del rischio territoriale nonché l'architettura stessa del Regional Digital Twin. Il modello teorico sviluppato interpreta infatti le quattro fasi — Sistema delle Conoscenze, simulazione di scenari multirischio, definizione degli hotspot, set di azioni — come processi interconnessi, capaci di scambiarsi dati e interpretazioni in modo continuo. Lo schema generale è rappresentato nella Figura 20, e sarà approfondito in modo dettagliato nel Capitolo 6.

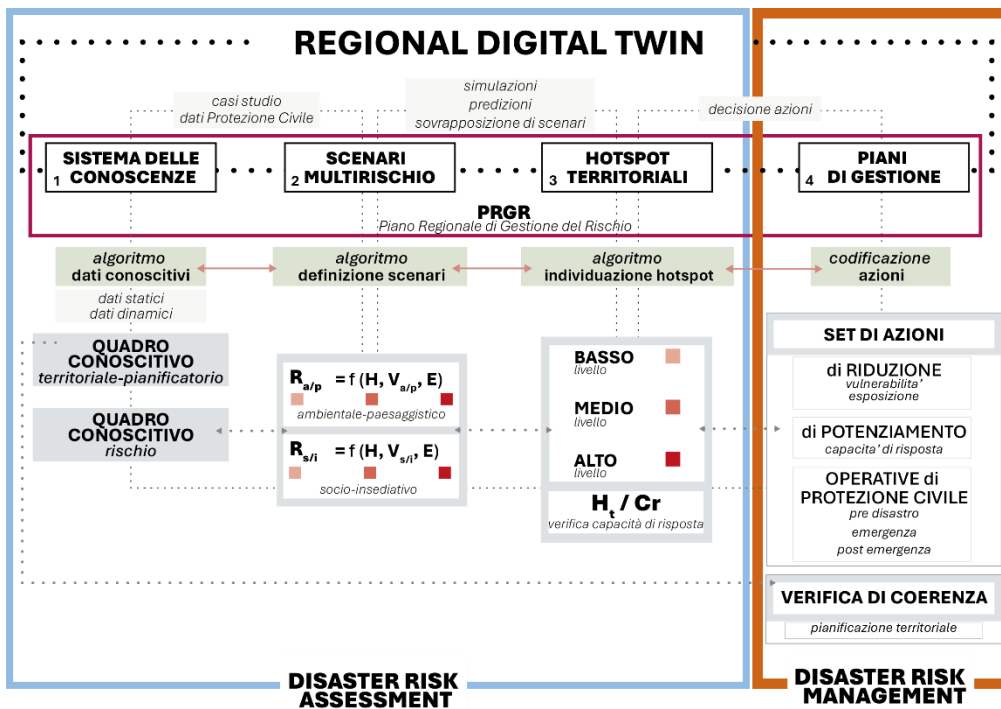


Figura 20:Schema generale della struttura del RDT basato sul PRGR

Ciò consente di aggiornare dinamicamente i risultati del RDT in funzione dei nuovi input acquisiti e delle integrazioni progressive delle conoscenze.

La costruzione del prototipo di RDT, di base sulle caratteristiche descritte nel paragrafo 4.1, e seguendo il modello di PRGR, esposto nel paragrafo 4.2, si struttura attraverso le quattro fasi composte principalmente da informazioni ottenute da dati Gis o Database autonomi, integrati tra loro secondo un criterio di coerenza temporale, tematica e di scala. Sono strettamente interconnesse e sviluppate in un flusso continuo di raccolta, elaborazione e applicazione dei dati, e sono così definite:

1. La costruzione del “Sistema delle Conoscenze”

Il Sistema delle conoscenze, utile al popolamento del RDT (Sacco et al.,2024), è suddiviso in due insiemi raggruppati per elementi, ognuno dei quali può avere la sua componente statica , ad esempio con dati provenienti da piattaforme regionali di open data, e dinamica, con dati ottenuti attraverso tecnologie IoT, sensori e fonti satellitari, ed entrambi sono costituiti da dati di origine e di formato diversi, (come presentato nel capitolo 5 i dati sono relativi al caso studio della Regione Abruzzo).

Il primo gruppo rappresenta il Quadro conoscitivo territoriale di base, composto da inquadramento orografico, idrografico, meteo-climatico, amministrativo, sociodemografico, economico – produttivo, patrimonio culturale e ambientale regionale. Il secondo è il Quadro conoscitivo dei principali rischi di Protezione Civile, composto da dati e informazioni derivanti dalla collaborazione con l’Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo.

2. La definizione degli “Scenari Multirischio”

La seconda fase è di tipo analitico e si sviluppa attraverso l’applicazione di un algoritmo originale che caratterizza il RDT e che finalizza la prima fase del Sistema delle Conoscenze. Gli scenari sono multi-scalari e multi-rischio, definiti attraverso la funzione $M-R = f$ (Multi-Pericolosità- $M-H$, Multi-Vulnerabilità- $M-V$, Multi-Esposizione $M-E$, Capacità di risposta- Cr). In questa ricerca la componente di V è considerata secondo gli aspetti ambientale/paesaggistico e socio/insediativo, questa distinzione consente di cogliere in modo più preciso gli effetti differenziati che i fenomeni naturali possono produrre sui diversi sistemi territoriali e di definire strategie e azioni più mirate, coerenti con una pianificazione del rischio realmente efficace. Per ogni componente della funzione R vengono definiti gli indici ($\sum H$, $\sum V_{ap}$, $\sum V_{si}$, $\sum E$) attraverso una classificazione numerica da 1 a 3 che hanno valore di incidenza bassa, media, alta. Questo serve a definire il livelli di rischio basso, medio ed alto ottenendo una visione generale del contesto territoriale.

3. L’individuazione degli “Hotspot Territoriali”

La terza fase riguarda un approfondimento degli scenari, o meglio la sovrapposizione mirata di questi per individuare con maggiore precisione gli Hotspot Territoriali, ovvero aree che rappresentano ambiti prioritari di intervento, e che richiedono azioni integrate di prevenzione, mitigazione e recupero territoriale. Questa analisi è fondamentale sia per graduare le azioni in funzione della gravità del rischio, sia per sovrapporre in modo mirato i diversi scenari. L’insieme di queste tre fasi riflette pienamente il paradigma del Disaster Risk Assessment -DRA, e rappresenta la base necessaria per la fase 4, verso il Disaster Risk Management – DRM, ovvero la traduzione delle analisi in un insieme strutturato di azioni operative.

4. La codificazione di “Strategie e azioni” di riduzione del rischio

L’ultima fase riguarda l’individuazione di strategie e azioni di riduzione del rischio, gestite attraverso il RDT. Queste hanno gli obiettivi di riduzione delle componenti di V , E , di potenziamento della Cr e di generare azioni

operative per i piani di Protezione Civile. Il tutto deve essere sottoposto ad una verifica di coerenza rispetto al quadro conoscitivo territoriale pianificatorio e la coerenza (interna/esterna, orizzontale/verticale; si riferisce all'armonizzazione delle previsioni di piano con altri piani dello stesso livello, sottordinati o sovraordinati, per rendere congrua l'adeguatezza generale delle scelte.

In questo modo, il RDT diventa uno strumento capace di collegare in modo diretto analisi, decisioni e interventi. Infatti le quattro fasi sono tra loro interdipendenti, l'aggiornamento dei dati (statici o dinamici) avviene in maniera automatizzata e agisce a catena su tutti i livelli successivi, consentendo di modificare in tempo reale gli output e i risultati attesi. Il RDT si fonda sul ruolo di algoritmi in grado di analizzare le trasformazioni territoriali e il loro impatto, progettati per accelerare i processi di aggiornamento, ottimizzare le elaborazioni e migliorare la capacità di risposta del sistema decisionale. La struttura di base del modello si configura come replicabile, potendo essere adattata in funzione della disponibilità e della qualità dei dati nei diversi contesti territoriali. Nel capitolo successivo saranno presentate le esperienze realizzate in campo internazionale nell'ambito della presente ricerca di dottorato, che sono state utili a definire compiutamente un sistema delle conoscenze che nutre il RDT e conforma il PRGR e a definire e implementare gli algoritmi del RDT per il supporto allo stesso PRGR. Sarà inoltre approfondito il caso studio su cui sarà applicata la metodologia, il PRGR della Regione Abruzzo, realizzato nell'ambito della collaborazione con l'Agenzia di Protezione Civile Regionale.

5. LE ATTIVITA' DI RICERCA NEL CONTESTO INTERNAZIONALE E IL CASO SPERIMENTALE NAZIONALE

Come già esposto con questa ricerca si tenta di definire un prototipo teorico di RDT, come strumento capace di integrare la pianificazione territoriale con la pianificazione e la gestione del rischio, seguendo gli approcci del DRA e DRM, seguendo quindi la struttura del PRGR. Per cui le tematiche affrontate riguardano temi di pianificazione, di rischio e di nuove tecnologie. La ricerca è stata svolta nell'ambito di una borsa di dottorato finanziata dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – PNRR, ai sensi del DM 351/2022, M4C1 – Investimento 4.1 “Dottorati per la Pubblica Amministrazione”, che ha consentito di approfondire in modo sistematico le potenzialità delle nuove tecnologie applicate ai processi di pianificazione e il loro ruolo nel supporto alle attività delle pubbliche amministrazioni. Fin dal primo anno, il percorso di ricerca ha previsto una convenzione con la Regione Abruzzo – Agenzia Regionale di

Protezione Civile, che ha reso possibile l'approfondimento dei temi legati ai sistemi conoscitivi per il Piano Regionale di Gestione del Rischio – PRGR e l'applicazione della metodologia di ricerca all'interno di una struttura teorica di Regional Digital Twin – RDT. Tale collaborazione ha permesso di confrontare il quadro teorico con esigenze operative reali, rafforzando il carattere applicativo della ricerca. Il progetto ha inoltre incluso un periodo obbligatorio di ricerca all'estero, presso la Facultad de Planeación Urbana y Regional della Universidad Autónoma del Estado de México – UAEMex, a Toluca de Lerdo , Messico. Questa esperienza è stata finalizzata al rafforzamento delle conoscenze dei rischi. A tale esperienza si è affiancato un ulteriore periodo di collaborazione internazionale presso il Barcelona Supercomputing Center – BSC, Catalogna, Spagna, orientato all'approfondimento del concetto di Digital Twin e allo sviluppo di un potenziale pseudo-codice da integrare nella struttura del prototipo di Regional Digital Twin. I casi , approfonditi nei paragrafi successivi, sono qui elencati :

- Il primo approfondimento è relativo ad un caso internazionale, analizzato tramite un periodo di quattro mesi svolto all'estero durante il secondo anno e previsto dalla borsa di dottorato, in accordo con la Facultad de Planeación Urbana y Regional, de la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, México, UaMex, presso cui si è potuto analizzare i tipi di rischio e i dati disponibili rispetto agli eventi naturali estremi presenti sul territorio nazionale messicano. Il Messico, per via della sua estensione territoriale e della varietà di fasce climatiche, presenta un'ampia gamma di pericolosità che possono offrire spunti per arricchire l'analisi e la prevenzione dei rischi nel contesto italiano.
- Il secondo riguarda il contesto europeo, spagnolo. Lo studio è stato svolto sempre durante un periodo estero svolto durante il terzo ed ultimo anno di ricerca, specificamente presso il centro di ricerca Barcelona Supercomputing Center – BSC, nella città di Barcellona. Qui si è potuto approfondire il tema del Barcellona DT, uno dei casi principali europei, interessante anche per via dell'utilizzo dei dati in Europa, questo è un tema cruciale per via delle normative sulla privacy , e che differenzia il caso catalano da altri contesti, come quelli di Seoul, Singapore e altre città asiatiche. Congiuntamente si è approfondito il tema sugli scenari di rischio naturale con il gruppo CASE - Natural Hazards and Risk Analysis. Infatti per la similitudine tra il territorio catalano e alcune zone italiane, alcune tipologie di rischio, come grandinate e incendi, presentano analogie significative con quelle

osservabili in diverse aree italiane, rendendo il confronto particolarmente rilevante.

- Il terzo caso riguarda il caso sperimentale di studio relativo al contesto italiano, in particolare alla regione Abruzzo, e deriva dalla convenzione della Borsa di Dottorato con l’Agenzia Regionale di Protezione Civile. In questo contesto si occupa di pianificazione e gestione del rischio. La regione Abruzzo come la gran parte del territorio italiano è soggetto alla presenza di eventi naturali che storicamente hanno dimostrato la loro potenza. Nello specifico la regione ha rischi estesi dall’entroterra alla costa, il territorio è caratterizzato da una morfologia e dalla presenza di comunità e patrimoni esposti molto fragili e vulnerabili. L’analisi si è focalizzata in particolare sul Piano di Protezione Civile regionale e sulle analisi di scenari di rischio.

5.1. IL CONTESTO INTERNAZIONALE

Los Estados Unidos de México, Estado De México, Toluca de Lerdo. La Conoscenza dei rischi

Il primo caso di studio analizzato nell’ambito del percorso di dottorato si è svolto presso la Facultad de Planeación Urbana y Regional della Universidad Autónoma del Estado de México – UAEMex, con sede a Toluca de Lerdo, nello Stato del Messico. Tale esperienza di ricerca ha avuto come obiettivo principale l’arricchimento del quadro conoscitivo relativo ai rischi naturali e antropici attraverso l’analisi di un contesto internazionale complesso e fortemente esposto a molteplici pericolosità. L’approfondimento del caso messicano risponde all’esigenza di costruire una base conoscitiva più ampia e articolata, utile alla strutturazione di un Regional Digital Twin – RDT, capace di integrare non solo i rischi caratteristici del caso studio principale (Regione Abruzzo), ma anche tipologie di rischio assenti o marginali nel contesto italiano. In questo senso, la conoscenza dei rischi sviluppata attraverso il caso messicano ha consentito di analizzare pericolosità quali il rischio vulcanico, il rischio sismico ad alta intensità, i cicloni tropicali, gli uragani e i tornadi, fenomeni che, sebbene non direttamente riscontrabili nel territorio abruzzese, risultano rilevanti per una riflessione metodologica più ampia sulla gestione del rischio e sulla costruzione di modelli territoriali adattivi e trasferibili.

Il contesto amministrativo degli Stati Uniti Messicani

Il Messico è una Repubblica federale il cui nome ufficiale è Estados Unidos Mexicanos, composta da 32 entità federative, suddivise in 31 Stati (Estados) e nella capitale federale, Città del Messico (Ciudad de México – CDMX), dotata di uno statuto giuridico speciale. L'organizzazione amministrativa del Paese si articola su tre livelli principali. Il livello federale, con sede a Città del Messico, esercita i poteri esecutivo, legislativo e giudiziario; il livello statale è affidato a ciascun governo statale, guidato da un governatore e da un Congresso locale; infine, il livello municipale rappresenta l'unità amministrativa di base. I municipios, circa 2.400 sull'intero territorio nazionale, svolgono un ruolo centrale nell'organizzazione politica e amministrativa del Paese, occupandosi direttamente di funzioni quali la pianificazione urbanistica, la gestione dei servizi locali e la sicurezza territoriale. Accanto a questa struttura formale, esiste una suddivisione interna in regioni che, pur non avendo valenza amministrativa né autonomia politica, è utilizzata per finalità geografiche, statistiche e di pianificazione settoriale, in particolare per il coordinamento dei servizi sanitari, educativi, giudiziari e di sicurezza. Un caso peculiare è rappresentato da Città del Messico che, pur non essendo uno Stato federato, è dotata di una propria Costituzione, in vigore dal 2017, ed è suddivisa in 16 alcaldías, unità amministrative assimilabili funzionalmente ai municipi.

Inquadramento territoriale e morfologia

Con una superficie di circa 1.964.000 km², il Messico è il quinto Paese più esteso del continente americano e presenta una marcata eterogeneità geografica, morfologica e climatica. Il territorio si estende dalla penisola della Baja California fino alla penisola dello Yucatán, affacciandosi a est sul Golfo del Messico e sul Mar dei Caraibi e a ovest sull'Oceano Pacifico e sul Golfo di California. Confina a nord con gli Stati Uniti d'America e a sud con Guatemala e Belize. Questa estensione territoriale, unita alla complessità orografica, rende il Paese particolarmente vulnerabile a una vasta gamma di rischi naturali. Dal punto di vista morfologico, il territorio messicano può essere schematicamente suddiviso in grandi aree: regioni desertiche e aride nel nord del Paese; altipiani e catene montuose centrali; e regioni tropicali umide nel sud-est, in particolare nella penisola dello Yucatán e nello Stato del Chiapas.

L'orografia: Las Sierras

Il sistema orografico messicano è dominato da due grandi catene montuose: la Sierra Madre Oriental, che si sviluppa lungo la costa del Golfo del Messico, e la Sierra Madre Occidental, che rappresenta la prosecuzione meridionale delle Montagne Rocciose degli Stati Uniti e percorre la costa pacifica fino a trasformarsi nella Sierra Madre del Sur, interrompendosi in corrispondenza dell'Istmo di Tehuantepec. A queste si aggiungono ulteriori sistemi montuosi localizzati nella Baja California Sur e nelle regioni meridionali fino al confine con il Guatemala.

Queste catene montuose svolgono un ruolo fondamentale nel determinare il clima del Paese, agendo come barriere orografiche che influenzano la distribuzione delle precipitazioni, la circolazione delle masse d'aria e la differenziazione climatica tra le pianure costiere e le regioni interne.

L' Eje Neovolcánico

Un elemento centrale del territorio messicano è rappresentato dall'Eje Volcánico Transversal, noto anche come Eje Volcánico Transversal – EVT, Sierra Volcánica Transversal o Cordillera Neovolcánica. Si tratta di una vasta catena vulcanica che attraversa il Paese da ovest a est, dall'Oceano Pacifico al Golfo del Messico, lungo il 19° parallelo, collegando la Sierra Madre Occidental con la Sierra Madre Oriental. Questo sistema montuoso fa parte della Cintura di Fuoco del Pacifico ed è localizzato in un'area di subduzione tra la placca di Cocos e la placca nordamericana, configurandosi come una delle regioni geologicamente più attive del continente.

L'asse neovolcanico ospita alcuni tra i principali vulcani come il Pico de Orizaba (5636 m), noto anche come Citlaltépetl, con la vetta più alta del Messico, il Nevado de Colima (4339 m), il Parícutín (2774 m), il Nevado de Toluca (4577 m), il Popocatepetl (5452 m), l'Iztaccíhuatl o "la donna addormentata" (5286 m), La Malinche (4451 m), Cofre de Perote (4282 m) e Sierra Negra, compagna del Pico de Orizaba (4580 m), molti dei quali ancora attivi. Oltre al rischio vulcanico e sismico, questa cordigliera svolge anche una funzione climatica, costituendo una barriera naturale alle perturbazioni provenienti dall'Oceano Pacifico, in particolare quelle che interessano lo Stato di Guerrero..

Clima, correnti oceaniche e principali rischi naturali

La marcata varietà climatica che caratterizza il territorio messicano è il risultato dell'interazione tra la sua posizione geografica, l'elevata

complessità orografica e l'influenza combinata delle principali correnti oceaniche che interessano i versanti pacifico e atlantico del Paese. Il Messico si colloca infatti in una posizione di cerniera tra sistemi atmosferici e oceanici differenti, che contribuiscono a generare forti contrasti climatici e ambientali su scala regionale e locale (García, 2004; CONAGUA, 2018).

Sul versante occidentale del Paese agisce la Corrente della California, una corrente fredda che scorre da nord verso sud lungo la costa pacifica e che contribuisce a determinare condizioni climatiche prevalentemente aride e semi-aride, in particolare nella penisola della Baja California. Procedendo verso latitudini più meridionali, la Corrente della California lascia progressivamente spazio alla Corrente Nord-Equatoriale, caratterizzata da acque più calde che favoriscono un incremento dell'umidità atmosferica e la transizione verso climi tropicali umidi. Questa dinamica oceanica crea le condizioni favorevoli alla formazione di sistemi ciclonici e uragani nel Pacifico orientale, con effetti significativi sulle regioni costiere e sull'entroterra (NOAA, 2022; CENAPRED, 2021).

Sul versante orientale, la Corrente del Golfo svolge un ruolo altrettanto rilevante. Essa trasporta masse d'aria calda e umida lungo le coste del Golfo del Messico e del Mar dei Caraibi, contribuendo alla definizione di un clima marcatamente tropicale nelle regioni dello Yucatán e dell'area caraibica messicana. L'elevata evaporazione associata a queste acque calde favorisce la formazione di uragani e cicloni tropicali di origine atlantica, nonché precipitazioni intense che possono estendersi verso l'interno del Paese, in particolare lungo i versanti orientali delle principali catene montuose (Gray, 2007; CENAPRED, 2021).

A sud-est del territorio messicano, tali condizioni climatiche si riflettono nella presenza di estese foreste pluviali tropicali, concentrate in parte nello Stato del Chiapas ma soprattutto nella penisola dello Yucatán, dove si sviluppa la cosiddetta foresta Maya. Questo ecosistema è caratterizzato da un clima tropicale umido, con temperature elevate e abbondanti precipitazioni stagionali, che rendono l'area particolarmente vulnerabile a fenomeni di inondazione, erosione e degrado ambientale, soprattutto in presenza di pressioni antropiche crescenti (INEGI, 2020; FAO, 2019).

All'interno del sistema delimitato dalla Sierra Madre Oriental, dalla Sierra Madre Occidental e dall'Eje Volcánico Transversal, si estende

l'altopiano centrale del Messico (Plateau Centrale), che rappresenta una delle principali unità morfologiche del Paese. Questo altopiano è idealmente suddiviso in una porzione settentrionale, caratterizzata da condizioni più aride e da quote mediamente inferiori, e una porzione meridionale, posta a quote più elevate e contraddistinta da condizioni climatiche più temperate. Nella parte settentrionale si collocano il deserto di Chihuahua, il deserto di Sonora e il semideserto di Zacatecas, aree soggette a fenomeni di siccità, stress idrico e desertificazione (CONAGUA, 2018). La porzione meridionale dell'altopiano ospita invece la regione del Bajío, una delle aree agricole più fertili del Paese, caratterizzata da altitudini comprese tra i 1.500 e i 2.500 metri s.l.m. e da numerose valli a clima temperato, quali la Meseta Tarasca, la valle di Toluca e la valle Poblano-Tlaxcalteca. Queste aree, pur beneficiando di condizioni climatiche relativamente favorevoli, risultano comunque esposte a rischi naturali quali eventi sismici, attività vulcanica e precipitazioni intense, amplificate dalla concentrazione di popolazione e infrastrutture (Martínez et al., 2017). La combinazione tra correnti oceaniche, orografia complessa e dinamiche atmosferiche fa sì che le masse d'aria provenienti dalle coste si muovano verso l'entroterra fino a incontrare l'Eje Volcánico Transversal, che agisce come una vera e propria barriera climatica. Questo incontro genera forti contrasti tra aree umide e aree secche, contribuendo alla coesistenza, all'interno di uno stesso Paese, di climi estremamente differenti che spaziano dalla giungla tropicale ai deserti, fino ai climi temperati e freddi di montagna (García, 2004). Tali condizioni climatiche e morfologiche, unite all'elevata attività tettonica e vulcanica legata alla subduzione della placca di Cocos sotto la placca nordamericana, rendono il territorio messicano esposto a una pluralità di rischi naturali, tra cui terremoti, eruzioni vulcaniche, uragani, inondazioni, frane, siccità e ondate di calore.

El Estado de México, Edomex

Nello specifico il periodo previsto nel percorso di dottorato si è svolto presso la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México - UAEMex. Lo Stato del Messico (Estado Libre y Soberano de México), con l'acronimo Edomex, è uno degli stati federati, del Centro- sud della Repubblica Messicana e ha per capitale Toluca de Lerdo. Si estende per circa 22.500,00 km², costituito da 125 municipios e 20 regioni. Secondo il Censo INEGI al 2020 la sua popolazione ammonta a 16,9 milioni di abitanti, con una densità abitativa di 755,22 ab./km², risultando essere lo stato più popoloso di tutta la Repubblica. Situato sull'altopiano centrale ad una

media di 2600 m s.l.m, confina a nord con Querétaro e Hidalgo, a est con Tlaxcala, Puebla e la Città del Messico (CDMX) che circonda quasi completamente, a sud con Morelos e Guerrero e ad ovest con Michoacán ed è alle pendici del vulcano Nevado De Toluca.

5.1.1. Dati e fonti della Protección Civil de México, Estado de Mexico a confronto

Si è analizzato anzitutto lo schema strutturale e gerarchico della pianificazione territoriale e della pianificazione del rischio (Martínez & al. 2017), (Escamilla et al., 2017).

Nonostante gli eventi più estremi di intensità come sismi, eruzioni vulcaniche e cicloni sono sicuramente di rilevante impatto, in questo territorio sono presenti altri fattori di rischio dovuti ad eventi naturali come fenomeni idrogeologici, idraulici, di siccità o di onde di calore, e soprattutto di fattori di esposizione e vulnerabilità molto critici.

Il sistema di gestione del rischio in Messico è strutturato attorno a tre principali organismi istituzionali: il Sistema Nacional de Protección Civil – SINAPROC, la Coordinación Nacional de Protección Civil – CNPC e il Centro Nacional de Prevención de Desastres – CENAPRED. Quest’ultimo svolge un ruolo centrale di supporto tecnico-scientifico al SINAPROC, occupandosi della raccolta, elaborazione e diffusione dei dati necessari alla valutazione dei rischi, nonché di attività di ricerca, formazione, monitoraggio e divulgazione relative ai fenomeni naturali e antropogenici potenzialmente generatori di catastrofi (Gobierno de México, 2021).

Questi organismi definiscono le linee guida per la redazione degli Atlas de Riesgo Nacional, Estatales y Municipales Figura 21, strumenti fondamentali per la conoscenza del territorio e delle pericolosità che possono interessare la popolazione. L’atlante dei rischi è concepito come una base informativa integrata che supporta la pianificazione territoriale e la riduzione del rischio di disastri, promuovendo al contempo una cultura dell’autoprotezione e una gestione più consapevole del territorio (Ley General de Protección Civil, 2012).

Analogamente a quanto avviene nel contesto italiano con i piani di Protezione Civile, gli Atlas de Riesgo sono strutturati in quattro capitoli principali:

1. Geografía Estatal, Regional o municipal in cui si riportano le caratteristiche geografiche, economico-sociali generali del territorio (División territorial, Topografía, Hipsometría, Geología, Climas, Suelos, Uso de la tierra, Población).
2. Sistema Perturbador, costituito da informazioni relative alle caratteristiche dei principali fenomeni naturali o provocati dall'uomo

che possono creare una situazione di pericolo per la popolazione o le sue infrastrutture all'interno del territorio statale, costituendo così cinque grandi macroaree di pericolosità - Geológicos, - Hidrometeorológicos, - Químico-Tecnológicos, - Sanitario-Ecológicos, - Socio-Organizativos).

3. Sistema Expuesto, costituito da informazioni relative ai siti di concentrazione, alla popolazione di massa e le sue caratteristiche.

4. Sistema Regulador, costituito da informazioni relative alle istanze ausiliarie in caso di emergenza o disastro. (Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo, 2021). Ai fini della ricerca, l'approfondimento è stato effettuato rispetto all'individuazione di dati e fonti del secondo e terzo capitolo poiché l'analisi del Sistema Perturbador offre delle conoscenze riguardo i fenomeni naturali e antropici (H) necessarie insieme al sistema vulnerabile (V) e all'esposizione (E) a generare scenari di rischio, (Criterios de evaluación: Atlas de Riesgos Municipales del Estado de México, 2022). Un primo approfondimento è stato analizzare le differenti tipologie di rischi presenti sul territorio messicano e come questi vengono categorizzati, risalendo così ai dati disponibili e alle loro fonti, come mostrato nella Tabella 8. Gli elementi non evidenziati sono stati trascurati in quanto non intesi come fenomeni interessati alla ricerca.

HAZARD	FONTI	DATI STATICI
Geológicos		
Sismos	servicio sismológico nacional (SSN), stituto de ingeniería UNAM	
Erupciones volcánicas		
Tsunamis	Atlas Nacional de Riesgo (ANR), CONABIO	kmz,shapefile
Inestabilidad de laderas	ANR	kmz
Hundimientos	ANR	kmz
Hidrometeorológicos		
Ciclones tropicales, Huracanes	ANR, CONABIO	kmz,shapefile
Inundaciones	INEGI, base de datos climatología nacional COLICOM, Atlas Nacional de Riesgo por Inundación (ANRI)	excel, kmz
Tormentas de nieve, granizo, polvo, eléctricas	CONABIO	shapefile
Heladas	CONABIO	shapefile
Sequías	CONABIO	shapefile
Ondas cálidas/gélidas	CONABIO	shapefile
Químico - Tecnológicos		
Fugas		
Derrames		
Incendios	SentinelHub,Copernicus, LANOT, CONAFOR	imagenes satelitales, excel
Explosiones		
Radiaciones		
Sanitario Ecológicos		
Plagas		
Epidemias		
Contaminación del agua , aire, suelo, de alimentos	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	csv
Socio - Organizativos		
Concentración masiva de población, Demostraciones de inconformidad social, Terrorism, Sabotaje, Vandalismo, Accidentes aéreos, marítimos o terrestres, Interrupción o afectación de servicios básicos o de infraestructura estratégica		
VULNERABILITY		
Factores Físico	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), ANR, CONABIO	excel,kmz,shapefile
Deficiente calidad de las construcciones, Asentamientos en zonas de riesgo, Crecimiento acelerado, Densidad poblacional, Falta de mantenimiento		
Nivel socio-económico	INEGI	excel
Pobreza, Acceso a crédito y préstamos, Acceso a infraestructura de servicios básicos y estratégica		
Factores Sociales	INEGI	excel
Tradiciones, Percepción del riesgo, Niveles de educación, Situación legal, Dominación y relaciones de poder, Marco legal, normas, legislación, Aspectos de género, grupos minoritarios, Acceso a la información		
SISTEMA EXPUESTO		
Población	INEGI, CONAPO	excel, shape
Edad, Personas con discapacidad, Económicos, Sociales, Educativos		
Tipología se vivienda o edificación	INEGI	excel
Año de construcción, niveles, tiempo de vida de las viviendas, tipología de vivienda, metros cuadrados de construcción		
Infraestructura vital y estratégica	INEGI	excel
Escuela, instituciones de salud, auxilio, edificios públicos, terminal de autobuses, aeropuertos, centros culturales, centros recreativos, hoteles, mercados, tianguis, tiendas de autoservicio, instalaciones de fibra óptica etc.		

Tabella 8: Dati e fonti di base per la costruzione degli Atlas de Riesgo, Mexico

Ai fini della presente ricerca, l'approfondimento è stato condotto in particolare sui dati e sulle fonti relative al Sistema Perturbatore e al Sistema Espuesto, in quanto l'analisi congiunta delle pericolosità (H),

dell'esposizione (E) e della vulnerabilità (V) rappresenta il presupposto fondamentale per la costruzione di scenari di rischio coerenti e comparabili (Criterios de evaluación, 2022). In questa fase è stato realizzato un primo censimento delle differenti tipologie di dati e fonti disponibili rispetto ai fattori di rischio, utili alla stesura degli Atlas. I risultati di tale analisi sono sintetizzati nella Tabella 8, e messi in relazione alle diverse categorie analizzate nel caso studio della Regione Abruzzo Tabella 9. La tabella evidenzia, per ciascuna tipologia di rischio, la disponibilità dei dati, la scala di riferimento e le principali fonti informative utilizzate.

HAZARD	FONTI	DATI STATICI
Seismic	Regione abruzzo	mappa sismica con accelerazioni
Flood	Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale	mappa di pericolosità
Landslides	Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale	mappa di pericolosità
Avalanche	Regione abruzzo	CLPV
Dams	Regione abruzzo	PED-piani evacuazione dighe, fasce inondazioni
Tsunami	ISPRA	dati mareometrici
Wildfire	Regione abruzzo	pirologica estiva AIB
VULNERABILITY environmental/landscape (Vel)		
Protected Areas	Geoportale Nazionale	carta della Natura
Quality of Protected Areas	ISPRA	carta della Natura
Forested Areas	Regione Abruzzo	AIB
Ecological Sensitivity	ISPRA	carta della Natura
Floristic-Vegetation Value	Regione Abruzzo	carta dei valori
Geosigmeti	Regione Abruzzo	carta dei valori
Continental/Marine Waters	Regione Abruzzo ISPRA	carta dei uso del suolo
SCIs Outside Protected Areas	Regione Abruzzo ISPRA	Cartografia Geobotanica dei SIC
VULNERABILITY anthropic/settlement (Vas)		
Archeological heritage	Regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise Valori	- shapefile
Historic Urban Areas	Regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise Valori	- shapefile
Building Condition	ISTAT - zone censuarie	excel-csv
Age of buildings	ISTAT - zone censuarie	excel-csv
Index of Social and Material Vulnerability -IVSM Age-index, Citizens with low level of instruction, Families with more than 5 components, Occupation rate, Female occupation, Structural dependency ratio	ISTAT - zone censuarie	excel-csv
EXPOSURE		
Population Density	ISTAT- zone censuarie	excel-csv
Future urban land (mosaic of urban plans) - PRG	Regione Abruzzo	shapefile
Land Consumption	ISPRA	carta del consumo di suolo

Tabella 9: Dati e fonti di base per la costruzione del sistema delle conoscenze della regione Abruzzo

Gli elementi non evidenziati nella tabella 8 sono stati volutamente esclusi dall'analisi in quanto ritenuti non pertinenti agli obiettivi specifici della ricerca. La funzione della tabella non è dunque quella di fornire un confronto esaustivo tra tutti i rischi possibili, ma piuttosto di mettere in luce le differenze e le potenzialità di integrazione tra due contesti territoriali differenti, evidenziando come anche rischi non presenti nel territorio abruzzese possano essere concettualmente inclusi all'interno del quadro conoscitivo del RDT.

La principale banca dati utilizzata per l'estrazione delle informazioni è la piattaforma interattiva Sistema Nacional de Información sobre Riesgos – SNIR, integrata nell'Atlas Nacional de Riesgo – ANR e gestita dal CENAPRED. Questa piattaforma raccoglie dati conoscitivi di base sul contesto nazionale, informazioni sui fenomeni naturali e antropici, sul sistema esposto e sul sistema regolatore, nonché scenari di rischio e scenari legati al cambiamento climatico. I dati sono scaricabili in formato KML, consentendo un'integrazione diretta all'interno di sistemi GIS e modelli digitali del territorio.

Un ulteriore strumento di rilievo è rappresentato dalla piattaforma Monitoreo y Aviso de Fenómenos Naturales, che fornisce informazioni in tempo reale sui principali fenomeni naturali che interessano il Paese. Attraverso fonti ufficiali quali il Centro Nacional de Prevención de Desastres – CENAPRED, il Servicio Sismológico Nacional – SSN, il Laboratorio de Observación de la Tierra – LANOT e la National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, è possibile accedere a dati dinamici aggiornati con frequenze variabili, da un'ora a un giorno, grazie all'utilizzo di sensori e satelliti.

Il verificarsi ricorrente di fenomeni naturali ad elevato impatto rende necessario un monitoraggio permanente di terremoti, cicloni tropicali e rischi vulcanici. In questo senso, l'integrazione di sistemi di visualizzazione dinamica in un unico pannello informativo rappresenta un elemento di particolare interesse per la costruzione di modelli digitali avanzati del territorio e per il supporto ai processi decisionali (Gobierno de México, 2021).

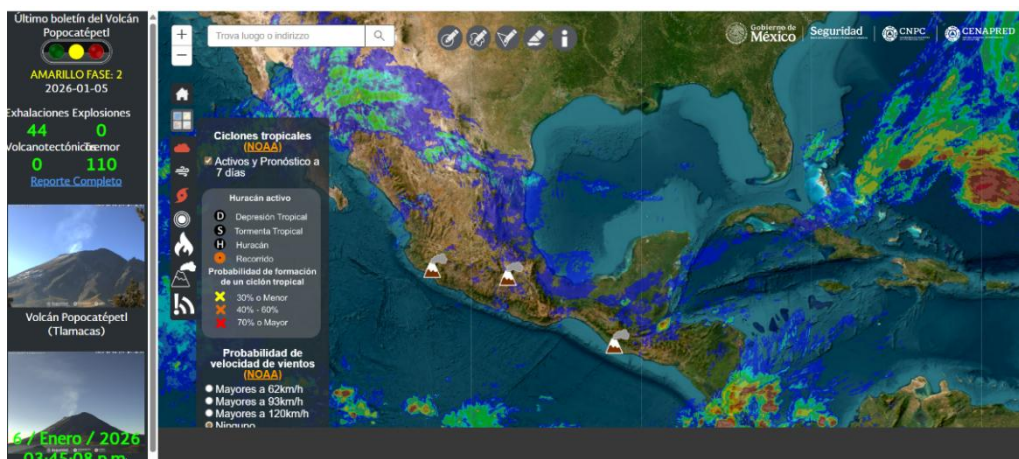


Figura 21: Dashboard Atlas Nacional de Riesgos

5.2. IL CONTESTO EUROPEO

Spagna, Catalunya, Barcellona.

Il Barcelona Digital Twin, e l'analisi di scenari di rischio

Il secondo caso analizzato è relativo ad un contesto europeo, e ad un approfondimento sullo sviluppo delle nuove tecnologie emergenti che possono supportare la pianificazione territoriale e del rischio. Barcellona è una delle principali città promotrici del tema del Digital Twin in Europa. Attraverso la collaborazione con il Barcelona Supercomputing Center è stato possibile da una parte analizzare il progetto in corso del DT di Barcellona con il gruppo CASE e dall'altro approfondire la metodologia per la creazione degli scenari di rischio naturali con il gruppo di ricerca NHaRA, (con cui inoltre, si è potuto creare un algoritmo automatizzato dell'analisi di scenari e creazione di Hotspot del mio tema di ricerca, approfondito nel capitolo 6).

Il territorio catalano e la città di Barcellona

La Catalogna o Catalunya è una delle 17 comunità autonome della penisola Iberica a nord-est della Spagna. Si estende per circa 32.000 km², confina a nord con la Francia divisa dalla catena Montuosa dei Pirenei, ad ovest con l'Aragona, a sud con la Comunidad Valenciana e ad est con il Mar Mediterraneo. La sua popolazione ammonta a circa 7 milioni di abitanti distribuiti maggiormente lungo l'area costiera, e risultando così la seconda comunità autonoma più popolosa seconda solo all'Andalusia. Il territorio presenta una notevole varietà morfologica, comprendente catene montuose (Pirenei, Prepirenei), colline e pianure costiere, oltre a un sistema idrografico di rilievo che include i fiumi Ter, Llobregat ed Ebro. Tale diversità geografica condiziona in modo significativo l'esposizione ai rischi naturali, in particolare eventi idrometeorologici e climatici.

I rischi naturali in Catalunya

Il territorio catalano presenta una pluralità di pericoli naturali che può determinare impatti significativi sulla popolazione, sulle infrastrutture e sui sistemi produttivi. Tra i fenomeni principali si hanno eventi idrometeorologici, come alluvioni e inondazioni. Essi sono frequentemente connessi agli episodi di precipitazioni intense, "gota fría", che interessano principalmente i maggiori centri urbani, Barcellona, Girona e Tarragona, e i bacini fluviali dei fiumi Ter, Llobregat ed Ebro. Questi eventi, oltre a generare esondazioni e danni diretti nelle aree urbanizzate, possono attivare processi idrogeologici secondari nelle zone montane, incrementando l'esposizione e la vulnerabilità di comunità. Altri eventi ricorrenti includono le grandinate, che impattano significativamente anche

sui sistemi agricoli e di viticoltura. Un ulteriore elemento critico è rappresentato dalla siccità, la cui intensificazione è attribuibile a motivi climatici come appunto il cambiamento climatico e antropici in riferimento alla pressione agricola e turistica. A ciò si aggiunge l'aumento delle ondate di calore, che in alcune zone interne determinano temperature superiori a 40 °C, con conseguenze rilevanti per la salute pubblica, i consumi energetici e la resilienza degli ecosistemi. Tali condizioni possono favorire la propagazione di incendi boschivi, con particolare incidenza nelle aree montane e collinari dei Pirenei, Prepirenei, di Garraf, di Montseny. Secondo l'aspetto geologico, il territorio presenta un livello di rischio sismico classificabile come basso-moderato. La regione, infatti, non è caratterizzata da un'attività sismica comparabile a quella dell'area andalusa; tuttavia, eventi tellurici, anche se rari, risultano documentati nelle zone settentrionali, in particolare nei Pirenei e nella provincia di Girona. In sintesi, il quadro di rischio regionale è definito da una preponderante esposizione a fenomeni idrometeorologici e climatici, amplificata dai processi di cambiamento climatico e dalla pressione antropica.

Il contesto amministrativo

Dal punto di vista istituzionale, la Catalogna gode di un ampio grado di autogoverno, sancito dallo Statuto di Autonomia del 2006. Tale ordinamento riconosce alla comunità autonoma competenze specifiche in ambito politico, economico, educativo, culturale e territoriale. La struttura amministrativa regionale si articola in quattro province, Barcellona, Girona, Lleida e Tarragona, suddivise, a loro volta, in comarche cioè unità territoriali intermedie che riflettono le identità storiche, geografiche ed economiche locali.

La città di Barcellona

La capitale della Catalunya è Barcellona, una città di rilievo internazionale e uno dei poli economici, culturali e turistici più importanti dell'Europa mediterranea. Con un'estensione di circa 101 km² si sviluppa sulla costa nord orientale della penisola, bagnata dal Mar Mediterraneo e circondata dalla catena montuosa Serra de Collserola, che ospita uno dei parchi metropolitani più grandi d'Europa. Ha una popolazione di circa 1,6 milioni di abitanti distribuita in 10 distretti (Figura 22) e oltre 70 quartieri, quali:

1. Ciutat Vella, è il distretto più storico e turistico, con la presenza della Rambla e il porto antico.

Quartieri: Barri Gòtic, El Raval, El Born - Sant Pere - Santa Caterina, Barceloneta

2. Eixample, progetto di Ildefons Cerdà con pianta a griglia, raggruppa Passeig de Gràcia e molte opere di Gaudí.

Quartieri: Dreta de l'Eixample, L'Antiga Esquerra, La Nova Esquerra, Sagrada Família, Sant Antoni.

3. Sants-Montjuïc, è l'area con funzioni prevalentemente residenziali, industriali e culturali come la sede di Montjuïc o la Fira de Barcelona.

Quartieri: Sants, Poble-sec, Hostafrancs, Zona Franca, Montjuïc

4. Les Corts, nonché zona universitaria e residenziale.

Quartieri: Les Corts, Pedralbes, Maternitat i Sant Ramon

5. Sarrià-Sant Gervasi, una zona residenziale di prestigio, vicina alla Collserola.

Quartieri: Sarrià, Sant Gervasi, Tres Torres, Vallvidrera, Tibidabo, Bonanova

6. Gràcia, area culturale con la presenza di piazze e del Parc Güell

Quartieri: Vila de Gràcia, Vallcarca, El Coll, Camp d'en Grassot, La Salut

7. Horta-Guinardó, oltre alla zona residenziale ospita parchi e servizi sanitari di rilievo

Quartieri: Horta, Guinardó, Carmel, Vall d'Hebron

8. Nou Barris, zona storicamente popolare e ricca di aree verdi

Quartieri: Vilapicina i la Torre Llobeta, Prosperitat, Roquetes, Canyelles

9. Sant Andreu, area di trasformazione urbana della ex zona industriale

Quartieri: Sant Andreu de Palomar, Bon Pastor, Trinitat Vella, Baró de Viver

10. Sant Martí, rispecchia la trasformazione tecnologica con 22@ Districte, la zona olimpica e il lungomare.

Quartieri: Poblenou, El Clot, La Verneda, Diagonal Mar, Vila Olímpica

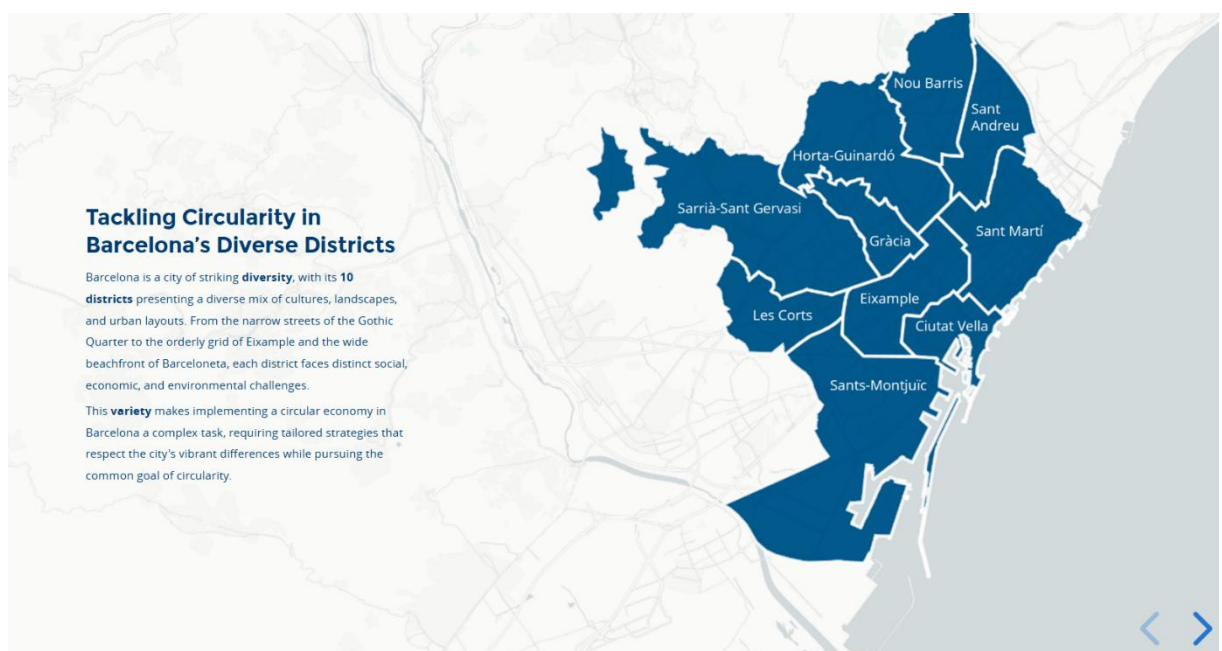


Figura 22: I distretti di Barcellona, Vcity

Barcellona una Smart City

La città di Barcellona è riconosciuta tra le smart cities più avanzate al mondo grazie all'adozione di strategie integrate che combinano tecnologia, sostenibilità e partecipazione civica come:

- **Tecnologia e infrastrutture digitali**

- Estesa rete di sensori IoT per monitorare traffico, qualità dell'aria, consumo energetico e gestione dei rifiuti.
- Ampia copertura di Wi-Fi pubblico gratuito (uno dei più grandi d'Europa).
- Investimenti in 5G e infrastrutture di connettività.

- **Mobilità intelligente**

- Sistema di trasporto pubblico integrato (metro, bus, tram, biciclette pubbliche Bicing).
- Progetto delle Superilles (Superblocks): riduzione del traffico in alcune aree urbane per favorire pedoni e biciclette (Il Post, 2019).
- Sperimentazioni con veicoli elettrici e condivisi.

- **Gestione urbana efficiente**

- Illuminazione intelligente a LED con sensori di movimento, che riducono consumi energetici.
- Smart water: sistema di irrigazione automatizzato che regola il consumo in base ai dati meteo e ai sensori nel suolo.
- Raccolta dei rifiuti con cassonetti sensorizzati che segnalano quando sono pieni. (app)

- **Sostenibilità e ambiente**

- Politiche per ridurre le emissioni di CO₂ e aumentare il verde urbano.
- Obiettivo "Barcellona 2030" per una città climaticamente neutra.
- Piani di adattamento climatico connessi ai Digital Twin Urbani, (vCity Tech, s.d.)

- **Partecipazione dei cittadini**

- Piattaforma Decidim.Barcelona, che permette ai cittadini di proporre, discutere e votare iniziative pubbliche.
- Dati urbani aperti (Open Data BCN) a disposizione di imprese, ricercatori e cittadini.

- **Innovazione e ricerca**

- Ospita il Barcelona Supercomputing Center (BSC-CNS), che supporta progetti di intelligenza artificiale, urban digital twins e clima.
- Ecosistema di startup tecnologiche e hub di innovazione (22@ District).

- Inoltre Barcellona è stata European Capital of Innovation (2014), ed è tra le principali smart cities nei globali insieme a Singapore, Amsterdam, Copenhagen.

Barcellona risulta essere una fonte di innovazione in molti campi, tra università e centri di ricerca, tra questi c'è il Barcellona Supercomputing Center - BSC centro di ricerca con cui è stata fatta una collaborazione per la mia ricerca.

5.2.1. Il Barcelona Supercomputing Center - BSC

Come illustrato nei paragrafi precedenti, la comunità autonoma catalana e, in particolare, la città di Barcellona rivestono un ruolo di primo piano nel panorama europeo della ricerca scientifica, dell'innovazione tecnologica e dell'istruzione superiore. In questo contesto si inserisce il Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación – BSC-CNS, con il quale è stata sviluppata una collaborazione nell'ambito della presente ricerca. Il BSC-CNS, inaugurato nel 2005, rappresenta il centro nazionale spagnolo per il calcolo ad alte prestazioni – High Performance Computing – HPC. Si tratta di un'organizzazione pubblica sostenuta da tre attori istituzionali principali: il Ministerio de Ciencia e Innovación del Governo spagnolo, la Generalitat de Catalunya, quale sistema amministrativo e istituzionale di governo regionale, e la Universitat Politècnica de Catalunya – UPC. Questa struttura di governance consente al centro di operare come nodo strategico tra politiche pubbliche, ricerca accademica e innovazione tecnologica (Barcelona Supercomputing Center – BSC-CNS, s.d.). Attraverso team multidisciplinari, il centro sviluppa numerosi progetti di ricerca articolati in cinque principali aree scientifiche: Informatica, Scienze della Vita, Scienze della Terra, Applicazioni informatiche in Scienza e Ingegneria e Scienze Sociali e Umanistiche computazionali. All'interno di tali ambiti, il centro conduce attività di ricerca avanzata che includono applicazioni di intelligenza artificiale – IA, Urban Digital Twin – UDT e modellazione climatica, avvalendosi di programmi di finanziamento dell'Unione Europea, di bandi di ricerca pubblici a livello nazionale e regionale, nonché di collaborazioni con aziende leader a livello internazionale. Un aspetto centrale della missione del BSC è la promozione della sovranità tecnologica europea e dell'uso etico dell'intelligenza artificiale, con particolare attenzione alla gestione e al controllo dei dati all'interno dello spazio europeo. In coerenza con gli obiettivi di sostenibilità ambientale, il centro opera inoltre utilizzando energia interamente rinnovabile, integrando le istanze

ambientali nelle proprie infrastrutture di ricerca (BSC-CNS, s.d.). Il centro di ricerca mette a disposizione risorse HPC di altissimo livello a beneficio della comunità scientifica internazionale e di numerosi attori industriali, collaborando con realtà quali IBM, Microsoft, Intel, NVIDIA, Repsol e Iberdrola. Tra le infrastrutture più rilevanti si distingue MareNostrum 5, la versione più recente della famiglia di supercomputer MareNostrum, che rappresenta uno dei sistemi di calcolo più potenti d'Europa. A questa si affianca il primo computer quantistico operativo in Spagna, sviluppato nell'ambito del progetto Quantum Spain, basato su tecnologie interamente europee. Grazie a queste infrastrutture computazionali avanzate e alla capacità di integrare competenze scientifiche, tecnologiche e applicative, il Barcelona Supercomputing Center – BSC-CNS è riconosciuto a livello internazionale come Centro di Eccellenza nell'e-Science, svolgendo un ruolo chiave nello sviluppo di modelli di simulazione, analisi predittiva e supporto ai processi decisionali in contesti complessi, tra cui la pianificazione territoriale, urbana e la gestione dei rischi.

Il gruppo CASE e il Barcelona Digital Twin

All'interno del Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación – BSC-CNS, il dipartimento CASE – Computer Applications in Science & Engineering riveste un ruolo centrale nelle attività di ricerca e sviluppo. Il gruppo CASE si occupa della progettazione e implementazione di codici di calcolo ad alte prestazioni – High Performance Computing – HPC per applicazioni scientifiche e ingegneristiche, con ricadute sia in ambito accademico sia industriale, inclusi settori avanzati quali la fusione nucleare, la modellazione ambientale e la simulazione di sistemi complessi. La missione principale del gruppo CASE consiste nello sviluppo di strategie computazionali avanzate finalizzate alla simulazione di problemi complessi su supercomputer, integrando programmazione parallela, metodi numerici evoluti e competenze scientifiche multidisciplinari. Questo approccio consente di affrontare fenomeni caratterizzati da elevata complessità e forte interdipendenza tra variabili, rendendo il gruppo un punto di riferimento nel panorama europeo dell'e-Science (Barcelona Supercomputing Center – BSC-CNS, s.d.). In questo contesto si colloca il progetto del Digital Twin di Barcellona, sviluppato dal gruppo CASE con l'obiettivo di definire e applicare il concetto di Urban Digital Twin – UDT. Il progetto mira a esplorare le potenzialità dei gemelli digitali urbani come strumenti di supporto alla pianificazione urbana, alla gestione del traffico, alla valutazione delle politiche di sostenibilità e all'analisi degli scenari di rischio. Attraverso il Digital Twin, è possibile monitorare e simulare

l'impatto atteso delle trasformazioni urbane sulla città e sui cittadini, anticipando gli effetti delle decisioni progettuali e politiche (Dembski et al., 2020).

Data Analytics and Visualization Group e progetti applicativi

Le attività del gruppo CASE – Computer Applications in Science & Engineering sono affiancate e rafforzate dal Data Analytics and Visualization Group, anch'esso parte del Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación – BSC-CNS. Questo gruppo è specializzato nella produzione di visualizzazioni scientifiche avanzate e nello sviluppo di strumenti di analisi visiva dei dati, svolgendo un ruolo fondamentale nel rendere interpretabili grandi volumi di dati complessi. Attraverso la trasformazione dei dati in rappresentazioni grafiche, video e ambienti interattivi, il gruppo supporta attività di ricerca scientifica, applicazioni industriali e processi di pianificazione urbana, favorendo una comprensione più efficace dei fenomeni analizzati. Tra i progetti più rilevanti sviluppati in questo ambito si distingue vCity – Urban Digital Twin, una piattaforma digitale concepita per la simulazione e l'analisi di scenari urbani complessi. Un'applicazione particolarmente significativa di vCity riguarda lo studio dell'accessibilità ai rifugi climatici nella città di Barcellona durante le ondate di calore, finalizzato a supportare interventi di pianificazione urbana orientati all'inclusività sociale e alla resilienza climatica. In questo contesto, l'utilizzo di calcolo parallelo predittivo consente di confrontare scenari alternativi e di individuare le aree urbane maggiormente vulnerabili, offrendo un supporto concreto ai decisori pubblici (vCity Tech, s.d.).

vCity Big Data / Simulations

È all'interno di questo quadro di ricerca che si colloca vCity, una piattaforma di gemello digitale urbano progettata secondo un approccio people-centered, in cui la dimensione tecnologica è strettamente connessa alle esigenze dei cittadini e degli attori istituzionali. vCity permette ai decisori pubblici di testare e valutare le trasformazioni urbane prima della loro attuazione, mettendo a disposizione uno spazio di simulazione in cui osservare in anticipo gli effetti delle scelte politiche e progettuali. In questo senso, la piattaforma può essere interpretata come una vera e propria finestra sul futuro della città, attraverso la quale esplorare scenari alternativi e comprendere come le decisioni prese nel presente possano influenzare l'evoluzione del sistema urbano nel medio e lungo periodo. Uno degli obiettivi principali di vCity è la semplificazione dei concetti tecnici complessi legati ai digital twin urbani, rendendoli

comprensibili e accessibili anche a un pubblico non specialistico. Attraverso rappresentazioni coerenti, intuitive e visivamente efficaci, la piattaforma consente di rendere leggibili le relazioni spesso invisibili tra i diversi sistemi che compongono la città, favorendo una comprensione più integrata e sistemica dell'ambiente urbano (Batty, 2018). Un ulteriore elemento distintivo di vCity è rappresentato dal principio di co-creazione, inteso come collaborazione attiva tra amministrazioni pubbliche, operatori privati e cittadini. Questo approccio favorisce processi decisionali più inclusivi e trasparenti, permettendo di individuare criticità, conflitti e opportunità già nelle fasi iniziali della pianificazione. Infine, vCity è concepita come una piattaforma adattiva, capace di rispondere alle sfide urbane contemporanee più urgenti, mantenendo l'attenzione sull'equilibrio dinamico tra le molteplici reti che costituiscono la città e supportando decisioni informate in contesti complessi e in continua evoluzione, Figura 23..

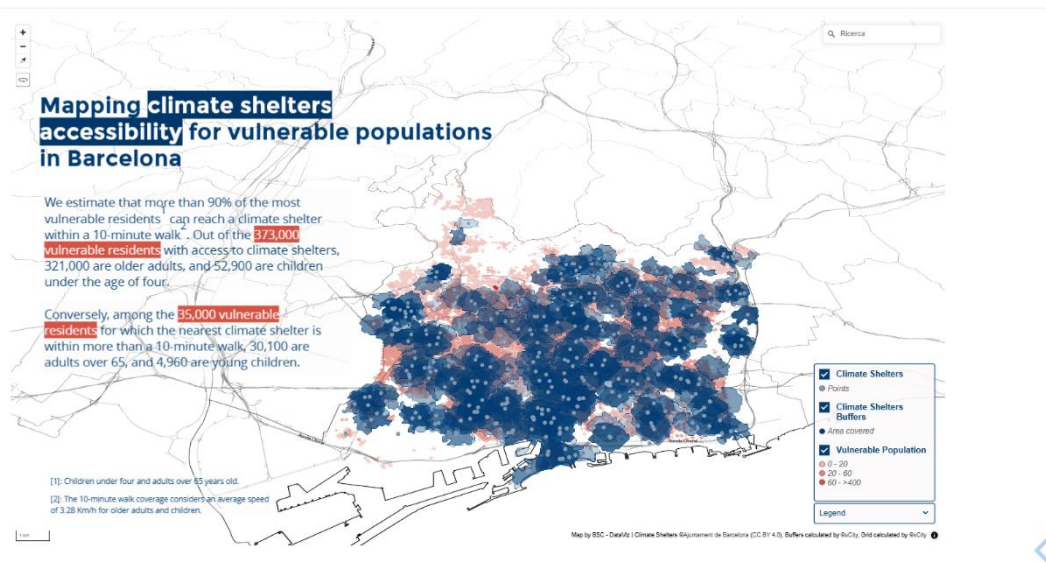


Figura 23: Dashboard vCity

Il gruppo NHaRA e gli scenari di rischio

Il gruppo Natural Hazards and Risk Analysis - NHaRA è un team interdisciplinare afferente al Dipartimento di Computer Applications in Science & Engineering – CASE del BSC. Il gruppo opera tra scienza dei dati, modellazione fisica e intelligenza artificiale, con l'obiettivo di ampliare le capacità di identificazione precoce, previsione e gestione dei rischi naturali, fortemente influenzati dai cambiamenti climatici (BSC-CNS, s.d.).

L'attività di ricerca del gruppo è orientata in particolare all'analisi e allo sviluppo di mappe di rischio. L'approccio adottato integra

modelli fisici, statistici e basati sull'intelligenza artificiale – IA, consentendo di affrontare la complessità dei fenomeni naturali e dei loro impatti a cascata su sistemi territoriali, infrastrutturali e socio-economici (Dembski et al., 2020).

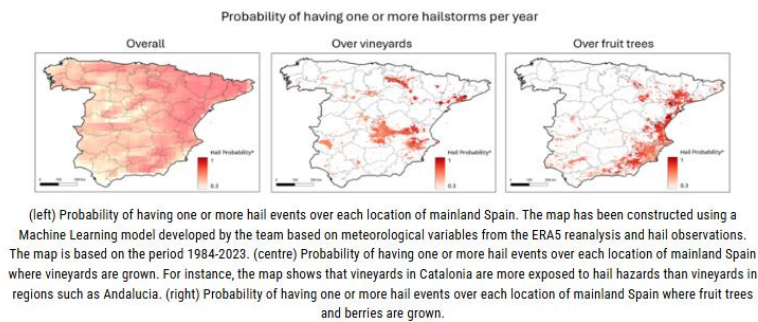
Tra gli obiettivi principali del gruppo rientra la progettazione di modelli predittivi avanzati in grado di stimare con elevata accuratezza l'evoluzione dei rischi naturali. Un ulteriore ambito di ricerca riguarda l'analisi e la visualizzazione di grandi set di dati, finalizzata all'individuazione di pattern, tendenze e correlazioni utili alla produzione di informazioni operative, come mappe di rischio e indicatori di supporto alla pianificazione e all'allocazione delle risorse.

Le principali linee di ricerca seguite dal gruppo includono la modellazione dei rischi singoli e composti in relazione agli scenari climatici attuali e futuri, analizzando l'evoluzione e l'interazione di fenomeni quali inondazioni, incendi boschivi, frane, grandinate e tempeste convettive intense. Ulteriori ambiti di ricerca riguardano la valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulla salute pubblica, sull'agricoltura, sui sistemi energetici e sugli ecosistemi, nonché la trasferibilità dei modelli di rischio basati su IA verso regioni caratterizzate da scarsità di dati, mediante tecniche di knowledge transfer e domain adaptation.

Questi approcci consentono di sviluppare strumenti rapidi e scalabili per l'analisi di grandi volumi di dati e la produzione di mappe di suscettibilità ad alta risoluzione, ad esempio su griglie spaziali di 500 × 500 m, particolarmente utili per la pianificazione territoriale e la gestione del rischio Figura 24.

Con il gruppo NHaRA , è stato sviluppato uno pseudocodice ad hoc, che sarà approfondito nel paragrafo 6.3.1., finalizzato alla strutturazione logica dei processi di analisi del rischio e alla loro integrazione all'interno dell'architettura del Regional Digital Twin – RDT, prendendo come struttura quella della ricerca in questione. Tale pseudocodice costituisce un elemento metodologico che traduce le logiche di modellazione del rischio, di integrazione dei dati e di valutazione degli scenari in una sequenza operativa replicabile e adattabile a diversi contesti territoriali. In questo modo, l'esperienza maturata con NHaRA contribuisce in parte alla definizione di un RDT regionale dinamico, flessibile e orientato al supporto alle decisioni.

High Performance Domain-Specific Architectures
High-Performance Algorithms and Hardware Accelerators for Bioinformatics (HPCBio)
Language Technologies Laboratory
Large-scale Computational Fluid Dynamics
Machine Learning for Biomedical Research
Materials Science
Microarchitecture Design and Implementation MAD
NLP for Biomedical Information Analysis
Natural Hazards and Risk Analysis (NHARA)
Performance Tools
Physical and Numerical Modelling
Predictable Parallel Computing
Programming Models
Propulsion Technologies



WILDFIRES

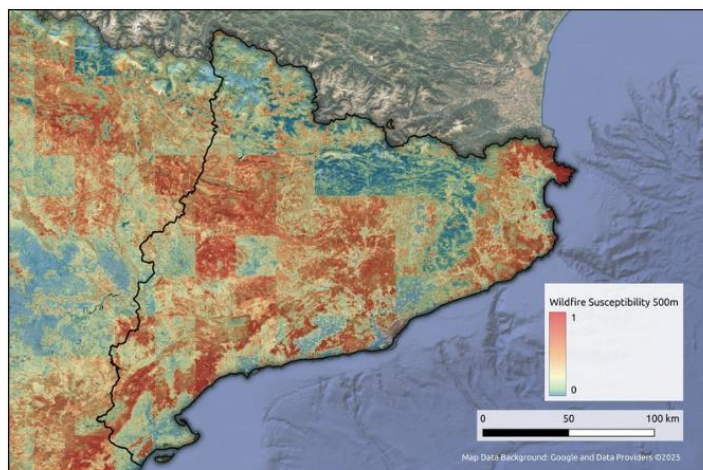


Figura 24: Cartografia del gruppo NHARA, su rischio grandine e impatto sull'agricoltura vinicola in Spagna (in alto). Rischio incendi in Catalogna (in basso)

5.3. CASO STUDIO SPERIMENTALE NAZIONALE:

Italia, Regione Abruzzo. La Protezione Civile e il Piano Regionale di Protezione Civile

Il lavoro svolto è il risultato di una collaborazione tra l'Università degli Studi dell'Aquila e l'Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo, come anticipato nel capitolo 5. L'indagine si propone un duplice obiettivo, da una parte analizzare in maniera sistemica le modalità di gestione del rischio in un territorio caratterizzato da una forte presenza di eventi calamitosi, dall'altra integrare metodi innovativi a supporto di una pianificazione territoriale più efficace. L'analisi si è concentrata sull'assetto del Sistema di Protezione Civile regionale, con particolare riferimento al Piano Regionale di Protezione Civile – PRPC, quale strumento cardine per la prevenzione, la preparazione e la gestione delle emergenze. In tale ambito, l'approfondimento ha riguardato in modo specifico lo studio degli scenari di rischio e del multirischio, con l'obiettivo di sviluppare un approccio metodologico alternativo rispetto ai modelli tradizionali. Tale approccio è stato orientato all'integrazione sistemica delle informazioni e alla lettura

delle interazioni tra fenomeni differenti, all'interno della struttura del Regional Digital Twin – RDT

Il contesto regionale

L'Abruzzo è una regione dell'Italia centro-meridionale che si estende su una superficie complessiva di circa 10.831 km². Confina a nord con le Marche, a sud con il Molise, a ovest con il Lazio e a est con il Mar Adriatico. Dal punto di vista amministrativo, il territorio regionale è articolato in quattro province – Chieti, Pescara, Teramo e L'Aquila, quest'ultima capoluogo di regione – e comprende complessivamente 305 comuni (ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica, 2023). Una parte significativa del territorio regionale è costituita da aree interne, individuate nell'ambito della Strategia Nazionale per le Aree Interne – SNAI, finalizzata a contrastare fenomeni di spopolamento, marginalizzazione territoriale e difficoltà di accesso ai servizi essenziali. Tra le principali aree SNAI presenti in Abruzzo si annoverano il Basso Sangro–Trigno, il Gran Sasso–Valle Subequana, la Valle del Giovenco–Valle Roveto, l'Alto Aterno–Gran Sasso Laga, la Valfino Vestina, la Valle del Sagittario, l'Alto Sangro e la Piana del Cavaliere–Alto Liri (Dipartimento per le Politiche di Coesione, 2022).

Accanto a queste, sono presenti numerose Unioni di Comuni, istituite per ottimizzare la gestione associata dei servizi pubblici locali. Tra esse figurano, tra le altre, Dei Miracoli, Del Sinello, Maiella–Alta Val di Foro, Comuni Montani Maiella Orientale Verde Aventino, Montana dei Comuni del Sangro, Vallata del Foro, Area Urbana Chieti–Pescara–Unica, Terre dei Peligni, Città–Territorio Val Vibrata, Colline del Medio Vomano, Terre del Sole e Montani della Laga. Complessivamente, tali forme associative coinvolgono 75 comuni e una popolazione di circa 317.545 abitanti.

La popolazione residente complessiva in Abruzzo è pari a 1.269.571 abitanti (dato censuario al 31 dicembre 2023), con una densità media di circa 117 ab/km². La distribuzione demografica risulta fortemente disomogenea: le aree costiere adriatiche presentano valori di densità più elevati, mentre le aree interne montane mostrano una marcata tendenza allo spopolamento, riconducibile sia a fattori socio-economici sia alle condizioni geomorfologiche e infrastrutturali.

Dal punto di vista orografico, l'Abruzzo è una regione prevalentemente montuosa, attraversata dal Sistema Appenninico Centrale, che si sviluppa in direzione nord–sud e comprende i Monti della Laga, il Massiccio del Gran Sasso d'Italia, il Massiccio della Maiella, il Monte Velino e i Monti della Meta. Tale conformazione determina la presenza di conche e altipiani e ospita un sistema articolato di aree protette di rilievo nazionale e regionale, tra cui il Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise, il Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga, il Parco Nazionale della Maiella e il Parco

Naturale Regionale Sirente–Velino, fino a degradare progressivamente verso la pianura costiera adriatica. Il clima regionale risente fortemente dell’orografia infatti la fascia collinare e costiera è caratterizzata da un clima più mite, con temperature medie annue comprese tra 12 °C e 16 °C, mentre le aree montane interne presentano temperature medie annue più basse, comprese tra 8 °C e 12 °C, con condizioni più rigide nel periodo invernale. Questa articolazione climatica, unita alla complessità morfologica del territorio, favorisce la compresenza di fenomeni naturali differenti che possono interagire tra loro, generando scenari di rischio complessi e contribuendo alla fragilità complessiva del sistema territoriale.

I rischi

Analogamente a gran parte del territorio nazionale, l’Abruzzo è esposto a un’elevata vulnerabilità rispetto a fenomeni di origine idrogeologica e idraulica, quali frane, smottamenti, colate detritiche e alluvioni, spesso aggravati da condizioni meteorologiche estreme e dal progressivo consumo di suolo (ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2021). La regione rientra inoltre nella cosiddetta “area del cratere 2016”, interessata dal ciclo sismico avviato nell’agosto dello stesso anno e storicamente colpita da eventi tellurici di elevata magnitudo, come il sisma dell’Aquila del 2009, che ha prodotto danni diffusi al patrimonio edilizio, alle infrastrutture e al tessuto socio-economico (Dipartimento della Protezione Civile – DPC, 2020). Ulteriori fattori di pericolosità sono rappresentati dalla frequente occorrenza di incendi boschivi, che alterano l’equilibrio ecosistemico e aumentano la suscettibilità dei versanti a processi erosivi e franosi; dagli eventi valanghivi, che interessano i comprensori montani appenninici, in particolare nelle aree ad alta quota del Gran Sasso e della Maiella; e dalla possibilità di maremoti lungo la fascia costiera adriatica, con potenziali impatti sulle aree portuali, sulle infrastrutture e sui centri urbani litoranei. A tali criticità di origine naturale si aggiunge la presenza di infrastrutture idrauliche strategiche, tra cui 14 dighe di competenza nazionale e 57 di competenza regionale. Queste opere svolgono un ruolo fondamentale per l’approvvigionamento idrico, la produzione energetica e la regolazione dei deflussi, ma risultano anche potenzialmente vulnerabili a sollecitazioni indotte da eventi estremi, quali sismi, frane o precipitazioni eccezionali. Il cedimento parziale o totale di tali strutture potrebbe generare scenari di rischio idraulico di vasta portata, come dimostrato dal disastro del Vajont (9 ottobre 1963), configurando situazioni di multirischio a catena con gravi conseguenze per le popolazioni e le infrastrutture a valle.

La compresenza e l'interazione di questi fattori rendono necessaria l'adozione di un approccio integrato alla pianificazione e alla gestione del rischio, in cui la Protezione Civile – PC svolge un ruolo strategico nelle fasi di prevenzione, preparazione, risposta e mitigazione. Attraverso la definizione di piani operativi, il coordinamento delle risorse e l'attivazione di sistemi di allerta tempestivi, la Protezione Civile costituisce il riferimento fondamentale per comprendere la struttura organizzativa e le funzioni operative del Sistema di Protezione Civile e del Piano Regionale di Protezione Civile – PRPC.

La gestione del rischio regionale e il contesto normativo

L'ordinamento italiano in materia di Protezione Civile ha conosciuto un'evoluzione progressiva, passando da un approccio prevalentemente emergenziale a un sistema integrato e multilivello, orientato alle fasi di previsione, prevenzione, gestione e superamento delle emergenze (Alexander, 2002).

La Legge 8 dicembre 1970, n. 996 ha rappresentato il primo quadro normativo organico, introducendo un modello fortemente reattivo, incentrato sul soccorso post-evento e sull'intervento straordinario dello Stato. Un cambiamento sostanziale è avvenuto con la Legge 24 febbraio 1992, n. 225, che ha istituito il Servizio Nazionale della Protezione Civile, introducendo la classificazione degli eventi (A, B, C), il concetto di protezione civile come funzione di sistema e il coordinamento tra i diversi livelli istituzionali.

Successivamente, il Decreto-Legge 7 settembre 2001, n. 343, convertito nella Legge 401/2001, ha rafforzato il ruolo del Dipartimento della Protezione Civile – DPC presso la Presidenza del Consiglio dei Ministri. La Legge 12 luglio 2012, n. 100, adottata anche alla luce delle criticità emerse nella gestione del sisma dell'Aquila del 2009, ha ulteriormente rafforzato la pianificazione di emergenza, introducendo l'obbligo per i Comuni di dotarsi del Piano Comunale di Protezione Civile – PCPC e riducendo il ricorso alle ordinanze in deroga. Il quadro normativo trova una sintesi organica nel Codice della Protezione Civile – Decreto Legislativo 2 gennaio 2018, n. 1, che ha riordinato e armonizzato la normativa esistente, consolidando un approccio multirischio e multifase. Il Codice definisce la protezione civile come l'insieme coordinato delle attività di previsione, prevenzione, gestione dell'emergenza e superamento dell'emergenza, rafforzando il principio di sussidiarietà, chiarendo ruoli e responsabilità e promuovendo strumenti di pianificazione integrata e cultura della protezione civile.

Le competenze di Protezione Civile

Come mostrato nella Figura 25, la Protezione Civile si avvale di una struttura gerarchica per operare a vari livelli, di seguito si espongono le competenze a livello Nazionale e regionale, utili ai fini della ricerca.

LIVELLO	STRUTTURA	COMPETENZE PRINCIPALI	TIPOLOGIE DI EVENTI GESTITE
NAZIONALE	Dipartimento della Protezione Civile (Presidenza del Consiglio dei Ministri)	<ul style="list-style-type: none"> - Definizione delle politiche e linee guida nazionali - Redazione del Piano Nazionale di Protezione Civile - Coordinamento e gestione diretta delle emergenze di tipo C (rilevanza nazionale) - Gestione del Sistema di Allerta Nazionale meteo-idro-sismico - Coordinamento delle strutture operative nazionali (Vigili del Fuoco, Forze Armate, Forze di Polizia, Corpo Forestale, ecc.) - Attivazione di mezzi e risorse straordinarie - Supporto alle Regioni in caso di eventi complessi 	Tipo C – Emergenze di rilievo nazionale che richiedono poteri straordinari
REGIONALE	Protezione Civile Regionale	<ul style="list-style-type: none"> - Redazione e aggiornamento del Piano Regionale di Protezione Civile - Gestione delle emergenze di tipo B (rilievo regionale) - Coordinamento del Centro Funzionale Regionale per previsione, monitoraggio e allertamento - Supporto tecnico e operativo a Province, Comuni e Unioni di Comuni - Coordinamento del volontariato regionale - Gestione risorse e mezzi regionali 	Tipo B – Eventi che superano la capacità di risposta comunale ma sono gestibili a livello regionale
PROVINCIALE	Centri di Coordinamento Provinciale (CCS)	<ul style="list-style-type: none"> - Coordinamento delle funzioni di protezione civile a livello provinciale - Supporto ai Comuni nelle attività di soccorso e assistenza - Gestione della viabilità principale, logistica e collegamenti tra aree colpite e non colpite - Coordinamento tra più Comuni coinvolti in un'emergenza 	Eventi sovracomunali che richiedono supporto e coordinamento territoriale intermedio regionale
COMUNALE	Sindaco e Centro Operativo Comunale (COC)	<ul style="list-style-type: none"> - Autorità comunale di protezione civile (il Sindaco) - Redazione e aggiornamento del Piano Comunale di Protezione Civile - Attivazione del COC con funzioni di supporto e coordinamento in emergenza - Informazione tempestiva alla popolazione - Gestione dei primi soccorsi, assistenza e ripristino dei servizi essenziali 	Tipo A – Eventi fronteggiabili con risorse comunali ordinarie e straordinarie locali

Figura 25: Schema gerarchico competenze e gestione della Protezione Civile

Livello Nazionale

Il Servizio Nazionale della Protezione Civile – SNPC è stato istituito con la finalità di tutelare l'integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, catastrofi e altri eventi calamitosi. Esso rappresenta il livello di coordinamento strategico dell'intero sistema di Protezione Civile italiano, operando secondo un modello multilivello e integrato (Repubblica Italiana, 2018). La responsabilità politica e istituzionale del SNPC è attribuita al Presidente del Consiglio dei Ministri – PCM, che può esercitarla direttamente o delegarla a un Ministro con portafoglio o al Sottosegretario di Stato alla Presidenza del Consiglio dei Ministri, Segretario del Consiglio. L'organo tecnico-operativo centrale è il Dipartimento della Protezione Civile – DPC, che, in collaborazione con le Regioni e le autonomie locali, indirizza, promuove e coordina le attività di protezione civile sull'intero territorio nazionale. Il DPC svolge un ruolo centrale nel coordinamento della risposta agli eventi di tipo C, ossia eventi che, per intensità ed estensione, devono essere fronteggiati con immediatezza d'intervento mediante mezzi e poteri straordinari, da impiegare per periodi limitati e predefiniti. In tali circostanze, il Dipartimento assicura la direzione unitaria delle operazioni di emergenza, garantendo il raccordo tra le diverse componenti e strutture operative del sistema (D.Lgs. 1/2018). Un organo collegiale fondamentale del DPC è il Comitato Operativo, presieduto dal Capo del Dipartimento e composto da rappresentanti delle principali strutture operative del Sistema Nazionale della Protezione Civile. Il Comitato assicura il coordinamento e l'integrazione delle attività durante le fasi emergenziali, contribuendo alla definizione delle strategie operative e all'allocazione delle risorse. L'azione del Dipartimento durante la gestione delle emergenze è disciplinata dal D.P.C.M. 3 dicembre 2008, n. 739, recante gli Indirizzi operativi per la gestione delle emergenze, che definisce le modalità di intervento e coordinamento nelle diverse fasi dell'evento. Successivamente, il Decreto-Legge 15 maggio 2012, n. 59, convertito nella Legge 12 luglio 2012, n. 100, ha riorganizzato e ridefinito le competenze del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, rafforzando la pianificazione, la prevenzione e la trasparenza nella gestione delle emergenze. A livello operativo, il DPC emana indirizzi rivolti a Regioni, Province e Comuni per la predisposizione e l'attuazione

dei programmi di previsione e prevenzione in relazione alle diverse tipologie di rischio; predisporre e attuare i piani di emergenza per gli eventi di tipo C, in raccordo con le Regioni e gli enti locali interessati; coordinare gli interventi di spegnimento degli incendi boschivi, in collaborazione con le strutture regionali competenti.

All'interno del Dipartimento opera il Centro Funzionale Centrale – CFC, nel quale confluiscono i dati provenienti dai Centri Funzionali Regionali – CFR e dai Centri di Competenza – CdC, a supporto delle attività di monitoraggio, previsione e valutazione dei fenomeni sul territorio nazionale. Un ulteriore organismo di rilievo è la Commissione Nazionale per la Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi, che svolge il ruolo di struttura di collegamento tra il Servizio Nazionale della Protezione Civile e la comunità scientifica. La Commissione fornisce pareri tecnico-scientifici su quesiti formulati dal Capo del Dipartimento e contribuisce a migliorare le capacità di valutazione, previsione e prevenzione dei diversi rischi naturali e antropici (Protezione Civile, 2022).

Livello regionale

Il livello regionale rappresenta il livello intermedio di governo e di coordinamento del sistema di protezione civile. La Regione esercita funzioni di programmazione, pianificazione, gestione e supporto nei confronti delle strutture locali, operando in coerenza con gli indirizzi nazionali e nel rispetto del principio di sussidiarietà (Repubblica Italiana, 2018). Le principali competenze regionali in materia di Protezione Civile includono:

- Pianificazione regionale: redazione, aggiornamento e attuazione del Piano Regionale di Protezione Civile – PRPC, in coerenza con il Piano Nazionale e con i Piani Provinciali e Comunali;
- Gestione delle emergenze di tipo B: coordinamento e intervento diretto in caso di eventi di rilievo regionale che superano la capacità di risposta del singolo Comune;
- Centri Funzionali Regionali: gestione delle attività di monitoraggio, previsione e allertamento, integrate nel Sistema di Allerta Nazionale – SAN;
- Supporto agli enti locali: assistenza tecnica, operativa e finanziaria ai Comuni per la predisposizione dei Piani Comunali di Protezione Civile – PCPC e per la gestione delle emergenze;

- Coordinamento delle risorse regionali: impiego del personale regionale, del volontariato organizzato, dei mezzi e dei materiali di proprietà regionale o convenzionati;
- Formazione e sensibilizzazione territoriale: organizzazione di corsi di formazione, esercitazioni e campagne informative rivolte a cittadini, amministratori e operatori locali.

Il ruolo della Regione risulta quindi strategico nel garantire la continuità operativa tra il livello nazionale e quello locale, assicurando un'azione coordinata e coerente nelle diverse fasi del ciclo di gestione del rischio: previsione, prevenzione, emergenza e superamento dell'emergenza. Il ruolo della Regione risulta quindi strategico nel garantire la continuità operativa tra il livello nazionale e quello locale, assicurando un'azione coordinata e coerente nelle diverse fasi del ciclo di gestione del rischio: previsione, prevenzione, emergenza e superamento dell'emergenza.

5.3.1. Il Piano Regionale Di Protezione Civile

A livello regionale, il sistema di Protezione Civile si avvale di specifici organi collegiali, con funzioni consultive, tecnico-scientifiche e operative, in coerenza con il quadro normativo definito dal Codice della Protezione Civile – Decreto Legislativo 2 gennaio 2018, n. 1 (Repubblica Italiana, 2018).

- il Comitato Regionale di Protezione Civile, con funzioni consultive, incaricato di verificare la coerenza, la compatibilità e il coordinamento delle iniziative regionali in materia di protezione civile;
-
- il Comitato Tecnico-Scientifico per la Protezione Civile, organo consultivo e propositivo che supporta la Regione nelle attività di analisi, valutazione e indirizzo tecnico-scientifico;
-
- il Comitato Operativo Regionale per le Emergenze, attivato durante le fasi emergenziali per assicurare il coordinamento operativo delle strutture coinvolte.
-
- Durante la fase emergenziale, rientrano tra le competenze dirette della Regione la gestione degli interventi di emergenza sanitaria, nonché l'invio di propri tecnici per le verifiche di agibilità degli edifici, il rilievo dei danni, la valutazione del rischio residuo e indotto, il controllo della potabilità delle acque e l'attuazione di eventuali

interventi di bonifica ambientale (Dipartimento della Protezione Civile – DPC, 2022).

- Il Presidente della Giunta Regionale, avvalendosi del Comitato Operativo Regionale, assicura la direzione unitaria e il coordinamento delle attività di protezione civile di competenza regionale, garantendo al contempo l'armonizzazione con le azioni delle amministrazioni statali, delle Province, dei Comuni e delle altre componenti del sistema operanti sul territorio, secondo il principio di leale collaborazione e sussidiarietà (Repubblica Italiana, 2018).

Inoltre presso la Direzione regionale di Protezione Civile è istituita la Sala Operativa Regionale, che garantisce il costante aggiornamento degli scenari di rischio, attraverso l'acquisizione delle informazioni provenienti dal territorio e dal Centro Funzionale. Sulla base delle valutazioni tecniche effettuate dai responsabili competenti, sentiti il dirigente del Servizio Emergenza e quello del Centro Funzionale, viene determinato l'eventuale passaggio tra i diversi stati operativi, S0 – Stato ordinario, S1 – Stato di vigilanza, S2 – Stato di presidio operativo, S3 – Unità di crisi regionale. Tale articolazione consente di modulare progressivamente il livello di risposta del sistema regionale di protezione civile in funzione dell'evoluzione degli scenari di rischio, garantendo tempestività ed efficacia nelle azioni di prevenzione e gestione dell'emergenza (Dipartimento della Protezione Civile – DPC, 2022).

La Protezione Civile è configurata dall'ordinamento italiano come materia a competenza mista, in quanto l'articolo 117 della Costituzione la ricomprende tra le materie di legislazione concorrente. In tale ambito, allo Stato spetta la definizione dei principi fondamentali, mentre alle Regioni è demandata la disciplina normativa di dettaglio e l'attuazione operativa delle attività di protezione civile. Le Regioni, attraverso le proprie strutture, partecipano all'organizzazione e all'attuazione delle attività di previsione e prevenzione dei rischi, nonché al soccorso alle popolazioni colpite da eventi calamitosi. In coerenza con gli indirizzi dei programmi nazionali, le Regioni elaborano i programmi regionali di previsione e prevenzione, svolgono analisi territoriali, organizzano e coordinano le risorse disponibili, definiscono le procedure di intervento e curano le attività di formazione, informazione ed esercitazione del personale e del volontariato di protezione civile. Il quadro normativo nazionale di riferimento è rappresentato dalla Legge 24 febbraio 1992, n. 225, istitutiva del Servizio Nazionale della Protezione Civile, e dal successivo Decreto Legislativo 31 marzo 1998, n. 112, che agli articoli 107 e 108 ha disciplinato le funzioni di protezione civile mantenute in capo allo Stato o trasferite alle Regioni. La Regione Abruzzo ha recepito i contenuti della L. 225/1992 attraverso la

Legge Regionale n. 72/1993, recante la Disciplina delle attività regionali di protezione civile, che costituisce ancora oggi il fondamento dell'attuale sistema regionale. È attualmente in corso un processo di revisione della normativa regionale, finalizzato ad adeguare l'impianto legislativo alle innovazioni introdotte dalla Legge n. 100/2012, di modifica e integrazione della L. 225/1992. In attesa del completamento di tale processo, il sistema regionale continua a fare riferimento ai principi della L.R. 72/1993, demandando ai successivi atti di pianificazione e programmazione il dettaglio delle competenze operative.

In questo quadro, si colloca il Piano Regionale di Protezione Civile che integra attività e programmi per l'organizzazione e l'attuazione delle attività di previsione e prevenzione dei rischi. Costituisce il principale strumento di programmazione delle azioni da attuare in caso di eventi calamitosi e viene redatto in conformità agli indirizzi normativi nazionali più recenti.

La regione Abruzzo ha eseguito l'indirizzo Nazionale sviluppando un Piano Regionale di Protezione Civile avvalendosi di mappe di rischio, scenari di evento e schemi operativi, risultando inoltre implementato all'interno di un WebGIS regionale dedicato, che consente la consultazione e l'aggiornamento dinamico delle informazioni territoriali e degli scenari di rischio.

I principali obiettivi del Piano possono essere sintetizzati come segue:

1. Identificazione degli ambiti territoriali ottimali per la definizione delle aree di intervento e coordinamento operativo Protezione Civile Regione Abruzzo.
2. Integrazione cartografica multirischio, attraverso strumenti geografici quali:
Carta dell'indice di rischio incendi boschivi (su base comunale)
Carta storica delle valanghe con mappatura dei 793 eventi censiti tra 1957 e 2024
3. Carta di Localizzazione dei Pericoli da Valanga (C.L.P.V.) in scala 1:25.000, aggiornata periodicamente per aree ad alta quota.

Gli strumenti operativi correlati qui elencati sono sintetizzati in Tabella 8:

- SISTEMA DI ALLERTAMENTO REGIONALE MULTIRISCHIO
aggiornato tramite delibera regionale (ad es. Decreto n. 8/APC del 26 novembre 2024), applicando linee guida del D.P.C.M. del 2004 per il rischio meteo-idro-geologico
- PIANI DI EMERGENZA DIGA - PED
per specifici invasi (es. Casoli, Bomba), necessari per la gestione delle criticità legate a infrastrutture idrauliche strategiche

- Aggiornamento della classificazione sismica regionale (es. Decreto n. 4/APC del 5 luglio 2024) ai sensi delle normative vigenti .
- **PIANI SETTORIALI INTEGRATI**
 Piano regionale antincendio boschivo (AIB) 2023–2025, che indica le linee guida operative per le attività di previsione e prevenzione degli incendi boschivi
- **SUPPORTO TECNICO, FORMATIVO E DIVULGATIVO**
 La gestione del rischio e la formazione sono rafforzate tramite campagne come “Io non rischio”, destinata alla sensibilizzazione della popolazione abruzzese.

Elemento	Descrizione
Quadro normativo di riferimento	D.Lgs. 1/2018 e Direttiva PCM 30 aprile 2021
Obiettivi strategici	Pianificazione, allertamento multirischio, gestione operativa
Cartografia e monitoraggio	Rischio incendi, valanghe, idrogeologico, sismico
Piani operativi	PED per dighe, AIB, aggiornamenti sismici
Formazione e divulgazione	Campagne “Io non rischio”, progetti PNRR, eventi formativi

Tabella 10: Piano Regionale di Protezione Civile, Abruzzo

Come evidenziato nell’analisi strutturale del Piano Regionale di Protezione Civile – PRPC (Figura 10), tra gli elementi del documento assumono un ruolo centrale la programmazione e la gestione delle attività di previsione e prevenzione dei rischi. Tali fasi rappresentano il presupposto conoscitivo e operativo indispensabile per le successive fasi di gestione dell’emergenza e di superamento dell’emergenza, che si sviluppano rispettivamente durante l’accadimento dell’evento e nel periodo post-evento. La presente ricerca si sottolinea come fasi di previsione e prevenzione, siano strategiche per una gestione efficace e del rischio, allineandosi con i concetti di DRA e DRMA.

La previsione è intesa come l’insieme delle attività di analisi, monitoraggio e valutazione dei rischi potenziali, realizzabile attraverso la costruzione di scenari di rischio differenziati in funzione delle pericolosità presenti sul territorio e delle condizioni di esposizione e vulnerabilità. Su questa base conoscitiva si innesta la fase di prevenzione, che comprende l’adozione di

misure strutturali e non strutturali finalizzate alla riduzione degli impatti attesi e alla mitigazione degli effetti derivanti dagli scenari individuati.

In questo quadro si colloca il Piano Regionale di Gestione del Rischio – PRGR, approfondito nel capitolo 4, e fulcro di questa ricerca, che non si configura come uno strumento alternativo al PRPC vigente, bensì come un livello di integrazione e potenziamento metodologico dello stesso. Il PRGR è concepito come uno strumento dinamico, soprattutto se integrato come struttura del Regional Digital Twin (tema affrontato nel paragrafo 4.2.), in grado di rafforzare non solo le fasi di previsione e prevenzione del Piano Regionale di Protezione Civile, ma anche di emergenza e post-emergenza, fornendo una lettura multirischio del territorio.

Il PRGR si pone quindi in continuità con gli obiettivi e la struttura del PRPC, contribuendo a:

- integrare in modo più efficace i dati territoriali, ambientali e socio-economici;
- migliorare la costruzione e l'aggiornamento degli scenari di rischio;
- supportare la valutazione delle interazioni di multirischio;
- fornire un supporto operativo dinamico alle decisioni in fase di pianificazione.

In tal senso, il PRGR rappresenta un'evoluzione concettuale e operativa del Piano Regionale di Protezione Civile, orientata a rafforzare la capacità preventiva del sistema regionale e a ridurre la dipendenza da interventi esclusivamente emergenziali, in coerenza con l'approccio multirischio e multifase promosso dalla normativa nazionale ed europea (UNDRR, 2015; United Nations, 2016).

5.3.2. Descrizione degli scenari di rischio nel Piano Regionale Di Protezione Civile

Nel caso specifico del Piano di Protezione Civile della regione Abruzzo le tipologie di rischio analizzate sono, tra quelle censibili in base alla normativa nazionale, le seguenti:

Rischio Sismico;

Rischio Idraulico;

Rischio Idrogeologico;

Rischio Valanghe;

Rischio Incendi Boschivi;

Rischio Dighe;

Rischio Maremoto.

Di questi vengono analizzati quindi non solo le pericolosità, bensì i fattori di vulnerabilità e di esposizione. La prevenzione, parte integrante del Disaster

Risk Management – DRM , traduce i risultati del DRA in misure strutturali (opere di protezione, consolidamenti, infrastrutture di mitigazione) e non strutturali (pianificazione territoriale, normative tecniche, formazione della popolazione) per ridurre la probabilità e l'impatto dei disastri. Gli scenari di rischio, e di multirischio, svolgono un ruolo centrale in questo ciclo integrato, supportando la definizione di soglie di allerta, protocolli operativi, esercitazioni e pianificazione di emergenza a tutti i livelli — nazionale, regionale, provinciale e comunale. Nel Piano Regionale di Protezione Civile dell'Abruzzo, essi sono organizzati per tipologia di pericolo e rappresentati tramite cartografia GIS integrata con banche dati geologiche, idrologiche e demografiche, permettendo di localizzare risorse, vie di fuga, aree di raccolta e priorità operative, in coerenza con il Codice della Protezione Civile (D.Lgs. 1/2018) e con gli obiettivi del Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030.

Rischio sismico da PNSRS - pericolosità sismica

Descrizione: Mappa di pericolosità sismica di cui all'OPCM 3519/2006.

La normativa fa riferimento ad accelerazioni di picco attese su suolo rigido con periodo di ritorno di 475 anni, che equivale ad una probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni.

SCENARIO: Nuova classificazione sismica D.G.R. n. 425 del 15.07.2024 O.P.C.M. 3519 del 28.04.2006 (Regione Abruzzo, 2024), (La pericolosità sismica della mappa MPS04 è espressa in termini di accelerazione orizzontale del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli rigidi), a questo si aggiunge la popolazione esposta.

Rischio idraulico- aree a pericolosità idraulica

Descrizione: Individuazione delle aree a pericolosità riportate nei Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) predisposti dalle Autorità di bacino distrettuali, e in particolare alle aree a più elevata pericolosità perimetrata per i tempi di ritorno più bassi (da 20 a 50 anni), che corrispondono al livello di criticità elevata previsto dal sistema di allertamento per il rischio idrogeologico ed idraulico. Gli elementi di questa classe vanno estrapolati dai DB Aree a pericolosità alluvioni PGR.

SCENARIO: sovrapposizione del PGRA E PAI , per ricavare le aree a pericolosità alluvionale con valori da P1-P4 (classificazioni basate su frequenza e intensità dell'allagamento), alle aree di pericolosità si uniscono dati sulla vulnerabilità ed esposizione (Uso del suolo, popolazione censita, infrastrutture), Figura 26.

STRUMENTO	AMBITO	OBIETTIVI PRINCIPALI	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	APPLICAZIONE IN ABRUZZO
Piano di Assetto Idrogeologico- PAI	Rischio idrogeologico complessivo (frane + alluvioni)	- Perimetrazione delle aree a rischio - Definizione delle classi di pericolosità e rischio - Prescrizioni vincolanti per uso del suolo	L. 183/1989, D.Lgs. 152/2006	Piano di base dell'Autorità di Bacino, recepito nel governo del territorio regionale
Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico-PSAI	Aggiornamenti tematici e settoriali sul dissesto idrogeologico	- Approfondire e aggiornare il PAI - Ridefinire aree di pericolosità e rischio - Integrare nuove conoscenze e dati post-evento	D.Lgs. 152/2006, normativa Autorità di Bacino	Utilizzato per aggiornare il quadro conoscitivo regionale e affinare le perimetrazioni di rischio
Piano Stralcio per la Difesa dalle Alluvioni - PSDA	Rischio idraulico (alluvioni)	- Attuare la Direttiva Alluvioni 2007/60/CE - Redigere mappe di pericolosità e rischio alluvioni - Definire misure di prevenzione, protezione e gestione del rischio alluvioni	Direttiva 2007/60/CE, D.Lgs. 49/2010	In Abruzzo integra il PAI concentrandosi sul rischio alluvionale, coerente con i Piani di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)

Figura 26:strumenti per la definizione del rischio idraulico e idrogeologico

Rischio idrogeologico- aree a pericolosità idrogeologica

Descrizione: Individuazione delle aree a pericolosità idrogeologica riportate nei Piani stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) o derivate dalle aree in frana riportate nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI), predisposti rispettivamente dalle Autorità di bacino distrettuali, dall'ISPRA, dalle Regioni e Province Autonome.

SCENARIO: PAI

Nell'ambito dei sopra elencati distretti i piani attualmente vigenti in materia di rischio idrogeologico e rischio idraulico, a supporto della pianificazione di protezione civile e della programmazione di interventi di mitigazione del dissesto idrogeologico un utile contributo viene dagli indicatori di rischio (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (I.S.P.R.A.) (2021). Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio (ISPRA, 2021) di seguito meglio specificati:

- Popolazione (rischio idrogeologico ed idraulico): popolazione residente nelle aree a pericolosità elevata e molto elevata;
- Famiglie (rischio idrogeologico ed idraulico): famiglie a rischio in aree a pericolosità elevata e molto elevata;
- Edifici (rischio idrogeologico ed idraulico): edificio a rischio in aree a pericolosità elevata e molto elevata;
- Industrie e servizi (rischio idrogeologico ed idraulico): industrie e servizi a rischio in aree a pericolosità elevata e molto elevata;
- Beni Culturali (rischio idrogeologico ed idraulico): beni culturali a rischio in aree a pericolosità elevata e molto elevata.

La corretta gestione del territorio attraverso la pianificazione territoriale e la programmazione degli interventi (strutturali e non strutturali), nel settore della difesa del suolo, deve innanzitutto mirare alla riduzione complessiva del livello di rischio, con particolare riguardo alla salvaguardia della vita umana e la tutela dei beni esposti. In riferimento agli interventi strutturali nel settore della difesa del suolo la Regione Abruzzo dispone nell'ambito della programmazione interna, ReNDiS (ISPRA, n.d.) di un quadro del dissesto idrogeologico, mentre, l'Agenzia regionale di Protezione Civile - A.P.C. della Regione Abruzzo dispone mediante Ordinanze di Protezione Civile Multirischio di Piani di Interventi Urgenti e Piani di Fabbisogni per la Riduzione del Rischio Residuo e la Messa in Sicurezza (Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2021) delle aree interessate da eventi calamitosi per i quali è stato riconosciuto lo stato di emergenza.

Rischio dighe - aree inondabili per collasso dighe e per scarico rapido

Descrizione e SCENARIO:

Individuazione delle aree potenzialmente interessate dall'onda di piena, originata sia dal collasso della diga che dalla manovra o malfunzionamento degli organi di scarico desunte dai piani di emergenza dighe PED, qualora disponibili Più sovrapposizione con elementi esposti come (Popolazione, infrastrutture, aree produttive, aree di raccolta)

Il Documento di Protezione Civile stabilisce per ciascuna diga le specifiche condizioni per l'attivazione del Sistema di Protezione Civile nel caso di eventi rilevanti per la sicurezza della diga (rischio diga) e nel caso di attivazione degli scarichi della stessa tali da comportare a valle dello sbarramento fenomeni di esondazione (rischio idraulico a valle).

I Documenti di Protezione Civile (D.P.C.) sono predisposti dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (D.L. n. 173 del 11.11.2022, G.U. n. 264 del 11.11.2022, (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – MIT, n.d.) per il tramite degli uffici tecnici dighe (U.T.D.) territorialmente competenti, con il concorso dell'Autorità Idraulica competente per l'alveo di valle, della

Protezione Civile Regionale, nonché del gestore e approvati dai prefetti competenti per territorio. Mentre, il Piano di Emergenza Diga (P.E.D.) stabilisce la procedura per il contrasto delle situazioni di pericolo connesse con la propagazione di un'onda di piena originata da manovre degli organi di scarico o dall'ipotetico collasso dello sbarramento e riporta:

- gli scenari riguardanti le aree potenzialmente interessate dall'onda di piena, originata sia da manovre degli organi di scarico sia dal collasso della diga;
- le strategie operative per fronteggiare una situazione di emergenza, mediante l'allertamento, l'allarme, le misure di salvaguardia anche preventive, l'assistenza ed il soccorso della popolazione;
- il modello d'intervento, che definisce il sistema di coordinamento con l'individuazione dei soggetti interessati per il raggiungimento di tale obiettivo e l'organizzazione dei centri operativi.

Rischio valanghe- aree a pericolo valanghe

Descrizione: Delimitazione delle aree, individuate dalle Regioni, che risultano interessate dalla pericolosità per eventi valanghivi. Laddove esistente, gli elementi di questa classe sono un'estrazione del livello regionale (Regione Abruzzo, n.d.).

SCENARIO: Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (CLPV) + esposti Innesco: pendenza (di solito >28° per neve asciutta, >25° per neve umida), esposizione, forma del versante

- Traiettoria: corridoio di scorrimento e possibili deviazioni dovute alla morfologia
- Zona di accumulo/arrivo: area in cui la massa nevosa rallenta e si deposita
- Velocità stimata e energia d'impatto
- Storico eventi documentati
- Copertura vegetale e ostacoli naturali/artificiali

Rischio incendi boschivi- aree pericolosità incendi boschivi

Descrizione: Aree a pericolosità incendi boschivi. Gli elementi di questa classe sono un'estrazione della corrispondente classe a livello regionale (Regione Abruzzo, n.d.).

SCENARIO:

- Cartografie ufficiali: pericolosità AIB regionale, catasto incendi, uso/copertura del suolo, curve di livello.
- Storico eventi: incendi passati (data, estensione, tipologia combustibile, meteo).

- Meteo e indici: dati FWI/EFFIS, statistiche di vento, temperature, umidità.
- Elementi esposti: case, infrastrutture, beni ambientali, zone turistiche, interfacce urbano-foresta
- Analisi della pericolosità (hazard)
- Individua i tipi di combustibile e la loro continuità (orizzontale e verticale).
- Valuta morfologia: pendenze, esposizione solare, corridoi di vento.
- Classifica il territorio in aree a pericolosità bassa, media, alta, molto alta secondo i criteri regionali.

Rischio maremoto- aree pericolosità maremoto indotto da sisma

Descrizione: Aree a pericolosità maremoto indotto da sisma individuate nelle “Indicazioni alle componenti ed alle strutture operative del Servizio nazionale di protezione civile per l’aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio maremoto”

SCENARIO:

- Modelli nazionali di pericolosità tsunami: mappe NEAMTHM18 e prodotti TSUMAPS-NEAM (run-up, probabilità, tempi di arrivo).
 - Eventi storici e cataloghi INGV: terremoti e tsunami documentati nell’Adriatico e nel Mediterraneo.
 - Simulazioni numeriche di propagazione e inondazione: calcolano l’altezza d’onda, il run-up e la penetrazione sulla costa.
 - Cartografia DEM e batimetria: per valutare l’effetto della morfologia costiera sulla propagazione.
2. Dati locali e territoriali
- Uso del suolo (CTR, catastali, ortofoto) per vedere dove ricadono gli allagamenti.
 - Anagrafe edilizia e demografica: popolazione residente e fluttuante (turisti, stabilimenti balneari).
 - Infrastrutture e vie di fuga: strade costiere, sottopassi, aree di attesa sopra quota di sicurezza.
 - Elementi vulnerabili: porti, campeggi, scuole, ospedali costieri.
3. Sistemi di monitoraggio e allerta
- INGV (CAT): rilevamento sismico in tempo reale e prima stima tsunami.
 - ISPRA (mareografi): conferma dell’onda con dati mareometrici.
 - SiAM: sistema nazionale che trasmette messaggi di allerta a Regione e Prefetture.
 - Piattaforma di comunicazione testata periodicamente in Abruzzo (es. esercitazioni 2024).

6. IL PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEL RISCHIO: METODOLOGIA, APPLICAZIONE E RISULTATI RELATIVI AL CASO STUDIO NAZIONALE DELLA REGIONE ABRUZZO

In seguito agli approfondimenti teorici relativi ai processi di Disaster Risk Assessment - DRA e Disaster Risk Management - DRM, nonché all'analisi del potenziale innovativo offerto dallo strumento Digital Twin - DT e della sua estensione territoriale attraverso il Regional Digital Twin - RDT, il presente capitolo, si concentra sulla definizione della metodologia operativa per il PRGR, sulla sua applicazione al caso studio nazionale della regione Abruzzo e sulla descrizione dei risultati di tale applicazione. L'obiettivo principale è quello di dimostrare come sia possibile strutturare una metodologia per la costruzione di un PRGR, e parallelamente predisporre uno strumento informatico di supporto in grado di analizzare gli scenari di rischio e di analizzarne le interferenze e integrazioni, strumento che può essere considerato elemento costitutivo di un teorico RDT, fornendo un quadro sistemico e replicabile utile alla pianificazione strategica e alla governance territoriale. In primo luogo, vengono esaminate le fasi di costruzione dell'RDT, articolate nella definizione di un quadro conoscitivo integrato, nella produzione di scenari simulati di multi-rischio naturali e nell'individuazione e analisi delle aree a maggiore esposizione e vulnerabilità, identificate come hotspot di rischio utili alla definizione di set di azioni di prevenzione e mitigazione. Tali procedure consentono di disporre di una base conoscitiva solida e georeferenziata, in grado di supportare decisioni orientate alla prevenzione e alla mitigazione degli impatti potenziali. Il sistema restituisce, come prodotto finale, mappe tematiche e indicatori sintetici, strumenti essenziali per orientare il processo decisionale e per incrementare l'efficacia delle strategie di adattamento e risposta ai disastri naturali. In conclusione, il capitolo propone una prospettiva metodologica e applicativa volta a dimostrare come la sinergia tra simulazioni di scenari, analisi multi-rischio, identificazione automatizzata degli hotspot e strumenti digitali innovativi possa costituire un significativo avanzamento nella capacità dei territori di accrescere la propria resilienza e di migliorare la mitigazione e la risposta agli eventi calamitosi, attraverso l'implementazione di strategie mirate ed azioni specifiche. L'individuazione e la quantificazione del rischio consentono di delineare e adottare approcci diversificati di riduzione, monitoraggio, mitigazione e prevenzione. A partire dal quadro conoscitivo costruito, è possibile sviluppare scenari di multi-rischio attraverso un'analisi qualitativa che attribuisce valori crescenti di intensità – da basso a medio fino ad alto rischio – in relazione ai livelli di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Questa fase consente di identificare con

maggior dettaglio gli hotspot, ossia quelle aree caratterizzate da una potenziale concentrazione di più rischi. Gli hotspot rappresentano ambiti territoriali a priorità elevata di intervento, per i quali risultano necessarie azioni specifiche di prevenzione, mitigazione e recupero territoriale. Le fasi metodologiche delineate si collocano pienamente all'interno del paradigma del Disaster Risk Assessment - DRA, in quanto consentono di costruire un quadro conoscitivo e operativo solido, indispensabile per una lettura sistemica del rischio. Tale impostazione non rappresenta un punto di arrivo, bensì la premessa necessaria al successivo passaggio verso il Disaster Risk Management - DRM, ovvero la traduzione delle analisi condotte in un set operativo di azioni. Queste ultime, in maniera coerente con i risultati del DRA, si configurano come strumenti concreti di pianificazione e gestione, orientati alla prevenzione, mitigazione e risposta, e rappresentano il nucleo applicativo della strategia complessiva di riduzione del rischio.

6.1. INTEGRAZIONE TRA PREVISIONE, PREVENZIONE, DISASTER RISK ASSESSMENT E DISASTER RISK MANAGEMENT NEL SISTEMA DI PROTEZIONE CIVILE

Nell'ambito della Protezione Civile italiana, le fasi di previsione e prevenzione sono necessari per ridurre gli impatti degli eventi calamitosi, in coerenza con il Codice della Protezione Civile (D.Lgs. 1/2018) e con il Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Queste attività si integrano strettamente con i processi di Disaster Risk Assessment (DRA) e Disaster Risk Management (DRM), che costituiscono un approccio sistemico e scientifico alla gestione del rischio.

1. Previsione e Prevenzione nella Protezione Civile

- **Previsione:** insieme delle attività tecnico-scientifiche volte a individuare le aree e i periodi di potenziale occorrenza di un evento dannoso, mediante analisi storiche, monitoraggio in tempo reale e modelli previsionali.
- **Prevenzione:** misure strutturali e non strutturali finalizzate a ridurre la probabilità che un evento si verifichi o, qualora ciò non sia possibile, a limitarne le conseguenze su persone, beni e ambiente.

2. Integrazione con il Disaster Risk Assessment (DRA)

Il DRA è il processo sistematico di:

1. **Identificazione dei pericoli:** ricognizione delle tipologie di eventi naturali o antropici potenzialmente dannosi (es. sismi, frane, incendi, alluvioni, maremoti).
2. **Analisi della vulnerabilità:** valutazione della suscettibilità di elementi esposti (popolazione, edifici, infrastrutture, ecosistemi).

3. Analisi dell'esposizione: localizzazione e quantificazione di ciò che può subire danni in caso di evento.

4. Stima del rischio: combinazione di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione per ottenere mappe e indicatori quantitativi di rischio.

Le attività di previsione della Protezione Civile forniscono input fondamentali al DRA, in quanto permettono di:

- Aggiornare costantemente le banche dati di pericolosità.
- Integrare modelli previsionali con osservazioni in tempo reale.
- Creare scenari di rischio coerenti con la realtà territoriale.

3. Integrazione con il Disaster Risk Management (DRM)

Il DRM rappresenta il processo decisionale e operativo che, basandosi sul DRA, pianifica e implementa misure per la riduzione e gestione del rischio. Comprende:

- **Prevenzione e Mitigazione:** interventi strutturali (es. opere idrauliche, consolidamenti, barriere) e non strutturali (pianificazione territoriale, normative edilizie, educazione civica).
- **Preparazione:** predisposizione di piani di emergenza, sistemi di allerta e procedure di evacuazione.
- **Risposta:** gestione delle operazioni in emergenza per salvaguardare vite e beni.
- **Recupero:** ripristino delle condizioni di sicurezza e resilienza post-evento.

La fase di prevenzione della Protezione Civile è parte integrante del DRM, in quanto traduce i risultati del DRA in azioni concrete di riduzione del rischio, definisce le priorità di intervento in base alla gravità e probabilità degli scenari, coordina le competenze di più livelli istituzionali.

4. Approccio integrato

Il ciclo completo può essere rappresentato così:

1. DRA, conoscenza del rischio (dati e modelli)
2. Previsione, monitoraggio e scenari previsionali
3. DRM- Prevenzione (DRM), azioni per ridurre impatti
4. Preparazione e risposta, attuazione dei piani di protezione civile

Questo approccio consente una pianificazione basata su scenari previsionali, utili a strategie multi-rischio, che possono rafforzare la resilienza comunitaria, in linea con le politiche europee e ONU.

Il ruolo degli scenari di rischio nella previsione, prevenzione e gestione

All'interno del processo di protezione civile, gli scenari di rischio costituiscono rappresentazioni descrittive e quantitative delle possibili conseguenze derivanti dal manifestarsi di uno specifico evento calamitoso in un determinato contesto territoriale. Essi derivano, come già affrontato

nel capitolo 2, dai fattori di Pericolosità, Vulnerabilità, Esposizione, ed hanno un ruolo primario per definire tutti i processi successivi di previsione e prevenzione. Nel DRA, lo scenario di rischio è il prodotto finale della valutazione, traduce i dati tecnico-scientifici in un quadro operativo comprensibile per decisori e operatori, fornisce mappe tematiche, e indicatori numerici che permettono di stabilire priorità e strategie. In fase di previsione quindi la Protezione Civile utilizza lo scenario per:

- Identificare aree da monitorare con maggiore intensità.
- Definire soglie di allerta e protocolli di attivazione.
- Simulare le possibili evoluzioni dell'evento (es. propagazione di un incendio, onde di maremoto, colate detritiche post-pioggia intensa).

Inoltre gli scenari di rischio costituiscono la base operativa del DRM, poiché:

- Orientano le misure strutturali
- Guidano la pianificazione di emergenza a tutti i livelli
- Supportano le esercitazioni di protezione civile e la formazione della popolazione.

Infine nel Piano Regionale di Protezione Civile dell'Abruzzo, gli scenari di rischio sono:

- Strutturati per tipologia di pericolo (sismico, idrogeologico, incendi boschivi, maremoto, ecc.).
- Rappresentati mediante cartografia GIS integrata con banche dati geologiche, idrologiche e demografiche.
- Utilizzati per individuare le risorse necessarie, le vie di fuga, i centri di raccolta e le priorità di intervento.

In sintesi nel Piano di Gestione del Rischio, le fasi di previsione e prevenzione rappresentano una base importante su cui sviluppare la gestione e il superamento dell'emergenza, costituendo un approccio proattivo che si attiva prima dell'evento e ne condiziona l'efficacia delle risposte successive. La previsione comprende le attività tecnico-scientifiche di analisi storica, monitoraggio e modellazione delle pericolosità presenti, finalizzate alla definizione di scenari di rischio coerenti con il contesto territoriale. Tali scenari, ottenuti attraverso il processo di Disaster Risk Assessment (DRA) consentono di individuare aree a maggiore criticità e definire potenziali evoluzioni dell'evento.

6.2. ARTICOLAZIONE METODOLOGICA

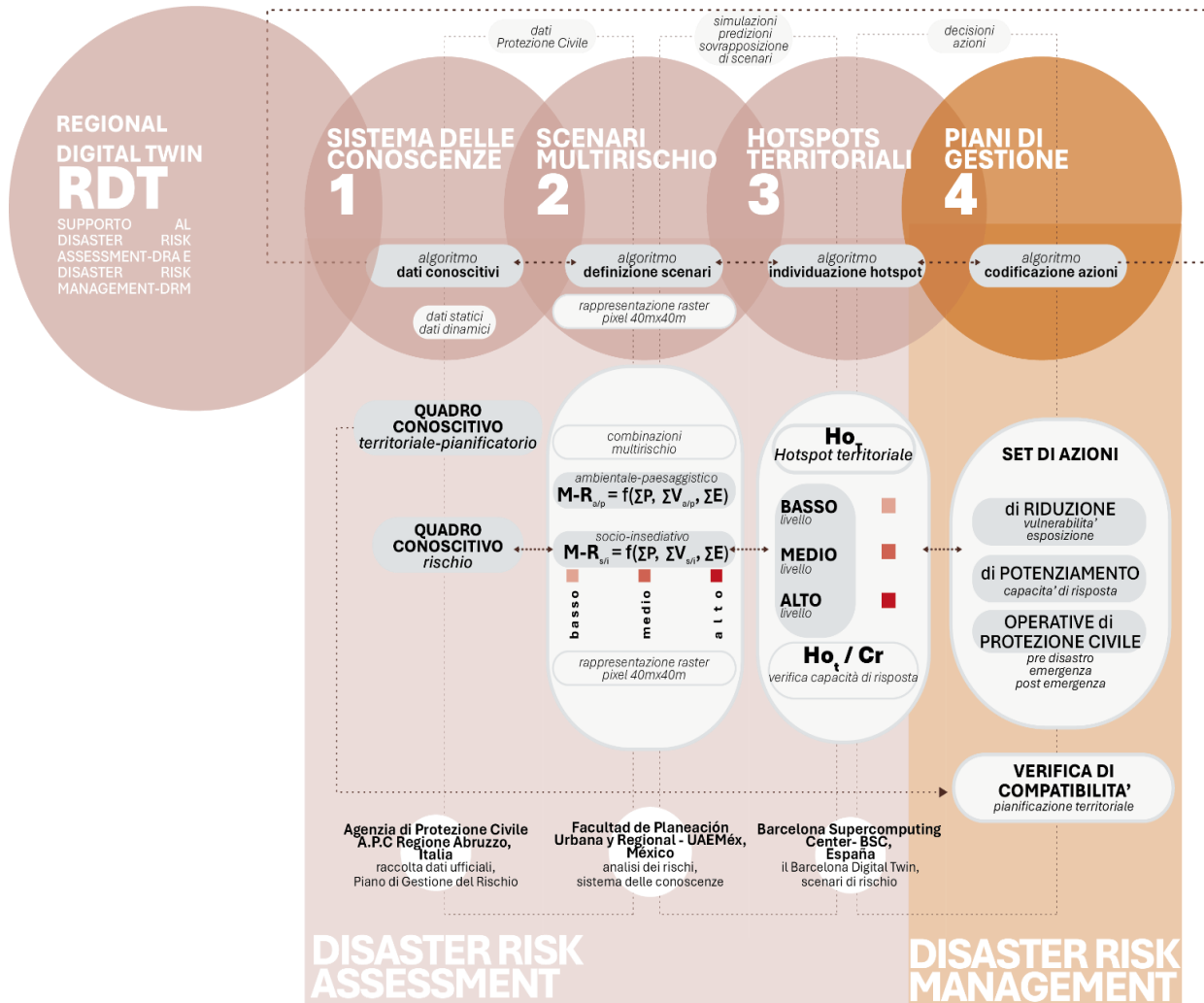


Figura 27: Schema metodologico per la struttura del RDT sul modello di PRGR

Come illustrato nello schema metodologico di Figura 27, la costruzione del Regional Digital Twin – RDT si fonda su un impianto concettuale derivato dal modello del Piano Regionale di Gestione del Rischio - PRGR ed è strutturata secondo i principi del Disaster Risk Assessment - DRA e del Disaster Risk Management - DRM. Il modello si articola in quattro fasi principali — sistema delle conoscenze, simulazione degli scenari di multi-rischio, individuazione degli hotspot territoriali e definizione di set di azioni operative — organizzate in un flusso ciclico che accompagna il passaggio dalla valutazione del rischio alla traduzione operativa delle analisi, in linea con i più recenti orientamenti della letteratura sul Disaster Risk

Management a scala territoriale (Di Ludovico et al., 2020; Poljanšek et al., 2017).

Un elemento metodologico trasversale all'intero framework metodologico è l'adozione sistematica del formato raster come struttura dati di riferimento per tutte le analisi spaziali. Tutti i dati utilizzati e prodotti nelle diverse fasi del RDT sono organizzati in griglie regolari a risoluzione omogenea, consentendo una rappresentazione continua del territorio. Tale scelta risulta particolarmente appropriata per le analisi di multi-rischio territoriale, poiché il raster permette di modellare fenomeni spazialmente diffusi — come pericolosità naturali, vulnerabilità ambientali e socio-insediative ed esposizione — come superfici continue, superando i limiti di discontinuità tipici della rappresentazione vettoriale (Di Ludovico et al., 2020). Inoltre, il formato raster facilita le operazioni di overlay, normalizzazione e combinazione matematica degli indicatori, risultando particolarmente efficace per la costruzione di scenari e per la comparabilità spaziale dei risultati a scala regionale.

In conclusione, è opportuno precisare che, nella configurazione metodologica proposta, il RDT si basa prevalentemente su un insieme di conoscenze statiche, ovvero informazioni che descrivono condizioni territoriali, strutturali e di rischio relativamente stabili nel tempo. Rientrano in questa categoria, ad esempio, i quadri conoscitivi di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, le caratteristiche morfologiche e insediative del territorio, nonché le dotazioni infrastrutturali e le configurazioni dei sistemi di Protezione Civile. Tali conoscenze costituiscono il livello fondamentale e strutturante del RDT, indispensabile per l'elaborazione degli scenari di rischio, l'individuazione degli hotspot e la definizione delle azioni di prevenzione e mitigazione. All'interno di una logica avanzata di un Regional Digital Twin, orientata alla gestione del rischio in tempo reale, a queste conoscenze statiche potranno progressivamente affiancarsi dati dinamici, generati attraverso sistemi di Internet of Things - IoT e reti di sensori distribuiti sul territorio. Tra queste rientrano, a titolo esemplificativo, i dati provenienti da sensori sismici, idrometrici e pluviometrici, sistemi di monitoraggio dei movimenti franosi, sensori strutturali applicati agli edifici e alle infrastrutture strategiche, flussi informativi sulla mobilità e sulla presenza temporanea della popolazione, nonché dati ambientali e meteorologici acquisiti in tempo quasi reale. L'integrazione di tali informazioni dinamiche consentirebbe di aggiornare continuamente gli scenari di rischio, migliorare la capacità di previsione e supportare in modo più efficace le decisioni operative nelle fasi di pre-disastro, emergenza e post-emergenza.

In questa prospettiva, il RDT si configura, quindi, come un'infrastruttura digitale aperta e incrementale, capace di evolvere nel tempo integrando

dati statici e dinamici e rafforzando progressivamente il supporto alla governance del rischio a scala regionale.

1. COSTRUZIONE DEL SISTEMA DELLE CONOSCENZE

La prima fase è finalizzata alla costruzione di un Quadro Conoscitivo composto dal *Quadro Conoscitivo territoriale-pianificatorio* e dal *Quadro Conoscitivo di rischio* mediante l'integrazione di dati statici e dinamici provenienti da fonti eterogenee. I dati utilizzati sono infatti di natura spazialmente e tematicamente eterogenea e sono riferiti in modo specifico al caso studio della Regione Abruzzo, scelto come ambito di sperimentazione della metodologia. Tale eterogeneità riguarda sia la scala spaziale dei dati, sia la varietà delle informazioni trattate, che includono componenti ambientali, territoriali, socio-demografiche, infrastrutturali e di pericolosità. Le principali fonti informative derivano dall'Agenzia di Protezione Civile della regione Abruzzo, in particolare dai sistemi informativi e dai database ufficiali utilizzati per il monitoraggio e la gestione dei rischi naturali. A queste si affiancano dati provenienti da enti nazionali, quali l'ISTAT, utilizzati in particolare per la caratterizzazione della componente demografica e insediativa dell'esposizione. L'utilizzo di fonti istituzionali garantisce la coerenza dei dati con la normativa vigente e con i sistemi ufficiali di monitoraggio del rischio, rafforzando l'affidabilità e la trasferibilità del modello proposto. La raccolta e l'accesso a tali dati sono stati possibili grazie alla collaborazione istituzionale con l'Agenzia di Protezione Civile della Regione Abruzzo, attivata nell'ambito della borsa di studio di dottorato finanziata con fondi PNRR per le Pubbliche Amministrazioni. Questo contesto ha consentito un'interazione diretta con l'ente responsabile della gestione del rischio a scala regionale, favorendo l'accesso a dati aggiornati e validati e permettendo un allineamento costante tra il modello di Regional Digital Twin e le esigenze operative della pianificazione e della Protezione Civile. I dati raccolti sono stati rielaborati attraverso e convertiti in formato raster, producendo superfici informative omogenee che descrivono le componenti di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Il sistema delle conoscenze così strutturato costituisce la base comune per tutte le fasi successive del modello e consente una lettura spaziale, integrata e sistemica del rischio, coerente con l'approccio H-V-E ampiamente consolidato nella letteratura scientifica (UNDRO, 1979; Cardona et al., 2012; Di Ludovico et al., 2020).

2. COSTRUZIONE DEGLI SCENARI MULTI-RISCHIO

La seconda fase si basa su un approccio semi-quantitativo fondato sugli indicatori. In questo approccio, gli indicatori di pericolosità, vulnerabilità ed

esposizione vengono classificati in classi ordinali (basso, medio, alto), alle quali sono associati valori numerici discreti (1 – 2 - 3). Tale metodologia consente di superare i limiti di una valutazione esclusivamente qualitativa, senza richiedere l'elevata quantità e precisione di dati necessarie agli approcci pienamente quantitativi. L'approccio semi-quantitativo risulta particolarmente adatto ai contesti regionali, caratterizzati da eterogeneità delle fonti informative e da differenti livelli di affidabilità dei dati (Di Ludovico et al.,2020). Gli scenari di multi-rischio sono stati costruiti attraverso operazioni di overlay e combinazione di indicatori in formato raster, adottando una griglia regolare con celle di dimensione pari a 40 m × 40 m, adeguata a garantire un equilibrio tra dettaglio spaziale, estensione territoriale e sostenibilità computazionale delle analisi. Tale risoluzione consente una rappresentazione sufficientemente fine delle dinamiche di rischio a scala regionale, mantenendo al contempo la comparabilità e l'integrazione dei diversi strati informativi. È importante evidenziare che il framework metodologico adottato non è finalizzato esclusivamente all'analisi del multi-rischio, ma applica lo stesso approccio integrato anche ai suoi elementi costitutivi. In particolare, la metodologia consente di costruire e analizzare in modo coerente multi-pericolosità - M-H, multi-vulnerabilità - M-V e multi-esposizione - M-E, ciascuna derivante dalla combinazione di più indicatori omogenei rappresentati in formato raster. In linea con l'approccio semi-quantitativo basato su indicatori, il rischio viene interpretato come il risultato della combinazione additiva delle sue componenti fondamentali, secondo la funzione del tipo:

$$\mathbf{M-R=f(M-H, M-V, M-E)}$$

particolarmente adatta a contesti regionali in cui l'obiettivo principale è l'individuazione e la comparazione spaziale delle aree critiche piuttosto che la stima puntuale dei danni. In coerenza con tale impostazione, la definizione degli scenari di multi-rischio è stata ulteriormente approfondita distinguendo due principali dimensioni interpretative: quella ambientale-paesaggistica e quella socio-insediativa. In questo senso, la componente di vulnerabilità è stata articolata in vulnerabilità ambientale-paesaggistica - MV_{ap} e vulnerabilità socio-insediativa - MV_{si} , ciascuna costruita attraverso insiemi dedicati di indicatori. Questa distinzione consente di formulare scenari di rischio differenziati secondo le seguenti espressioni:

$$\mathbf{M-R_{ap} = \sum H + \sum V_{ap} + \sum E;}$$

$$\mathbf{M-R_{si} = \sum H + \sum V_{si} + \sum E;}$$

dove $M-R_{ap}$ e $M-R_{si}$ rappresentano rispettivamente gli indicatori di rischio riferiti alla dimensione ambientale-paesaggistica e a quella socio-insediativa per ciascun tipo di pericolosità H (Di Ludovico et al., 2020). Tale articolazione, consente di cogliere le diverse modalità attraverso cui il rischio si manifesta sul territorio, mettendo in evidenza sia la fragilità dei sistemi naturali e paesaggistici, sia la vulnerabilità dei sistemi insediativi, infrastrutturali e sociali. L'adozione di questa doppia chiave di lettura rafforza la capacità interpretativa degli scenari di multi-rischio e costituisce un passaggio fondamentale per il successivo processo di individuazione degli hotspot territoriali e per la definizione di azioni mirate di prevenzione, mitigazione e recupero, in coerenza con un approccio integrato alla pianificazione e alla gestione del rischio a scala regionale.

Inoltre, questa fase metodologica ha coinciso con il primo periodo di ricerca all'estero, svolto presso la Facultad de Planeación Urbana y Regional della Universidad Autónoma del Estado de México - UAEMex, a Toluca de Lerdo, Messico. L'esperienza è stata finalizzata al rafforzamento delle competenze relative all'analisi del contesto legislativo di pianificazione (Martínez & al. 2017), e dei rischi in contesti territoriali differenti da quello italiano, caratterizzati da un'elevata esposizione a fenomeni naturali estremi quali attività vulcanica, sismicità, frane, uragani, tsunami complessi (Escamilla et al., 2017). In particolare, il periodo di studio ha consentito un approfondimento sulle tipologie di fonti e dati del rischio e dei sistemi di Protezione Civile, favorendo un confronto critico tra approcci istituzionali e di pianificazione territoriale. In questo contesto, è stato possibile analizzare il funzionamento del Sistema Nacional de Protección Civil - SINAPROC e del Centro Nacional de Prevención de Desastres - CENAPRED, che rappresentano i principali riferimenti istituzionali per la prevenzione, il monitoraggio e la gestione dei rischi naturali a scala nazionale in Messico (CENAPRED, 2020; Secretaría de Gobernación, 2014). Tale confronto ha contribuito ad arricchire il quadro concettuale della ricerca, ampliando la comprensione delle dinamiche di rischio in contesti socio-territoriali differenti.

3. IDENTIFICAZIONE DEGLI HOTSPOT TERRITORIALI

La terza fase, dedicata all'individuazione degli Hotspot Territoriali, utilizza gli output raster degli scenari di multi-rischio per identificare le aree con una concentrazione significativa di criticità. Gli hotspot vengono individuati attraverso l'aggregazione spaziale delle celle raster associate ai livelli più elevati di rischio e classificati in base ai gradi crescenti di criticità

territoriale. In coerenza con gli obiettivi della ricerca e con le finalità operative della Protezione Civile, l'approfondimento analitico si concentra in modo specifico sulla dimensione socio-insediativa del rischio, ritenuta prioritaria ai fini della tutela dei sistemi antropizzati e della riduzione dell'esposizione della popolazione, degli insediamenti e delle infrastrutture strategiche. In questo contesto, il rischio sismico è assunto come rischio di base, in ragione della sua diffusione e del suo ruolo strutturante nei quadri di vulnerabilità insediativa, e viene combinato con gli altri rischi naturali per la definizione degli scenari multi-rischio e degli hotspot finali. Tale scelta metodologica risulta coerente con la letteratura che riconosce nel rischio sismico un elemento cardine per la lettura dei sistemi insediativi nei contesti mediterranei. Gli hotspot così individuati sono messi in relazione con la capacità di risposta del sistema territoriale e istituzionale per verificarne la potenzialità di mitigazione del rischio e in caso contrario implementarla nella fase 4 con azioni non strutturali. Questa fase rappresenta il punto di transizione tra la valutazione del rischio, Disaster Risk Assessment – DRA, e la sua gestione operativa, Disaster Risk Management – DRM, costituendo il passaggio chiave verso la definizione di strategie e azioni mirate.

La definizione metodologica degli hotspot è stata ulteriormente consolidata durante il secondo periodo di ricerca all'estero, svolto presso il Barcelona Supercomputing Center - BSC. In questo contesto, oltre ad approfondire le analisi sugli scenari di rischio, è stato sviluppato uno pseudocodice finalizzato all'automatizzazione del processo di individuazione degli hotspot finali. Lo pseudocodice è strutturato in modo coerente con le Fasi 1, 2 e 3 della metodologia proposta — sistema delle conoscenze, costruzione degli scenari di multi-rischio e identificazione degli hotspot — e rappresenta un primo passo verso l'implementazione computazionale del modello di Regional Digital Twin, rafforzandone il carattere replicabile, scalabile e orientato al supporto decisionale.

4. DEFINIZIONE DELLE AZIONI DI RIDUZIONE DEL RISCHIO

La Fase 4 rappresenta la traduzione operativa degli esiti analitici delle fasi precedenti e si colloca pienamente nell'ambito del Disaster Risk Management. Essa è finalizzata all'individuazione di azioni strategiche di riduzione del rischio e di recupero pre-disastro nelle aree Hotspot, ovvero in quei contesti territoriali caratterizzati dalla presenza di multi-rischio con livelli di criticità molto elevati. In coerenza con gli approcci più recenti al pre-disaster recovery planning, la fase non si limita alla definizione di interventi emergenziali, ma mira a orientare in modo anticipato le trasformazioni territoriali e organizzative necessarie a ridurre gli impatti

potenziali degli eventi calamitosi e a migliorare la resilienza dei sistemi antropizzati (FEMA, 2017; Di Ludovico et al., 2019; Di Ludovico et al., 2020). Accanto all'individuazione delle azioni di prevenzione e mitigazione, la Fase 4 prevede anche la valutazione della Capacità Di Risposta - C delle comunità e istituzioni interessati in caso di evento, con riferimento alle stesse aree Hotspot. In questo senso, la C viene interpretata come componente del rischio strettamente connessa alla vulnerabilità e all'esposizione, e comprende l'insieme delle risorse, delle infrastrutture, delle competenze e delle procedure operative disponibili nelle fasi di pre-disastro, emergenza e post-emergenza (UNDRR, 2015; Protezione Civile, 2023). Nel quadro del DRM, le azioni operative di riduzione del rischio individuate nella Fase 4 si articolano tradizionalmente in misure strutturali e misure non strutturali, entrambe considerate essenziali per affrontare in modo integrato la complessità dei rischi naturali.

Le azioni strutturali comprendono interventi fisici e infrastrutturali finalizzati alla riduzione diretta della vulnerabilità e dell'esposizione, quali, a titolo esemplificativo, le opere di difesa idraulica, il consolidamento dei versanti, i sistemi di contenimento delle frane, l'adeguamento e il miglioramento sismico degli edifici, nonché la realizzazione di infrastrutture resilienti. Tali misure agiscono prevalentemente sulla componente fisica del rischio e, pur richiedendo investimenti significativi e tempi di attuazione medio-lunghi, risultano fondamentali per ridurre in modo duraturo l'esposizione di persone, beni e funzioni strategiche (UNDRR, 2015; ISPRA, 2021).

Le azioni non strutturali rivestono un ruolo altrettanto strategico e comprendono l'insieme delle politiche, degli strumenti normativi e delle pratiche operative orientate alla riduzione del rischio senza il ricorso a opere fisiche. Rientrano in questa categoria, tra le altre, la pianificazione territoriale e urbanistica orientata alla prevenzione, i sistemi di allertamento precoce, i piani di Protezione Civile, le attività di informazione e formazione della popolazione, le esercitazioni, nonché le azioni di monitoraggio e controllo continuo del territorio. Queste misure incidono in modo significativo sulla vulnerabilità e, soprattutto, sul rafforzamento della capacità di risposta, contribuendo a incrementare la resilienza dei sistemi territoriali e sociali (UNDRR, 2015; Protezione Civile, 2023; Di Ludovico et al., 2020).

Nel contesto specifico della ricerca, la Fase 4 è stata applicata in modo sperimentale a uno degli Hotspot individuati nella Fase 3, selezionato come caso esemplificativo per la valutazione delle possibili azioni di intervento preventivo in relazione al multi-rischio presente. In questa prospettiva, il Regional Digital Twin, se opportunamente automatizzato, è concepito

come uno strumento in grado di supportare l'individuazione delle azioni più adeguate in funzione degli scenari di rischio e delle caratteristiche specifiche degli Hotspot analizzati. Inoltre, le procedure relative al set di azioni del PRGR possono essere codificate attraverso un toolkit operativo, strutturato sulla base dell'architettura del RDT. Tale toolkit consente di associare in modo sistematico scenari di rischio, tipologie di Hotspot e categorie di intervento, facilitando l'utilizzo dei risultati da parte delle amministrazioni competenti e degli stakeholder locali. Un elemento centrale di questa fase è rappresentato dalla verifica di compatibilità delle azioni proposte con gli strumenti di pianificazione territoriale e settoriale, in particolare con la pianificazione urbanistica, paesaggistica e di Protezione Civile, rafforzando il carattere integrato e multilivello del modello (Di Ludovico et al., 2020).

Nel suo complesso, la Fase 4 configura il passaggio dalla conoscenza alla decisione e all'azione, completando il percorso metodologico del RDT e del PRGR e contribuendo a rendere il modello uno strumento operativo avanzato per la prevenzione, la mitigazione e la gestione del rischio a scala regionale.

6.3. DRA – fase 1 fase 2 fase 3

6.3.1. FASE 1: LA COSTRUZIONE DEL SISTEMA DELLE CONOSCENZE

La raccolta dati e la categorizzazione in livelli basso – medio - alto

Come anticipato nella metodologia, il primo passo del PRGR, per popolare le informazioni del RDT e quindi ottenere gli Scenari di Rischio è stato generare una raccolta di dati utile a individuare le conoscenze relative al contesto della regione Abruzzo relative al rischio – R, attraverso le conoscenze dei suoi elementi di pericolosità – H, vulnerabilità - V ed esposizione - E, i parametri della funzione:

$$\mathbf{R=f(H,V,E)}$$

Ciascuna delle tre componenti – H, V, E – viene classificata attraverso una scala ordinale di livelli da 1 a 3 al fine di ottenere una rappresentazione sintetica e normalizzata dei dati originari, traducibile in una scala di pericolosità: 1 - basso, 2 - medio, 3 - alto. Tale procedura di normalizzazione consente di unificare il linguaggio tecnico e di rendere confrontabili informazioni provenienti da fonti eterogenee e caratterizzate da formati o risoluzioni differenti, così da poter ottenere delle rappresentazioni cartografiche georeferenziate attraverso il software Q-gis.

Questo approccio metodologico consente oltre a confrontare fenomeni eterogenei su base comune, di costituire il prerequisito per la successiva definizione degli scenari multi-rischio e l'individuazione delle aree prioritarie per la mitigazione.

- **ANALISI DELLA MULTI – PERICOLOSITÀ**

La componente H si fonda su un'analisi che considera sette principali tipologie di pericolo, ritenute rilevanti per la pianificazione del rischio: eventi sismici, fenomeni di natura idrogeologica, rischi idraulici, fenomeni valanghivi, tsunami, incendi boschivi, pericoli connessi ad impianti di ritenuta (dighe), nonostante quest'ultimo non sia prettamente un rischio naturale risulta essere di rilevante importanza nel Piano Regionale Di Protezione Civile, come anticipato nel paragrafo 5.3.1 .

L'analisi della componente H si articola attraverso lo studio delle sette tipologie di pericolosità, sopraccitate e selezionate in collaborazione con l'Agenzia regionale di Protezione Civile- A.P.C. della regione Abruzzo, ai fini del Piano Regionale, e sono di seguito approfondite. Dalla raccolta dati per tematica di pericolosità, si è categorizzata ognuna di queste in livello 1-2-3, ognuna con un sistema e criterio ad hoc per ottenere un unico linguaggio. Dopo aver riclassificato le 7 pericolosità , attraverso il software QGIS si è passati ad una rappresentazione geometrica per poter gestire meglio la quantità di informazioni. Sono stati quindi riproiettati i layer (che erano in coordinate geografiche latitudine-longitudine) in coordinate geometriche (metri). Questo processo è stato necessario per poter costruire una griglia di 40mx40m, che ricopre tutto il territorio della regione Abruzzo, e ottenere i quadranti utili per la costruzione in pixel (contenenti valori discretizzati) delle mappe raster.

1. PERICOLOSITA' SISMICA

Sono stati utilizzati i dati presenti nel Piano Nazionale di Soccorso per il Rischio Sismico – PNSRS, redatto dall'A.P.C., in riferimento all'aggiornamento della classificazione sismica dei comuni abruzzesi In vigore dal 1 agosto 2024 (BURAT Ord. N. 30 del 31.07.2024) che sostituisce di fatto la classificazione per “zone sismiche” (Protezione Civile Regione Abruzzo, 2024). La nuova classificazione si basa sui criteri della O.P.C.M. n. 3519 del 28.04.2006 utilizzando i valori di accelerazione massima al suolo (ag max), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a sottosuoli molto rigidi ($V_s > 800$ m/s, Cat. A), calcolati su un numero di punti della griglia a 0,05 gradi, con incertezza al 50° percentile (valore standard). I territori che fanno parte dei singoli comuni sono relativi alla zona con

massima soglia ag,475 (peak ground acceleration), rilevata sul territorio comunale secondo gli intervalli definiti da I.N.G.V. nel modello di pericolosità sismica MPS04 e disponibili sul sito (INGV, s.d.) Nonostante molti comuni siano aumentati di una zona , altri sarebbero dovuti essere declassati seppure storicamente riconosciuti ad alta sismicità, per cui la scelta presa è di mantenere in questi casi la zona sismica più alta assegnata dalla D.G.R. n. 438 del 29.03.2005., creando condizioni di omogeneità e in via cautelativa. Nella Tabella 11 sono elencati i livelli di classificazione originali e la loro normalizzazione necessaria alla metodologia, rappresentata nella Figura 28.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
ZONA 1 <i>alta pericolosità, presenta un'elevata probabilità di forti terremoti</i>	H3
ZONA 2 <i>media probabilità del verificarsi terremoti di una certa intensità</i>	H2
ZONA 3 <i>bassa pericolosità, i comuni possono essere interessati da eventi sismici modesti.</i>	H1

Tabella 11: Livelli di classificazione della pericolosità sismica

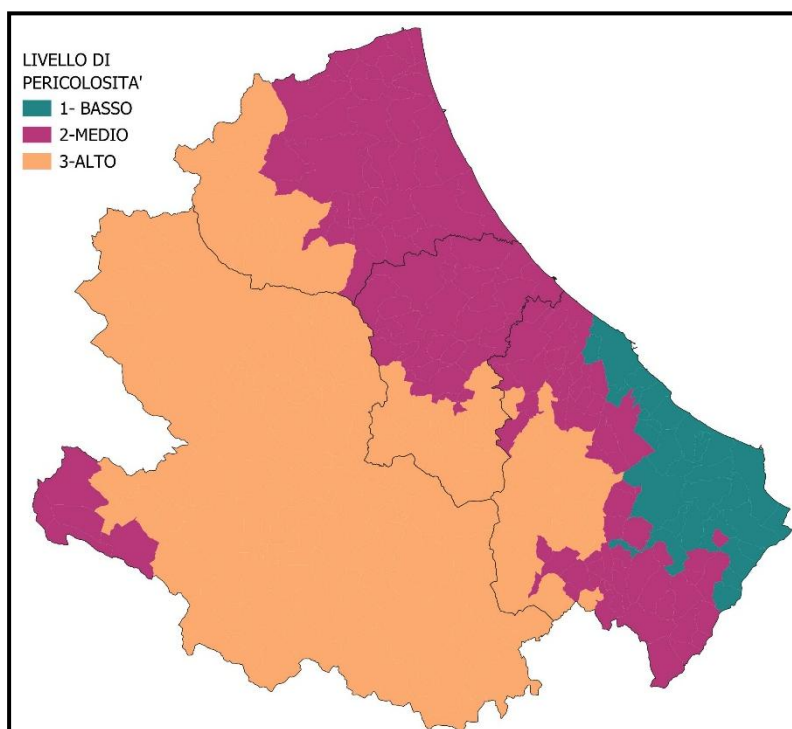


Figura 28: Mappa classificazione sismica

2. PERICOLOSITA' IDROGEOLOGICA E

3. PERICOLOSITA' IDRAULICA

I dati raccolti per le pericolosità idrogeologica e idraulica si riferiscono al Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale e al Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale, di cui fa parte il territorio abruzzese, le cui autorità competenti sono :

- Ex Autorità di Bacino Idrografico di Rilievo Regionale della Regione Abruzzo e del Bacino Interregionale del Fiume Sangro;
- Ex Autorità di Bacino Idrografico del Tevere;
- Ex Autorità di Bacino Idrografico del Tronto;
- Ex Autorità di Bacino del Liri – Garigliano – Volturno. Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico;
- Ex Autorità di Bacino del Biferno e minori, Fortore, Saccione e Trigno.

Nel quadro della pianificazione e gestione del rischio idrogeologico e idraulico, i principali strumenti utilizzabili e a cui si è fatto riferimento sono il Piano di Assetto Idrogeologico - PAI e il Piano Stralcio per la Difesa dalle Alluvioni – PSDA, (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale, 2016; ISPRA, 2018).

- Il PAI fornisce una visione complessiva del rischio idrogeologico, includendo frane e dissesti geomorfologici oltre al rischio idraulico, rappresenta lo strumento di riferimento generale predisposto dalle EX Autorità di Bacino, finalizzato alla ricognizione, classificazione e regolamentazione delle aree a rischio di dissesto idrogeologico. Esso comprende sia i fenomeni di natura geomorfologica (frane, smottamenti, instabilità dei versanti), sia quelli di natura idraulica (esondazioni e alluvioni), definendo mappe di pericolosità e di rischio e attribuendo a ciascun ambito classi di rischio da R1 a R4.

- Il PSDA costituisce un approfondimento tematico sul solo rischio da alluvione, con un livello di dettaglio maggiore, funzionale alla pianificazione di Protezione Civile e alla definizione delle misure di prevenzione e mitigazione degli impatti alluvionali. Può essere considerato un piano settoriale e di maggiore dettaglio, adottato come stralcio funzionale del PAI, con l'obiettivo specifico di disciplinare il rischio idraulico legato alle alluvioni. Esso recepisce e integra i contenuti della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE e della normativa nazionale di recepimento, concentrandosi sulla delimitazione delle aree allagabili, sulla modellazione degli scenari di piena con diversi tempi di ritorno (TR 30, TR 100, TR 300 anni) e sulla definizione di mappe di rischio per la popolazione, le attività economiche,

le infrastrutture e i beni ambientali e culturali. Nella Tabella 12 sono elencati i livelli di classificazione originali e la loro normalizzazione necessaria alla metodologia, rappresentata nelle Figure 29,30.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
P1 <i>più probabilità di accadimento, impatto meno dannoso</i>	H1
P2 <i>moderata probabilità di accadimento potenziale di danno</i>	H2
P3 <i>meno probabilità di accadimento danno maggiore</i>	H3

Tabella 22: Livelli di classificazione pericolosità idraulica e idrogeologica

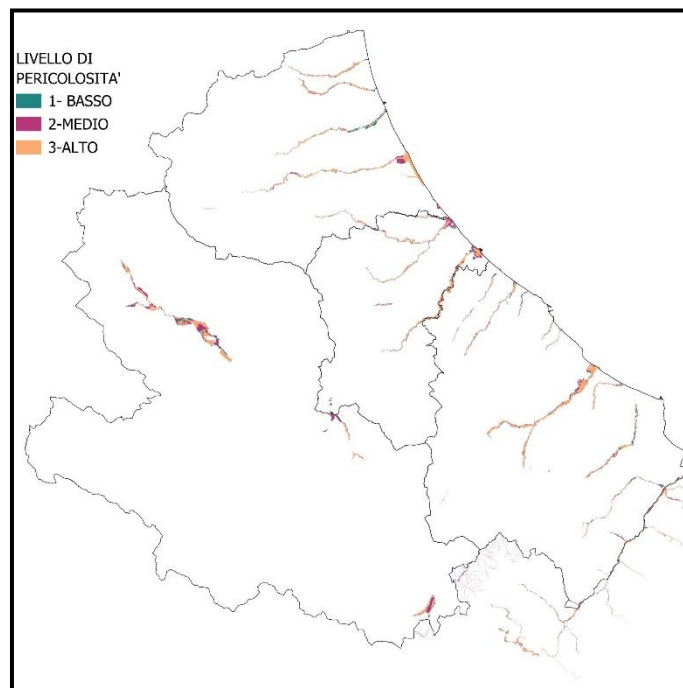


Figura 29: Mappa classificazione idraulica

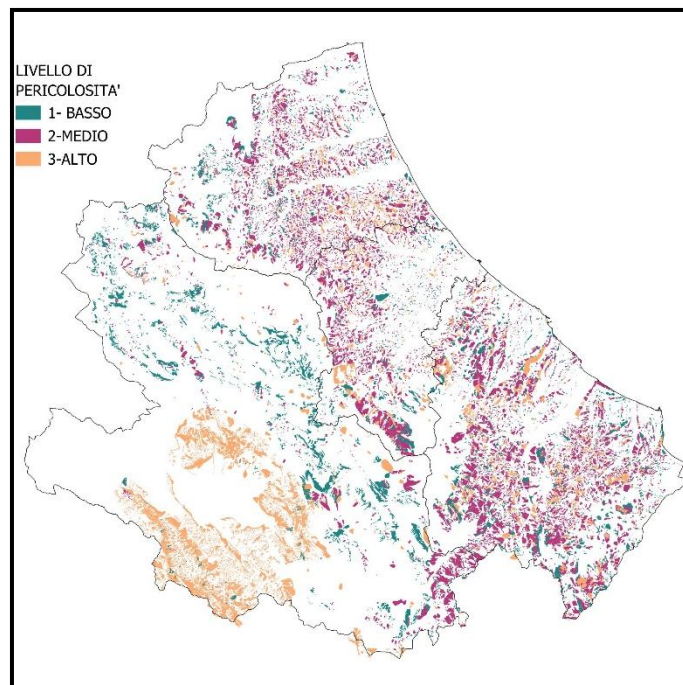


Figura 30:Cartografia classificazione idrogeologica

4. VALANGHE

I dati si rifanno alla delibera della Giunta Regionale n. 559 del 13.09.2021 avente ad oggetto "L.R. n.47/92 art. 2. Approvazione della Carta di Localizzazione dei Pericoli da Valanga (C.L.P.V.), contenente la localizzazione delle aree che presentano pericoli potenziali di caduta valanghe". La CLPV (Carta di Localizzazione dei Pericoli da Valanga) è uno strumento conoscitivo che rappresenta, su base cartografica, le aree potenzialmente interessate da fenomeni valanghivi (Regione Abruzzo, 2021). Non ha valore vincolante, ma costituisce un supporto tecnico-operativo per la prevenzione, la pianificazione territoriale e la gestione del rischio valanghe. La CLPV oltre a registrare le valanghe avvenute, individua anche le aree potenzialmente soggette a valanga, distinguendo zone di:

- Distacco: pendii acclivi oltre 25–30°;
- Scorrimento: canali, impluvi naturali;
- Accumulo: fondovalle, aree antropizzate esposte.

I dati di cui si compone sono la Carta storica catastale, Siti valanghivi da rilevamento VA, Siti valanghivi da fotointerpretazione VF, Classificazione di zone da 1a a 5 delle aree interessate. Nella Tabella 13 sono elencati i livelli di classificazione normalizzati e rappresentati nella Figura 31.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Possibili continuazioni e collegamenti	H1
Zone presunte pericolose	
Zone pericolose	H2
Valanghe	H3

Tabella 33: Livelli di classificazione pericolosità valanghiva

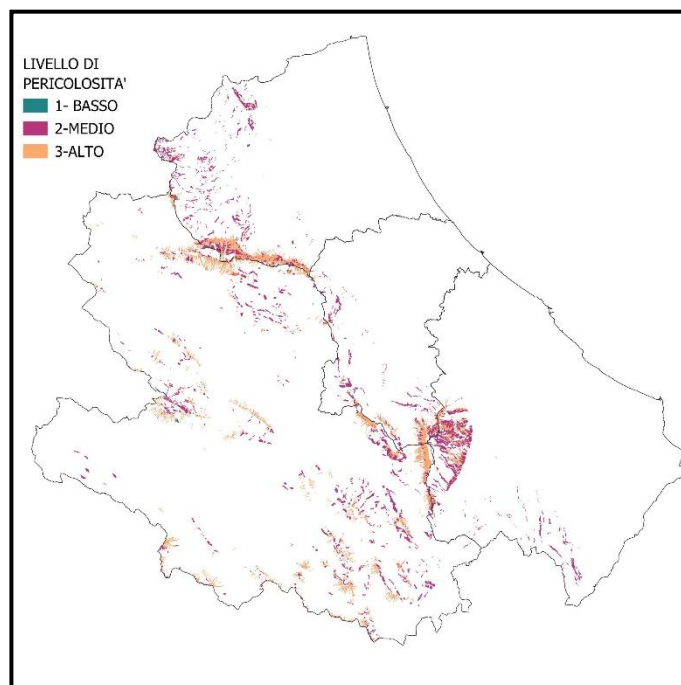


Figura 31: Cartografia pericolosità valanghiva

5. DIGHE (PAI-PSDA-PED)

Secondo la normativa vigente ed in base alle relative caratteristiche dimensionali, in Abruzzo sono ubicate e censite per competenza:

- **14 DIGHE NAZIONALI**, che superano 15 metri di altezza o che determinano un volume di invaso superiore a 1.000.000 di m³;
- **57 DIGHE REGIONALI**, con altezza inferiore ai 15 metri di altezza e che determinano un invaso non superiore a 1.000.000 di m³.
- Nello specifico, ai fini della Protezione Civile, sono stati considerati sia gli invasi localizzati all'interno del territorio regionale sia gli invasi che seppur non localizzati all'interno del territorio regionale nella valutazione del rischio a valle dello sbarramento interessano porzioni del territorio abruzzese. Tali dighe sono assoggettate alla D.P.C.M. del 08.07.2014 (Direttiva PCM, 2014) per cui sono in corso di redazione i relativi Documenti di Protezione Civile (D.P.C.) e la relativa pianificazione e gestione dell'emergenza.

Le analisi effettuate in questo contesto fanno riferimento alle uniche dighe di cui oggi sono stati approvati i Piani di Emergenza Diga (P.E.D.), disponibili sul sito regionale (Regione Abruzzo, s.d.) e sono le dighe di: Piaganini, Poggio Cancelli, Provvidenza, Rio Fucino, Sella Pedicate, Casoli, Bomba.

L'analisi della pericolosità di dighe è stata condotta integrando i classici dati relativi allo scarico, cioè il rilascio controllato di acqua dalla diga, al rischio di collasso delle dighe, e un'ulteriore analisi relativa all'integrazione del PSDA con le aree di collasso, per identificare le zone non previste.

- Scarico:

probabilità alta, tempi di ritorno brevi, gestione ordinaria del bacino, evento legato a manovre durante piogge intense.

- Dambreak o collasso della diga:

probabilità bassa, tempi di ritorno maggiori, potenzialmente catastrofico, involontario (collasso della diga).

- Integrazione dei dati PSDA e dambreak:

una proposta sviluppata durante il periodo di collaborazione con la Protezione Civile per ipotizzare uno scenario possibilmente più dannoso, e riferito ad un'analisi incrociata tra il PSDA con tempo di ritorno di 200 anni (TR200) e le aree a rischio di collasso delle dighe, secondo quanto previsto dal PAI - Piano di Assetto Idrogeologico, (che include il PSDA). Sovrapponendo la carta PSDA Tr 200 anni con la cartografia di aree interessate a collasso:

Le aree localizzate dal PSDA Tr 200 anni che risultano circoscritte all'interno delle aree di dambreak sono state classificate come H2 (probabilità media);

Le aree localizzate dal PSDA Tr 200 anni che risultano esterne alle aree potenzialmente soggette a dambreak sono classificate come H3 (probabilità più bassa, ma impatto più elevato in caso di collasso). Nella Tabella 14 sono elencati i livelli di classificazione normalizzati e rappresentati nella Figura 32.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Scarico <i>maggior probabilità, e tempi di ritorno minori</i>	H1
Collasso/ Dambreak <i>minore probabilità, tempi di ritorno maggiori</i>	H2
Collasso + PSDA <i>Aree PSDA non circoscritte nelle aree di influenza a collasso</i>	H3

Tabella 4: Livelli di classificazione pericolosità da dighe

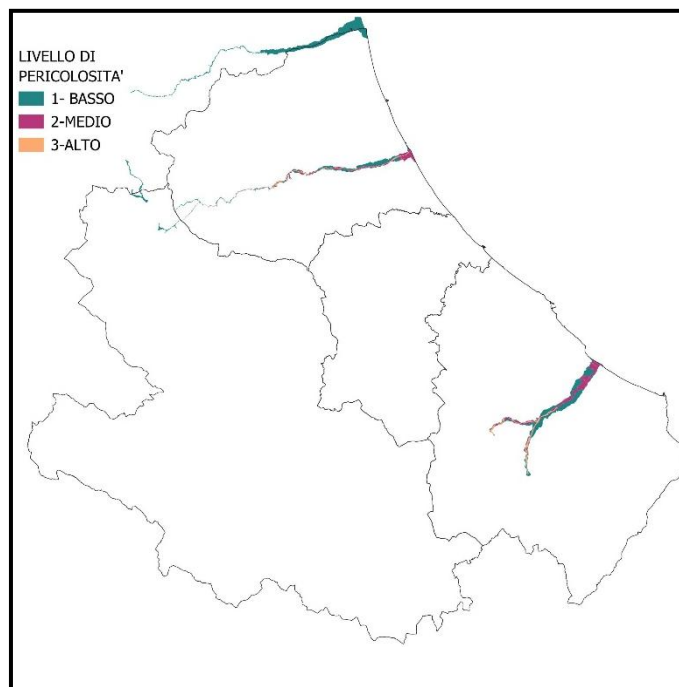


Figura 32: Cartografia pericolosità da dighe

6. MAREMOTO

Il fenomeno è classificato secondo due livelli di allerta che dipendono dal suo impatto stimato sulle coste, nonché dal tempo di arrivo teorico della prima onda, con la stima dei *forecast point* che corrispondono a specifiche coordinate geografiche (Protezione Civile, s.d.):

Zona 1:

indica che le coste potrebbero essere colpite da un'onda di maremoto con un'altezza inferiore a 0,5 metri e/o con un run up , cioè la massima quota topografica raggiunta dall'onda di maremoto durante la sua ingressione (inondazione) rispetto al livello medio del mare inferiore ad 1 metro

Zona 2:

indica che le coste potrebbero essere colpite da un'onda di maremoto con un'altezza superiore a 0,5 metri e/o con un run up superiore a 1 metro.

Nella Tabella 15 sono elencati i livelli di classificazione normalizzati e rappresentati nella Figura 33.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Zona 2	H2
Zona 1	H3

Tabella 55: Livelli di classificazione pericolosità da maremoto

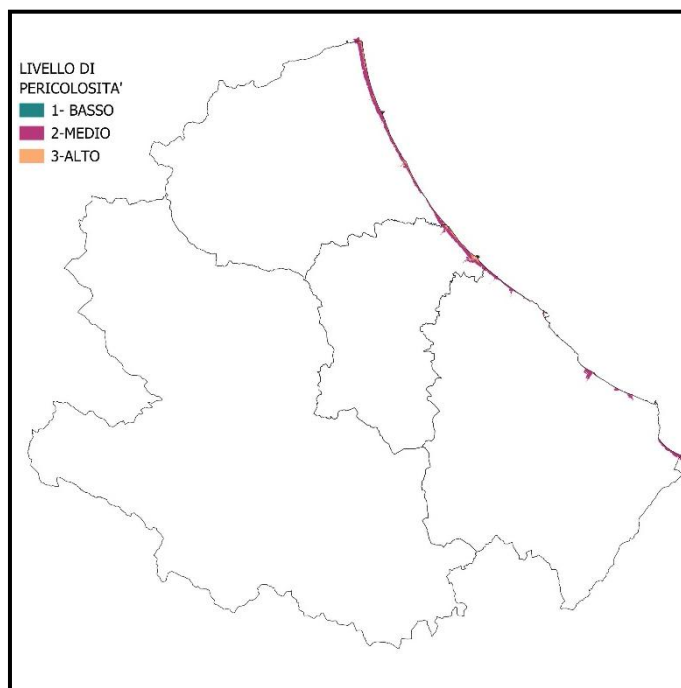


Figura 33: Cartografia pericolosità da maremoto

7. INCENDI

Dal Piano AIB - Carta dei Livelli del Rischio Pirologico Estivo da Tipologie Forestali si sono estrapolati i dati necessari a classificare la pericolosità, anche attraverso il servizio WMS (Web Map Service) che consente di integrare dinamicamente la carta in sistemi GIS o applicazioni web (Regione Abruzzo, 2015). La carta rappresenta una zonazione del territorio abruzzese, suddiviso in aree con diversi livelli di rischio di incendi boschivi. Questa classificazione si basa su vari fattori, tra cui, tipologia di vegetazione, composizione forestale, condizioni climatiche stagionali, carico di combustibile, accessibilità e presenza di infrastrutture. Nella Tabella 16 sono elencati i livelli di classificazione normalizzati e rappresentati nella Figura 34.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Molto bassa	H1
Bassa	
Media	H2
Alta	H3
Molto alta	

Tabella 16: Livelli di classificazione pericolosità incendi

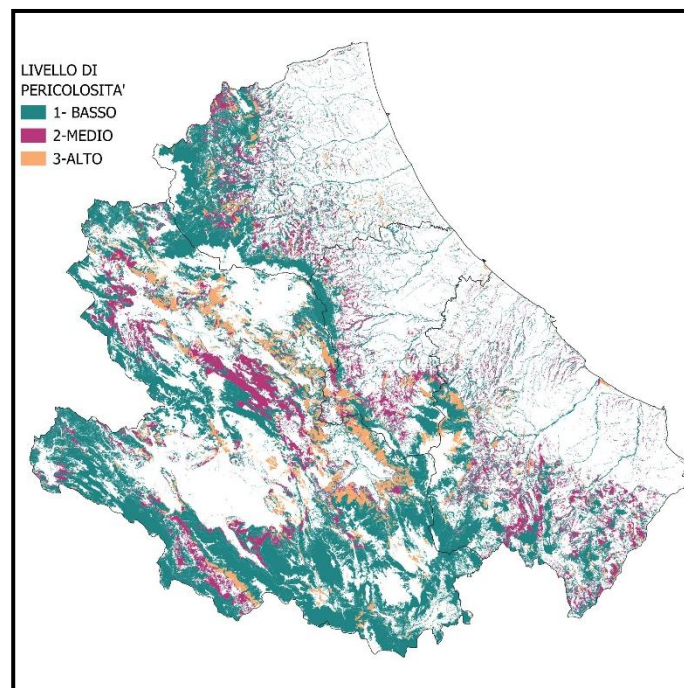


Figura 34: Cartografia pericolosità da incendi

Per ciascuna di queste tipologie è stato applicato un sistema di classificazione progressiva della pericolosità, la cui sintesi è riportata nella Tabella 17.

I risultati mostrano la rappresentazione cartografica vettoriale delle 7 pericolosità classificate secondo il criterio 1 – 2 – 3 , basso – medio- alto livello di incidenza.

Hazard Type	Original Data	Source	Classification
Seismic	Seismic zone 1 = high hazard Seismic zone 2 = medium hazard Seismic zone 3 = low hazard	BURAT Ordinance No. 30 (31.07.2024)	Zone 1 = H3 Zone 2 = H2 Zone 3 = H1
Hydrogeological	P1 = higher probability, lower damage P2 = medium P3 = lower probability, higher damage	PAI – PSDA	P1 = H1 P2 = H2 P3 = H3
Hydraulic	P1 = higher probability, lower damage P2 = medium P3 = lower probability, higher damage	PAI	P1 = H1 P2 = H2 P3 = H3
Avalanche	Avalanches Hazardous zones Possible continuations/connections Presumed hazardous zones	C.L.P.V.	Avalanches = H3 Hazardous zones = H2 Possible continuations/connections and presumed hazardous zones = H1
Dams	Discharge maneuver Collapse Uncontained collapse (Tr200)	PED - PSDA	Discharge = H1 Collapse = H2 Uncontained = H3
Tsunami	Zone 1 Zone 2	ISPRA	Zone 1 = H3 Zone 2 = H2
Fires	Very high High Medium Low Very low	AIB Plan - Abruzzo Region	Very high = H3 High = H3 Medium = H2 Low/Very low = H1

Tabella 67: Classificazione riassuntiva delle pericolosità

LA MULTI - VULNERABILITA' AMBIENTALE PAESAGGISTICA $V_{a/p}$

La componente V della funzione di rischio è stata suddivisa in due sottocategorie principali, al fine di rappresentare in maniera più accurata le diverse dimensioni della vulnerabilità territoriale. La prima sottocategoria riguarda la Vulnerabilità ambientale e paesaggistica, sviluppata a partire da dati provenienti da fonti ufficiali nazionali e regionali, quali l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e il portale istituzionale della Regione Abruzzo. Tra i dataset utilizzati si segnalano, a titolo esemplificativo, la Carta della Natura, i dati di uso/copertura del suolo (Land Use) e altre banche dati tematiche disponibili a livello regionale. Da tali fonti sono state estratte informazioni, e quindi rielaborati degli indicatori, riguardanti le 7 tematiche che costituiscono l'Indice totale - ΣV_{ap} , qui di seguito analizzate:

1.ACQUE CONTINENTALI E MARITTIME

Con i dati estrapolati dalla carta di Uso del Suolo della regione Abruzzo, indica il livello di vulnerabilità dovuto all'impatto diretto dell'uso del suolo sulla disponibilità e sulla qualità delle acque continentali e marittime. La classificazione data identifica le informazioni di prioritaria importanza dando così un livello massimo di vulnerabilità, Tabella 18, Figura 35.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Codice di usi del suolo	V3

Tabella 78: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, acque continentali e marittime

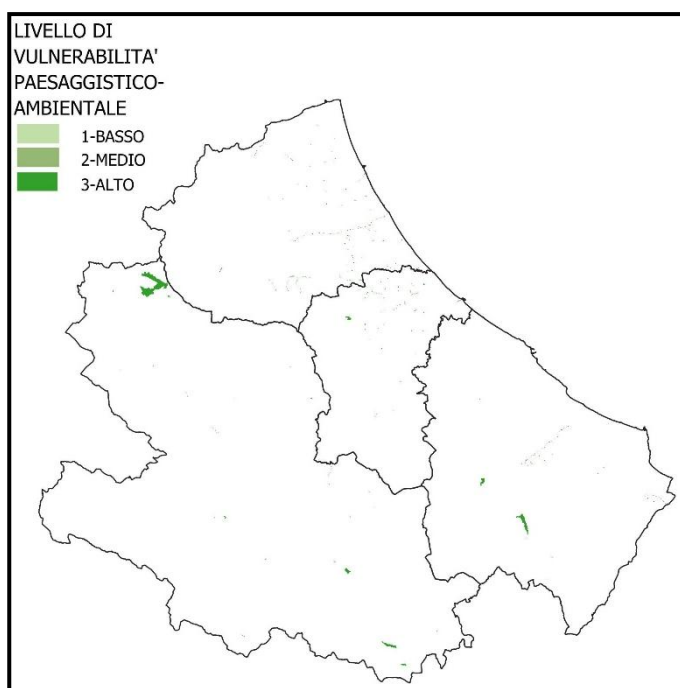


Figura 35: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, acque continentali e marittime

2.SENSIBILITA' ECOLOGICA

Dati ottenuti dalla Carta della Natura, indicano la stima della Sensibilità Ecologica. Questa informazione è finalizzata a evidenziare quanto un biotopo è soggetto al rischio di degrado per cause naturali, o perché popolato da specie animali e vegetali incluse negli elenchi delle specie a rischio di estinzione, oppure per caratteristiche strutturali. In questo senso la sensibilità esprime la predisposizione intrinseca di un biotopo a subire un danno, indipendentemente dalle pressioni di natura antropica cui esso è sottoposto. In Abruzzo, il 7% degli habitat è considerato ad alto rischio. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 19, Figura 36.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Molto bassa	V1
Bassa	
Media	V2
Alta	V3
Molto alta	

Tabella 8: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, sensibilità ecologica

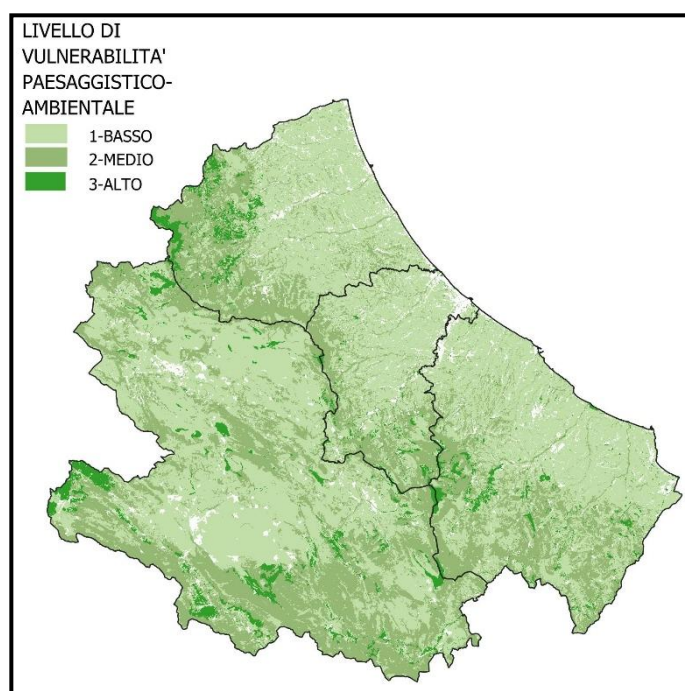


Figura 36: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, sensibilità ecologica

3. VALORE FLORISTICO- VEGETAZIONALE

Dati forniti dalla Carta Del Valore Floristico-Vegetazionale. Questo è uno strumento cartografico che rappresenta e valuta l'importanza delle diverse formazioni vegetali presenti in un'area geografica. In pratica, individua e classifica le aree in base alla loro ricchezza, rarità, tipicità, stato di conservazione e significato ecologico della flora e della vegetazione che le caratterizzano. E' utile a valutare il valore ecologico e conservazionistico della vegetazione, fornendo informazioni utili per la pianificazione territoriale e la gestione delle aree naturali. In sintesi, la carta del valore floristico-vegetazionale è uno strumento essenziale per la comprensione e la gestione del capitale naturale, fornendo informazioni preziose per la tutela della biodiversità e la pianificazione territoriale sostenibile. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 20, Figura 37.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Tipologia di capitale naturale	V3

Tabella 20: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, valore floristico- vegetazionale

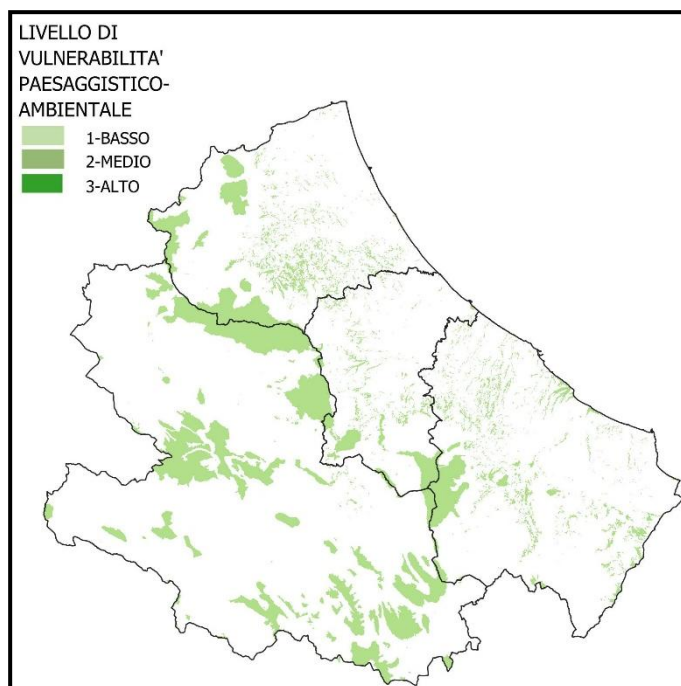


Figura 37: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, valore floristico- vegetazionale

4.GEOSIGMETI IDENTITARI

Dalla Carta dei Valori sono stati estrapolati i dati dei geosigmeti della regione Abruzzo. Un geosigmeta, si riferisce a un sito geologico che presenta caratteristiche particolari e uniche, spesso legate a fenomeni o processi geologici specifici, e che può essere considerato un esempio rappresentativo di quel tipo di fenomeno. Sono geositi che, per le loro caratteristiche specifiche, sono considerati esempi rappresentativi di un particolare fenomeno o processo geologico. In sintesi, mentre tutti i geosigmeti sono geositi, non tutti i geositi sono geosigmeti. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 21, Figura 38.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Nomi identificativi	V3

Tabella 21: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, geosigmeti identitari

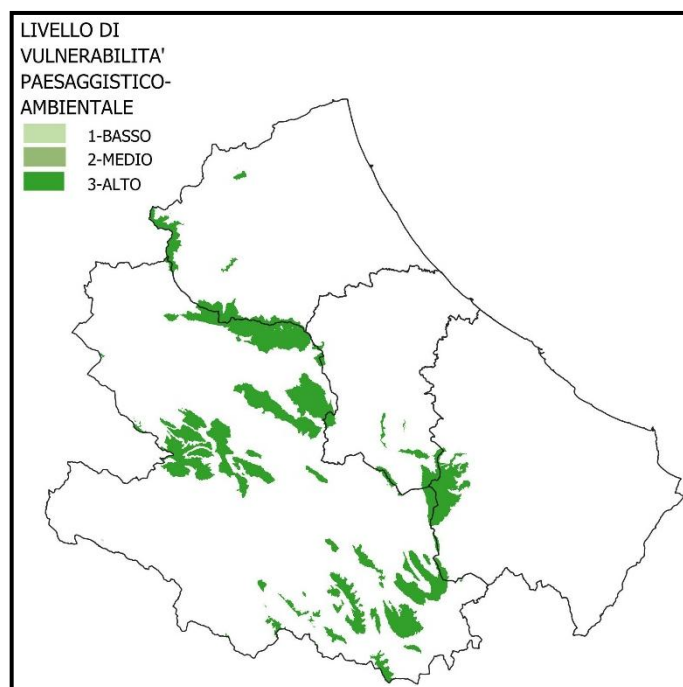


Figura 38: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, geosigmeti

5.AREE PROTETTE

Le Aree Protette, consultabili tramite il Geoportale Nazionale, sono zone terrestri, fluviali, lacustri o marine, create per tutelare ecosistemi, formazioni fisiche, geologiche o biologiche di particolare valore. Queste aree, che comprendono parchi nazionali, regionali e riserve naturali, sono

gestite per preservare la biodiversità e gli equilibri ecologici, consentendo anche attività compatibili con la conservazione. Le Aree Protette sono zone in cui si cerca di mantenere o ripristinare uno stato di equilibrio ecologico, tutelando la flora, la fauna, i paesaggi e le formazioni geologiche. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 22, Figura 39.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Tipologia	V3

Tabella 22: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, aree protette

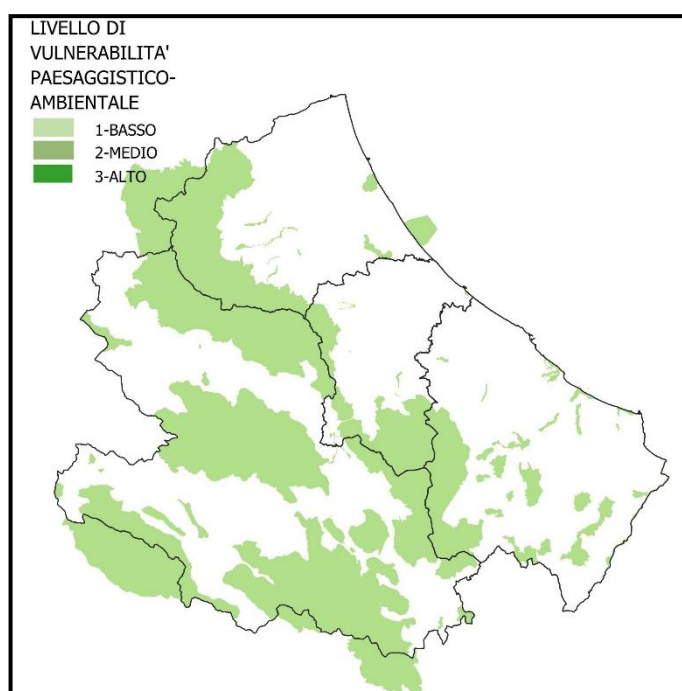


Figura 39: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, aree protette

6. QUALITÀ DELLE AREE PROTETTE

In ambito ISPRA, la "qualità delle aree protette" si riferisce alla valutazione dello stato di conservazione e della salute degli ecosistemi presenti all'interno delle aree protette, sia terrestri che marine. ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, svolge un ruolo chiave nel monitoraggio e nella valutazione della qualità di queste aree, fornendo dati e analisi per supportare le politiche di conservazione e gestione. In sintesi, la qualità delle aree protette per ISPRA è un concetto ampio che

comprende sia la valutazione della salute degli ecosistemi che il supporto alle politiche e alle pratiche di gestione volte a garantire la loro conservazione a lungo termine. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 23, Figura 40.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Alta	V1
Media	V2
Bassa	V3
Molto bassa	

Tabella 23: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, qualità delle aree protette

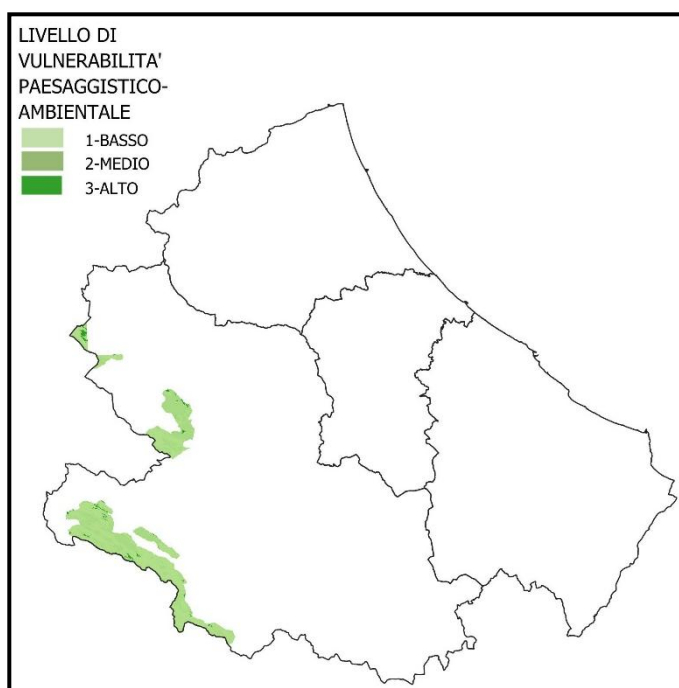


Figura 40: Cartografia vulnerabilità, qualità aree protette

7.AREE FORESTALI

Dati estratti dalla mappa forestale della regione Abruzzo è uno strumento che rappresenta graficamente la distribuzione e la tipologia delle aree forestali presenti sul territorio regionale. Essa fornisce informazioni dettagliate sulle diverse categorie di boschi, foreste, e altre formazioni vegetali boschive, inclusi eventuali vincoli o usi specifici. La

mappa forestale è uno strumento fondamentale per la pianificazione territoriale, la gestione sostenibile delle foreste, la tutela dell'ambiente, e la prevenzione dei rischi naturali come incendi, frane e alluvioni. Normalizzazione e rappresentazione in Tabella 24, Figura 41.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Tipologia	V3

Tabella 94: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, aree forestali

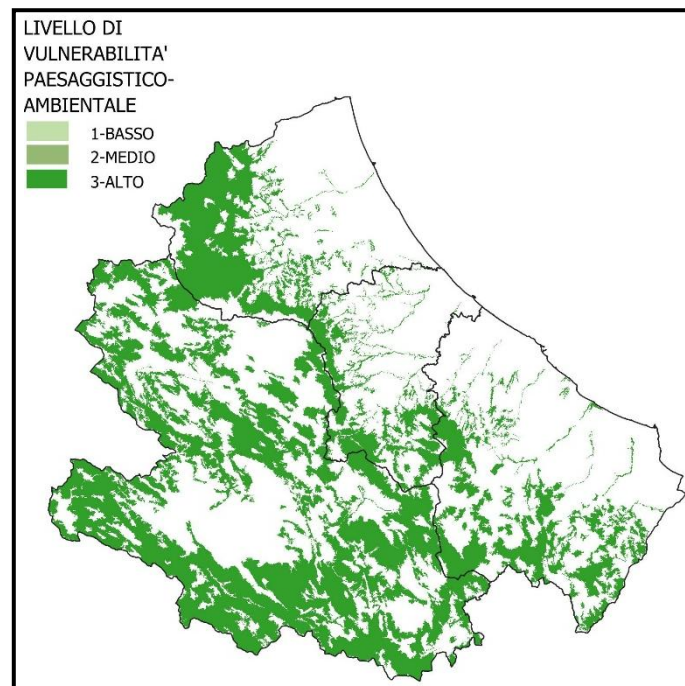


Figura 41: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, aree forestali

8. SIC FUORI DA AREE PROTETTE

Dati ottenuti dalla Cartografia Geobotanica dei SIC (Siti Di Importanza Comunitaria) Fuori Dalle Aree Protette in Abruzzo è un tipo di mappa che rappresenta la distribuzione e le caratteristiche della vegetazione presente in queste aree, fornendo informazioni dettagliate sulla composizione e le relazioni delle comunità vegetali. In pratica, mostra quali tipi di piante si trovano in quali zone, e come queste piante sono collegate tra loro, anche al di fuori delle aree protette come parchi e

riserve. Sono aree designate dall'Unione Europea per proteggere specie e habitat di particolare valore naturalistico. Non sempre coincidono con le aree protette tradizionali (parchi, riserve), ma possono estendersi anche a zone esterne. Si riferisce a zone che, pur non essendo all'interno di parchi o riserve, sono comunque importanti per la conservazione della biodiversità e rientrano nei SIC. In sintesi, la cartografia geobotanica dei SIC fuori dalle aree protette in Abruzzo è uno strumento che permette di conoscere meglio la vegetazione presente in queste zone, fornendo informazioni utili per la pianificazione territoriale e la conservazione della biodiversità. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 25, Figura 42.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Alta	V3
Media	V2
Bassa	V1
Molto bassa	

Tabella 105: Livelli di classificazione vulnerabilità paesaggistica, SIC fuori dalle aree protette

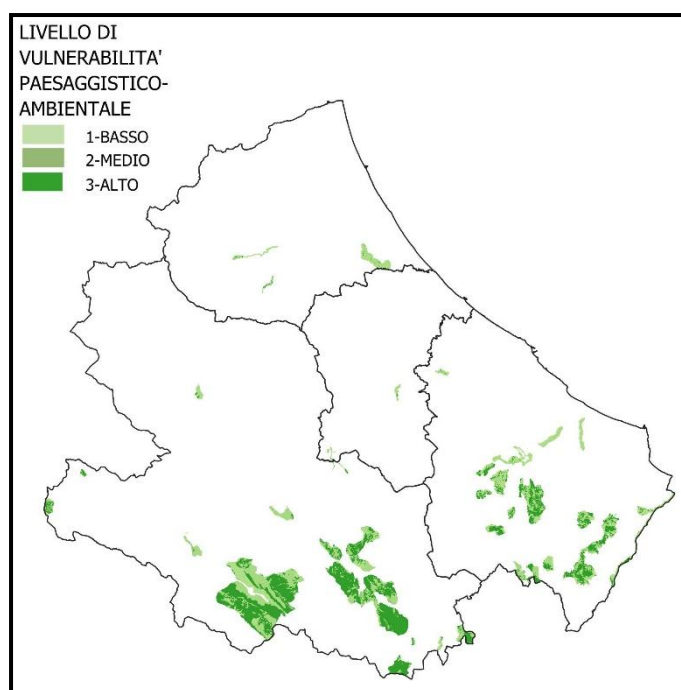


Figura 42: Cartografia vulnerabilità paesaggistica, SIC fuori da aree protette

Questi dati risultano essenziali per definire il grado di vulnerabilità dei paesaggi non antropizzati e per classificarli in tre livelli di intensità (basso, medio, alto), in coerenza con la metodologia di normalizzazione già illustrata, alcuni di questi dati sono stati categorizzati con valore massimo

3 senza entrare nel merito della distinzione tipologica. La sintesi di tale classificazione è riportata nella Tabella 26.

Theme	Original Data	Source	Classification
Protected Areas	Type	National Geoportal	$V_{e/l} = 3$
Quality of Protected Areas	High Medium Low Very low	ISPRA	High = $V_{e/l} 1$ Medium = $V_{e/l} 2$ Low = $V_{e/l} 3$ Very low = $V_{e/l} 3$
Forested Areas	Typology	Regional Forestry Map	$V_{e/l} = 3$
Ecological Sensitivity	Very high High Medium Low Very low	Nature Map	Very high = $V_{e/l} 3$ High = $V_{e/l} 3$ Medium = $V_{e/l} 2$ Low = $V_{e/l} 1$ Very low = $V_{e/l} 1$
Floristic-Vegetation Value	Type	Value Map	$V_{e/l} = 3$
Geosigmeti	Name	Value Map Abruzzo Region	$V_{e/l} = 3$
Continental/Marine Waters	Land use code	Abruzzo Region	$V_{e/l} = 3$
SCIs Outside Protected Areas	High Medium Low Very low	Geobotanical Cartography Abruzzo Region	High = $V_{e/l} 3$ Medium = $V_{e/l} 2$ Low = $V_{e/l} 1$ Very low = $V_{e/l} 1$

Tabella 26: Classificazione degli indicatori dell'indice sintetico Vulnerabilità paesaggistico- ambientale - ΣV_{pa}

LA MULTI - VULNERABILITA' SOCIO INSEDIATIVA

La vulnerabilità è stata analizzata anche sotto il profilo antropico, conducendo una valutazione della vulnerabilità socio-insediativa. Tale analisi si è basata su dati ufficiali forniti dall'ISTAT relativi da una parte al patrimonio edilizio e dell'altra dalla popolazione della regione Abruzzo. In particolare, sono stati utilizzati:

- i dati sui fabbricati per sezione di censimento riferiti all'anno 2011;
- i dati sulla popolazione residente aggiornati al 2021.

A integrazione di questa analisi, sono state identificate le Aree Urbane di Interesse Storico e le Aree Archeologiche tramite la banca dati della Carta dei Valori, 2018, reperibile sul sito della regione Abruzzo [24], in quanto tali elementi rappresentano fattori determinanti nella definizione complessiva della vulnerabilità socio-insediativa e assumono rilevanza anche in termini di protezione del patrimonio culturale. Questa componente di vulnerabilità considera principalmente i fattori che influenzano la capacità di un territorio o di una comunità di far fronte a eventi estremi, tenendo conto della distribuzione della popolazione, del patrimonio edilizio e del valore culturale del contesto urbano.

a. PATRIMONIO CULTURALE E CARTA DEI VALORI

1. AREE URBANE DI VALORE STORICO

Sono i centri storici o borghi, sono in spesso vulnerabili per via l'età degli edifici, lo stato di conservazione, e tipologie costruttive.

Un'area urbana di valore storico si riferisce a una porzione di territorio all'interno di un centro urbano, caratterizzata dalla presenza di testimonianze storiche, artistiche, ambientali o di particolare pregio. Questa zona, spesso identificata come "centro storico" o "zona A" nei piani regolatori, è sottoposta a tutela e protezione per preservare il suo patrimonio culturale e architettonico. Nei piani urbanistici, le aree di valore storico sono spesso delimitate e soggette a normative specifiche per la loro tutela e valorizzazione, come la limitazione di interventi edilizi o la protezione di elementi architettonici di pregio. In sintesi, le aree urbane di valore storico rappresentano un tesoro da preservare e valorizzare, poiché testimoniano la storia, l'identità e la cultura di una città. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 27, Figura 43.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Codice	V3

Tabella 27: Livelli di classificazione vulnerabilità socio insediativa, aree urbane di valore storico

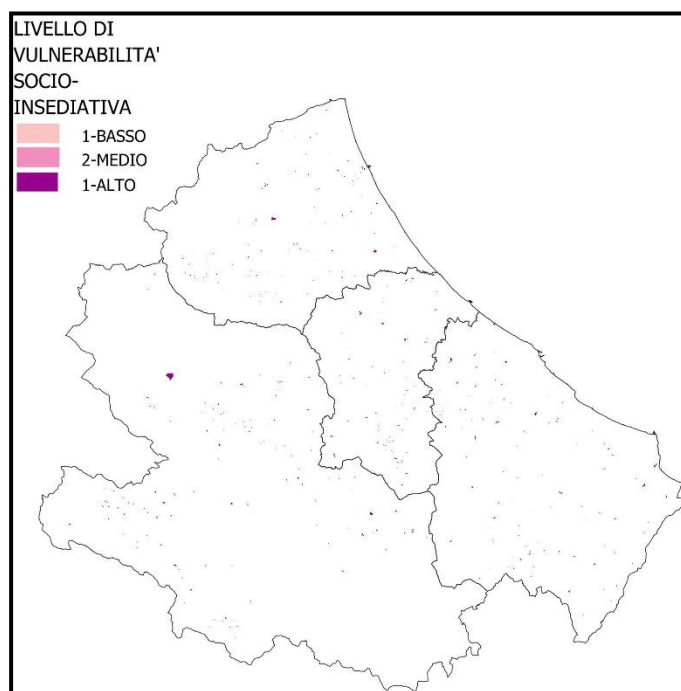


Figura 43: Cartografia vulnerabilità, aree urbane di valore storico

2.AREE ARCHEOLOGICHE

Aree di alto valore ed interesse storico artistico. Le aree archeologiche in Abruzzo, definite dalla "Carta dei Valori", sono zone che presentano testimonianze di attività umane del passato, come resti di insediamenti, manufatti o altri elementi di interesse storico e culturale. La "Carta dei Valori" è uno strumento che mira a identificare, tutelare e valorizzare queste aree, riconoscendone l'importanza per la storia e l'identità del territorio. In sintesi, la "Carta dei Valori" delle aree archeologiche in Abruzzo è uno strumento che contribuisce alla salvaguardia e alla valorizzazione del ricco patrimonio storico e culturale della regione, garantendo che le testimonianze del passato siano preservate e rese accessibili a tutti. Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 28, Figura 44.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Nomi	V3

Tabella 118: Livelli di classificazione vulnerabilità socio insediativa, aree archeologiche

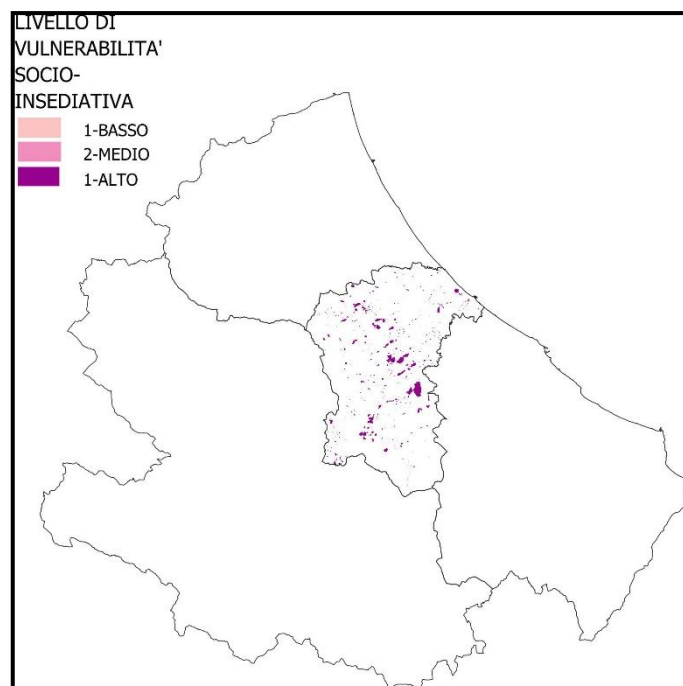


Figura 44: Cartografia vulnerabilità, aree archeologiche

b. IL PATRIMONIO EDILIZIO

L'analisi del patrimonio edilizio è stata condotta secondo due prospettive, attraverso i dati derivanti dalla fonte ISTAT 2011

1. Stato di Conservazione degli Edifici, selezionando le classi con le condizioni più sfavorevoli ("mediocre" e "pessimo"), che rappresentano situazioni di maggiore fragilità strutturale;
2. Epoca di costruzione, prendendo come riferimento la data dei primi titoli abilitativi edilizi (1967) e l'entrata in vigore delle prime norme tecniche antisismiche (1984), in quanto fattori determinanti per la resistenza sismica e la sicurezza strutturale.

1. LO STATO DI CONSERVAZIONE DEGLI EDIFICI

Sono dati relativi alle condizioni più sfavorevoli, si classificano a seconda della percentuale di edifici in stato pessimo o mediocre presente nella zone censuarie. Lo stato di conservazione degli edifici, nel contesto ISTAT, si riferisce alla valutazione delle condizioni fisiche e strutturali di un edificio, classificandole in diverse categorie che vanno da "ottimo" a "inagibile".

La valutazione dello stato di conservazione viene effettuata da personale specializzato che ispeziona l'edificio e compila una scheda di valutazione, seguendo le istruzioni e i criteri definiti dall'ISTAT. I dati raccolti vengono poi utilizzati per alimentare il Censimento Permanente della Popolazione e delle Abitazioni. In sintesi, la valutazione dello stato di conservazione degli edifici è un aspetto fondamentale del Censimento Permanente dell'ISTAT, che permette di avere un quadro completo della situazione abitativa italiana e di pianificare interventi mirati per la sua valorizzazione e sicurezza. In questo contesto sono stati considerati i dati relativi alle condizioni più sfavorevoli, si classificano a seconda della percentuale di edifici in stato pessimo o mediocre presente per zone censuarie.

- **Mediocre:** Edificio con segni di deterioramento, con interventi di manutenzione straordinaria necessari.
- **Pessimo:** Edificio con evidenti segni di degrado, con interventi strutturali importanti necessari.

Normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 29, Figura 45.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Mediocre	$[\% \text{ Buildings (BD)}_{p+m} < 1/3 \text{ BD}_{tot}] = \mathbf{V1}$
Pessimo	$[1/3 \text{ BD}_{tot} < \% \text{BD}_{p+m} < 2/3 \text{ BD}_{tot}] = \mathbf{V2}$
	$\% \text{BD}_{p+m} > 2/3 \text{ BD}_{tot} = \mathbf{V3}$

Tabella 129: Livelli di classificazione vulnerabilità socio insediativa, stato di conservazione degli edifici

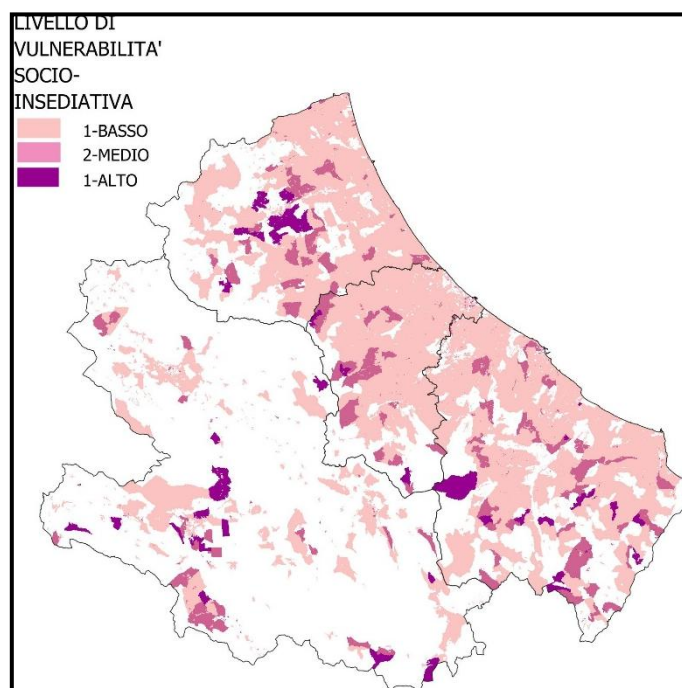


Figura 45: Cartografia vulnerabilità socio insediativa, stato di conservazione degli edifici

epoca di costruzione degli edifici (<'67<'84)

La classificazione è stata effettuata secondo V3 (alta) per gli edifici costruiti prima del 1967, prendendo il range degli edifici costruiti da prima del 1919 al 1970 secondo ISTAT.

E8	Edifici ad uso residenziale costruiti prima del 1919
E9	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1919 al 1945
E10	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1946 al 1960
E11	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1961 al 1970

La scelta dei dati ante '67 fa riferimento alla legge n. 765: questa norma, che ha portato diverse innovazioni, ha determinato anche una modifica sostanziale, benché sotto certi aspetti secondaria, alla precedente legge n. 1150/1942: laddove la norma del 1942 indicava che la licenza era necessaria “nei centri abitati” e nelle zone interessate dalla pianificazione comunale (piani regolatori), l'intervento del 1967 è andato ad indicare che la licenza diventava indispensabile per ogni intervento edilizio nell'intero territorio di ciascun comune, indipendentemente dalla effettiva pianificazione urbanistica. Con V2 (media) sono stati identificati gli edifici costruiti tra il '67 ed il 1984, prendo i dati disponibili fino al 1990, (range di dati censiti secondo ISTAT).

E12	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1971 al 1980
E13	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1981 al 1990

Il criterio scelto per questa seconda classificazione degli edifici residenziali fa riferimento alla Normativa del 1984:

1984	D.M. 29 febbraio 1984	Riguardante la classificazione sismica del territorio e basati su uno studio del CNR.
------	-----------------------	---

– Decreto Ministeriale del 29 Febbraio 1984 Riguardante la classificazione sismica del territorio e basati su uno studio del CNR. Tale studio si basava per la prima volta su un'indagine di tipo probabilistico ed è a base della classificazione dell'OPCM 3274.

– Decreto Ministeriale del 5 Marzo 1984 (G.U. n.91 del 31/03/1984) “Dichiarazione di sismicità di alcune zone della regione Lombardia.”

– Decreto Ministeriale del 19 Giugno 1984 (G.U. n.208 del 30/07/1984) “Norme tecniche relative alle costruzioni sismiche”. Aggiornamento del Decreto 3 Marzo 1975. Si introduce la differenziazione a livello di protezione sismica per particolari categorie di edifici. Opere strategiche I=1.4; Opere a particolare rischio d'uso I=1.2. Abrogato dal DM 24 Gennaio 1986.

Gli edifici residenziali censiti relativi alla successiva applicazione della legge del 1984, e che quindi hanno applicato le normative sopracitate sono stati categorizzati con V1 (bassa). Secondo il censimento ISTAT i dati sono classificati dal 1991 a dopo il 2005.

E14	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1991 al 2000
E15	Edifici ad uso residenziale costruiti dal 2001 al 2005
E16	Edifici ad uso residenziale costruiti dopo il 2005

In sintesi, normalizzazione e rappresentazione con la Tabella 30, Figura 46.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Edifici costruiti ante '67	$[\%BD_{ante'67} > X_{med}] = \mathbf{V3}$
Edifici costruiti tra '67 e '84	$[(\text{if } \%BD_{ante'67} < X_{med}) \text{ and } (\text{if } \%BD_{post'84} < X_{med})] = \mathbf{V2}$
Edifici costruiti post '84	$[\%BD_{post'84} > X_{med}] = \mathbf{V1}$

Tabella 30: Livelli di classificazione vulnerabilità socio insediativa, epoca di costruzione degli edifici

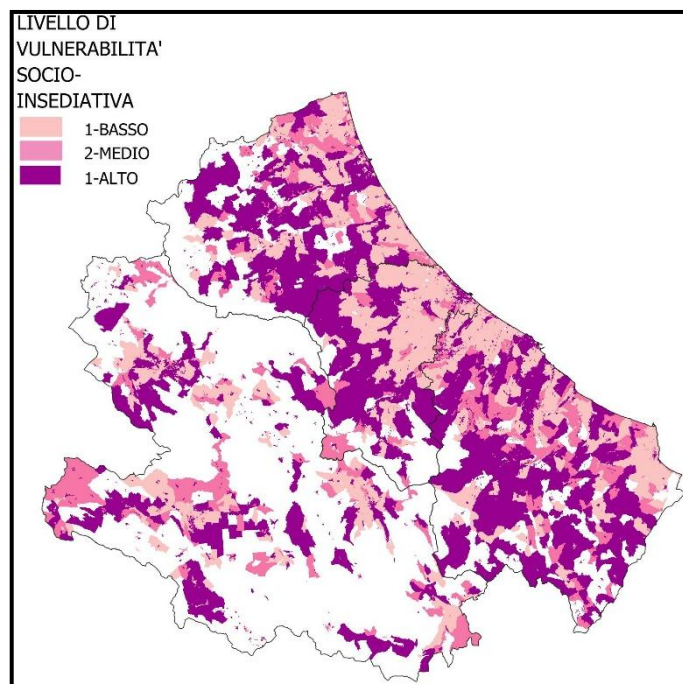


Figura 46: Cartografia vulnerabilità socio insediativa, epoca di costruzione degli edifici

LA POPOLAZIONE

Per quanto riguarda la componente sociale e demografica, è stato elaborato l'Indice di Vulnerabilità Sociale e Materiale - **IVSM** (ISTAT, 2020)

utile a misurare le condizioni di svantaggio dei territori. Serve a capire dove gli abitanti o le famiglie sono più esposte a rischi sociali ed economici ed è costruito secondo il modello proposto dall'ISTAT (ISTAT, 2021).

L'IVSM in questione si compone di sei indicatori chiave, qui di seguito elencati.

1. RAPPORTO DI DIPENDENZA STRUTTURALE:

Indica quanti individui non autonomi ci sono per ogni 100 individui potenzialmente indipendenti. Il dato fornisce una misura della sostenibilità strutturale di una popolazione

* Popolazione NON ATTIVA (0-14 anni e maggiore di 65 anni)

* Popolazione ATTIVA (15-64 anni)

$$R_{ds} = \left(\frac{pop\ non\ attiva}{pop\ attiva} \right) * 100$$

2. INDICE DI VECCHIAIA:

E' l'indicatore demografico che misura il grado di invecchiamento di una popolazione,

$$I_v = \left(\frac{>65}{0-14} \right) * 100$$

secondo le zone censuarie dei dati ISTAT;

**alcuni valori sono dati come 100% (esempio 7/0*100) (per 7 anziani servono 7 giovani) si è deciso di procedere dando un valore (1) al denominatore tale che non risulti 0,*

3. TASSO DI OCCUPAZIONE:

È un indicatore utile a comprendere la capacità del mercato del lavoro di utilizzare le risorse umane disponibili.

* Occupati = popolazione occupata tra i 15-64 anni

* Popolazione di riferimento = totale popolazione tra i 15-64 anni

$$T_o = \left(\frac{occupati}{pop\ di\ riferimento} \right) * 100$$

4. NUCLEI FAMILIARI IN CONDIZIONI DI SOVRAFFOLLAMENTO:

Una famiglia è considerata in condizioni di sovraffollamento quando le stanze disponibili sono meno di quelle richieste per i suoi membri, in riferimento alle linee guida europee.

Il dato si riferisce a famiglie con oltre 5-6 componenti e ed è un indicatore che riflette la qualità delle condizioni abitative delle famiglie, evidenziando la presenza di un disagio abitativo, che può essere più marcato in alcune

fasce della popolazione, come le famiglie con figli minori o quelle meno abbienti.

$$N_{fs} = \left(\frac{\text{n}^\circ \text{ famiglie 5-6 componenti}}{\text{tot famiglie}} \right) * 100$$

5. LIVELLO DI ISTRUZIONE:

Il dato si riferisce al numero di residenti, relativo alle zone censuarie, in possesso di titoli di studio pari o inferiore alla licenza di scuola secondaria di primo grado, indica la soglia di base per capire il livello minimo di istruzione raggiunto da una popolazione. Se una quota rilevante della popolazione resta ferma alla licenza media, diventa un segnale di fragilità sociale che genera minori opportunità lavorative, rischio di esclusione sociale, difficoltà nell'accesso a servizi pubblici o digitali. Monitorare questo indice serve a individuare aree o gruppi in difficoltà, valutando così la necessità di rafforzare politiche di contrasto alla dispersione scolastica, programmi di formazione professionale o di educazione permanente, e politiche di inclusione e sviluppo.

$$L_i = \left(\frac{\text{istruzione} \leq \text{licenza media}}{\text{pop riferimento}} \right) * 100$$

6. GENERE:

percentuale di donne occupate

Il dato fornisce una visione di quanto effettivamente il mercato del lavoro riesca ad assorbire e valorizzare la forza lavoro femminile.

E' un' indicatore europeo - Strategia di Lisbona, Europa 2020 - che indica la percentuale di donne occupate in relazione alla popolazione attiva femminile.

Un basso tasso di occupazione femminile segnala ostacoli specifici come disparità salariali, difficoltà di conciliazione lavoro-famiglia, stereotipi di genere.

$$D_o = \left(\frac{\text{donne occupate}}{\text{pop femminile attiva}} \right) * 100$$

COSTRUZIONE DELL ' IVSM

L'indice composito si ottiene, come riportato da 8milacensus, aggregando gli indicatori normalizzati con peso uguale mediante media aritmetica semplice, una funzione di sintesi additiva che in quanto tale presuppone un effetto compensativo fra gli indicatori elementari.

In questa applicazione l'effetto compensativo della media aritmetica (effetto medio) è corretto aggiungendo alla media un fattore (coefficiente di penalità) che dipende dalla variabilità dei valori normalizzati di ciascuna

unità (denominata variabilità orizzontale), ossia dalla variabilità degli indicatori rispetto ai valori di riferimento utilizzati per la normalizzazione. L'indice sintetico della i-esima unità si ottiene pertanto applicando con penalità positiva la versione corretta del metodo delle penalità per coefficiente di variazione (AMPI+/-)

dove:

$$AMPI_i^+ = M_{ri} + S_{ri} cv_i$$

M_{ri} =media aritmetica

S_{ri} = scostamento quadratico medio dei valori normalizzati

cv_i =coefficiente di variazione dei valori normalizzati degli indicatori dell'unità

Per la classificazione in livelli basso, medio, alto sono stati utilizzati i dati normalizzati e categorizzati secondo la Tabella 31 e Figura 47.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Rapporto di dipendenza strutturale	$ISMV < 1/3_{zc} = \mathbf{V1}$
Indice di vecchiaia	
Tasso di occupazione	$1/3_{zc} < ISMV < 2/3_{zc} = \mathbf{V2}$
Nuclei familiari in condizioni di sovraffollamento	
Livello di istruzione	$ISMV > 2/3_{zc} = \mathbf{V3}$
Percentuale di donne occupate	

Tabella 31: Livelli di classificazione vulnerabilità socio insediativa, IVSM

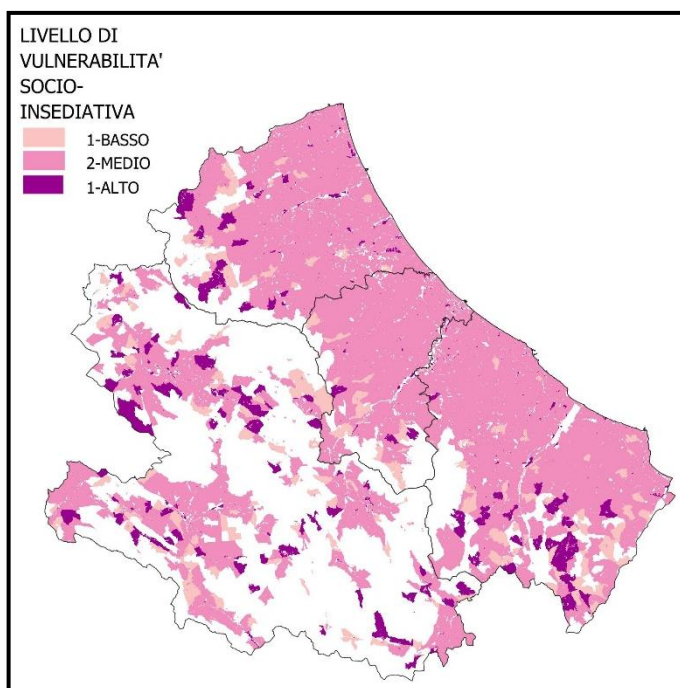


Figura 47: Cartografia vulnerabilità socio insediativa, IVSM

La sintesi di tale classificazione è riportata nella Tabella 32.

Theme	Original Data	Source	Classification
Archaeological Areas	Code	Value Map – Abruzzo Region	$V_{s/s} = 3$
Historic Urban Areas	Name	Value Map – Abruzzo Region	$V_{s/s} = 3$
Building Condition	Poor mediocre	ISTAT 2011 Census	$[\% \text{ Buildings (BD)}_{p+m} < 1/3 \text{ BD}_{tot}] = V_{s/s} \mathbf{1}$ $\cdot [1/3 \text{ BD}_{tot} < \% \text{BD}_{p+m} < 2/3 \text{ BD}_{tot}] = V_{s/s} \mathbf{2}$ $\cdot \% \text{BD}_{p+m} > 2/3 \text{ BD}_{tot} = V_{s/s} \mathbf{3}$
Building Age	Buildings number	ISTAT 2011 Census	$[\% \text{BD}_{ante'67} > X_{med}] = V_{s/s} \mathbf{3}$ $\cdot [(\text{if } \% \text{BD}_{ante'67} < X_{med}) \text{ and } (\text{if } \% \text{BD}_{post'84} < X_{med})] = V_{s/s} \mathbf{2}$ $\cdot [\% \text{BD}_{post'84} > X_{med}] = V_{s/s} \mathbf{1}$
Index of Social and Material Vulnerability	Age-index, citizens with low level of instruction, families with more than 5 components, occupation rate, female occupation, structural dependency ratio	ISTAT 2021 Census	$\text{ISMV} < 1/3 = V_{s/s} \mathbf{1}$ $1/3 < \text{ISMV} < 2/3 = V_{s/s} \mathbf{2}$ $\text{ISMV} > 2/3 = V_{s/s} \mathbf{3}$

Tabella 32: Classificazione degli indicatori dell'indice di sintetico Vulnerabilità socio insediativa - ΣV_{si}

LA MULTI - ESPOSIZIONE

Infine, l'indicatore Esposizione- E- è stato definito tenendo conto sia della componente demografica sia di quella territoriale e pianificatoria, al fine di rappresentare in maniera integrata il grado di esposizione dei beni e delle persone ai pericoli naturali. In particolare, sono stati utilizzati:

1. DENSITÀ ABITATIVA

L'indice è stato calcolato sulla base dei dati ISTAT relativi alle sezioni di censimento del 2021. E' un indicatore che esprime il numero di abitanti per unità di superficie, generalmente chilometro quadrato, di un determinato territorio. In pratica, indica quanto è "affollata" una certa area, ovvero quanti abitanti mediamente vivono in ogni km². E' un indicatore chiave per comprendere la distribuzione della popolazione sul territorio e viene utilizzato dall'Istat per analisi demografiche e territoriali. I dati normalizzati e categorizzati secondo la Tabella 33 e Figura 48.

$$D_a = \left(\frac{\text{popolazione}}{\text{area z.c.km}^2} \right)$$

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Popolazione / area della zona censuaria per Km2	$D_a \leq 1/3_{zc} = \mathbf{E1}$
	$1/3 \leq D_a \leq 2/3_{zc} = \mathbf{E2}$
	$D_a \geq 2/3_{zc} = \mathbf{E3}$

Tabella 33: Livelli di classificazione esposizione, densità abitativa

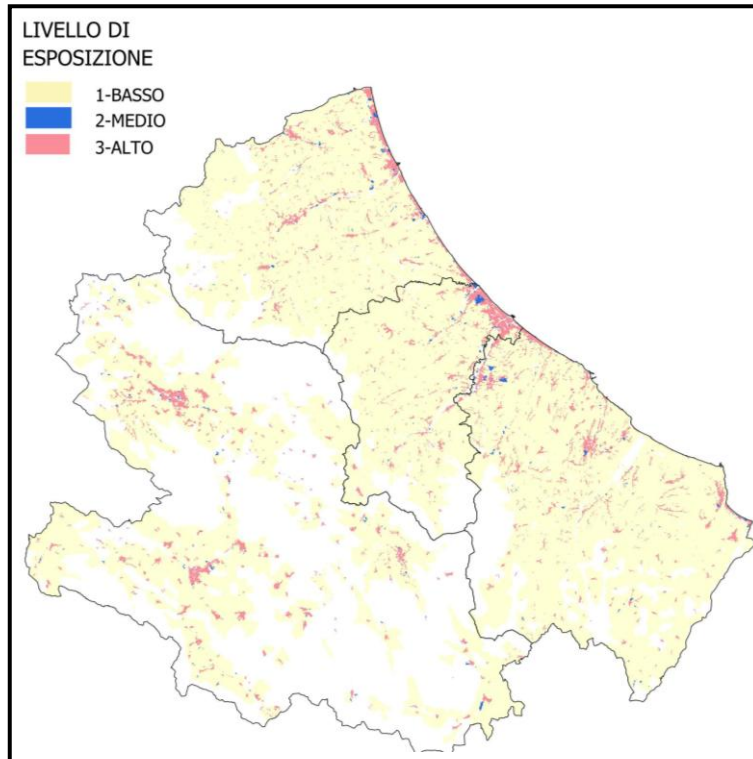


Figura 48: Cartografia esposizione, densità abitativa

2. CONSUMO DI SUOLO

I dati sul consumo di suolo, derivati dalla *Carta Nazionale del Consumo di Suolo* prodotta dall' Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA e anch'essi elaborati in riferimento al livello delle sezioni di censimento, Figura 49.

3	COD_PRO	COD_Provincia	Codice Istat Provinciale			Descrizione/classifica: ambito amministrativ
4	NOME_Regione	NOME_Provincia	Nome della Provincia			Descrizione/classifica: ambito amministrativ
5	COD_REG	COD_Regione	Codice Istat Regionale			Descrizione/classifica: ambito amministrativ
6	NOME_Provincia	NOME_Regione	Nome della Regione			Descrizione/classifica: ambito amministrativ
7	CSUOLO1	Suolo_consumato_[ha]	Superficie di suolo consumato [ha]	ha	CSUOLO	Consumo di suolo
8	CSUOLO2	Suolo_non_consumato_[ha]	Superficie di suolo non consumato [ha]	ha	CSUOLO	Consumo di suolo
9	CSUOLO3	Non_classificato_[ha]	Superficie non classificata per mancanza di dati [ha]	ha	CSUOLO	Consumo di suolo
10	CSUOLO4	Suolo_consumato_[%]	Percentuale di suolo consumato sulla superficie amministrativa [%]	%	CSUOLO	Consumo di suolo
11	CSUOLO5	Non_consumato_[%]	Percentuale di suolo non consumato sulla superficie amministrativa [%]	%	CSUOLO	Consumo di suolo

Figura 49: Immagine ISPRA consumo di suolo

L'ISPRA è l'ente responsabile del monitoraggio del consumo di suolo in Italia, all'interno del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA). Il monitoraggio, avviato nel 2012, si concretizza in una cartografia del suolo consumato e in rapporti tematici annuali, fornendo dati e analisi utili per la pianificazione territoriale e la gestione sostenibile del territorio.

Il consumo di suolo si riferisce alla perdita di aree agricole, naturali o seminaturali a causa della loro copertura con superfici artificiali. Questo fenomeno è caratterizzato dalla trasformazione del territorio naturale e agricolo in aree occupate da costruzioni, strade, parcheggi, ecc., spesso accompagnata da una crescente impermeabilizzazione del terreno. Il consumo di suolo è un problema significativo perché comporta la perdita di funzioni importanti come la produzione agricola, la biodiversità, e la regolazione del ciclo dell'acqua e del carbonio.

Si è scelto di considerare solo il valore generale di consumo di suolo, interpolandolo con le zone censuarie utilizzate da ISTAT, e classificando tutto con valore massimo di vulnerabilità V3 (alto). I dati sono stati normalizzati e categorizzati secondo la Tabella 34 e Figura 50.

LIVELLI DI CLASSIFICAZIONE	
ORIGINALI	NORMALIZZATI
Suolo consumato	E3

Tabella 34: Livelli di classificazione esposizione, consumo di suolo

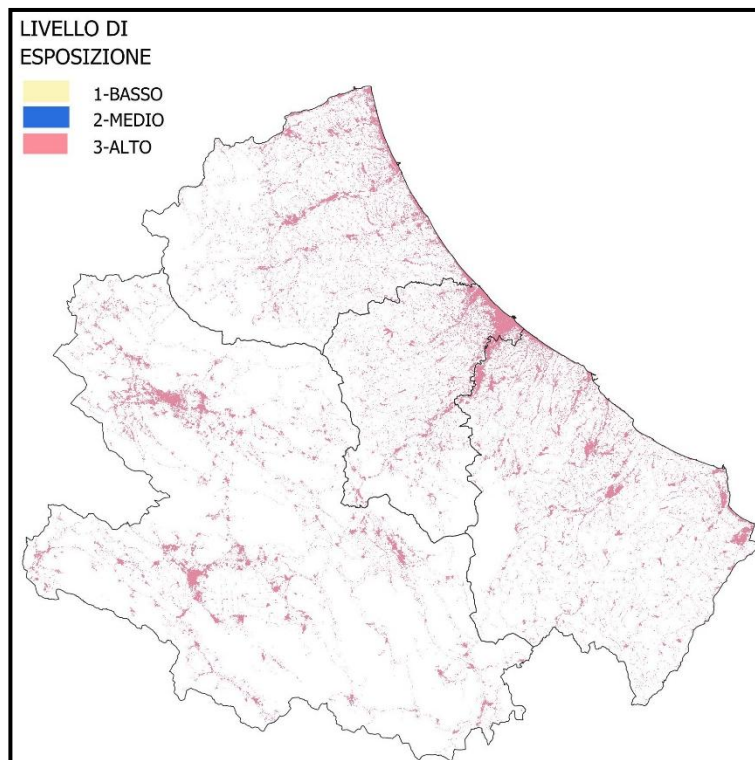


Figura 50: Cartografia esposizione, consumo di suolo

L'integrazione di questi due insiemi informativi, densità abitativa e consumo di suolo riferiti alle stesse zone censuarie, ha consentito di classificare i livelli di esposizione su scala normalizzata (1–3), in coerenza con il metodo applicato per gli altri parametri della funzione $R=f(H,V,E)$. La sintesi di tale classificazione è riportata nella Tabella 35.

Theme	Original Data	Source	Classification
Population Density	Total population/census area	ISTAT 2021 Census	[Pd < 1/3] = E1 [Pd < 2/3] = E2 [Pd > 2/3] = E3
Land Consumption	Built-up land	National Soil Consumption Map – ISPRA	E = 3

Tabella 35: Classificazione degli indicatori dell'indice sintetico Esposizione – ΣE

IL MOSAICO REGIONALE DEI PIANI REGOLATORI GENERALI – PRG

Un dato aggiuntivo utilizzato ai fini della selezione degli Hotspot di multirischio è il mosaico dei PRG disponibili della regione Abruzzo al 2010, ed ottenere così, non solo un riscontro con la pianificazione vigente, ma soprattutto individuare le previsioni di espansione insediativa del Piano Regolatore Territoriale con la Multi-Esposizione. Ciò permette di avere una rappresentazione di un possibile esposizione futura apportando un approccio temporale all'analisi, non evidenziato nelle metodologie esistenti.

Sulla base degli indicatori utilizzati per costruire il Sistema delle Conoscenze e definire gli Indici sintetici necessari alla fase 2, è stata aggiornata la Tabella 9 riassuntiva. L'aggiornamento include dati e informazioni utili ad arricchire il Quadro conoscitivo del rischio, integrando rischi e fattori di vulnerabilità approfonditi attraverso l'esperienza in Messico. Sono inoltre proposti, come spunto, possibili dati relativi alla capacità di risposta e all'integrazione di dati dinamici derivanti dalle nuove tecnologie come mostrato. Queste informazioni aggiuntive sono evidenziate con un colore giallo all'interno della Tabella 36.

HAZARD	FONTI	DATI
Seismic	Regione abruzzo	mappa sismica con accelerazioni
Flood	Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale	mappa di pericolosità
Landslides	Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale	mappa di pericolosità
Avalanche	Regione abruzzo	CLPV
Dams	Regione abruzzo	PED-piani evacuazione dighe, fasce inondazioni
Tsunami	ISPRA	dati mareometrici
Wildfire	Regione abruzzo	pirologica estiva AIB
Heat waves		
Hurricanes, Cyclones		
Drought		
Health risk		
Environmental- Contaminated Areas	OpenGeoData regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise - Degradato e abbandono	shapefile
Environmental- Potentially contaminated areas	OpenGeoData regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise - Degradato e abbandono	shapefile
Chemical-industrial- industry at risk of major accidents	Prefettura	
VULNERABILITY environmental/landscape (Vel)		
Protected Areas	Geoportale Nazionale	carta della Natura
Quality of Protected Areas	ISPRA	carta della Natura
Forested Areas	Regione Abruzzo	AIB
Ecological Sensitivity	ISPRA	carta della Natura
Floristic-Vegetation Value	Regione Abruzzo	carta dei valori
Geosigmeti	Regione Abruzzo	carta dei valori
Continental/Marine Waters	Regione Abruzzo ISPRA	carta dei uso del suolo
SCIs Outside Protected Areas	Regione Abruzzo ISPRA	Cartografia Geobotanica dei SIC

Nitrates from agricultural sources	Regione Abruzzo ISPRA	piano regionale di tutela delle acque
VULNERABILITY anthropic/settlement (Vas)		
Archeological heritage	Regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise - Valori	shapefile
Historic Urban Areas	Regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise - Valori	shapefile
Building Condition	ISTAT - zone censuarie	excel-csv
Age of buildings	ISTAT - zone censuarie	excel-csv
Index of Social and Material Vulnerability -IVSM Age-index, citizens with low level of instruction, families with more than 5 components, occupation rate, female occupation, structural dependency ratio	ISTAT - zone censuarie	excel-csv
Minority groups		
Gender issues, minority groups, young people		
High visibility areas	Regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze Condivise - Valori	shapefile
Road and technological infrastructures	Regione Abruzzo-Sistema delle Conoscenze - Armatura urbana e territoriale	shapefile
EXPOSURE		
Population: Density of residents	ISTAT- zone censuarie	excel-csv
Future urban land (mosaic of urban plans)	Regione Abruzzo	shapefile
Building		
RESPONCE CAPACITY		
Volunteer network		
Access to primary services		
Early warning		dynamic data
Risk perception		
Information and drills in schools		
Access to information		
Legal framework, regulations, legislation, , DRA, DRM		
IMPLEMENTATION AND USE OF TECHNOLOGIES		
IoT devices		dynamic data
Sensors		dynamic data
Urban Digital Twins		dynamic data
Regional Digital Twins		dynamic data
Real-time scenario simulations		dynamic data
Prediction and actions		dynamic data

Tabella 36: Tabella sintetica dei dati utilizzati e possibili per la costruzione del Sistema delle Conoscenze

6.3.2. DRA - FASE 2:

LA DEFINIZIONE DEGLI SCENARI MULTI-RISCHIO

Le componenti della funzione R descritte nelle sezioni precedenti costituiscono la base per lo sviluppo degli scenari multi-rischio. Ciascun parametro è stato rappresentato mediante cartografia raster elaborata in ambiente GIS, al fine di consentire un'analisi spaziale integrata e coerente

sull'intero territorio regionale. La pericolosità (H) è stata espressa attraverso sette cartografie tematiche, ciascuna classificata in base a tre livelli di criticità (da 1 a 3), come illustrato in Figura 2. Le tre categorie tematiche relative alla vulnerabilità ed esposizione – Vulnerabilità Ambientale e Paesaggistica (Ve/l), Vulnerabilità Socio-Insediativa (Vs/s) ed Esposizione (E) – sono state ulteriormente elaborate per costruire indici sintetici ($\Sigma Ve/l$, $\Sigma Vs/s$, ΣE).

Indice sintetico della Vulnerabilità paesaggistico-ambientale ($\Sigma Ve/l$)

Il risultato di questa procedura è una mappa sintetica dell'indice $\Sigma Ve/l$, costruita a partire dagli strati informativi relativi a: aree naturali protette, geositi, zone ecologicamente sensibili, aree verdi e forestali, corpi idrici interni e marini, e aree di pregio floristico e vegetazionale. La classificazione dell'indice $\Sigma Ve/l$ prevede una scala a più livelli che va da molto basso (0) a molto alto (valore massimo: 18), come riportato in Figura 51.

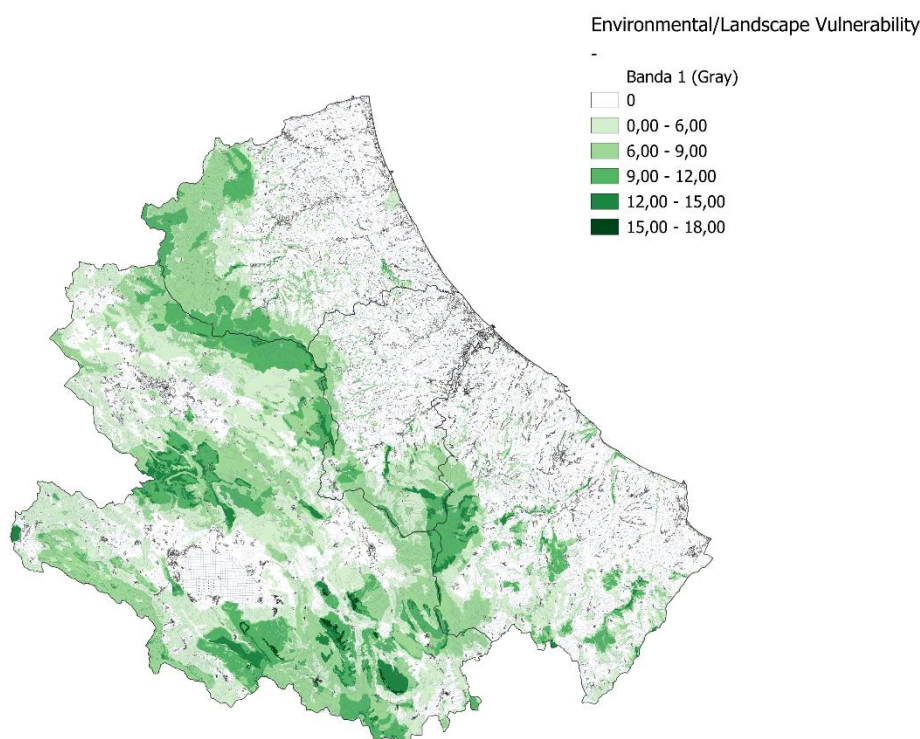


Figura 51: Cartografia dell'indice di Vulnerabilità paesaggistico- ambientale Vap

Indice sintetico della Vulnerabilità Socio-Insediativa ($\Sigma Vs/s$)

L'indice sintetico $\Sigma Vs/s$, rappresentato graficamente in Figura 52, integra i principali fattori che caratterizzano la vulnerabilità di natura antropica sul territorio regionale. In particolare, l'indice è stato costruito a partire dai seguenti strati informativi:

- aree archeologiche,
- aree urbane di valore storico,
- stato di conservazione del patrimonio edilizio,
- epoca di costruzione degli edifici,
- Indice di Vulnerabilità Sociale e Materiale (IVSM).

La combinazione di tali indicatori consente di sintetizzare in modo efficace la distribuzione spaziale della vulnerabilità socio-insediativa. L'indice $\Sigma V/s$ è stato classificato su una scala di valori che va da molto basso (0) a molto alto (valore massimo: 10), come mostrato in Figura 52.

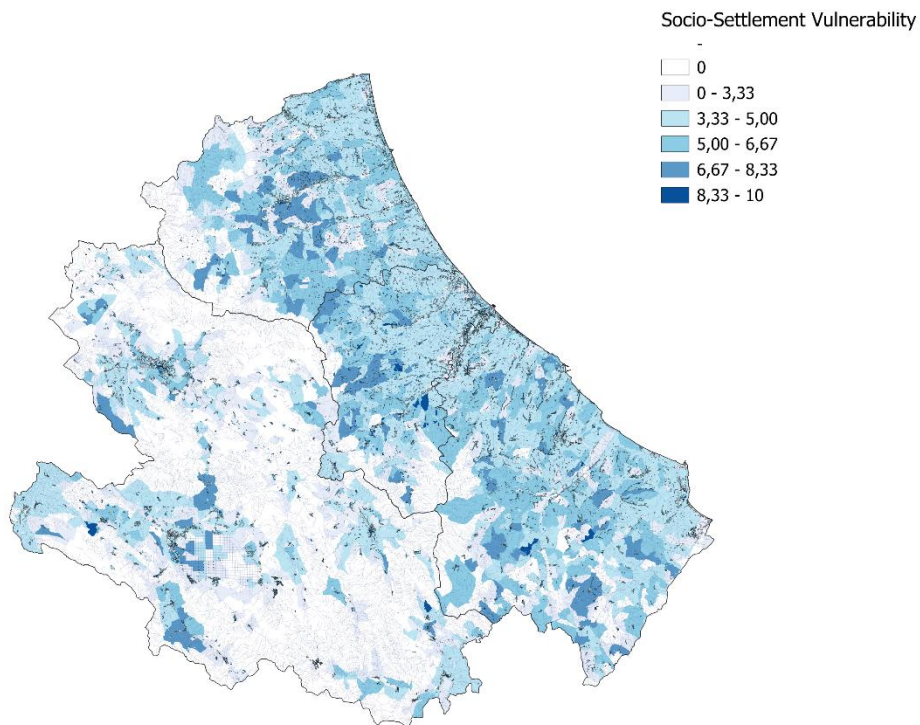


Figura 52: Cartografia dell'indice di Vulnerabilità socio-insediativa Vsi

Indice ΣE : sintesi cartografica dell'esposizione

La sintesi cartografica dell'indice ΣE , illustrata in Figura 53, integra i due principali fattori di esposizione individuati:

- densità di popolazione,
- consumo di suolo.

L'elaborazione di questi parametri, condotta a livello di sezione di censimento e trasposta su griglia regolare, ha permesso di definire un indicatore spaziale normalizzato. L'indice ΣE è stato classificato su una scala graduata con valori che variano da molto basso (0) a molto alto (valore massimo: 6), in coerenza con la metodologia adottata per le altre componenti di rischio ($\Sigma Ve/l$ e $\Sigma Vs/s$).

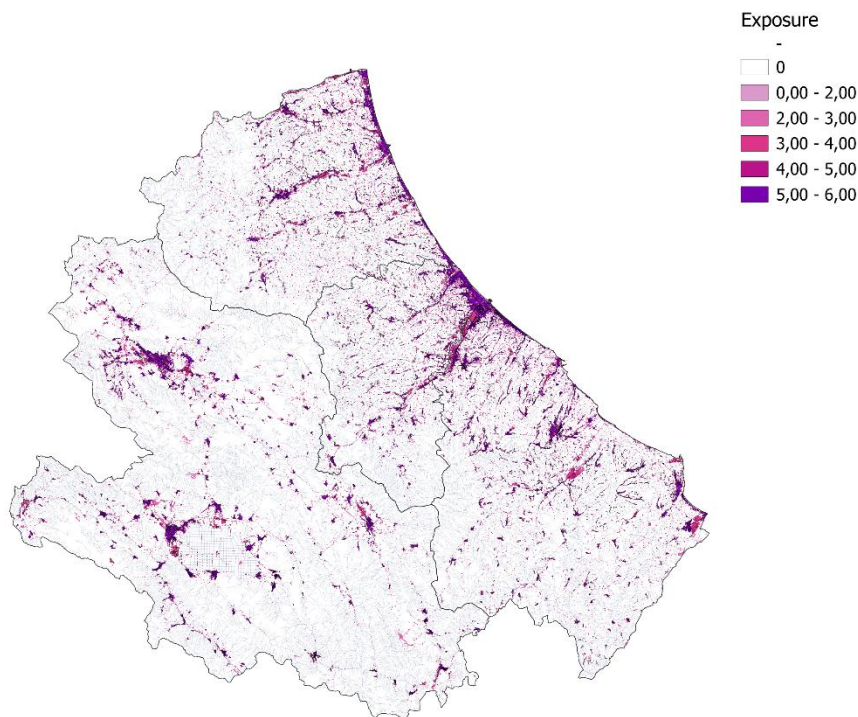


Figura 53: Cartografia dell'indice sintetico di Esposizione - ΣE

Tali indici sono stati generati sovrapponendo i corrispondenti indicatori tematici su una griglia modulare che copre l'intero territorio regionale. Questi sono stati analizzati a livello spaziale, riprodotti come cartografia raster con una griglia costituita da celle (pixel) di 40x40 metri. Ogni cella contiene i tre livelli qualitativi, basso, medio, alto, in riferimento ai rispettivi valori numerici, noti come pesi. Questi ultimi sono comunemente individuati come 0,3= basso, 0,6= medio, 1= alto. Per ottenere un'analisi spaziale omogenea degli indicatori complessivi si è effettuata una sovrapposizione cartografica iniziale tra $\Sigma Ve/l$ e ΣE , ottenendo dei valori discretizzati complessivi di ogni cella rispetto alla vulnerabilità paesaggistico- ambientale, ed un' analisi complessiva tra $\Sigma Vs/s$ e ΣE per una quadro relativo alla vulnerabilità sociale, ottenendo una rappresentazione in valori inizialmente da molto basso a molto alto,

e infine riconducibile alle tre classi finora citate (basso-medio-alto). Questi indicatori risultanti, con valori discretizzati delle celle saranno relazionati alla combinazione di pericolosità selezionate secondo le informazioni riportate nel Piano regionale di Protezione Civile della regione Abruzzo. In questo contesto le combinazioni di multi-rischio analizzate sono state selezionate in relazione al Piano Nazionale di Soccorso di Rischio Sismico, analizzando quindi eventi dei rischi sismo indotti, e in riferimento alla vulnerabilità socio insediativa. Ciò non toglie che grazie alla flessibilità e replicabilità dello studio queste analisi possano essere analizzate individuando le combinazioni tra altre pericolosità non approfondite in questa sede.

I Multi-Hazard selezionati per la definizione degli Hotspot territoriali:

1. Sismico + Idrogeologico = pericolosità sismica e idrogeologica, frane sismo indotte
2. Sismico+ Valanghivo= pericolosità sismica e valanghiva, valanghe sismo indotte
3. Sismico + Maremoto = pericolosità sismica e da maremoto, maremoto sismo indotto
4. Sismico + Dighe= pericolosità sismica e collasso di dighe, collasso sismo indotto.

Sono state così estrapolate quattro cartografie raster di multi-hazard, che sono state ulteriormente sovrapposte con gli scenari precedenti di Vulnerabilità ed Esposizione $\Sigma V_s/s$ e ΣE (Figure 54,55,56,57). Il risultato considerato valido per la identificazione dei valori basso, medio, alto di ogni pixel è quello che ha come condizione obbligatoria la compresenza dei tre elementi (H,V,E) necessari alla definizione di Rischio, le aree che non hanno rispettato questa condizione di copresenza sono state considerate nulle.

Le condizioni necessarie sono state:

1. $\Sigma V_{s/s}$ e $\Sigma E + MH_{\text{sismico/idrogeologico}}$
2. $\Sigma V_{s/s}$ e $\Sigma E + MH_{\text{sismico/valanghivo}}$
3. $\Sigma V_{s/s}$ e $\Sigma E + MH_{\text{sismico/maremoto}}$
4. $\Sigma V_{s/s}$ e $\Sigma E + MH_{\text{sismico/Dighe}}$

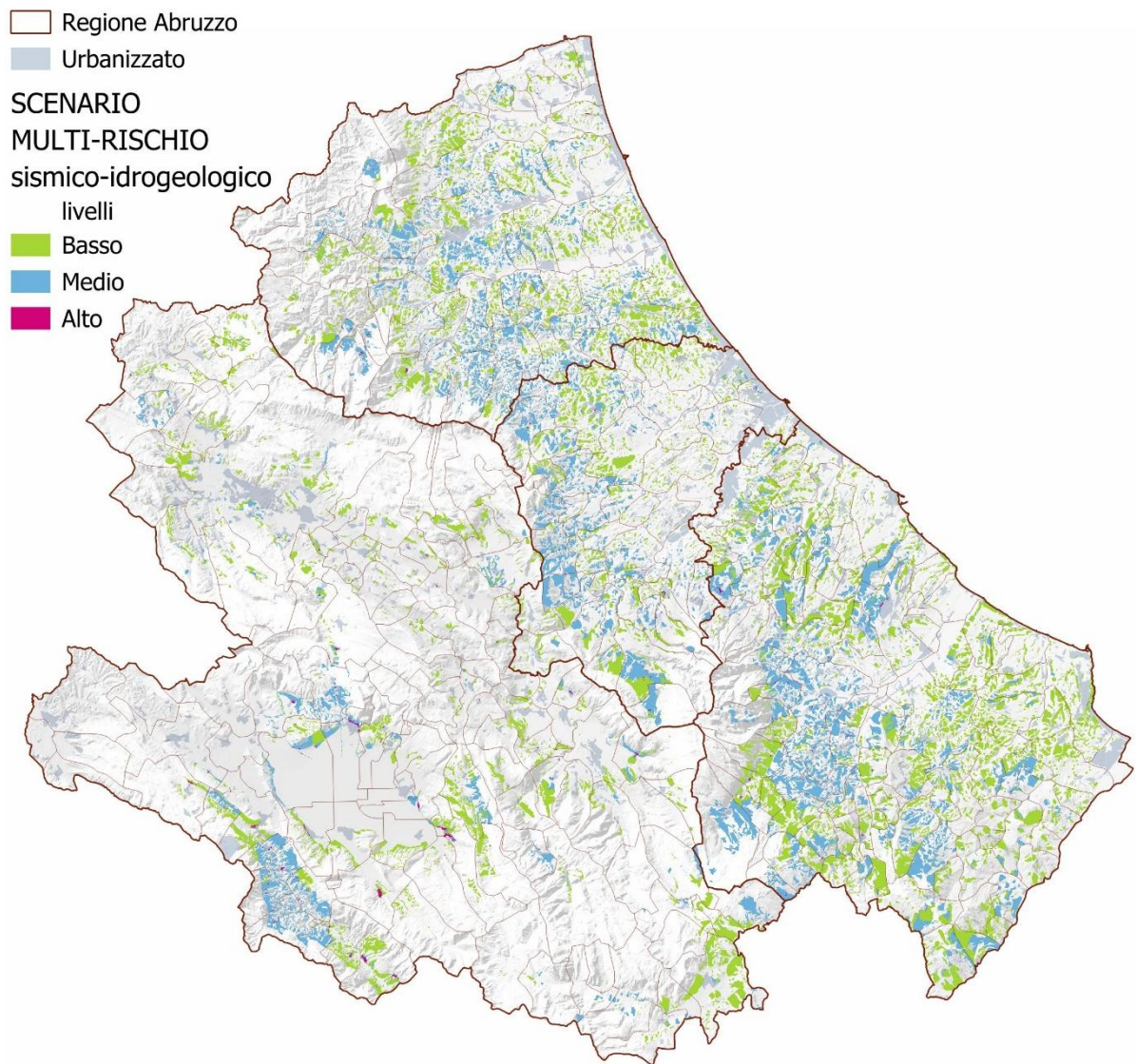


Figura 54: scenario M-R. ΣV s/s + ΣE + MH sismico/ idrogeologico

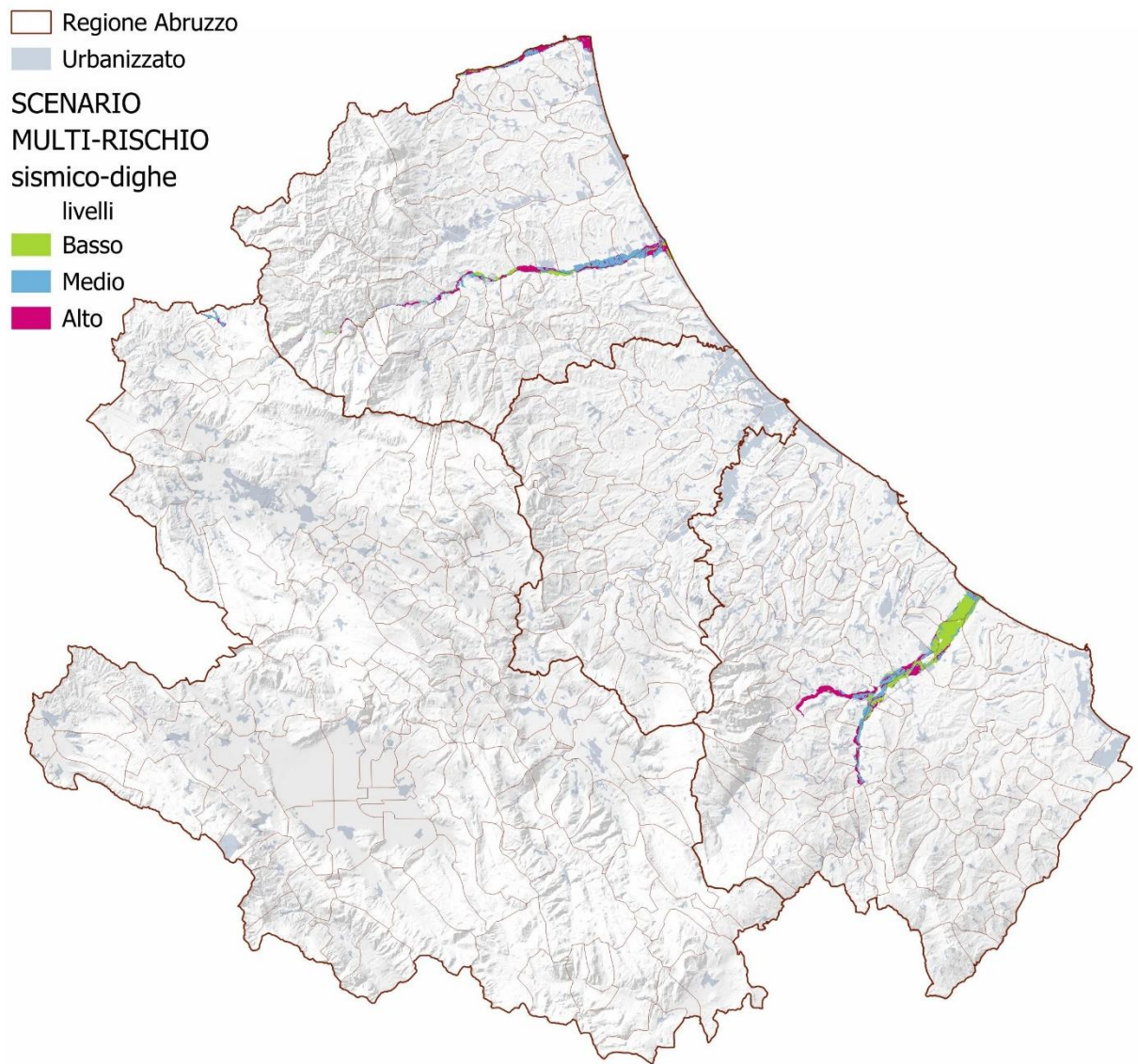


Figura 55: scenario M-R. ΣV s/s + ΣE + MH sismico/ dighe

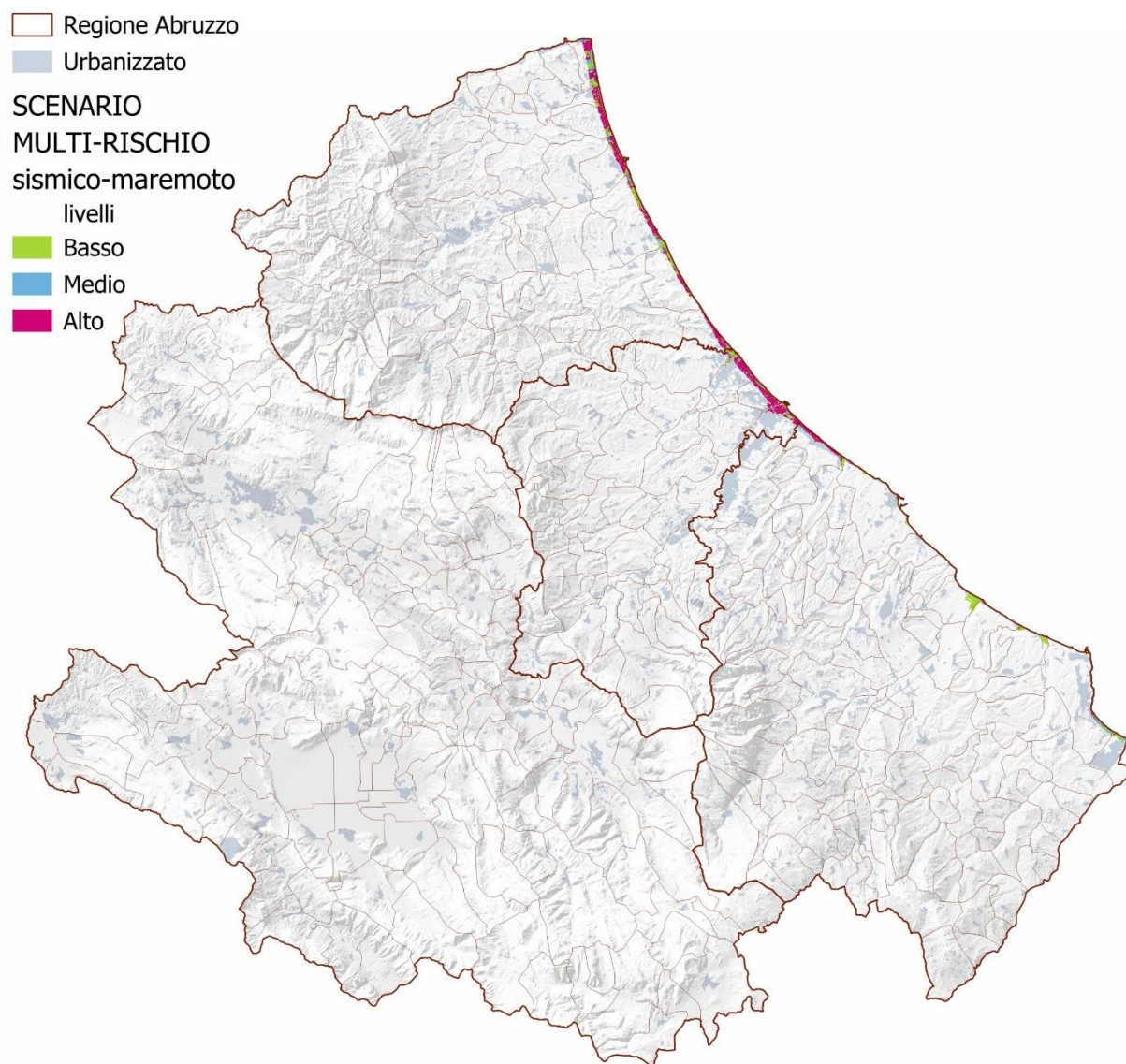


Figura 56:: scenario M-R. ΣV s/s + ΣE + MH sismico/ maremoto

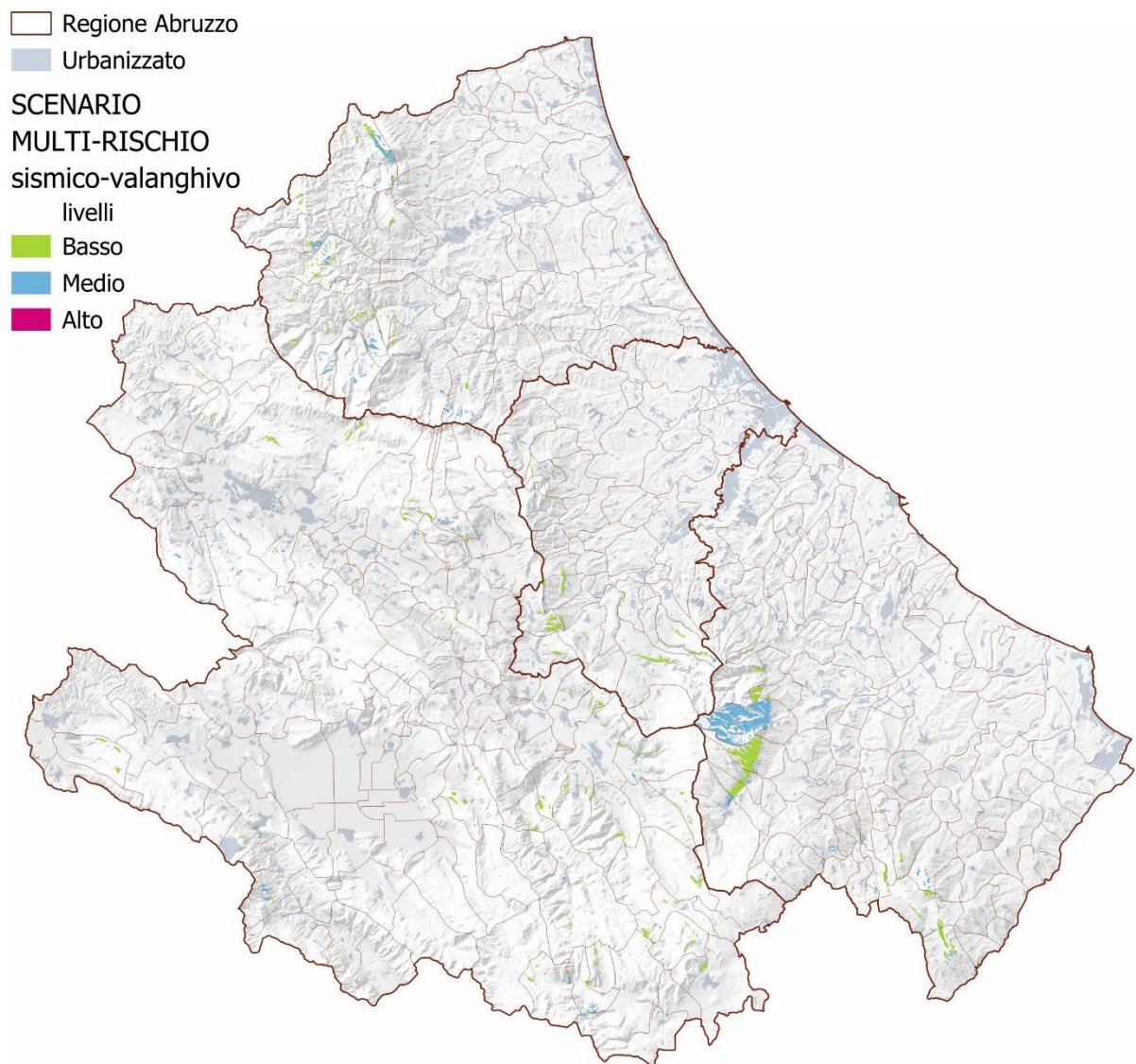


Figura 57: scenario M-R. Σ s/s + Σ E + MH sismico/ valanghivo

DRA-FASE 3

GLI HOTSPOT TERRITORIALI

La sovrapposizione degli scenari precedentemente elaborati ha fornito una mappa complessiva delle aree potenzialmente esposte, fornendo una cartografia raster rappresentativa degli Hotspot, Figura 58, per cui ogni pixel della griglia 40mx40m, conterrà al suo interno dei valori non solo del singolo rischio ma anche, qualora ci fosse, della concomitanza del M-R, classificati in termini semi-qualitativi con i livelli basso, medio, alto.

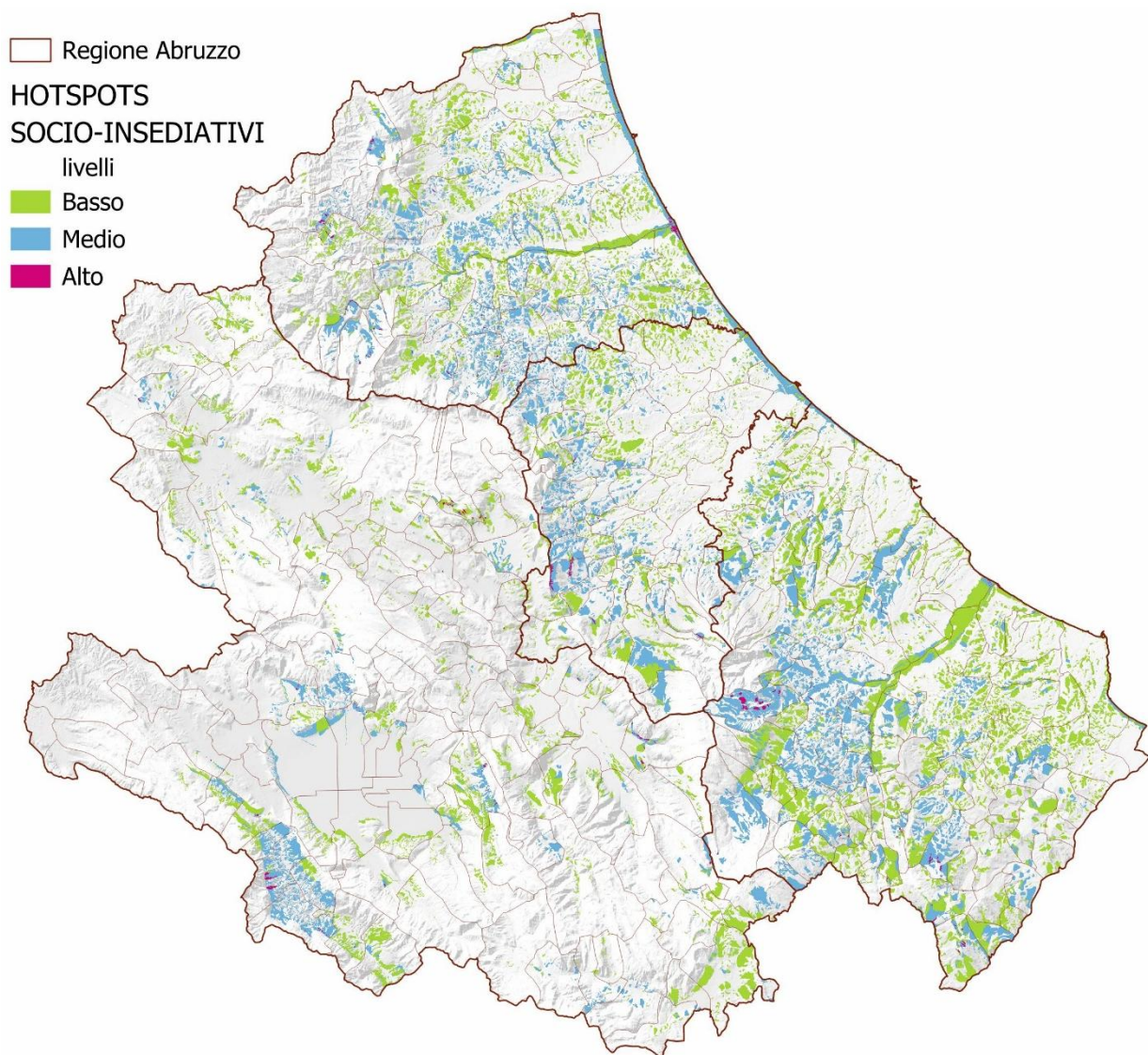


Figura 58: Cartografia Hotspot di rischio

Come anticipato in precedenza, per ottenere un riscontro degli hotspot in relazione alla pianificazione territoriale attuale e soprattutto a quella prevista, questi sono stati ulteriormente confrontati con il mosaico di PRG della regione Abruzzo al 2010, come mostrato in Figura 59. Inoltre per una maggiore lettura, a scala territoriale, il livello di multirischio è stato stimato mediante aggregazione a scala comunale degli scenari ottenuti tramite statistiche zonali, classificando i comuni in base al numero di rischi compresenti (1- 2 - =>3) e ne è stato individuato uno che sarà utilizzato al punto 6.4. come esempio per l'applicazione delle Azioni.

NUMERO DI RISCHI PRESENTI

- 1
- 2
- =>3

COMUNI PER NUMERO DI RISCHI PRESENTI

- 1
- 2
- =>3
- PRG-2010

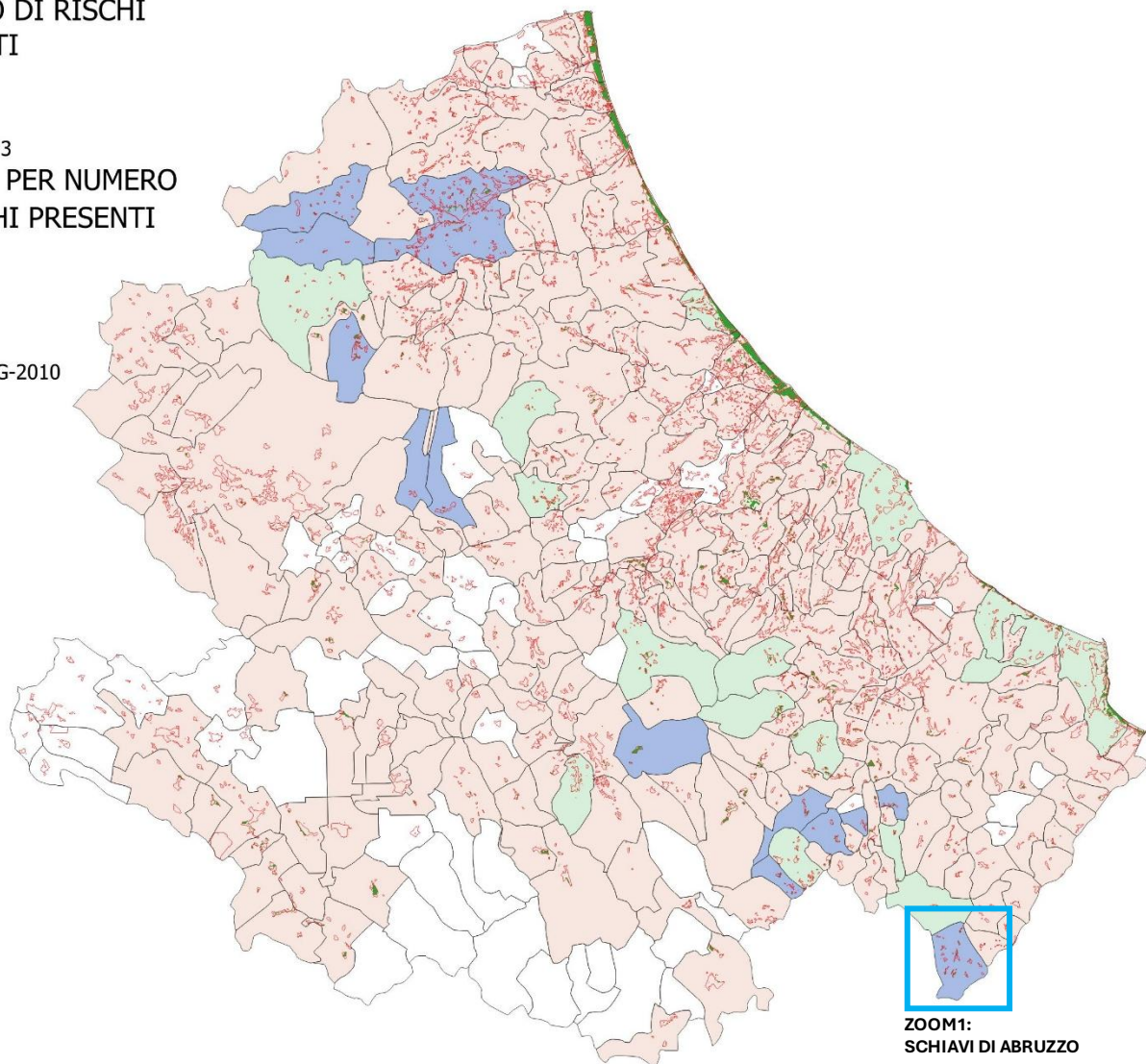


Figura 59: Cartografia raster hotspot in relazione alla pianificazione, PRG

6.3.3.1 L'automazione dell'algoritmo del Multi-Rischio. Il contributo del gruppo NHa- BSC

Tutto il lavoro dalla raccolta dati all'individuazione degli Hotspot è stata fatta manualmente, attraverso l'utilizzo di dati statici ottenuti da open data, regione Abruzzo e con il software Q-gis, e chiaramente è stato un processo che ha impiegato molto tempo. Attraverso la collaborazione con BSC, si è tentato di creare un codice Python che permettesse di seguire i processi sviluppati e codificarli utilizzando gli stessi dati. Si è sviluppato uno pseudocodice in grado di automatizzare i processi dall'individuazione dei multi rischi alla definizione degli Hotspot. Questo è un inizio di quello che potrebbe essere il sistema più complesso e totale a cui dovrebbe giungere il prototipo di RDT. Rendere l'intero processo automatizzato permetterebbe di aggiornare i dati in output quasi in tempo reale in relazione alle modifiche apportate ai dati in entrata, velocizzando i processi di definizione di scenari, di hotspot e delle decisioni da prendere in merito alle azioni operative, che si adattano di volta in volta. Qui in Figura 60 si riporta lo schema di processo dello pseudo-codice:

RISK KNOWLEDGE FRAMEWORK

SCENARIOS

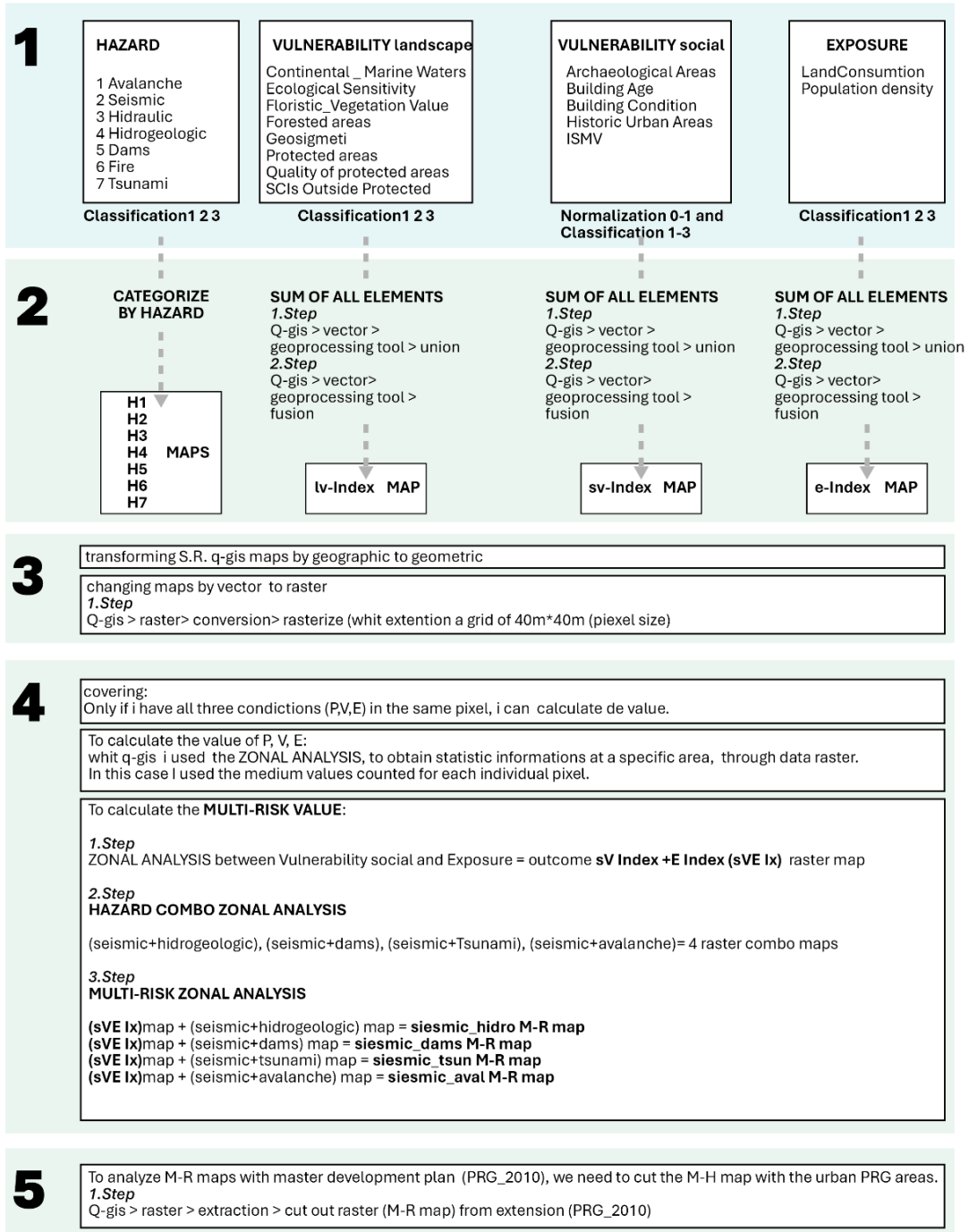


Figura 60:schema del processo del codice di automazione Python per la definizione del M-R

Questo repository contiene una pipeline di elaborazione geospaziale per creare raster aggregati di pericoli, esposizione e vulnerabilità su una risoluzione di griglia fissa e per produrre output GeoTIFF multibanda ritagliati da PRG per analisi a valle (ad esempio mappatura del rischio, pianificazione territoriale o supporto decisionale).

La pipeline è progettata per contesti multi-rischio e attualmente si concentra sul rischio sismico come rischio di base, combinato con altri rischi e livelli di esposizione/vulnerabilità, nella Tabella 39 è riportata la panoramica del flusso di lavoro, mentre nella Tabella 40 è descritto lo pseudo-codice.

PANORAMICA DEL FLUSSO DI LAVORO
High-level steps:
1. Recupera i dati SHP e rasterizza tutti i livelli in una griglia di 40 m × 40 m .
2. Eseguire due pipeline parallele :
2.1 Pericoli
- Calcola i valori medi del raster sismico combinato con altri pericoli
- Produrre 4 file raster di pericolo
2.2 Esposizione + Vulnerabilità
- Somma elementi di esposizione/vulnerabilità → 3 file raster
- Calcola gli indici medi di esposizione/vulnerabilità → 2 file raster
3. Ritaglia i raster di esposizione/vulnerabilità sui poligoni PRG preservando i valori di pericolosità
- Output 3 file raster ritagliati con PRG
4. Stack output in GeoTIFF multibanda
- Un file multibanda per il paesaggio (LVE)
- Un file multibanda per social (SVE)

Tabella 39: Flusso di lavoro dello pseudocode Python

KEY STAGES	DESCRIPTION	PSEUDO CODE
1. Load and rasterize shapefiles	All vector inputs are rasterized to a common grid with a target resolution of 40 meters.	<pre>shapefiles = load_shapefiles(shapefile_paths, target_resolution)</pre>
2. Hazard processing	<ul style="list-style-type: none"> • Uses seismic hazard as the base layer • Aggregates additional hazards: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Avalanche ◦ Dams ◦ Tsunami ◦ Hydrogeological <p>The output is a dictionary of hazard rasters aligned on the same grid.</p>	<pre>hazard_rasters = create_seismic_raster(shapefiles, ["avalanche", "dams", "tsunami", "hydrogeological"], base_hazard="seismic")</pre>
3. Exposure & Vulnerability indices	<p>LVE: Landscape Vulnerability & Exposure index</p> <p>SVE: Social Vulnerability & Exposure index</p> <p>Each index is computed from multiple rasterized input layers using sum and mean aggregation rules.</p>	<pre>lve_index, sve_index = create_vulnerability_rasters(shapefiles)</pre>
4. Hazard × Vulnerability interaction	<p>Produces combined Hazard × Vulnerability rasters for:</p> <p>Landscape (LV) Social (SV)</p>	<pre>lv_hazards = create_seismic_vulnerability_raster(hazard_rasters, lve_index) sv_hazards = create_seismic_vulnerability_raster(hazard_rasters, sve_index)</pre>
5. PRG-based clipping	Each raster is clipped using PRG polygons, producing per-PRG outputs while preserving hazard values.	<pre>lv_outputs = cut_rasters(shapefiles, lv_hazards) sv_outputs = cut_rasters(shapefiles, sv_hazards)</pre>
6. Multiband GeoTIFF export	<p>Final outputs:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ landscape_multiband.tif ◦ social_multiband.tif <p>Each band corresponds to a specific hazard or PRG-clipped combination.</p>	<pre>lv_stacked, band_names = stack_arrays_multiband(lv_outputs) save_multiband_tif(lv_stacked, band_names, "landscape") sv_stacked, band_names = stack_arrays_multiband(sv_outputs) save_multiband_tif(sv_stacked, band_names, "social")</pre>

Tabella 40: Pseudocode Python

6.4 IL DRM - FASE 4:

IL SET DI AZIONI PER IL RECUPERO DEGLI HOTSPOT

La Fase 4 riguarda l'individuazione di azioni strategiche di recupero pre-disastro nelle aree Hotspot, cioè in quelle aree in cui è presente il multi-rischio con un livello che può essere considerato molto elevato. A fianco a tali azioni, la Fase 4 determina anche la Capacità di Risposta del sistema di protezione civile al verificarsi di un evento, sempre nelle aree Hotspot. Nel quadro del Disaster Risk Management, le azioni operative di riduzione del rischio si articolano tradizionalmente in misure strutturali e misure non strutturali, entrambe fondamentali per affrontare in modo integrato la complessità dei rischi naturali. Le azioni strutturali comprendono interventi fisici e infrastrutturali finalizzati alla riduzione diretta della pericolosità o della vulnerabilità come ad esempio le opere di difesa idraulica, il consolidamento dei versanti, i sistemi di contenimento delle frane, l'adeguamento sismico degli edifici, la realizzazione di infrastrutture resilienti. Tali misure agiscono prevalentemente sulla componente fisica del rischio e richiedono investimenti rilevanti e tempi di realizzazione medio-lunghi, ma risultano essenziali per ridurre in modo duraturo l'esposizione di persone e beni (UNDRR, 2015; ISPRA, 2021).

Le azioni non strutturali rivestono un ruolo altrettanto strategico e comprendono l'insieme delle politiche, degli strumenti normativi e delle pratiche operative che mirano a ridurre il rischio senza ricorrere a opere fisiche. Rientrano in questa categoria ad esempio la pianificazione territoriale e urbanistica orientata alla prevenzione, i sistemi di allertamento precoce, i piani di Protezione Civile, le attività di informazione e la formazione della popolazione, le esercitazioni, le misure di monitoraggio e controllo continuo del territorio. Tali azioni incidono in modo significativo sulla vulnerabilità e sulla capacità di risposta, rafforzando la resilienza dei sistemi territoriali e sociali (Protezione Civile, 2023; UNDRR, 2015). Con la Figura 61 si riportano alcune Azioni classificate per tipo di rischio.

	RISCHIO	AZIONI		FONTI
		STRUTTURALI	NON STRUTTURALI	
AZ_s_S	sismico	<ul style="list-style-type: none"> Nuova edificazione antisismica secondo NTC Adeguamento/miglioramento sismico edifici esistenti Protezione infrastrutture critiche Microzonazione e interventi su terreni instabili 	<ul style="list-style-type: none"> Pianificazione urbanistica basata su microzonazione Incentivi finanziari e normative Educazione, piani comunali, esercitazioni Riduzione vulnerabilità socio-insediativa 	DPC OCDPC 978/2023; NTC 2018; INGV; Sendai 2015-2030
AZ_ns_S				
AZ_s_M	da maremoto	<ul style="list-style-type: none"> Difese costiere e barriere Edifici per evacuazione verticale Protezione infrastrutture costiere 	<ul style="list-style-type: none"> Mappe di inondazione costiera Sistemi di allarme precoci Piani di evacuazione e informazione 	SiAM INGV-DPC; JRC 2021 Tsunami Guidelines
AZ_ns_M				
AZ_s_F	idrogeologico	<ul style="list-style-type: none"> Argini e difese spondali Casse di espansione Sistemazioni idraulico-forestali Stabilizzazione versanti 	<ul style="list-style-type: none"> Pianificazione di bacino e PAI Monitoraggio e allerta Delocalizzazione in aree a rischio Partecipazione comunitaria 	ISPRA Inventario frane; Autorità bacino; DPC
AZ_ns_F				
AZ_s_Id	idraulico	<ul style="list-style-type: none"> Argini e difese spondali Casse di espansione Bacini laminazione Infrastrutture verdi urbane 	<ul style="list-style-type: none"> PAI e pianificazione bacino Monitoraggio e allerta Delocalizzazioni pianificate 	ISPRA 2022 Dissesto; Direttiva Alluvioni UE 2007/60/CE
AZ_ns_I				
AZ_s_V	valanghivo	<ul style="list-style-type: none"> Barriere fermaneve Dighe di deviazione Gallerie antivalanga Rimboschimento protettivo 	<ul style="list-style-type: none"> Catasto valanghe Chiusura preventiva piste/strade Bollettini pericolo 1-5 	AINEVA; Linee guida nazionali 2024
AZ_ns_V				
AZ_s_D	da dighe	<ul style="list-style-type: none"> Adeguamento corpo diga e scarichi Protezione infrastrutture di valle Riallocazione funzioni strategiche 	<ul style="list-style-type: none"> Monitoraggio continuo e ispezioni Piano sicurezza diga Piano emergenza diga (PED) e allertamento 	DPC; ICOLD; UE
AZ_ns_D				
AZ_s_I	da incendi	<ul style="list-style-type: none"> Fasce parafuoco Adeguamento edifici WUI Buffer zone e viabilità d'evacuazione 	<ul style="list-style-type: none"> Indici pericolo e sorveglianza Piani AIB e formazione Evacuazione WUI e tutela fragilità 	DPC Piano AIB; FAO; UNDRR
AZ_ns_I				

Figura 61: Azioni secondo il tipo di rischio

Nel caso specifico del progetto di ricerca si è quindi deciso di relazionare le azioni individuate nella Fase 4 del modello RDT-PRGR con le fasi operative della Protezione Civile e con gli Obiettivi

dell'Agenda 2030, evidenziando il contributo delle misure strutturali e non strutturali alla riduzione della vulnerabilità e dell'esposizione, al potenziamento della capacità di risposta e alla resilienza dei sistemi territoriali, Tabella 41.

RDT-PRGR	AZIONE	CARATTERISTICA	OBIETTIVO	FASE	codice SDG
Fase 4 – Set di azioni	Strutturale	Adeguamento e miglioramento sismico del patrimonio edilizio	Riduzione vulnerabilità fisica ed esposizione	Pre-disastro	SDG 11
	Strutturale	Consolidamento di versanti instabili	Riduzione vulnerabilità territoriale	Pre-disastro	SDG 13
	Strutturale	Opere di difesa idraulica e fluviale	Riduzione esposizione a eventi alluvionali	Pre-disastro	SDG 11
	Strutturale	Infrastrutture critiche resilienti (ospedali, viabilità)	Continuità dei servizi essenziali	Pre / Post	SDG 9
Fase 4 – Set di azioni	Non strutturale	Pianificazione territoriale orientata alla prevenzione	Riduzione esposizione insediativa	Pre-disastro	SDG 11
	Non strutturale	Piani di Protezione Civile	Rafforzamento capacità di risposta	Pre-disastro	SDG 11
	Non strutturale	Sistemi di allertamento precoce	Riduzione perdite umane	Pre / Emergenza	SDG 13
	Non strutturale	Informazione e formazione della popolazione	Riduzione vulnerabilità sociale	Pre-disastro	SDG 4
Fase 4 – Capacità di risposta	Operativa PC	Attivazione COC / CCS	Gestione coordinata dell'emergenza	Emergenza	SDG 16
	Operativa PC	Assistenza alla popolazione	Tutela della vita e salute	Emergenza	SDG 3
	Operativa PC	Ripristino funzionale e rientro	Riduzione tempi di recovery	Post-emergenza	SDG 11
Fase 4 – Pre-disaster recovery	Strategica	Pre-disaster recovery planning	Riduzione impatti futuri e tempi di recupero	Pre-disastro	SDG 11
Fase 4 – Governance RDT	Toolkit operativo	scenari ↔ hotspot ↔ codifica azioni ↔	Supporto decisionale integrato	Tutte	SDG 17

Tabella 41: Relazione tra azioni del PRGR, Agenda 2023, Protezione Civile

Le azioni strategiche individuate sono intese come azioni elementari, ciascuna delle quali può essere associata a livelli di priorità differenti, al fine di graduare nel tempo e nello spazio il sistema degli interventi strutturali e non strutturali in funzione della gravità del rischio e delle risorse disponibili. All'interno degli Hotspot di multi-rischio, tali azioni elementari non vengono considerate isolatamente, ma sono combinate tra loro secondo logiche differenziate, coerenti con la natura multi-rischio degli scenari analizzati, consentendo di costruire

pacchetti di intervento integrati e mirati alle specifiche criticità territoriali. Tra queste alcune sono state selezionate e applicate, con un approccio teorico, ad un Hotspot individuato come caso esemplificativo tra quelli emersi nella Fase 3 del PRGR, come mostrato nelle Figura 62, 63.

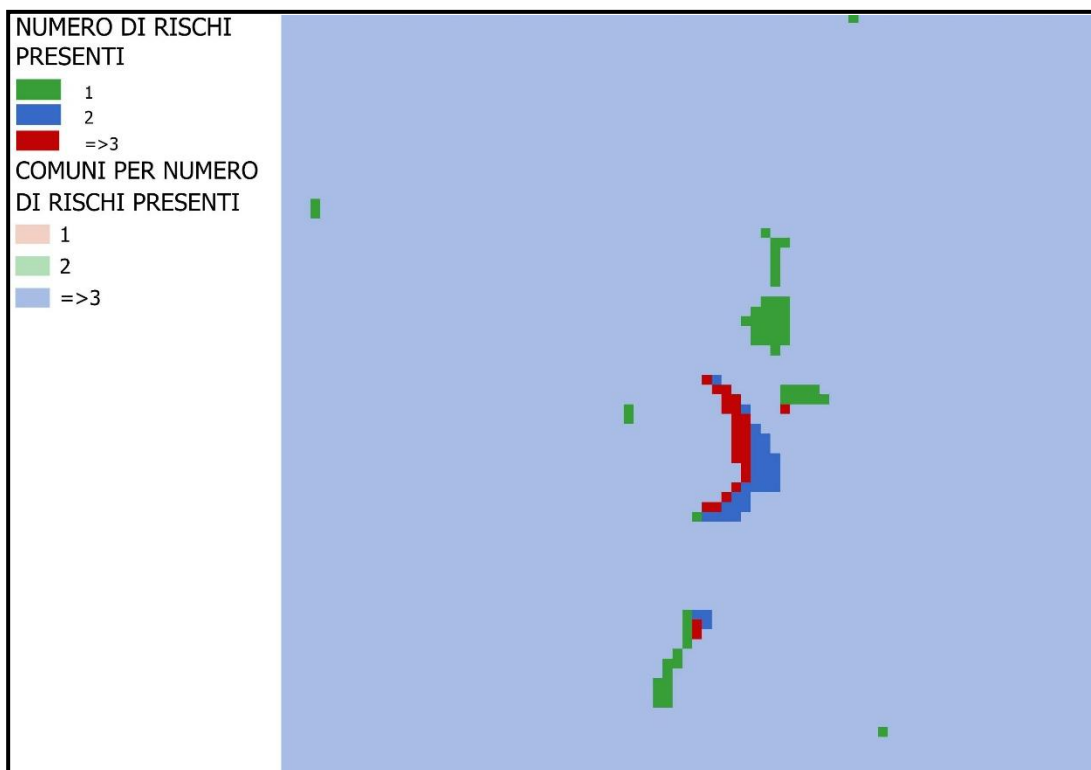


Figura 62: Hotspot di intervento, Schiavi di Abruzzo, Chieti

In questa fase, prima di applicare le Azioni, dovrebbe essere analizzata e verificata la presenza del fattore Capacità di Risposta C del territorio analizzato, indice approfondito nel paragrafo 3.1, , che potrebbe o no ridurre l’impatto sulle comunità e o migliorare la reazione di risposta. In questo contesto, per assenza di dati ufficiali relativi ai casi analizzati, viene considerato come fattore assente, quindi da considerare.

Il comune preso d’esempio è Schiavi di Abruzzo in provincia di Chieti. È un comune di 620 abitanti al confine con la regione Molise. Dagli Hotspot finali è emersa, sul territorio, una concomitanza di rischi sismico, valanghivo e idrogeologico e le azioni sono state definite attraverso i codici della figura 61 e della Tabella 41. Da notare che in questo contesto non è stata considerata l’intensità dei singoli rischi, ma le azioni scelte sono state selezionate in base alla presenza o no del rischio stesso, dando priorità alla compresenza di questi rispetto al loro singolo contributo.

Pertanto, se ci riferiamo al multi-rischio, dobbiamo anche dire che le azioni per la sua riduzione sono l'esito di una combinazione di azioni strategiche elementari, combinate tra loro.

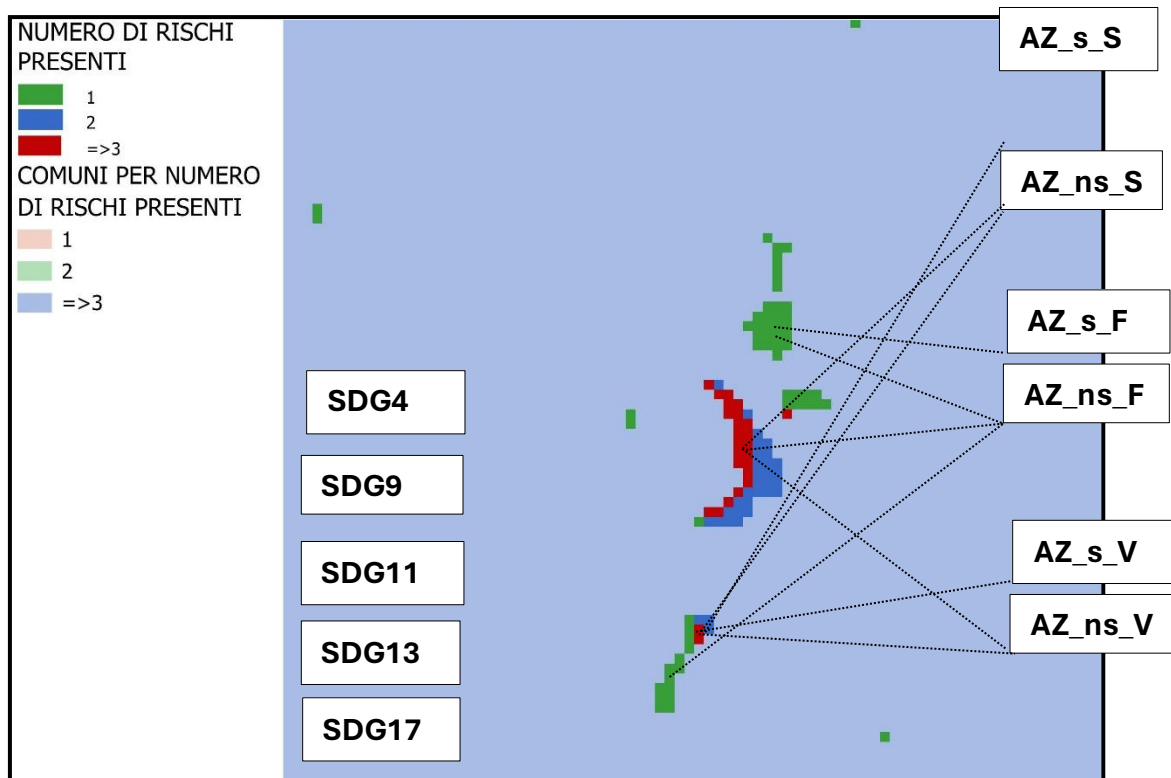


Figura 63: Hotspot con interventi, Schiavi di Abruzzo, Chieti

In questa fase il Regional Digital Twin – RDT, se pienamente implementato, può acquisire la capacità di individuare in modo mirato le azioni più appropriate in funzione degli scenari di rischio e degli Hotspot analizzati. Le procedure relative al set di azioni del PRGR possono essere quindi codificate attraverso un toolkit operativo, costruito sulla base dell’architettura del RDT, che consente di tradurre in modo sistematico gli esiti delle analisi in indicazioni operative. Tale strumento è progettato per agevolare l’utilizzo dei risultati anche da parte delle amministrazioni competenti e degli stakeholder locali, favorendo un’applicazione concreta, replicabile e coerente delle misure di prevenzione e gestione del rischio. In questa prospettiva, la codificazione delle azioni di recupero pre-disastro, intese come azioni strategiche elementari, risulta strettamente connessa alla codificazione del multi-rischio. All’interno di una logica di RDT, tale relazione consente di associare in modo diretto specifiche tipologie di rischio e configurazioni di Hotspot a corrispondenti pacchetti di azioni e a livelli di priorità differenziati, che possono essere aggiornati nel

tempo. Ciò permette di passare da un approccio statico alla pianificazione a un sistema dinamico di supporto alle decisioni, in cui la selezione e la gerarchizzazione delle azioni avvengono in funzione dell'evoluzione degli scenari di rischio e delle condizioni territoriali, rafforzando l'efficacia delle strategie di prevenzione, mitigazione e recupero.

6.5 LE POTENZIALITÀ DEL RDT PER LA PIANIFICAZIONE DEL RISCHIO

Un Regional Digital Twin - RDT potenziato rappresenta un avanzamento significativo come strumento di supporto alla pianificazione del rischio a scala territoriale e regionale. Esso consente infatti di rendere operativa e dinamica la struttura di un Piano Regionale di Gestione del Rischio - PRGR, integrando in modo sistematico i processi di Disaster Risk Assessment - DRA e Disaster Risk Management - DRM all'interno di un unico framework digitale. In questo quadro, il RDT supera l'approccio tradizionale alla rappresentazione del rischio come condizione statica, interpretandolo invece come un processo dinamico, risultante dall'interazione continua tra pericolosità, vulnerabilità, esposizione e capacità di risposta, tutte componenti soggette a variazioni nel tempo e nello spazio (Di Ludovico et al., 2020; Sacco et al., 2024). Per via della sua caratteristica aggiornabile, il RDT è in grado di integrare progressivamente nuovi dati e segnali di cambiamento, supportando una lettura evolutiva del rischio territoriale. Attraverso l'organizzazione strutturata del Sistema delle Conoscenze, il RDT integra dati multi-scala e multi-fonte relativi ai fenomeni naturali, ai sistemi ambientali e insediativi e alle componenti socio-economiche, costituendo una base informativa solida e coerente per la valutazione del rischio. Su questa base, la costruzione di Scenari di Multi-Rischio consente di analizzare la compresenza e l'interazione di più pericoli, evidenziando effetti cumulativi e concatenati che difficilmente emergono nelle analisi settoriali tradizionali (Poljanšek et al., 2017). La simulazione degli scenari di multi-rischio rafforza in modo significativo la dimensione previsionale e preventiva della pianificazione, consentendo di valutare l'evoluzione del rischio in relazione a differenti condizioni ambientali, climatiche e di uso del suolo. L'elaborazione di tali scenari permette quindi di individuare con maggiore precisione gli Hotspot Territoriali, ovvero quelle aree caratterizzate da livelli elevati e persistenti di rischio, in cui la sovrapposizione di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione rende

prioritari gli interventi di prevenzione e mitigazione. In una logica di RDT, gli hotspot non sono elementi statici, ma possono essere aggiornati dinamicamente in funzione delle variazioni delle condizioni territoriali, migliorando la capacità di anticipazione delle politiche di pianificazione. A partire dall'individuazione degli hotspot, il RDT supporta la definizione di un Set di Azioni Operative in linea con l'approccio del DRM, comprendente sia misure strutturali sia misure non strutturali di riduzione del rischio coerenti con l'Agenda 2030. Tali azioni possono essere selezionate, combinate e aggiornate in relazione ai livelli di rischio stimati, consentendo di collegare in modo diretto le analisi di rischio alle decisioni operative di prevenzione, mitigazione, preparazione e risposta. In questo senso, il RDT contribuisce a ridurre tempi e complessità dei processi di pianificazione tradizionali, favorendo un passaggio più rapido e informato dall'analisi all'azione e rafforzando il ruolo della pianificazione come strumento operativo e non solo conoscitivo. Nel contesto delle Smart Cities, il concetto di Digital Twin è oggi generalmente declinato come combinazione di più Digital Twins tematici – reti, energia, inquinamento, mobilità – all'interno dei quali il rischio di origine naturale rappresenta un tema centrale ma ancora poco strutturato, soprattutto alla scala territoriale e regionale. La letteratura scientifica sui Digital Twins applicati al rischio si concentra prevalentemente sulla gestione del rischio, in particolare nelle fasi di emergenza e in ambito urbano, mentre risultano limitati i contributi orientati alla pianificazione della gestione del rischio come processo integrato e continuo (Ariyachandra et al., 2023). Alcuni approcci recenti, come i Digital Risk Twins - DRT (Ghaffarian, 2025), enfatizzano l'integrazione delle dimensioni sociali, economiche, ambientali e istituzionali e un processo decisionale human-centered; tuttavia, anche in questi casi l'attenzione è rivolta principalmente alle fasi di preparazione, risposta e recupero, e non alla pianificazione del rischio rimane sullo sfondo. In questo quadro, il contributo della presente ricerca si colloca nel campo del Recovery Pre-Disaster Planning, proponendo un RDT orientato esplicitamente alla pianificazione del rischio come processo continuo. Il modello proposto integra in un unico framework le fasi pre-disastro, emergenza e post-disastro, superando la frammentazione tradizionale delle fasi operative e rafforzando il ruolo della pianificazione come elemento centrale della governance del rischio. Il RDT specializzato per la gestione e la pianificazione del rischio si configura quindi non solo come strumento di supporto decisionale, ma come una vera e propria infrastruttura digitale per la pianificazione integrata, capace di accompagnare nel tempo l'evoluzione dei sistemi territoriali e di rafforzarne la resilienza

nel lungo periodo. Inoltre, come è emerso dalla letteratura scientifica, manca in particolare un modello di UDT – RDT capace di supportare l'intero ciclo di vita dell'organismo urbano, dalla costruzione del quadro conoscitivo, all'analisi di scenario, alla definizione delle decisioni di piano, fino alla gestione, monitoraggio e valutazione nel tempo. In questo senso, risulta necessario sviluppare Digital Twins in grado di integrare tutte queste funzioni in un sistema coerente, dinamico e adattivo (Barresi, 2023; Caprari et al., 2022; Charitonidou, 2022), come schematizzato in Figura 64, dove la pianificazione diventa un elemento centrale di un sistema complesso e iterativo di verifica delle prestazioni territoriali.

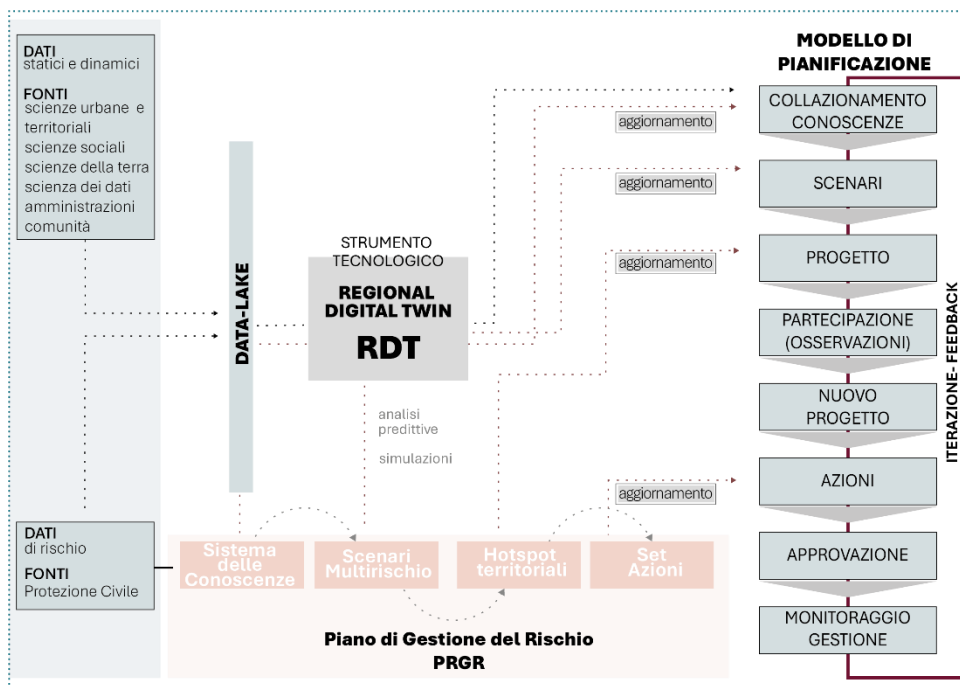


Figura 64: Schema RDT e Pianificazione

7. DISCUSSIONI

Nonostante la complessità dei temi affrontati, la presente ricerca ha inteso proporre un approccio metodologico volto a colmare, seppur in maniera ancora prevalentemente teorica e parziale, alcune delle principali lacune esistenti nell'impiego delle nuove tecnologie a supporto della pianificazione del rischio alla scala territoriale. Nel corso dello studio sono tuttavia emerse una serie di limiti strutturali e metodologici, che meritano di essere esplicitati e discussi criticamente, anche alla luce del dibattito scientifico esistente. Un

primo limite rilevante riguarda la disponibilità, accessibilità e qualità dei dati ufficiali utilizzati. La ricerca ha evidenziato come tali dati risultino spesso frammentati, non adeguatamente organizzati e, in diversi casi, non aggiornati, come nel caso di alcuni dataset socio-demografici di fonte ISTAT rispetto ai periodi di censimento. Questa condizione rappresenta una criticità ampiamente riconosciuta nella letteratura sul Disaster Risk Assessment e sulla pianificazione basata sui dati, in quanto incide direttamente sulla solidità delle analisi e sull'affidabilità dei processi decisionali supportati (Poljanšek et al., 2017; UNDRR, 2015). A tali difficoltà si affianca la complessità nel definire un linguaggio comune tra i diversi soggetti istituzionali e tecnici coinvolti nella valutazione e gestione del rischio. In ambiti specifici — come il rischio valanghivo o i rischi idraulico e idrogeologico, tradizionalmente afferenti alle ex Autorità di Bacino — persistono criteri, classificazioni e definizioni non pienamente omogenei tra enti e tra scale di pianificazione. Questa eterogeneità metodologica e terminologica rappresenta un limite strutturale per l'integrazione dei dati e per la costruzione di quadri interpretativi condivisi, soprattutto quando si opera in un'ottica di pianificazione territoriale integrata (Di Ludovico et al., 2020). Altra complessità riguarda l'uso potenziale dei big data e delle informazioni dinamiche, che nella presente ricerca non è stato possibile sperimentare in modo operativo. Sebbene tali dati offrano opportunità significative per il monitoraggio e l'aggiornamento in tempo quasi reale degli scenari di rischio, la letteratura evidenzia come il loro utilizzo sollevi importanti questioni legate alla governance dei dati, alla tutela dei diritti di cittadinanza, alla privacy e all'equità nell'accesso alle informazioni. Questi aspetti costituiscono un limite non solo tecnico ma anche etico e istituzionale, che impone cautela nell'integrazione dei big data all'interno di strumenti di pianificazione e di supporto decisionale (Kitchin, 2014; Townsend, 2013; UN-Habitat, 2020). Dal punto di vista metodologico, un limite significativo della ricerca è rappresentato dal fatto che l'approccio proposto è stato applicato a un solo caso studio. Di conseguenza, i risultati ottenuti non possono essere considerati pienamente verificati né tarati su contesti territoriali differenti, ciò potrebbe limitare la generalizzazione del modello e suggerendo la necessità di future applicazioni comparative su territori con caratteristiche fisiche, istituzionali e socio-insediative differenti (Yin, 2018). Un ulteriore limite, strettamente connesso alla natura innovativa del lavoro, riguarda il fatto che il Regional Digital Twin non è stato sperimentato come sistema operativo reale, ma è stato delineato principalmente a livello concettuale e metodologico, avvalendosi della correlazione tra dati, scenari e azioni. Questo limite

riflette una condizione più generale del panorama scientifico e applicativo: allo stato attuale, infatti, non esistono veri e propri Digital Twin orientati alla pianificazione territoriale del rischio, mentre le esperienze analizzate in letteratura si configurano prevalentemente come GIS avanzati, sistemi di simulazione o piattaforme di supporto alla gestione operativa del rischio, in particolare nelle fasi di emergenza (Lagap, 2024). In questo contesto, il contributo della ricerca risiede proprio nell'aver tratteggiato un modello teorico di RDT orientato alla pianificazione, capace di integrare DRA e DRM in un unico framework coerente, e nel proporre il PRGR come toolkit metodologico potenzialmente utilizzabile come struttura di base del prototipo di RDT. Tale impostazione non elimina i limiti evidenziati, ma consente di affrontare in modo più strutturato le complessità proprie della gestione del rischio e dei processi di pianificazione, valorizzando la dimensione multirischio e la distinzione tra vulnerabilità paesaggistico-ambientale e socio-insediativa (Sacco et al., 2024). Il prototipo di RDT proposto si configura infine come una struttura aperta e incrementale, potenzialmente in grado di integrare in futuro dati sempre più complessi e dinamici, in particolare quelli legati agli effetti del cambiamento climatico. Esso potrebbe costituire un supporto concreto per gli enti coinvolti nei processi di pianificazione e per la Protezione Civile, a condizione di un'adeguata preparazione tecnica e istituzionale finalizzata a un utilizzo consapevole dello strumento. Allo stesso tempo, il RDT può rappresentare un valido ausilio per la comunicazione con gli stakeholder e per i modelli di partecipazione, rafforzando la trasparenza e la comprensione dei processi decisionali.

8. CONCLUSIONI

La ricerca presentata ha come obiettivo principale la definizione di un modello metodologico innovativo per la pianificazione territoriale del rischio, fondato sull'integrazione tra Regional Digital Twin - RDT e del Piano Regionale di Gestione del Rischio - PRGR. L'intento non è stato quello di sviluppare un semplice strumento di rappresentazione o simulazione del rischio, ma di proporre un framework concettuale e operativo in grado di supportare in modo strutturato i processi di Disaster Risk Assessment - DRA e Disaster Risk Management - DRM, rafforzando il ruolo della pianificazione come asse centrale della governance del rischio a scala regionale. Nel corso del dottorato, un contributo rilevante alla maturazione della ricerca è derivato dalle attività svolte all'estero, che hanno permesso un confronto con contesti territoriali, sistemi di Protezione Civile e approcci al rischio differenti da quello italiano. In particolare, il primo periodo all'estero presso la Facultad de Planeación Urbanay Regional della Universidad Autónoma del Estado de México - UAEMex ha consentito di approfondire il tema del rischio in un contesto caratterizzato da elevata complessità e pluralità di pericoli, ampliando la comprensione dei modelli di pianificazione adottati in ambito internazionale. Il secondo periodo all'estero presso il Barcelona Supercomputing Center - BSC ha invece rafforzato le competenze legate all'elaborazione di scenari, all'automazione dei processi e alla formalizzazione di procedure, contribuendo allo sviluppo di uno schema logico-codificabile per l'individuazione degli hotspot di rischio. Dal punto di vista metodologico, la ricerca si fonda su una doppia struttura integrata. Da un lato, il PRGR fornisce l'impianto concettuale e procedurale per la lettura sistemica del rischio, articolata nelle fasi di costruzione del sistema delle conoscenze, definizione degli scenari di multi-rischio, individuazione degli hotspot e selezione di un set di azioni. Dall'altro lato, il RDT rappresenta l'infrastruttura digitale capace di rendere tale modello operativo, dinamico e aggiornabile nel tempo. L'integrazione tra queste due dimensioni consente di superare la tradizionale separazione tra analisi del rischio e decisione pianificatoria, proponendo un processo continuo che collega conoscenza, valutazione e azione. L'applicazione della metodologia è stata sperimentata attraverso un caso studio regionale, la Regione Abruzzo, scelto per la sua elevata esposizione a rischi naturali multipli e per la disponibilità di dati

istituzionali e collaborazioni con gli enti competenti. Il caso studio ha consentito di costruire un quadro conoscitivo multirischio coerente, di elaborare scenari integrati e di individuare hotspot territoriali prioritari, dimostrando la capacità del modello di supportare la lettura comparativa delle criticità e la definizione di strategie di intervento differenziate nello spazio. Evidenziando come un modello avanzato di RDT-PRGR possa essere in grado di, integrare dati eterogenei in un sistema coerente e replicabile, supportare la costruzione di scenari di multi-rischio e l'individuazione dinamica degli hotspot, collegare in modo diretto le analisi di rischio alla definizione di azioni strutturali e non strutturali, orientate alla prevenzione, mitigazione, preparazione e risposta; rafforzare la capacità di supporto alle decisioni per le amministrazioni pubbliche e i sistemi di Protezione Civile. Accanto ai risultati, la ricerca presenta tuttavia alcuni limiti rilevanti già affrontati nel paragrafo precedente. In primo luogo, l'applicazione della metodologia a un solo caso studio non consente una validazione completa del modello in contesti territoriali differenti. In secondo luogo, il Regional Digital Twin non è stato sperimentato come sistema operativo reale, ma è stato sviluppato prevalentemente a livello teorico e metodologico, anche in ragione del fatto che, allo stato attuale, non esistono veri e propri Digital Twin orientati alla pianificazione del rischio. Ulteriori limiti sono legati alla disponibilità e qualità dei dati e alla mancata integrazione operativa dei flussi informativi dinamici, che pongono anche questioni di governance e tutela dei diritti. Nonostante i limiti esposti, le evoluzioni future della ricerca potrebbero riguardare l'estensione del modello a più casi studio, per verificarne l'adattabilità e la robustezza; la sperimentazione concreta di un prototipo operativo di RDT, integrando dati dinamici e sensori IoT; l'approfondimento del ruolo del RDT nei processi di pre-disaster recovery planning; e lo sviluppo di strumenti di supporto alla partecipazione e alla comunicazione del rischio. In questa prospettiva, la ricerca pone le basi per un'evoluzione del Digital Twin da strumento di analisi a infrastruttura digitale per la pianificazione del rischio, capace di accompagnare nel tempo le trasformazioni dei territori complessi e di rafforzarne la resilienza, oltre che individuare e aggiornare continuamente un set integrato di azioni strutturali e non strutturali di mitigazione del rischio. Tali azioni, coerenti con i risultati delle analisi multirischio, possono essere orientate alla prevenzione, alla mitigazione, alla preparazione e alla risposta, rafforzando la capacità complessiva dei sistemi territoriali di affrontare eventi estremi. In questo modo, il RDT

diventa uno strumento di supporto concreto alle politiche pubbliche, in grado di dialogare con la pianificazione territoriale, i piani di protezione civile e le strategie di sviluppo regionale. Infine, il Regional Digital Twin si configura come un toolkit operativo non solo per le amministrazioni pubbliche e gli enti di protezione civile, ma anche per la cittadinanza. La possibilità di visualizzare scenari di rischio, comprendere le criticità del territorio e conoscere le strategie adottate contribuisce a rafforzare la trasparenza, la consapevolezza e la partecipazione nei processi decisionali. In questa prospettiva, il RDT non è soltanto uno strumento tecnico, ma un dispositivo abilitante per una gestione del rischio più condivisa, informata e orientata alla resilienza. In conclusione, la ricerca tenta di evidenziare come l'integrazione tra tecnologie ICT, Digital Twin e pianificazione territoriale possa aprire nuove prospettive per la gestione del rischio a scala regionale. Il RDT basato sul PRGR, in relazioni agli approcci di DRA e di DRM, rappresenta un contributo interessante sia dal punto di vista teorico sia operativo, offrendo un modello replicabile e adattabile a diversi contesti territoriali e ponendo le basi per futuri sviluppi nella pianificazione del rischio e nella governance dei territori complessi.

9. GLOSSARIO

Internet of Things – IoT

L'Internet of Things indica l'insieme delle tecnologie che permettono la connessione in rete di oggetti fisici, sensori e dispositivi intelligenti. Tali elementi sono in grado di raccogliere, trasmettere ed elaborare dati in modo automatico, consentendo il monitoraggio continuo di fenomeni ambientali, infrastrutturali e territoriali. Nel contesto del Regional Digital Twin, l'IoT rappresenta la principale fonte di dati dinamici utili al monitoraggio in tempo reale e all'aggiornamento degli scenari di rischio.

Artificial Intelligence – AI

L'Artificial Intelligence comprende l'insieme di teorie, metodi e tecnologie finalizzate allo sviluppo di sistemi informatici capaci di svolgere compiti che normalmente richiedono intelligenza umana, come il ragionamento, l'apprendimento, il riconoscimento di pattern e il supporto alle decisioni. Nei Digital Twin territoriali, l'AI consente di analizzare grandi quantità di dati eterogenei e di supportare processi decisionali complessi.

Machine Learning – ML

Il Machine Learning è un sottoinsieme dell'Artificial Intelligence basato su algoritmi che apprendono automaticamente dai dati. È utilizzato per classificazione, previsione e individuazione di relazioni non lineari. Nella pianificazione del rischio, il ML può supportare la costruzione di scenari e l'analisi delle interazioni tra pericolosità, vulnerabilità ed esposizione.

Deep Learning – DL

Il Deep Learning rappresenta un'evoluzione del Machine Learning basata su reti neurali profonde. È particolarmente efficace nell'elaborazione di immagini satellitari, dati LiDAR e grandi flussi sensoristici, risultando rilevante per l'analisi automatizzata dei fenomeni territoriali.

Big Data

Il termine Big Data si riferisce a dataset caratterizzati da elevato volume, velocità e varietà. Nel contesto della gestione del rischio, essi consentono una comprensione più dettagliata dei fenomeni complessi, ma pongono anche criticità legate a qualità, governance e tutela dei diritti.

Cloud Computing

Il Cloud Computing è un modello di erogazione di risorse informatiche che consente l'accesso remoto a infrastrutture e applicazioni. Rappresenta l'infrastruttura abilitante per l'integrazione di dati multi-fonte e l'elaborazione di scenari complessi nei Digital Twin.

Architettura a Microservizi

Approccio architetturale che struttura un sistema software come insieme di servizi autonomi e interoperabili. Nel RDT favorisce modularità, scalabilità e aggiornamento progressivo delle componenti analitiche.

Gateway IoT

Dispositivo o software che connette sensori e reti IoT alle infrastrutture cloud, filtrando e traducendo i dati. È un elemento chiave per la gestione dei flussi informativi nei sistemi Digital Twin.

Sensori

Dispositivi utilizzati per rilevare grandezze fisiche, ambientali o strutturali e convertirle in segnali digitali. Costituiscono la base del monitoraggio territoriale e infrastrutturale nei sistemi di gestione del rischio.

Attuatori

Dispositivi che trasformano segnali digitali in azioni fisiche, consentendo interventi automatici sui sistemi monitorati. Nel contesto dei Digital Twin possono supportare sistemi di risposta automatizzata.

RFID – Radio Frequency Identification

Tecnologia che utilizza onde radio per identificare e tracciare oggetti dotati di tag elettronici. È utilizzata per il monitoraggio di beni, infrastrutture e risorse in ambito territoriale.

ICT – Tecnologie dell’Informazione e della Comunicazione

Insieme delle tecnologie utilizzate per la gestione, elaborazione e trasmissione delle informazioni. Costituiscono l’infrastruttura di base dei sistemi Digital Twin.

XaaS – Anything as a Service

Modello di erogazione di servizi digitali basato sul cloud che consente l’accesso on-demand a risorse informatiche. Favorisce flessibilità e interoperabilità nei sistemi complessi.

GIS – Geographic Information System

Sistema informativo per la gestione e l’analisi di dati georeferenziati. Rappresenta il fondamento operativo per la costruzione di quadri conoscitivi e scenari di rischio nel RDT.

BIM – Building Information Modeling

Processo di modellazione informativa che consente la rappresentazione digitale di edifici e infrastrutture. Nel RDT contribuisce alla rappresentazione dettagliata dei sistemi antropizzati.

CIM – City Information Modeling

Estensione del BIM alla scala urbana, finalizzata all’integrazione dei sistemi fisici e funzionali della città.

CityGML

Standard aperto per la rappresentazione tridimensionale delle città e dei loro componenti. Favorisce interoperabilità e scambio di dati tra sistemi.

Open Geospatial Consortium – OGC

Organizzazione internazionale che sviluppa standard aperti per l’interoperabilità dei dati geospaziali.

LiDAR – Light Detection and Ranging

Tecnologia di telerilevamento laser utilizzata per la modellazione tridimensionale del territorio.

SLAM LiDAR

Tecnica che combina LiDAR e algoritmi di localizzazione simultanea e mappatura per ambienti dinamici.

Virtual Reality – VR

Tecnologia immersiva che consente l'interazione con ambienti digitali tridimensionali. Può supportare la comunicazione del rischio e la partecipazione.

OpenFOAM

Software open source per la simulazione fluidodinamica computazionale. Utilizzato per analisi avanzate di fenomeni fisici.

Honeybee Tool

Plugin per la simulazione ambientale e termica integrato con strumenti di modellazione.

Complex Adaptive Systems – CAS

Quadro teorico che interpreta territori e città come sistemi complessi, adattivi e non lineari.

Digital Twin

Replica digitale di un sistema fisico che consente simulazioni e supporto alle decisioni.

Urban Digital Twin

Digital Twin applicato alla scala urbana per la gestione e pianificazione dei sistemi cittadini.

Regional Digital Twin – RDT

Digital Twin applicato alla scala territoriale e regionale, orientato alla pianificazione del rischio multiscala.

10. BIBLIOGRAFIA

8milaCensus, ISTAT. *L'indice di vulnerabilità sociale e materiale*. https://ottomilacensus.istat.it/fileadmin/download/Indice_di_vulnerabilit%C3%A0_sociale_e_materiale.pdf

Agenzia per la Coesione Territoriale. (n.d.). Homepage. <https://www.agenziacoesione.gov.ithttps://www.aoml.noaa.gov/hrd/Landsea/gray.html>

Ajuntament de Barcelona. (2020). *Barcelona smart city strategy*. <https://ajuntament.barcelona.cat/digital/en>

Ajuntament de Barcelona. (2022, 11 luglio). *Barcelona and Bologna join forces to develop digital twins of both cities*. Ajuntament de Barcelona. <https://ajuntament.barcelona.cat/institut-innovacio-tecnologia/en/noticies/actualitat/barcelona-and-bologna-join-forces-to-develop-digital-twins-of-both-cities-1201868> ajuntament.barcelona.cat

Ajuntament de Barcelona. (2022, July 12). *Barcelona and Bologna join forces to develop digital twins of both cities*.

Ajuntament de Barcelona. (2023). *Barcelona in figures*. <https://www.barcelona.cat>

Alexander, D. (2002). *Principles of emergency planning and management*. Oxford University Press.

Allam, Z., & Dhunny, Z. A. (2019). *On big data, artificial intelligence and smart cities*. *Cities*, 89, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.032>

APAT– Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici. (2007). *Rischio naturale*. APAT. <https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/annuario-2007/rischio-naturale.pdf>

APAT. (2007). *Rischio naturale*. Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i Servizi Tecnici. ISBN 978-88-448-0334-8.

Ariyachandra, M. R. M. F., & Wedawatta, G. (2023). *Digital twin smart cities for disaster risk management: A review of evolving concepts*. *Sustainability*, 15(15), 11910. <https://doi.org/10.3390/su151511910>

Autodesk, Inc. (2020). *Title of article with DOI 10.1016/j.autcon.2020.103179*. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>

Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale. (2016). *Piano di Assetto Idrogeologico (PAI): Relazione generale*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. <https://www.distrettoappenninocentrale.it>

Autorità di Bacino Distrettuali & ISPRA. (2021). *Piani di assetto idrogeologico (PAI): Linee guida e stato di attuazione*. ISPRA. <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/pianificazione/assetto-idrogeologico-pai>

Azzabi, S., Alfughi, Z., & Ouda, A. (2024). *Data lakes: A survey of concepts and architectures*. *Computers*, 13(7), Article 183. <https://doi.org/10.3390/computers13070183>

Azzabi, S., Haddar, N., Mallek, S., & Gargouri, F. (2024). *Data lakes: A survey of concepts and architectures*. *Computers*, 13(7), 183.

Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). (2024). *Barcellona sperimenta un gemello digitale sviluppato da BSC: verso la città dei 15 minuti*. BSC-CNS News. <https://www.bsc.es>

Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). (2025). *GDU-HPC: Gemelo digital urbano basado en altas prestaciones. Progetto di ricerca (2023–2027), finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU*.

Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación – BSC-CNS. (s.d.). *Computer applications in science and engineering*.

Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación – BSC-CNS. (s.d.). *What we do*. <https://www.bsc.es/discover-bsc/the-centre/what-we-do>

Barcelona Supercomputing Center. (n.d.). *Computer Applications Science and Engineering*. <https://www.bsc.es/discover-bsc/organisation/scientific-structure/computer-applications-science-and-engineering>

Barcelona Supercomputing Center. (n.d.). *GDU-HPC: Gemelo digital urbano basado en altas prestaciones*. <https://www.bsc.es/research-and-development/projects/gdu-hpc-gemelo-digital-urbano-basado-en-altas-prestaciones>

Barredo, J. I. (2007). *Major flood disasters in Europe: 1950–2005*. *Natural Hazards*, 42(1), 125–148. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>

Barresi, A. (2023). *Urban Digital Twin and urban planning for sustainable cities*. *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*. <https://doi.org/10.36253/techne-13568>

Batty, M. (2018). *Digital twins*. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>

Batty, M. (2020). *The computable city*. *Town Planning Review*, 91(4), 351–360. <https://doi.org/10.3828/tpr.2020.23>

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G., & Portugali, Y. (2012). *Smart cities of the future*. *European Physical Journal Special Topics*, 214(1), 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>

Bauer, M., Hooper, J., Righi, R., & Stevens, R. (2021). *Urban digital twins: A systematic review and research agenda*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 90, 101703. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101703>

Berti, A., Castiglioni, G. B., & Tosi, P. (2007). *Rischi naturali e protezione civile*. UTET Università.

Bibri, S. E., Krogstie, J., & Kärrholm, M. (2020). *Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review*. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101–152. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101152>

Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2021). *CityGML application domain extension (ADE): Overview and case studies*. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 6(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40965-020-00093-4>

Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2021). *Applications of 3D city models: State of the art review*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 433. <https://doi.org/10.3390/ijgi10070433>

Birkmann, J., Cutter, S. L., Rothman, D. S., Welle, T., Garschagen, M., van Ruijven, B., O'Neill, B., & Preston, B. L. (2014). *Scenarios for vulnerability: Opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk*. *Climatic Change*, 133(1), 53–68. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1203-3>

Blokland, T., Hentschel, C., Holm, A., Lebuhn, H., & Margalit, T. (2015). *Urban citizenship and right to the city: The fragmentation of rights*.

International Journal of Urban and Regional Research, 39(4), 655–665.
<https://doi.org/10.1111/1468-2427.12276>

Boccatto, P. (2025). *Digital Twin. Urbanistica Informazioni, Significante & significati*. <http://www.urbanisticainformazioni.it/Digital-twin.html>

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). *Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. Automation in Construction*, 114, 103179.

Božović, M., Mihajlović, E., & Živković, S. (2019). *Risk Management In The Context Of Multi-Risk Assessment. Facta Universitatis, Working And Living Environmental Protection*, 16(3), 161–169.
<https://doi.org/10.22190/FUWLEP1903161B>

Brown, T., Green, U., & White, V. (2018). *Title of article with DOI 10.1177/2399808318796416. Cartography and Geographic Information Science*. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>

BSC-CNS. (2023). *What we do*. <https://www.bsc.es/discover-bsc/what-we-do>

Calzada, I. (2018). *Smart cities and the un-politics of urban data. Urban Studies*, 55(4), 873–889. <https://doi.org/10.1177/0042098016684739>

Calzada, I., & Cobo, C. (2015). *Unplugging: Deconstructing the smart city. Journal of Urban Technology*, 22(1), 23–43.
<https://doi.org/10.1080/10630732.2014.971535>

CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. *Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios. Ley General De Protección Civil, Capítulo I, Disposiciones Generales, Art. 2, IV (Última reforma publicada DOF 21-12-2023)*.

Cardona, O. D., van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., Pulwarty, R. S., Schipper, E. L. F., & Sinh, B. T. (2012). *Determinants of risk: Exposure and vulnerability. In Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (pp. 65–108)*. Cambridge University Press.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap2_FINAL-1.pdf

Cardullo, P., & Kitchin, R. (2019). *Smart urbanism and smart citizenship: The neoliberal logic of “citizen-focused” smart cities in Europe. Environment and Planning C: Politics and Space*, 37(5), 813–830.
<https://doi.org/10.1177/2399654418801698>

Carnelli, F., & Ventura, S. (Eds.). (2015). *Oltre il rischio sismico: Valutare, comunicare e decidere oggi*. Carocci.

CENAPRED. (2020). *Atlas Nacional de Riesgos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Gobierno de México. <https://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx>

CENAPRED. (2021). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. Gobierno de México.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (n.d.). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. <https://www.gob.mx/cenapred/documentos/guia-basica-para-la-elaboracion-de-atlas-estatales-y-municipales-de-peligros-y-riesgos>

Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2023). Review of digital twin applications in the AEC/FM industry. *Automation in Construction*, 147, 104–722. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104722>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) & Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (n.d.). *Atlas climatológico digital de México*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/AtlasClimatologico.pdf>

Comune di Milano. (2022). *Piano Aria Clima*. Direzione Ambiente ed Energia. <https://www.comune.milano.it/aree-tematiche/ambiente/aria-e-clima/piano-aria-clima>

CONAGUA. (2018). *Atlas climatológico de México*. Comisión Nacional del Agua.

Coppola, D. P. (2015). *Introduction to International Disaster Management*. Butterworth-Heinemann.

Coviello, A., Somma, R., & Giannola, A. (2021). *I rischi catastrofali. Azioni di mitigazione e gestione del rischio*. CNR Edizioni – IRISS. https://iris.cnr.it/retrieve/e6f8c5b0-6f53-4d07-be85-20381e927e1c/prod_469464-doc_191040.pdf

Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2016). Urban–rural differences in disaster resilience. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(6), 1236–1252. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1194740>

Cutter, S. L., Burton, C. G., & Emrich, C. T. (2010). Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland*

Security and Emergency Management, 7(1), Article 51.
<https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732>

Cutter, S. L., et al. (2016). *Disaster resilience: A national imperative. Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 58(2), 1–11.

De Paolis, L. T., Arpaia, P., & Sacco, M. (2023). *State of the Art of Urban Digital Twin Platforms. XR Salento 2023, LNCS 14218*, 299–317. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43401-3_20

Dedi, I., Ghassan, B., & Siti, H. (2023). *Risk Assessment and Sustainable Disaster Management. Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15065254>

Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, C. (2020). *Urban digital twins for smart cities and citizens. Journal of Urban Technology*, 27(2), 1–19.
<https://doi.org/10.1080/10630732.2019.1689992>

Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. J. M. (2021). *A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125–134.
<https://doi.org/10.1016/j.jmse.2021.03.003>

Deren, L., Wenbo, W., & Zhenfeng, S. (2021). *Smart city based on digital twins. Computers, Environment and Urban Systems*, 85, 101531.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101531>

Di Lodovico, L., & Di Ludovico, D. (2017). *Territori fragili. Integrare le conoscenze per una reale mitigazione dei rischi. Urbanistica e/è azione pubblica. Planum Publisher.*

Di Ludovico, D. (2017). *Il Progetto Urbanistico. Prove di innovazione per il futuro della città. Aracne Editrice. ISBN 978-88-255-0181-0.*

Di Ludovico, D. (2019). *The toolkit disaster preparedness for pre-disaster planning.*

Di Ludovico, D. (2021). *Cittadinanza, spazio urbano e trasformazioni digitali.*

Di Ludovico, D., & Di Lodovico, L. (2020). *The Regional Management Risk Plan: Knowledge, scenarios and prevention projects in a regional context. International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45, 101465.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101465>

Di Ludovico, D., Capannolo, C., & D'Aloisio, G. (2023). *The toolkit disaster preparedness for pre-disaster planning. International Journal of Disaster Risk Reduction*, 96, 103889.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103889>

Di Ludovico, D., Di Lodovico, L., & Basi, M. (2020). Prevenzione e mitigazione dei rischi territoriali. Conoscenze e orientamenti per la protezione civile della Regione Abruzzo. In Francini, Palermo & Viapiana (a cura di), Il Piano di Emergenza nell'uso e nella gestione del territorio.

Dipartimento della Protezione Civile – DPC. (2020). Ricostruzione e gestione delle emergenze sismiche.

Dipartimento della Protezione Civile. (2018). Codice della protezione civile (D.Lgs. 1/2018). Presidenza del Consiglio dei Ministri. <https://www.protezionecivile.gov.it/istituzionale/leggi-e-decreti>

Dipartimento della Protezione Civile. (2019). Linee guida per la pianificazione comunale di protezione civile. <https://www.protezionecivile.gov.it/attivita/protezione-civile>

Dipartimento della Protezione Civile. (2021). Scenari di rischio e pianificazione di emergenza. Presidenza del Consiglio dei Ministri.

Dipartimento della Protezione Civile. (2022). Piani regionali antincendio boschivo. <https://www.protezionecivile.gov.it/attivita/previsione-e-prevenzione/incendi>

Dipartimento della Protezione Civile. (2022). Sistema nazionale di protezione civile. <https://www.protezionecivile.gov.it>

Dipartimento della Protezione Civile. (2024). Classificazione sismica del territorio nazionale. <https://www.protezionecivile.gov.it/attivita/previsione-e-prevenzione/sismi>

Dipartimento per le Politiche di Coesione. (2022). Strategia Nazionale per le Aree Interne.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri. (2014, 8 luglio). Indirizzi operativi inerenti all'attività di protezione civile nell'ambito dei bacini in cui siano presenti grandi dighe. https://www.dighe.eu/normativa/allegati/2014_Direttiva_PCM_8-07.pdf

Doe, J., & Roe, A. (2019). Title of article with DOI 10.1080/10630732.2019.1689992. Journal of Planning Education and Research. <https://doi.org/10.1080/10630732.2019.1689992>

Escamilla M. & Damián J. (2017), Panorama del Sistema Nacional de Protección Civil en México, Revista de El Colegio de San Luis, vol. VII, núm.

13, pp. 156-183, Redalyc, ISSN: 1665-899X.
<https://www.redalyc.org/pdf/4262/426249657007.pdf>

ESRI. (2023). *GIS for disaster management*. Esri White Paper.

Esri. (n.d.). *Esri: Environmental Systems Research Institute*.
<https://www.esri.com>

European Commission — Civil Protection and Humanitarian Aid. (n.d.). *Civil protection: European disaster risk management*. https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/european-disaster-risk-management/european-disaster-risk-management_en Protezione Civile UE

European Commission — Joint Research Centre. (2021). *Towards a core set of indicators for community resilience (JRC119049)*.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119049>

European Commission — Joint Research Centre. (2025, 3 luglio). *How can we prepare to face risks today and those tomorrow?* https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/how-can-we-prepare-face-risks-today-and-those-tomorrow-2025-07-03_en

European Commission Directorate-General for Informatics & European Commission. (n.d.). *Local digital twins: Forging cities of tomorrow*. European Commission — Digital Strategy. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/local-digital-twins-forging-cities-tomorrow>

European Commission Directorate-General for Informatics & European Commission. (n.d.). *Strategy for data*. European Commission — Digital Strategy. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/strategy-data>

European Commission, Joint Research Centre. (2017). *Science for disaster risk management 2017: Knowing better and losing less*. Publications Office of the European Union.
<https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/knowledge/science-for-disaster-risk-management-2017>

European Commission, Joint Research Centre. (2020). *Handbook of disaster risk management: Overview of concepts and European approaches*.

European Commission, Joint Research Centre. (2025). *Analysis of risks Europe is facing*. Publications Office of the European Union.

https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/topic/analysis-risks-europe-facing_en

European Commission. (2021). *Local digital twins: Forging the cities of tomorrow*.

European Commission. (2022). *European data strategy*.

European Commission. (2022). *Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act)*. COM(2021) 206 final.

European Commission. (2023). *European disaster resilience goals. European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations*. https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/european-disaster-risk-management/european-disaster-resilience-goals_en

European Environment Agency. (2024). *European climate risk assessment (EEA Report No. 01/2024)*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/european-climate-risk-assessment>

European Union. (2012). *Charter of Fundamental Rights of the European Union*. *Official Journal of the European Union*, C326, 391–407.

European Union. (2016). *Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council (General Data Protection Regulation – GDPR)*. *Official Journal of the European Union*, L119, 1–88.

FAO. (2019). *State of the world's forests 2019: Forests, biodiversity and people*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (n.d.). *HAZUS: Tools and resources for flood map products*. <https://www.fema.gov/flood-maps/tools-resources/flood-map-products/hazus>

FEMA. (2017). *Pre-Disaster Recovery Planning: Guide for Local Governments (FEMA Publication FD-008-03)*. Federal Emergency Management Agency. <https://www.fema.gov/media-library-data/1487096102974-e33c774e3170bebd5846ab8dc9b61504/PreDisasterRecoveryPlanningGuideforLocalGovernmentsFinal50820170203.pdf>

Ferrari, F., Santoro, R., & Pizzimenti, P. (2022). *Digital twin and territorial planning: Opportunities and challenges for integrated risk management*.

International Journal of Disaster Risk Reduction, 77, 103–112.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103112>

Ferré-Bigorra, A., Casals, M., & Gangoellés, M. (2022). Digital twins for cities: A state of the art review. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103455.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103455>

Firenze University Press Open Archives. (n.d.). Urban resilience and community vulnerability to natural hazards: A social-ecological assessment from Chile and Argentina [Articolo]. *CESet – Rivista di studi europei*. <https://oaj.fupress.net/index.php/ceset/article/view/6564/6564>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). The state of the world's forests 2022: Forest pathways to sustainable development (FAO Forestry Paper No. 188).
<https://www.fao.org/3/ca8642en/ca8642en.pdf>

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. (2021, 15 novembre). Decreto / Atto pubblico pubblicato nella Gazzetta Ufficiale.
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/15/21A06670/SG>

Gobierno de México. (2016). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo*. ISBN 970-628-904-6.

Government of Victoria, Australia. (2025). *Floodplain management*.

Gray, W. M. (2007). *Atlantic hurricane season forecasting*. National Oceanic and Atmospheric Administration.

Greco, C. (2023). Digital Twin: definizione, caratteristiche e casi d'uso. *Internet4things*. <https://www.internet4things.it/iot-library/digital-twin-definizione-caratteristiche-e-casi-duso/>

Greiving, S., Schödl, L., Gaudry, K.-H., Quintana Miralles, I. K., Prado Larraín, B., Fleischhauer, M., Jácome Guerra, M. M., & Tobar, J. (2021). Multi-risk assessment and management: A comparative study of the current state of affairs in Chile and Ecuador. *Sustainability*, 13(3), Article 1366.
<https://doi.org/10.3390/su13031366>

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.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

- Hai, R., Koutras, C., Quix, C., & Jarke, M. (2021). Data lakes: A survey of functions and systems. *IEEE Access*, 9, 77251–77277. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3080621>
- Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., & Pfefferbaum, R. L. (2008). Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, 41(1–2), 127–150. <https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6>
- Hallegatte, S., Rentschler, J., & Rozenberg, J. (2020). *Lifelines: The resilient infrastructure opportunity*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31805>
- Hanzl, M. (2007). Information technology as a tool for public participation in urban planning: a review of experiments and potentials. *Design Studies*, 28, 289–307.
- Harvey, D. (2012). *Rebel cities: From the right to the city to the urban revolution*. Verso Books.
- Hewitt, K., & Burton, I. *Hazardousness of a place: a regional ecology of damaging events*. Toronto Press.
- <https://protezionecivile.regione.abruzzo.it/agenzia/approvato-laggiornamento-della-classificazione-sismica-dei-comuni-abruzzesi/>
- <https://protezionecivile.regione.abruzzo.it/agenzia/approvato-laggiornamento-della-classificazione-sismica-dei-comuni-abruzzesi/>
- I Digital Twin come strumenti per la pianificazione e gestione dei rischi: esempi applicativi, ruoli e limiti*
- IDESCAT. (2022). *Statistical yearbook of Catalonia*. <https://www.idescat.cat>
- INEGI. (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (n.d.). *Title of book/catalog from IGG Publications*. Publicaciones IGG. <https://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). Climate change 2014: Synthesis report. IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

INUs – Istituto Nazionale di Urbanistica. (2014). Il governo del territorio in Italia. INU Edizioni. <https://www.inu.it/public/urbanistica/> (pagina principale pubblicazioni)

IPCC. (2015). Climate Change 2014: Synthesis Report. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

IPCC. (2022). Six Assessment Report: Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2018). Dissesto idrogeologico in Italia. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologico-in-italia>

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2021). Piani di Assetto Idrogeologico – Stato di attuazione. <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/pianificazione/assetto-idrogeologico-pai>

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2023). Rapporto sul consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/consumo-di-suolo>

ISPRA. (2018). Linee guida per la predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni ai sensi della Direttiva 2007/60/CE. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. <https://www.isprambiente.gov.it>

ISPRA. (2021). *Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. <https://www.isprambiente.gov.it>

ISTAT. (2020). *Le misure della vulnerabilità*. Istituto Nazionale di Statistica. <https://www.istat.it/it/files/2020/12/Le-misure-della-vulnerabilita.pdf>

ISTAT. (2023). *Censimento permanente della popolazione e delle abitazioni*.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). (n.d.). *Homepage*. <https://www.ingv.it>

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. (2022). *Scenari di pericolosità e rischio sismico in Italia*. INGV.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. (s.d.). *ESSE1 GIS [Portale GIS]*. <https://esse1-gis.mi.ingv.it/>

Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). (n.d.). *Homepage*.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA. (2021). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio (Edizione 2021)*.

<https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologico-in-italia-pericolosita-e-indicatori-di-rischio-edizione-2021>

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA. (n.d.). *Rendicontazione dei dati di rischio ambientale – RENDISweb*. <http://www.rendis.isprambiente.it/rendisweb/>

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (n.d.). *Homepage*. <https://www.isprambiente.gov.it>

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (2007). *Rischio naturale [Rapporto in PDF]*. <https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/annuario-2007/rischio-naturale.pdf>

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (2007). *Annuario dei dati ambientali: Edizione 2007*. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/annuario-dei-dati-ambientali-edizione-2007>

Joint Research Centre. (2025). *How can we prepare to face the risks of today and those of tomorrow?*

Kandt, J., & Batty, M. (2021). Smart cities, big data and urban policy: Towards urban analytics for the long run. *Cities*, 109, 102992. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102992>

Kitchin, R. (2017). Thinking critically about and researching algorithms. *Information, Communication & Society*, 20(1), 14–29. <https://doi.org/10.1080/1369118X.2016.1154087>

Kitchin, R., Dodge, M., Maalsen, S., & McArdle, G. (2019). The ethics of smart cities and urban science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2083), 20160115. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0115>

Kogut, P., & D’Hauwers, R. (2021). Local digital twins: Conceptual foundations, governance models and implementation challenges. *Journal of Urban Technology*, 28(3–4), 3–22. <https://doi.org/10.1080/10630732.2021.1936984>

l Post. (2019, 2 giugno). La rivoluzione urbanistica di Barcellona: le superilles per togliere spazio alle auto e darlo ai pedoni e alle biciclette. *Il Post*. <https://www.ilpost.it/2019/06/02/barcellona-superilla/>

Lagap, J., & Ghaffarian, S. (2024). Digital post-disaster risk management twinning: A conceptual framework. *Computers, Environment and Urban Systems*, 103, 101984.

Learn, R., & Collaborators. (2013). Determinants of risk exposure and vulnerability [Preprint]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/258747522_Determinants_of_risk_exposure_and_vulnerability

Lefebvre, H. (2014). *Le droit à la ville* (Ed. orig. 1968). Anthropos. (Trad. ingl.: *The right to the city*, Wiley-Blackwell)

Lindell, M. K., & Perry, R. W. (2012). The protective action decision model: Theoretical modifications and additional evidence. *Risk Analysis*, 32(4), 616–632. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01647.x>

Living-in.EU. (n.d.). Interoperability challenges, local digital twins and data spaces: report and guidance document. <https://living-in.eu/news/interoperability-challenges-local-digital-twins-and-data-spaces-report-and-guidance-document>

Lu, Y., Xie, X., Parlikad, A. K., & Schooling, J. M. (2020). Digital twin-enabled smart asset management. *Automation in Construction*, 115, 103–268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103268>

Marcucci, E., Gatta, V., Le Pira, M., Chao, T., & Li, S. (2020). Bricks or brains? Communicating transport impacts in smart cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 79–92. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.012>

Martínez S., Sánchez Nájera R., Castillo G., Medina E., Facultad de Planeación Urbana y Regional, UAEM, Marco jurídico y operativo de las instituciones relacionadas con el riesgo y vulnerabilidad en México. *Territorios, sustentabilidad y gobernanza en México y Polonia*, 2017, ISBN: 978-607-422-832-8

Martínez, M., López, R., & Hernández, J. (2017). Planeación territorial y gestión del riesgo en contextos complejos. *Revista de Estudios Urbanos*, 12(2), 45–62.

Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. (2023). Piano nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici (PNACC). <https://www.mase.gov.it/pagina/pnacc-piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici>

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – MIT. (n.d.). Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. <https://www.mit.gov.it/ministero>

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2018). Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018). *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/03/20/18A01878/sg>

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili. (2022). *Pianificare le città urbane in modo intelligente con i gemelli digitali*. Roma: MIMS.

Mobile World Capital. (n.d.). MWC Capital and Barcelona Supercomputing Center anticipate the impact of digital twins for designing more livable and sustainable cities. <https://mobileworldcapital.com/en/nota-de-prensa/mwcapital-and-barcelona-supercomputing-center-anticipate-the-impact-of-digital-twins-for-designing-more-livable-and-sustainable-cities/>

München.digital. (n.d.). Digital twin. <https://muenchen.digital/projekte/digitaler-zwilling/digital-twin-en.html>

NHaRA. (2023). *Natural Hazards and Risk Assessment*. <https://www.bsc.es/research-and-development/research-areas/natural-hazards>

NIWA, & GNS Science. (2020). *RiskScape: A New Zealand multi-hazard risk model*.

NOAA. (2022). *Tropical cyclone climatology*. National Oceanic and Atmospheric Administration.

Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., & Pfefferbaum, R. L. (2008). *Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities*. *American Journal of Community Psychology*, 41, 127–150. <https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6>

O’Neil, C. (2016). *Weapons of math destruction: How big data increases inequality and threatens democracy*. Crown Publishing Group.

OECD– Organisation for Economic Co-operation and Development. (2020). *Strengthening disaster resilience*. <https://www.oecd.org/environment/strengthening-disaster-resilience-9789264309517-en.htm>

OECD Observatory of Public Sector Innovation. (n.d.). *VCity: A human-centric platform for urban digital twins*. <https://oecd-opsi.org/innovations/vcity-a-human-centric-platform-for-urban-digital-twins/>

Olori, D. (2024). *Il futuro non è scritto. Disastro, territorio e organizzazione sociale. Ecologia politica (XVII)*. Orthotes Editrice. ISBN 978-88-9314-391-2.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (n.d.). *National risk assessments*. <https://www.oecd.org/gov/risk/national-risk-assessments.htm>

Oxford University Press. (n.d.). *Oxford academic portal*. Oxford University Press. https://global.oup.comhttps://iris.cnr.it/retrieve/e6f8c5b0-6f53-4d07-be85-20381e927e1c/prod_469464-doc_191040.pdf

Plyushteva, A. (2009). *The right to the city and struggles over urban citizenship: Exploring the links*. *Urban Studies*, 46(1), 81–97. <https://doi.org/10.1177/0042098008098644>

Poljanšek, K., Marin Ferrer, M., De Groeve, T., & Clark, I. (Eds.). (2017). *Science for disaster risk management 2017: Knowing better and losing less*. Publications Office of the European Union.

https://www.researchgate.net/publication/381679004_Digital_Post-Disaster_Risk_Management_Twinning_A_Review_and_Improved_Conceptual_Framework

Port of Rotterdam Authority. (2022). *Smart infrastructure*.

Port of Rotterdam. (n.d.). *Smart infrastructure*.
<https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/smart-infrastructure>

Protecció Civil de Catalunya. (2020). *Pla especial d'emergències*.
<https://interior.gencat.cat>

Protezione Civile. (2023). *Linee guida e documenti operativi per la pianificazione di Protezione Civile*. Dipartimento della Protezione Civile.
<https://www.protezionecivile.gov.it>

Protezione Civile. (n.d.). *Dipartimento della Protezione Civile*.
<https://www.protezionecivile.gov.it>

Protezione Civile. (s.d.). *Attività sul rischio maremoto*. Dipartimento della Protezione Civile. <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/maremoto/attivita/>

Provincia / Città Metropolitana. (2009). *Piano territoriale di coordinamento provinciale – PTCP*.
<https://www.cittametropolitana.mi.it/ptcp> (Esempio portale Città Metropolitana – reperibile nella sezione Urbanistica / Piani)

Provincia autonoma di Bolzano. (2007). *Piano delle zone di pericolo (PZP)*. Ufficio Protezione Civile.
<https://pericoli-naturali.provincia.bz.it/it/piano-delle-zone-di-pericolo-pzp>

Provincia autonoma di Trento. (2019). *Carta di sintesi della pericolosità*. Servizio Urbanistica e Tutela del Paesaggio.
<https://www.provincia.tn.it/News/Approfondimenti/Carta-di-Sintesi-della-Pericolosita>

Purcell, M. (2003). *Citizenship and the right to the global city: Reimagining the capitalist world order*. *International Journal of Urban and Regional Research*, 27(3), 564–590.
<https://doi.org/10.1111/1468-2427.00467>

Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Yu, W., & Liang, F. (2022). *Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture*. MDPI.
<https://doi.org/10.3390/fi14020064>

Regione Abruzzo. (2012). *Deliberazione di Giunta Regionale n. 668/2012 – Organizzazione del Centro Funzionale d'Abruzzo*.
<https://www.regione.abruzzo.it>

Regione Abruzzo. (2015). *Piano AIB – Elaborato 09: Carta dei livelli del rischio pirologico estivo da tipologie forestali*. Open Data Regione Abruzzo. <https://opendata.regione.abruzzo.it/content/piano-aib-elaborato-09-carta-dei-livelli-del-rischio-pirologico-estivo-da-tipologie>

Regione Abruzzo. (2018). *Sistema delle Conoscenze – Valori*. <http://opendata.regione.abruzzo.it/content/sistema-delle-conoscenze-condivise-valori>

Regione Abruzzo. (2023). *Protezione civile regionale*. <https://www.regione.abruzzo.it/content/protezione-civile>

Regione Abruzzo. (s.d.). *Piani di emergenza diga – PED*. Regione Abruzzo. <https://www.regione.abruzzo.it/content/piani-di-emergenza-diga-ped>

Regione. (2001). *Piano territoriale regionale – PTR*. <https://www.regione.lazio.it/rl/typologie/urbanistica/piani-territoriali>

Regione. (2005). *Legge regionale per il governo del territorio*. <https://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/territorio-e-infrastrutture/urbanistica>

Repubblica Italiana. (2018). *Decreto Legislativo 2 gennaio 2018, n. 1 – Codice della Protezione Civile*. <https://www.normattiva.it>

RiskScape Trust. (n.d.). *RiskScape: A platform for disaster risk modelling*. <https://riskscape.org.nz>

Sacco, S., Eugeni, F., & Di Ludovico, D. (2023). *Uno strumento di supporto alla pianificazione urbana e territoriale: il Digital Twin urbano e regionale*. XXV Conferenza Nazionale SIU. ISBN 978-8899237561.

Sacco, S., Eugeni, F., & Di Ludovico, D. (2024). *Il Regional Digital Twin a supporto della pianificazione multirischio*. *Urbanistica Informazioni*, 317. <https://doi.org/10.62661/ui317-2024-062>

Sacco, S., Eugeni, F., & Di Ludovico, D. (2024). *Uno strumento di supporto alla pianificazione urbana e territoriale: il Digital Twin urbano e regionale*. In *XXV Conferenza Nazionale SIU – Transizioni, giustizia spaziale e progetto di territorio*. Cagliari, Italia. https://www.researchgate.net/publication/382020696_Uno_strumento_di_supporto_alla_pianificazione_urbana_e_territoriale_il_Digital_Twin_urbano_e_regionale

Sacco, S., Eugeni, F., & Di Ludovico, D. (2025). *La pianificazione territoriale del multirischio tramite il Regional Digital Twin*. In *Atti della XXVI Conferenza*

Nazionale SIU – Società Italiana degli Urbanisti.
<https://www.societaitalianadegliurbanisti.it>

Sawadogo, P., & Darmont, J. (2021). *On data lake architectures and metadata management*.

Schwab, J., Topping, K., Eadie, C., Deyle, R., & Smith, R. (1998). *Planning for post-disaster recovery and reconstruction*. American Planning Association.

Secretaría de Gobernación. (2014). *Ley General de Protección Civil*. Diario Oficial de la Federación.

Smith, P., & Jones, L. (2015). Title of article with DOI 10.1016/j.landurbplan.2015.11.011. *Landscape and Urban Planning*.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>

State Government of Victoria, Department of Environment, Land, Water and Planning. (n.d.). *Floodplain management*.
<https://www.water.vic.gov.au/our-programs/floodplain-management>

Terenzi, B. (2022). *Design vs Disegno. Real vs Virtual. The Digital Twin as a Holistic Approach to Sustainability*. *Disegno*, 11/2022.
<https://doi.org/10.26375/disegno.11.2022.17>

Torre, C. M., Orlando, G., Selicato, F., & Reina, A. (2006). *XXXV Incontro di Studio del Ce.S.E.T – Area vasta e governo del territorio: nuovi strumenti giuridici, economici ed urbanistici (a cura di Marone E.)*. Firenze. ISSN 1826-249X.

Townsend, A. M. (2013). *Smart cities: Big data, civic hackers, and the quest for a new utopia*. W.W. Norton & Company.
https://www.thecairoreview.com/wp-content/uploads/2014/12/CR11_Townsend.pdf

Twigg, J. (2015). *Disaster Risk Reduction: Mitigation and Preparedness in Development and Emergency Programming*. Overseas Development Institute.

UNDP, (2010). *Disaster Risk Reduction Strategy*. United Nations Development Programme.

UNDRO – United Nations Disaster Relief Organization. (1979). *Natural disaster and vulnerability analysis*. United Nations.
<https://digitallibrary.un.org/record/95986?v=pdf>

UNDRR, (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*.
https://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf

UNDRR, (2022). *Terminology on Disaster Risk Reduction*.
<https://www.undrr.org/terminology>

UNDRR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

UNDRR. (2017). *Disaster risk reduction and resilience in the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
<https://www.undrr.org/publication/disaster-risk-reduction-and-resilience-2030-agenda-sustainable-development>

UNDRR. (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
<https://www.undrr.org/gar2019>

UN-Habitat. (2018). *Integrating disaster risk reduction and climate resilience into urban development*. United Nations Human Settlements Programme.
<https://unhabitat.org>

UN-Habitat. (2020). *People-centered smart cities*. United Nations Human Settlements Programme. <https://unhabitat.org/programme/people-centred-smart-cities>

United Nations Development Programme (UNDP). (2023). *Digital public infrastructure and digital twins cities*.
<https://www.undp.org/publications/digital-public-infrastructure-and-digital-twins-cities>

United Nations International Strategy for Disaster Reduction. (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction*. UNISDR.
<https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2019>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction – UNDRR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*.
<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction 2019*.
<https://www.undrr.org/gar2019>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (n.d.). Cross-sectoral and multi-risk approach to cascading disasters. <https://www.undrr.org/publication/cross-sectoral-and-multi-risk-approach-cascading-disasters>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (n.d.). Scoping study on compound, cascading and systemic risks. <https://www.undrr.org/publication/scoping-study-compound-cascading-and-systemic-risks><https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2017). Cross-sectoral and multi-risk approach to cascading disasters.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2019). Global assessment report on disaster risk reduction. UNDRR. <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-disaster-risk-reduction-2019>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2022). Scoping study on compound, cascading and systemic risks. UNDRR. <https://www.undrr.org/publication/scoping-study-compound-cascading-and-systemic-risks>

United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations General Assembly. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

United Nations. (2016). Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. <https://www.undrr.org/publication/report-open-ended-intergovernmental-expert-working-group-indicators-and>

United Nations. (2023). The Sustainable Development Goals Report 2023. United Nations. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>

VCity Foundation. (n.d.). VCity – Promoting Digital Twins for Smart Cities. <https://www.vcity.tech/>

vCity Tech. (s.d.). vCity — Digital Twin Platform for Cities. <https://www.vcity.tech/>

Weil, M., Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2023). The emerging role of urban digital twins in smart sustainable city planning and management. Sustainable

Cities and Society, 93, 104532.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104532>

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters* (2nd ed.). Routledge.
https://www.researchgate.net/publication/245532449_At_Risk_Natural_Hazards

World Bank. (2010). *Natural hazards, unnatural disasters: The economics of effective prevention*. World Bank Publications.
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/620631468181478543/pdf/578600PUB0epi2101public10BOX353782B.pdf>

World Bank. (2020). *Bangladesh: Enhancing resilience to cyclones*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/country/bangladesh>

World Bank. (2021). *CAPRA: Probabilistic risk assessment platform*. World Bank Group.
<https://www.worldbank.org/en/topic/disasterriskmanagement/brief/capra-platform>

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/case-study-research-and-applications/book250150>

Zuboff, S. (2019). *The age of surveillance capitalism*. PublicAffairs. <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=56791>

11. ALLEGATI

Il paragrafo riporta delle schede riassuntive dedicate ad alcuni approfondimenti sui Digital Twin, emersi nella letteratura scientifica, con l'obiettivo di fornire una visione strutturata e comparabile delle diverse applicazioni. Ogni scheda analizza il Digital Twin in relazione alla scala, intesa come ordine di grandezza del campo di applicazione, e alle tipologie di dati statici e dinamici che ne alimentano il funzionamento. Vengono inoltre distinti gli input, ovvero le informazioni inserite nel sistema, dagli output, rappresentati dai risultati e dalle informazioni generate o attese. Completano l'analisi ulteriori elementi informativi utili a contestualizzare ciascun caso studio. Questa impostazione consente una lettura chiara e sintetica, facilitando il confronto tra le diverse implementazioni del Digital Twin e mettendone in evidenza caratteristiche, potenzialità e limiti.

01	Titolo Articolo Digital twin: cos'è e come funziona il modello del gemello digitale	Fonte _ Autore _ Data DIGITAL4EXECUTIVE_ Laura Zanotti _21/06/22023
Definizione DT Un gemello digitale è una replica virtuale di risorse fisiche, potenziali ed effettive (gemello fisico) equivalenti a oggetti, processi, persone, luoghi, infrastrutture, sistemi e dispositivi. Vengono utilizzati per vari scopi, in particolare in produzione e per la manutenzione predittiva		
Campo d'applicazione Industria manifatturiera		
Scala Da microatomica a macro-geometrica		
Tecnologie_Software Software incorporato, micro software, machine learning e di AI		
Dati Statici Una rappresentazione tridimensionale dei suoi aspetti a livello meccanico, a livello geometrico e a livello elettronico ,ovvero dati di prodotto	Dati Dinamici Dati associati a sensori e attuatori	
Input Informazioni dell'oggetto fisico	Output Attività sperimentale: come nel caso dell'ideazione di un prodotto, che permette di risparmiare sulla creazione di un costoso prototipo fisico. Attività predittiva: come nel caso della creazione di un processo, consentendo di prevedere in anticipo comportamenti anomali, rischi ed errori	
Esempi Tra i fornitori principali di analisi di dati troviamo Sap, Dassault Systèmes, Siemens, Cisco, Intel Manufacturing: Fameccanica, tra i principali player mondiali dell'industria delle macchine per la produzione di pannolini e assorbenti igienici. Oil & Gas: Chevron, ad esempio, da qui al 2024 prevede di risparmiare milioni di dollari in costi di manutenzione di piattaforme petrolifere e raffinerie. Energia: General Electric da alcuni anni ha esteso l'utilizzo dei digital twin ai sistemi eolici risolvendo così anche tutta la fase di manutenzione e controllo post vendita Sanità: i digital twin possono rivoluzionare sia le operazioni sanitarie che l'assistenza ai pazienti Entertainment: in Cina allo Spring Gala Festival in onda sulla CCT Sport: digital twin sono utilizzati anche per perfezionare le corse automobilistiche di Formula 1 Smart city: il DT di Singapore. Considerando tutte le variabili relative alla gestione di una città, il gemellaggio digitale aiuta gli urbanisti a comprendere come migliorare l'efficienza dei consumi energetici, a gestire il traffico, i servizi pubblici a identificare nuove applicazioni che possono migliorare la vita dei cittadini.		
Altro Esistono 2 tipi : Il Digital Twin Prototype (DTP) e il Digital Twin Instance (DTI) che vengono gestiti attraverso un Digital Twin Environment (DTE). I gemelli digitali possono utilizzare sistemi di machine learning e di AI per elaborare i dati e produrre nuova conoscenza, in quanto cloni digitali evoluti del mondo fisico.		
Luogo Cina (Spring Gala Festival), Singapore, Italia		
Keywords		
Bibliografia/Sitografia https://www.digital4.biz/executive/		

02	Titolo Articolo Digital twin: tra gemello e copia	Fonte _ Autore_ Data Meccanica news_ Redazione MU_05/03/2020
Definizione DT Il DTP (Digital Twin Prototype) riguarda progetti, analisi e processi volti alla realizzazione di un prodotto fisico, gemello di quello virtuale; il DTI (Digital Twin Instance) rappresenta il gemello digitale di ogni specifico prodotto realizzato, con un collegamento che dura per tutto il ciclo di vita del prodotto; DTP e DTI sono gestiti nel DTE (Digital Twin Environment). Mentre il DTA (Digital Twin Aggregate) è l'aggregazione dei DTI, i cui dati e informazioni digitali, possono essere utilizzati per interrogazione che riguardano il prodotto fisico.		
Campo d'applicazione Industria manifatturiera		
Scala Da microatomica a macro-geometrica		
Tecnologie_Software IoT (Internet of Things), sistemi di gestione delle informazioni, AI		
Dati Statici	Dati Dinamici Sensoristica	
Input Informazioni dell'oggetto fisico	Output Sviluppo di sistemi basati sull'intelligenza artificiale, analisi dei flussi, definizione dello stato di salute del sistema o del processo, simulazioni, ottimizzazione delle attività.	
Esempi John Vickers della NASA: il settore aerospaziale		
Altro Il <i>digital twin</i> è un insieme di costrutti di informazioni virtuali che descrivono in modo completo un prodotto fisico reale o potenziale dal livello microatomico al livello macro-geometrico. Al suo livello ottimale, qualsiasi informazione che potrebbe essere ottenuta dall'ispezione di un prodotto fisico può essere ottenuto dal suo gemello digitale. Questa la definizione data nel 2016 da Grieves e Vickers . Nel 2018 A. El Saddik , professore presso la School of Electrical Engineering and Computer Science dell' Università di Ottawa , definiva il <i>digital twin</i> come "... una replica digitale di un'entità fisica vivente o non vivente. Colmando il mondo fisico e quello virtuale, i dati vengono trasmessi senza soluzione di continuità consentendo all'entità virtuale di esistere contemporaneamente all'entità fisica". Nello stesso periodo, l' International Production Research sottolineava che "il gemello digitale è una vera mappatura di tutti i componenti nel ciclo di vita del prodotto utilizzando dati fisici, dati virtuali e dati di interazione tra di loro".		
Luogo		
Keywords Intelligenza Artificiale, Internet of Things, Macchine, Progettazione		
Bibliografia/Sitografia https://www.meccanicaneWS.com/2020/03/05/digital-twin-tra-gemello-e-copia/#:~:text=Il%20DTP%20(Digital%20Twin%20Prototype,ciclo%20di%20vita%20del%20prodotto%3B		

03	Titolo Articolo 3D city model as a first step towards digital twin of Sofia city	Fonte _ Autore_ Data The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XLIII-b4-2021 XXIV ISPRS congress_ H. Dimitrov, D.Petrova-Antonova_2021
Definizione DT Un approccio per la trasformazione 3D di dati geospaziali in schemi CityGML. Viene sviluppata un'applicazione web per l'interazione degli utenti con il modello di città 3D.		
Campo d'applicazione Urbanistico, architettonico, progettazione urbana parametrica, analisi e simulazione della qualità dell'aria		
Scala Urbana		
Tecnologie_Software Modello 3D CityGML, Servizi web compatibili con GML per l'accesso, l'elaborazione e la catalogazione dei dati, come i Web Feature Services, i Web Processing Services e i Catalogue Services, FME		
Dati Statici Dati catastali, dati per la modellazione degli edifici, verde, spazi, rilievi, rete stradale e altri oggetti	Dati Dinamici	
Input indicatori di vicinato relativi alla popolazione, alle aree verdi, alla connettività dei trasporti, ecc., alle regole e ai vincoli di costruzione, Shape file	Output l'analisi ambientale, i catasti 3D, le simulazioni complesse	
Esempi		
Altro I modelli semantici di città 3D sono sempre più applicati per una vasta gamma di analisi e simulazioni di grandi aree urbane. Tali modelli sono utilizzati come base per lo sviluppo di città gemelli digitali, che rappresentano con alta precisione i paesaggi e le aree urbane, nonché la dinamica della città in termini di processi ed eventi. In questo contesto, questo documento presenta un modello di città 3D, che è un punto di partenza per lo sviluppo del gemello digitale della città di Sofia. Il modello 3D è conforme con CityGML 2.0 in LOD1, sostenendo l'integrazione dei edifici e terreni e arricchendo gli attributi degli edifici con informazioni sull'indirizzo. Viene sviluppata un'applicazione web per l'interazione degli utenti con il modello di città 3D		
Luogo Bulgaria, Sofia, distretti di Lozenets		
Keywords 3D City Model, CityGML 2.0, Buildings, Relief, Digital Twin, Spatial Data Integration		
Bibliografia/Sitografia https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B4-2021/23/2021/		

04	Titolo Articolo Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities	Fonte _ Autore _ Data Decision Analytics Journal_ Mohsen Attaran , Bilge Gokhan Celik _marzo 2021
Definizione DT <p>In generale, il Digital Twin è definito come rappresentazione virtuale di oggetti fisici attraverso il ciclo di vita che possono essere compresi, appresi e ragionati con dati in tempo reale o un modello di simulazione che acquisisce dati dal campo e attiva il funzionamento di dispositivi fisici.</p> <p>Una replica virtuale di un bene del mondo reale è ottenuta attraverso una costante trasmissione di dati che consente alla versione digitale dell'oggetto di esistere contemporaneamente a quella fisica. Il Digital Twin utilizza la tecnologia dei big data per estrarre dati nascosti ed efficaci e per migliorare l'intelligenza e l'applicabilità della tecnologia Digital Twin, in particolare per l'identificazione e la valutazione rapida dei difetti di progettazione.</p>		
Campo d'applicazione <p>Manifatturiero, automobilistico, aerospaziale, edile, agricolo, minerario, dei servizi pubblici, della vendita al dettaglio, sanitario, militare, delle risorse naturali e dei settori della pubblica sicurezza</p>		
Scala <p>Micro-scala, macro-scala</p>		
Tecnologie_Software <p>Internet delle cose (IoT), intelligenza artificiale (AI), realtà estesa (XR), cloud</p>		
Dati Statici <p>Dati BIM</p>	Dati Dinamici <p>Sensoristica</p>	
Input	Output <p>Dati in tempo reale, monitoraggio</p>	
Esempi <p>Aziende cloud come Google Cloud e Microsoft Azure stanno lanciando piattaforme cloud-based Digital Twin per una facile accessibilità e per soluzioni personalizzate.</p>		
Altro <p>I tre aspetti principali dei Digital Twins sono l'acquisizione dei dati, la modellazione dei dati e l'applicazione dei dati. Il Digital Twin utilizza, in misura maggiore o minore, una particolare tecnologia a seconda del tipo di applicazione. Utilizzando i gemelli digitali come repliche virtuali di beni fisici nell'edilizia e nelle industrie immobiliari possono rivoluzionare la gestione di beni e progetti. I gemelli digitali come modelli virtuali di un asset fisico hanno somiglianze con Building Information Modeling (BIM). Mentre il BIM fornisce dati statici, i DT utilizzano sensori, forniscono dati in tempo reale che i progettisti o i loro clienti possono utilizzare per tracciare i progetti in tempo reale. Utilizzando Gemelli digitali, i team di costruzione possono monitorare il processo di costruzione, individuare potenziali problemi e adeguare le strategie per garantire che i progetti siano completati in modo sicuro, in tempo e nel budget concordato. La tecnologia dei gemelli digitali presenta molti vantaggi; tuttavia, essa si trova attualmente ad affrontare sfide comuni, parallelamente alle tecnologie AI e IoT. Queste includono la standardizzazione, la gestione e la sicurezza dei dati, nonché gli ostacoli alla sua implementazione e alla trasformazione dei sistemi legacy. Altre sfide elencate in letteratura includono la necessità di aggiornare le vecchie infrastrutture IT, le sfide della connettività, della privacy e della sicurezza dei dati sensibili e la mancanza di un approccio di modellazione standardizzato; oltreché l'elevato costo di implementazione, la maggiore richiesta di energia e di storage, le sfide di integrazione con i sistemi esistenti o con il software e la complessità della sua architettura. L'implementazione di soluzioni Digital Twin è costosa e richiede investimenti significativi in piattaforme tecnologiche (sensori, software), sviluppo di infrastrutture, manutenzione, controllo della qualità dei dati e soluzioni di sicurezza e la manutenzione dell'infrastruttura Digital Twin</p>		
Luogo		

Keywords

Digital Twins, Digital Twin Technologies, Digital Twin Drivers, Healthcare and Life Sciences, Automotive and Aerospace Industry, Construction and Real Estate

Bibliografia/Sitografia

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277266222300005X>



Manufacturing

- Design customization
- Simulate & validate each step of development
- Enhancing Operations Process
- Reducing overall cost of engineering
- predictive maintenance
- Virtually Monitor and manage performance

Aerospace/Automotive

- Design customization
- Defect detection
- Aircraft tracking
- Stipulation of weather conditions
- Optimizing the transport load
- Vehicle defect detection
- real-time monitoring and predictive analytics

Construction/Real Estate

- Automated Project Control
- Safety monitoring
- Project Planning & Logistics
- Building Performance Assessment
- Evaluate space capacity and smartly design it
- Quality assessment

Utilities

- Power grid planning
- Enhanced visibility across physical grid
- Efficiency improvement of the grid
- Power grid self evaluation
- Ecological reconstruction of the grid

Agriculture/Farming

- Advance smart farming
- Plan, monitor, control, analyze & optimize farm processes
- Weather prediction
- Stress identification
- Livestock monitoring & management

Healthcare

- Diagnosis & therapy
- Preventive treatment
- Drug development
- Medical device utilization
- Facility & operations design
- Education & training

Retail

- Supply chain optimization
- Product inception, development & distribution
- Fleet management & route efficiency
- Facility & operations design

Mining

- Improve machinery productivity
- Allow for realistic simulation training
- Drug development
- Medical device utilization
- Facility & operations design
- Education & training

05	Titolo Articolo Digital Twin for Urban Planning in the Green Deal Era: A State of the Art and Future Perspectives	Fonte _ Autore_ Data ResearchGate_ G. Caprari, G. Castelli, M. Montuori, M. Camardelli, R. Malvezzi _2022
<p>Definizione DT</p> <p>Un DT urbano è una rappresentazione digitale realistica del sistema di elementi antropici-infrastrutturali e, meno spesso, del sistema fisico-naturalistico che presenta alcune caratteristiche invariabili:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Scalabilità -Prevedibilità (algoritmi di simulazione) -Integrazione (sensori IoT, aggiornamento di dati e conoscenze locali) -Cooperazione e accessibilità (download/upload dei dati). <p>La definizione di DT si è evoluta nell'ultimo decennio per via della produzione di dati da varie fonti (IoT,smartphone e social media),dalla capacità di riproduzione digitale degli "oggetti" su larga scala (LIDAR,applicazioni Unmanned Aerial Vehicle- UAV), dello sviluppo di software , hardware,algoritmi di AI e automazione di processi.</p>		
<p>Campo d'applicazione</p> <p>Urbanistica</p>		
<p>Scala</p> <p>Urbana,locale</p>		
<p>Tecnologie_Software</p> <p>IoT, 5G wireless,AI, Cloud Computing, Realtà virtuale/aumentata (VR/AR), Web-GIS 3D,BIM, LIDAR, telerilevamento</p>		
<p>Dati Statici</p> <p>Nuvole di punti 3D, database pubblici</p>	<p>Dati Dinamici</p> <p>Sensoristica</p>	
<p>Input</p> <p>Dati microscalari</p>	<p>Output</p> <p>Simulazioni di scenari di rischio Open Source</p>	
<p>Esempi</p> <p>UDT, Scenario-Based Planning: The Cases of Zurich, Dublin, Helsinki</p> <p>PDT , Participatory Digital Twin for Consensus-Building in Herrenberg ,attraverso OS software (Simulation of Urban Mobility -SUMO, COLlaborativeVisualisation and Simulation Environment—COVISE, OpenCOVER, OpenFOAM) and free access to data.I cittadini hanno usato una Geo-app (Reallabor Tracker) per la raccolta di dati per suggerire proposte e presentare criticità all'amministrazione (Volunteered Geographic Information-VGI) e compilare questionari valutativi sull'apprezzamento dei test e delle modalità immersive di comunicazione.</p> <p>(CS)DT: Virtual Singapore as A City-State Digital Twin, (VSdt) è un modello tridimensionale complesso e dinamico di una città virtuale che include inoltre la configurazione digitale degli spazi aperti e della vegetazione</p>		
<p>Altro</p> <p>Bolton, "... una rappresentazione virtuale dinamica di un oggetto o di un sistema fisico attraverso il suo ciclo di vita, utilizzando dati in tempo reale per consentire la comprensione, l'apprendimento e il ragionamento".</p> <p>L'aspetto più interessante della declinazione urbana,mira a fornire una risposta locale sistematica e tempestiva ai problemi del nostro tempo,aggravata dalla fragilità strutturale e crescente densità di popolazione delle città. In questo senso, ci riferiamo agli impatti del cambiamento climatico, la perdita di naturalezza,permeabilità e biodiversità nelle città, modelli di trasporto non sostenibili e impatti delle attività umane sulle componenti biofisiche e atmosferiche e di conseguenza al benessere delle persone.</p> <p>Cosa significano Smart Cities e Digital Twin? È difficile trovare una definizione inequivocabile di questi concetti nella letteratura ma c'è un chiaro legame co-creativo: uno abilita l'altro e viceversa.Infatti, un DT privo di sensori e aggiornamenti sincroni o asincroni tra la realtà fisica e il suo gemello virtuale sarebbe una mera rappresentazione digitale tradizionale (modello 3D) di un prodotto, processo o sistema complesso.</p> <p>Il concetto di 'twin city' va oltre l'approccio settoriale della 'smart city' integrando le due componenti (virtuale/digitale e umana) all'interno di una struttura multifunzionale che mira a produrre nuove conoscenze dai dati e viceversa. Nessuno dei casi esaminati al momento ha sviluppato DT organici come centri tecnologici di collegamento tra l'amministrazione comunale e la società civile.</p> <p>L'elemento chiave di questo nuovo paradigma è l'evoluzione spazio-temporale tra dati e simulazione virtuale e tra semantica e geometria. Queste proprietà permettono ai DT di acquisire una serie temporale di dati attraverso i</p>		

sensori, consentendo agli amministratori/utenti di di elaborare scenari "in tempo reale" e "data-driven", offrendo una comprensione precisa della realtà urbana.

Di particolare interesse saranno i progressi nelle linee di ricerca sulla qualità dello spazio pubblico e sulle questioni emergenti in materia di clima-sociale-sanitario, sulle scadenze dell'agenda urbana e sulla governance multilivello, nonché sulle connessioni tra osservazione analogica ed elaborazione digitale per una pianificazione urbana sostenibile e completa.

Luogo

Europa: Cambridge, Dublin, Gothenburg, Helsinki, Herrenberg, London, Munich, Newcastle, Paris, Rennes, Rotterdam, Zurich

Nord America: Atlanta, Boston, Boulder, Pasadena, Portland

Asia e Oceania: Amaravati, Dubai, Jaipur, Singapore, Sidney, Yingtian.

Keywords

digital twin, urban planning, urban governance, tools and techniques, geospatial technologies, climate action.

Bibliografia/Sitografia

https://www.researchgate.net/publication/367577515_Digital_Twin_for_Urban_Planning_in_the_Green_Deal_Era_A_State_of_the_Art_and_Future_Perspectives

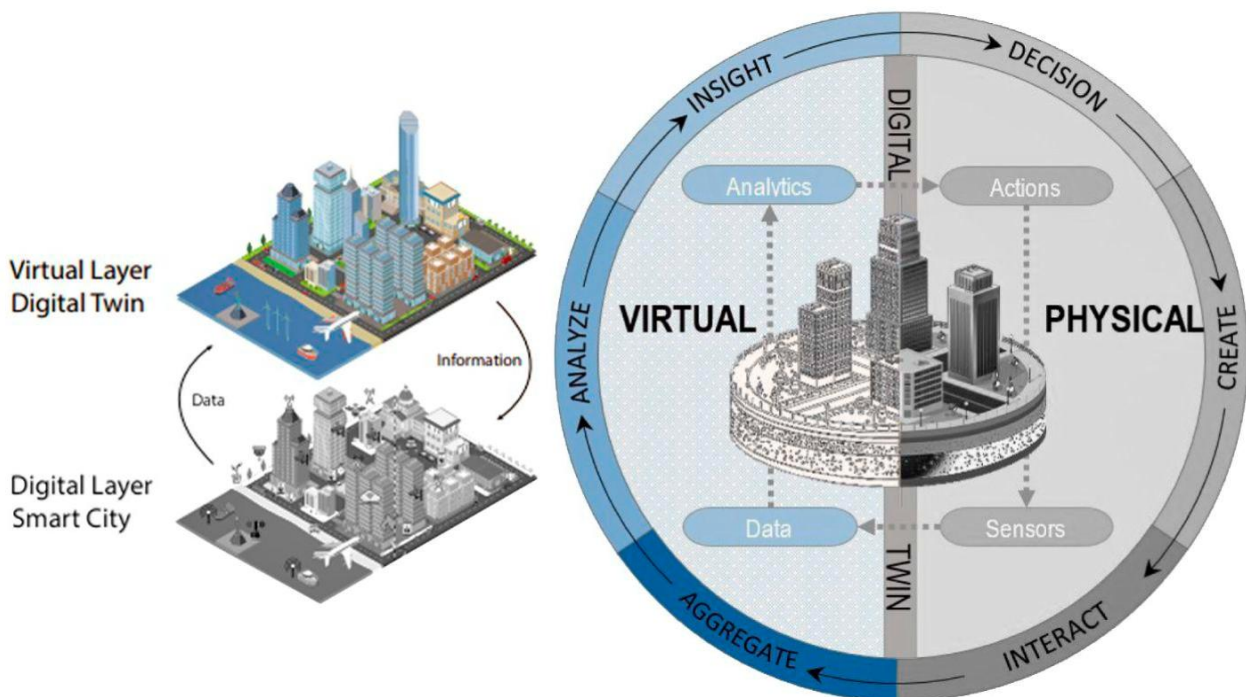


Tabella 1. Alcune definizioni di DT a seconda dell'ambito di applicazione.

Autore e anno	Definizioni di gemello digitale	Campo di applicazione
Glaessgen E., Stargel D., 2012 [29]	'[. . .] è una simulazione integrata multifisica, multiscala e probabilistica di un veicolo o un sistema "as-built" che utilizza i migliori modelli fisici disponibili, gli aggiornamenti dei sensori, la storia della flotta, ecc. per rispecchiare la vita del suo gemello volante corrispondente ".	Aerospaziale
Chen Y., 2017 [30]	"[. . .] è un modello computerizzato di un dispositivo fisico	Design del prodotto
Vrabic' R. et al., 2018 [33]	o sistema che rappresenta tutte le caratteristiche funzionali e i collegamenti con gli elementi di lavoro". "[. . .] è una rappresentazione digitale di un articolo o di un gruppo fisico che utilizza simulazioni integrate e dati di servizio [. . .] contiene informazioni provenienti da più fonti lungo il ciclo di vita del prodotto. [. . .	Ingegneria
Schrotter G., Hürzeler C., 2020 [38]] viene continuamente aggiornato e visualizzato in vari modi per prevedere le condizioni attuali e future, [. . .], per migliorare il processo decisionale ". "[...] significa un arricchimento coerente dell'inventario di dati territoriali 3D e, oltre alla modellazione e alla descrizione dei dati, una gestione del ciclo di vita dei singoli componenti e dell' intero inventario di dati ".	Pianificazione urbana

Tabella 2. Casi di studio selezionati: sintesi dei contenuti e confronto.

		Casi di studio			
		Cambridge [40]	Zurigo [38], Dublino [27], Helsinki [41-43]	Herrenberg [23,44]	Singapore [45-49]
		Statico e manageriale Sovracomunale	Dinamico-evolutivo Città, sub-aree, distretto	Dinamico-evolutivo e collaborativo Città	Dinamico-evolutivo Città-Stato
Scopi	Governance multilivello e piattaforma per la cooperazione tra i diversi livelli di pianificazione	Orientato alla valutazione preventiva guidata dai dati, alla creazione di scenari simulativi e predittivi per il supporto alle politiche/azioni di sviluppo urbano sostenibile.		Creazione del consenso, coinvolgimento dei cittadini interessati, democratizzazione dei processi decisionali	Sviluppo di una piattaforma di supporto decisionale ad alta tecnologia
Le tecnologie GIS	Elaborazione	GIS-BIM, Laser Scanner, UAV (Unmanned aerial vehicle), IoT, software Open Source	GIS-BIM, Lidar, IoT, AR/VR, software Open-Source	GIS-BIM, Lidar, IoT, AR/VR, software Open-Source	GIS-BIM, immagini satellitari ad alta risoluzione, Lidar, telerilevamento, Deep Learning, Machine Learning, AI
Esperimenti	<ul style="list-style-type: none"> - Indagini urbanistiche tradizionali prima dell'elaborazione del progetto - Simulazione della domanda energetica locale in uno scenario "what if" di mobilità elettrica considerando le future politiche abitative e lavorative 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulazioni di scenari di crisi e di prevenzione (inondazioni e deflussi, temperature, esposizione a sostanze inquinanti) finalizzato a sviluppare strategie specifiche per il sito - Analisi del microclima urbano (ventilazione, studio delle ombre, radiazione solare) 	<ul style="list-style-type: none"> - Applicazioni di realtà aumentata (AR/VR) in eventi pubblici e laboratori - Sviluppo di app per la raccolta di dati (VGI) - Simulazioni di mobilità e traffico per la sensibilizzazione sui temi dell'inquinamento antropico 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulazioni climatiche da scala urbana (City-GML) a scala edilizia (BIM) con diversi strumenti applicativi integrati in DT - Censimento 3D degli alberi con procedure tecnologiche semi-automatiche - Massima precisione dell'ambiente costruito (LOD3) 	
Punti di forza	<ul style="list-style-type: none"> - DT come strumento di coordinamento tra i livelli di pianificazione - Analisi strategica della struttura di governance locale - Coinvolgimento dei rappresentanti dei cittadini 	<ul style="list-style-type: none"> - Modello 3D ad alta tecnologia - Simulazioni in scenari climatici critici - Modelli DT nei dati aperti 	<ul style="list-style-type: none"> - Attività multipartecipative - Strumenti tecnologici avanzati (AR/VR) + raccolta dati GeoApp (VGI) - Simulazioni a partire dai dati dei sensori 	<ul style="list-style-type: none"> - DT realistico (LOD 3) e strumentazione tecnologica avanzata - Caratterizzazione degli spazi aperti (vegetazione 3D) - Scenari macro-micro energetici/climatici da dati misurati e simulati 	
Punti di debolezza	<ul style="list-style-type: none"> - Modello 3D virtuale non sviluppato - Capacità di simulazione limitate 	<ul style="list-style-type: none"> - I DT non tengono conto della morfologia dello spazio aperto - Interoperabilità generale bassa e coinvolgimento degli utenti (workshop, strumenti, feedback e rapporti) - Poche simulazioni da dati sincronizzati con l'IoT 	<ul style="list-style-type: none"> - Mancanza di proposte e/o scenari proattivi - Mancanza di rapporti con il governo e la governance territoriale 	<ul style="list-style-type: none"> - Rischio di mancanza di trasparenza dei dati (software proprietario) - Mancanza di un sistema di co-design e/o di processi partecipativi 	

06	Titolo Articolo Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review	Fonte _ Autore_ Data ResearchGate_ M. R. Enders, N.Hoßbach_04/04/2022
<p>Definizione DT "Un Gemello Digitale è una rappresentazione virtuale di un oggetto fisico chiamato Gemello Fisico. Il Gemello Fisico e quello digitale possono essere collegati tra loro. Un Digital Twin può fornire maggiori informazioni sul Gemello fisico di quante ne possa fornire il Gemello fisico stesso" ..." questa definizione copre un ulteriore aspetto di completezza nel senso che un Digital Twin può fornire più informazioni su un oggetto fisico rispetto all'oggetto stesso come previsioni (Sivalingam et al. 2018) o risultati di simulazione (Ayani et al. 2018). I risultati forniti da una simulazione possono anche essere ottenuti direttamente dall'oggetto fisico ma con un Digital Twin, queste informazioni possono essere fornite senza necessità dell'oggetto fisico, che consente di ridurre al minimo i tempi di inattività delle attività di produzione per esempio."</p>		
<p>Campo d'applicazione Manifatturiero,aeronautica,agricolo,energetico,automobilistico,sanitario,settore pubblico</p>		
<p>Scala Micro-scala, macro- scala</p>		
<p>Tecnologie_Software</p>		
<p>Dati Statici</p>	<p>Dati Dinamici</p>	
<p>Input</p>	<p>Output</p>	
<p>Esempi</p>		
<p>Altro Il tempo di creazione descrive se un gemello digitale è stato creato prima o dopo la sua controparte fisica e può essere diviso in due categorie: -I DT creati prima dell'esistenza del gemello fisico . Grieves e Vickers (2017) affermano che quando un Gemello Digitale viene creato prima che esista un Gemello Fisico corrispondente, viene chiamato prototipo di Gemello Digitale. (Alaei et al. (2018)un prototipo di Gemello Digitale usato durante la fase di progettazione del prodotto per poter ottenere un feedback dai clienti senza dover ricorrere a una prototipazione lunga e costosa). -I DT creati in qualsiasi momento successivo durante l'esistenza del gemello fisico . Quando il Gemello Digitale è legato a un oggetto fisico, viene chiamato un'istanza di Gemello Digitale. (Luo et al. (2018) descrivono come sia possibile costruire un'istanza di Digital Twin per un singolo componente di una una fresatrice CNC già esistente per aggiungere funzionalità aggiuntive, che consentono di prevedere i guasti e di avvisare in tempo guasti e di avvisare in tempo per evitare danni gravi).</p> <p>Le applicazioni del Digital Twin sono state suddivise nei tre scopi seguenti: - SIMULAZIONE, riguarda applicazioni in cui il comportamento di oggetti fisici può essere riprodotto in uno spazio virtuale. Ciò consente di pianificare o ottimizzare prodotti o impianti di produzione senza dover fare affidamento sull'oggetto fisico. - MONITORAGGIO, comprende tutte le applicazioni che si concentrano sulla rappresentazione dello stato attuale e sulla sua interpretazione di un oggetto fisico. - CONTROLLO,comprende le applicazioni in cui i Digital Twin influenzano direttamente i prodotti o gli impianti di produzione.</p> <p>La dimensione di completezza può essere misurata dal numero di caratteristiche rappresentate dell'oggetto fisico dal Digital Twin come per esempio geometria, temperatura, umidità o consumo energetico. Grieves e Vickers (2017) affermano che un Digital Twin ottimale può fornire ogni informazione su un oggetto fisico che può essere raccolto dall'oggetto fisico stesso e quindi il Digital Twin può essere considerato completo.</p>		

La **connessione** tra oggetto fisico e virtuale è identificata attraverso:

-NESSUNA CONNESSIONE, si riferisce a una rappresentazione digitale di un oggetto fisico senza una connessione ad esso. Ciò può verificarsi, ad esempio, durante lo sviluppo di nuovi prodotti quando non viene creato alcun oggetto fisico ma esiste già una rappresentazione virtuale dello stesso.

-CONNESSIONE UNIDIREZIONALE, dal modello fisico al digitale, può essere utilizzata per riflettere lo stato attuale del modello reale nella sua controparte digitale. Sulla base delle informazioni provenienti dall'oggetto fisico, il Digital Twin può essere utilizzato per simulare e analizzare il comportamento dell'oggetto fisico (Demkovich et al. 2018). Ad esempio, Luo et al. (2018) utilizzano un Digital Twin con una connessione unidirezionale per prevedere i guasti della macchina.

-CONNESSIONE BIDIREZIONALE, è una connessione diretta in entrambe le direzioni tra il Fisico e Digitale. Ad esempio Malik e Bilberg (2018) hanno creato un Digital Twin di un robot per controllarlo in un posto di lavoro in collaborazione uomo-robot. La differenza rispetto alla connessione unidirezionale è che in questo caso il Digital Twin è in grado di controllare il modello fisico senza interazione umana.

Luogo

Keywords

Digital Twin, Literature Review

Bibliografia/Sitografia

https://www.researchgate.net/publication/359715537_Dimensions_of_Digital_Twin_Applications_-_A_Literature_Review

07	Titolo Articolo Urban digital twin applications as a virtual platform of smart city	Fonte _ Autore _ Data INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABLE Building Technology and Urban Development_Seungho Yang, Heechul Kim_2021
Definizione DT Il gemello digitale è un concetto in cui un mondo virtuale creato sulla base di una modellazione 3D è collegato al mondo reale, e i dati reali vengono utilizzati nello spazio virtuale e restituiti al mondo reale. È anche considerato come un processo di simulazione di un prodotto fisico in uno spazio virtuale. In questa città virtuale ha luogo un'interazione in tempo reale tra la realtà fisica e il modello virtuale, che comprende il monitoraggio in tempo reale della città, l'analisi di vari fenomeni, la previsione del futuro attraverso la simulazione e la visualizzazione di varie caratteristiche. Pertanto, il gemello digitale urbano è riconosciuto come un'opportunità per migliorare la pianificazione urbana e sviluppare città intelligenti di successo.		
Campo d'applicazione Edificio, strada, quartiere, città		
Scala Urbana, locale		
Tecnologie_Software BIM, VR, IoT, Analytics		
Dati Statici	Dati Dinamici Sensoristica	
Input	Output Simulazione, monitoraggio, mappatura	
Esempi PER OGGETTO D'APPLICAZIONE: -Pianificazione e progettazione urbana. Dublino: Simulazione dell'impatto della costruzione di nuovi edifici sull'ombreggiamento. -Gestione e operatività della città Hong Kong: Monitoraggio delle operazioni delle infrastrutture di tubature. -Trasporti, Ambiente ed Energia. Londra: Fornitura di informazioni sul flusso del traffico, valutazione dell'efficienza energetica degli edifici. -Catastrofi. Helsinki: simulazione di un'alluvione. -Altri usi. Seul:Fornitura di informazioni turistiche. PER TIPO DI SERVIZIO: -Simulazione. Seul: simulazione del percorso del vento, monitoraggio e analisi in tempo reale, monitoraggio sulle condizioni di traffico. -Mappatura e costruzione di database. Anversa: mappatura del livello di rumore -Servizio civico. Singapore: Servizio di piattaforma per auto condivise PER SCALA SPAZIALE: -Scala di edificio. Pechino: gestione delle informazioni sugli edifici -Scala del quartiere Londra: Previsione del livello di criminalità -Scala della città. DUET (Digital Urban European Twins): Analisi della rete stradale urbana		
Altro Una Città Intelligente ha la caratteristica di funzionare come una piattaforma che comprende un'ampia gamma di elementi legati alla vita dei cittadini. A questo proposito, Kim et al. (2018) hanno considerato la smart city come una Città Piattaforma in cui le infrastrutture, istituzioni e risorse umane sono armonizzate. Hanno spiegato che le città intelligenti risolvono i problemi urbani analizzando le informazioni raccolte in tutta la città e inducendo un uso efficiente delle sue risorse; in altre parole, l'intera città diventa una piattaforma che fornisce informazioni personalizzate richieste dai suoi utenti. Il fatto che una smart city abbia la caratteristica di una piattaforma che si occupa delle problematiche urbane nel loro complesso significa che può essere descritta come un insieme di numerosi elementi individuali. Le parole chiave per la ricerca dei dati includevano il termine : "urban digital twin" (gemello digitale urbano) "digital twin city" (città gemella digitale).		

Inoltre, dato che il concetto stesso di Digital Twin viene descritto come una piattaforma per la simulazione attraverso modelli virtuali, sono state utilizzate anche parole chiave come

"**urban simulation**" (simulazione urbana)

"**city simulation**" (simulazione di città).

Il lavoro di simulazione dei fenomeni che avvengono nello spazio urbano è stato, in linea di principio, giudicato accettabile per la piattaforma del gemello digitale urbano.

CRITERI DI CLASSIFICAZIONE:

-**Oggetto d'applicazione.** I gemelli digitali urbani hanno diverse applicazioni; pertanto, è necessario preparare un modello che soddisfi lo scopo di ogni applicazione .

- **Tipo di servizio dell'applicazione.** Dato che la direzione dello sviluppo del modello sarà determinata fin dall'inizio in base al tipo di servizio finale.

-**Scala dello spazio** a cui si rivolgono le applicazioni dei gemelli digitali urbani. I gemelli digitali urbani si basano su dati provenienti da vari strati della città e le soluzioni che ne derivano hanno anch'esse diverse scale di applicazione. Pertanto, è importante considerare la scala spaziale delle applicazioni di gemello digitale urbano in termini di acquisizione dei dati o di utilizzo delle soluzioni.

CLASSIFICAZIONE IN TERMINI DI OPERATORI E UTENTI:

I cittadini e le parti interessate nelle città hanno interessi diversi, nel campo della pianificazione urbana, la partecipazione e il processo collaborativo di più attori e i vari domini dovrebbero essere considerati. Pertanto, nel gemello digitale del settore pubblico, come le amministrazioni comunali, i ruoli del settore pubblico o privato devono essere ben definiti.

Luogo

Seoul, Dublino, Singapore, Londra, Hong Kong, Hangzhou, Sejong, Helsinki

Keywords

Urban digital twin, smart city, application, platform, simulation

Bibliografia/Sitografia

<https://www.sbt-durabi.org/articles/article/KGOd/>

08	Titolo Articolo Local Digital Twin	Fonte _ Autore_ Data Policy Brief_Lieven Raes, Digital Vlaanderen Susie Ruston McAleer and Pavel Kogut, 21c_2022
<p>Definizione DT</p> <p>Cos'è un Digital Twin (DT)? Un modello digitale intelligente e in continua evoluzione di un sistema del mondo reale dove l'interazione bidirezionale permette al gemello di monitorare e migliorare le prestazioni di un sistema e allo stesso tempo di imparare dalla controparte del mondo reale per diventare una migliore rappresentazione delle sue proprietà e dei suoi processi.</p> <p>Che cos'è un Local Digital Twin (LDT)? Il concetto di gemello digitale applicato su scala cittadina. Le attuali applicazioni LDT si concentrano sulle aree urbane, ma con l'evolversi del concetto non c'è dubbio che le LDT includeranno nuovi luoghi (aree rurali) e scale (regionale, nazionale, europea).</p>		
<p>Campo d'applicazione</p> <p>Città</p>		
<p>Scala</p> <p>Urbana, locale</p>		
<p>Tecnologie_Software</p> <p>BIM, VR, IoT, Analytics, GIS,</p>		
<p>Dati Statici</p> <p>Modello 3D</p>	<p>Dati Dinamici</p> <p>Sensoristica</p>	
<p>Input</p> <p>Modelli</p>	<p>Output</p> <p>Simulazione, monitoraggio, mappatura</p>	
<p>Esempi</p> <p>DUET's LDT Maturity Model aiuta a capire quali sono i potenziali percorsi/stadi che una città può attraversare nel suo percorso LDT e quali sono le domande che dovrebbe porsi per crescere e migliorare le proprie capacità per una migliore definizione delle politiche supportate dai dati.</p> <p>-CITTA' DI PILSEN, REPUBBLICA CECA:</p> <p>Costruire un gemello digitale è un processo graduale. Le città dovrebbero iniziare con i dati disponibili in uno o due settori (ad es. il traffico, ambiente, dati 3D), concentrandosi su set di dati di alta qualità, inclusi i dati IoT, e successivamente aggiungere altri domini al mix. Il passo successivo sarebbe passare dall'analisi e visualizzazione dei dati ai modelli predittivi. È importante coinvolgere le organizzazioni all'interno di una città che influenzano le operazioni e le decisioni chiave, come i responsabili di GIS, IT, pianificazione urbana, energia, mobilità, sicurezza. Il loro impegno è necessario sia per progettare una soluzione LDT efficace,</p> <p>DUET's Cities Guide to Legal Compliance for Data-Driven Decision Making fornisce assistenza nel processo di selezione dei set di dati e dei modelli per l'uso del processo decisionale e nelle attività di analisi/reporting relative alla selezione.</p> <p>-REGIONE DELLE FIANDRE, BELGIO:</p> <p>In DUET, siamo stati in grado di "parlare tra loro" attraverso un sistema complesso che consiste in diversi sottosistemi basati su standard. Questa interoperabilità basata sugli standard ha in definitiva facilitato la comunicazione tra i dati della città primaria (ad es. reti stradali, edifici, modelli di elevazione), i dati dei sensori IoT e vari modelli di simulazione legati al traffico, alla qualità dell'aria e al rumore.</p> <p>Uno dei punti salienti del nostro progetto pilota è stato l'integrazione di modelli, sistemi e set di dati locali e regionali, ad es. l'uso del modello di traffico delle Fiandre a Ghent, la fusione di modelli regionali di qualità dell'aria (da VITO) con i dati LOD2 3D locali e la fusione di reti di sensori regionali per una migliore copertura/granularità. Ciò ha richiesto un'ampia cooperazione tra i diversi dipartimenti (ad es. dati e informazioni, mobilità, ambiente) soprattutto nel campo dei lavori stradali. Per quanto riguarda le lezioni apprese, abbiamo riscontrato che, sebbene vi sia un ampio sostegno per l'uso dei risultati LDT nella comunicazione delle politiche, mancano ancora prove del loro uso efficace e coerente nella preparazione e valutazione delle politiche con i cittadini.</p>		

DUET's Governance Model aiuta le città a determinare i requisiti per i modelli di business cloud, esplorando il tipo di ecosistema a livello di rete di cui una città avrà bisogno per raggiungere i propri obiettivi. Quattro categorie di modelli di rete sono esplorate con casi d'uso da Orebro, Helsinki, Amsterdam, Vienna e Rotterdam.

-CITTA' DI ATENE, GRECIA:

La città di Atene vede Digital Twin come un driver per accelerare l'adozione di una politica basata su prove. Ciò richiede, tra l'altro, di sfruttare le fonti di dati disponibili, come i dati GIS comunali (terreno, posizione degli alberi, modelli di costruzione 3D, ecc.), i dati dei trasporti pubblici, comprese le posizioni delle fermate e dei veicoli in movimento, i dati più ampi sul traffico, i dati sull'inquinamento e i dati sul rumore.

Una delle sfide e delle principali lezioni apprese riguarda l'apertura, l'accessibilità, la qualità e il formato dei set di dati disponibili. In Grecia, i dati aperti locali stanno solo iniziando a guadagnare terreno. Molti set di dati non sono aggregati, forniti in formati non compatibili o semplicemente chiusi (privati). Abbiamo affrontato questi problemi investendo in reti IoT e sensori a basso costo e attingendo alle risorse/ai set di dati disponibili a livello UE...Attualmente, il gemello digitale di Atene correla dati sul traffico con dati sull'aria e sull'inquinamento atmosferico e acustico. Questo viene poi utilizzato per creare scenari per il green routing e il monitoraggio del traffico all'interno della città. Inoltre, fornisce la caratteristica di raccolta di feedback da parte di cittadini/utenti su disponibili scenari what-if sotto forma di commenti/suggerimenti.

Altro

In teoria, un LDT dovrebbe essere il più vicino possibile a una città reale in tutte le sue complessità: rispecchiando la vita urbana in tutta la sua a livello di diversi sistemi e sottosistemi. complessità: ... su scale temporali che vanno dai secondi (città ad alta frequenza) fino alle ore, giorni, mesi e persino anni (città a bassa frequenza). Se un giorno tale LDT dovesse emergere, dopo aver superato tutte le sfide etiche, di dati e di calcolo, non si tratterebbe di un singolo gemello, ma di un insieme di gemelli cooperanti di livello inferiore che rappresentano una miriade di settori, domini e attività che compongono il tessuto urbano.

In un contesto urbano i gemelli digitali hanno un ruolo da svolgere nel modo in cui città sono pianificate, costruite e gestite. (Urban planning, Construction, City management).Una città può avere numerose applicazioni in una vasta gamma di settori (ad esempio, modelli di traffico, modelli di inondazione, giochi di realtà virtuale), ma se non sono interconnesse in qualche modo, il valore di una città intelligente veramente connessa non potrà mai essere realizzato.Grazie a un gemello digitale, diverse applicazioni e servizi per la smart city possono diventare parte di un ecosistema che aumenta il valore dei singoli servizi.

Luogo

Pilsen, Regione delle Fiandre, Atene, Orebro, Helsinki, Amsterdam, Vienna, Rotterdam

Keywords

DUET(Digital Urban European Twin), LDT(Local Digital Twin)

Bibliografia/Sitografia

<https://www.digitalurbantwins.com/>

https://www.digitalurbantwins.com/_files/ugd/68109f_c0be167a31d54825a3f458323d773790.pdf

Intelligent Twins

Future Ready Phase

AI powered simulations enable accurate predictions for real-time data-supported operation decisions and policy.

Big Data / AI

Data simulations/predictions

3D Interface

Cloud enabled

Predictive Twins

Insightful Phase

Advanced data models inform near real-time decisions across 2 or more domains

Experimental Twins

Exploratory Phase

Policy impact predicted using limited static data sets (often historical data).

Awareness of Twins

Strategy Phase

Planning to adopt digital twins. Exploration of funding options.

Data analytics

Open data

Intelligent Twins

Future Ready Phase

Uses structured and unstructured data for cross-domain impact modelling

Twin uses AI to learn and make real-time accurate insights and predictions

Able to accurately align real-time operational decisions with longer term policy

Insightful Phase

Integrates large numbers of structured urban data sets for multiple use cases across more than 2 domains

Impact predicted using advanced data models and simulations (what-if scenarios)

Able to inform near real-time decisions

Exploratory Phase

Brings together a small number of structured urban data sets for a specific use case involving 2 domains

Impact predicted on limited static (meta) data sets and sources (often centered on mobility)

Able to make decisions based on historical data

Strategy Phase

Political desire to create/adopt Digital Twins for better evidence-based decision making

Aligns with administrations existing digital transformation and smart city strategies

Enablers				
People	Research or proposal writing teams from policy and/or IT departments	Digital skills needed to model and understand the data	Twins easy to understand facilitating collaboration between stakeholders	Digital Twin insights embedded in leadership decisions
Governance	Exploring existing models and frameworks	Funding and mandates usually from Government Innovation projects	City funded adhering to (inter)national legislation and standards	Adoption of responsible AI approach & ethical data governance
Technology	City open data sets	Testing of digital twin interoperability with other data platforms	Cloud based prediction models, 3D interface.	HPC enabled AI & Machine Learning Comprehensive, scalable data capture

09	Titolo Articolo Local Digital Twins: Driving Business Model Innovation in Smart Cities	Fonte _ Autore_Data DUET_Ruben D'Hauwers, Pavel Kogut_2021
<p>Definizione DT</p> <p>Il termine LDT è stato recentemente coniato dalla Commissione Europea per descrivere i gemelli digitali delle città, i loro processi, sistemi e risorse. Operano su scala più ampia ma utilizzano tecnologie avanzate simili a quelle delle controparti del settore privato (ad esempio cloud computing, IoT, intelligenza artificiale) per migliorare il modo in cui le città vengono pianificate e gestite. Il termine LDT è sinonimo del concetto di gemelli digitali urbani, poiché entrambi si riferiscono a gemelli digitali su scala urbana.</p> <p>Gli LDT offrono molti degli stessi vantaggi degli altri sistemi di smart city. Ad esempio, con i LDT è possibile ottenere informazioni contestuali sulle attività fisiche (ad es. il consumo energetico degli edifici)... (ad es. modelli di mobilità) e altre tendenze chiave che influenzano la città e i suoi abitanti (ad es. livelli di inquinamento, cambiamenti climatici). È anche possibile ottimizzare le prestazioni della città facendo funzionare i suoi sistemi in modo più efficiente; un esempio potrebbe essere l'ottimizzazione di una rete di trasporto attraverso un centro di controllo alimentato da AI. Questa funzione di valutazione ex ante rende gli LDT uno strumento ambito dalle autorità pubbliche. E mentre le amministrazioni cittadine sono spesso i principali utilizzatori degli LDT, ci sono molti esempi internazionali che dimostrano l'uso degli LDT al di là del processo decisionale politico. Un gemello digitale aperto all'ecosistema può avvantaggiare anche altri attori. Ad esempio, può aiutare i cittadini a usufruire dei servizi pubblici in modo migliore e più rapido, mentre le aziende possono sviluppare nuovi prodotti e servizi basati sui dati LDT.</p>		
<p>Campo d'applicazione Città</p>		
<p>Scala Urbana</p>		
<p>Tecnologie_Software GIS, IoT,AI,Cloud Computing, Big Data, XsaaS</p>		
<p>Dati Statici Modello informativo della città</p>	<p>Dati Dinamici Sensoristica</p>	
<p>Input Dati informativi (dati di censimento, dati socioeconomici, dati sul consumo energetico, dati sulla manutenzione)</p>	<p>Output Scenari</p>	
<p>Esempi</p> <p>The Closed LDT: Il GeoTWIN di Vienna, che è attualmente nella fase di prototipo. È stato creato per raggiungere diversi obiettivi. Il primo è quello di abbattere i silos di dati all'interno del governo collegando diverse fonti al modello informativo della città, ad esempio GIS, dati di censimento, dati socioeconomici, dati sul consumo energetico, dati sulla manutenzione. Un altro è quello di sostenere la pianificazione urbana e lo sviluppo di nuovi progetti infrastrutturali, come l'area della Stazione Ferroviaria Nord-Ovest. Nel caso del geoTwin di Vienna, il valore viene creato internamente al governo sotto forma, tra le altre cose, di un miglioramento del processo decisionale politico, di una riduzione dei rischi e di una migliore pianificazione urbana. I costi sono coperti dal dipartimento GeoTWIN utilizzando fondi governativi.</p> <p>The Network-Oriented LDT: L'Helsinki Digital Twin è stato creato dalla città per stimolare la collaborazione tra molteplici funzioni cittadine e fornire una risposta collettiva ai bisogni urbani, compreso come utilizzare le risorse energetiche in modo più efficiente. In effetti, una delle principali applicazioni del gemello digitale di Helsinki è l' Energy and Climate Atlas, un servizio web aperto costruito su un modello di città semantica. Pubblicato per la prima volta nel 2018, l'Atlante include informazioni di base su tutti gli edifici e sul loro consumo energetico. Il modello 3D della città permette agli utenti di fare analisi comparative per scoprire, ad esempio, quanta energia consumano i diversi edifici, quanta energia solare può essere ricevuta dai diversi edifici. L'Atlante è un utile strumento informativo per le società immobiliari, i promotori immobiliari, i produttori di pannelli solari, ma anche i cittadini. L'Atlante può essere utilizzato da chiunque, anche per scopi commerciali, purché venga citata la città di Helsinki come fonte dei dati.</p> <p>The Network Owned LDT: In effetti, alcuni primi segnali di transizione verso il Network Owned LDT possono essere individuati nei progetti di gemello digitale urbano esistenti. Un esempio calzante è Rotterdam. La città vuole creare un'infrastruttura digitale</p>		

per riunire gli attori locali con l'obiettivo di incoraggiarli a condividere informazioni e servizi all'interno dell'ecosistema dei dati. Attualmente esistono circa 350 diverse iniziative di città intelligenti che non sono collegate tra loro. La piattaforma cambierebbe la situazione interconnettendo il maggior numero possibile di applicazioni legate a Rotterdam attraverso l'uso di standard aperti.

The Network Enabled LDT:

Come per il tipo precedente, un vero LDT abilitato alla rete deve ancora emergere nella vita reale. Tuttavia, abbiamo notato alcune manifestazioni di questo gemello urbano a Örebro. La città si sta muovendo verso un ecosistema di dati collegati ("Ett sammankopplat Örebro") per facilitare lo scambio di informazioni su edilizia sociale, sviluppo urbano, istruzione, trasporti e mobilità, tra gli altri.

L'amministrazione locale prevede di combinare alcuni di questi dati con le proprie fonti per migliorare il funzionamento della città. Ad esempio,

uno degli obiettivi è sfruttare i dati dei sensori, alcuni dei quali sono di proprietà di società private, per migliorare le prestazioni della rete stradale. L'aspettativa è che il sistema di segnaletica stradale basato sull'IoT contribuisca a ridurre la congestione grazie a informazioni più accurate sulla densità del traffico.

Altro

Il parametro di utilizzo si sposta da un **modello chiuso** (con il governo come unico utente) a uno **aperto** in cui un gemello digitale è aperto a tutti: dipendenti pubblici, residenti, aziende. In quest'ultimo caso, i benefici derivanti dall'utilizzo dell'LDT vanno a diversi stakeholder, generando un valore esterno per l'ecosistema. Poiché le città intelligenti sono essenzialmente grandi ecosistemi di dati, abbiamo mappato i parametri di controllo lungo l'asse x per indicare i **proprietari delle risorse di dati e delle infrastrutture tecniche**. Il **controllo** può essere **centralizzato** (regolato dal governo) e **decentralizzato** (regolato dall'ecosistema). In un ambiente decentralizzato, diversi attori fungono da fonti di dati. Hanno il controllo delle informazioni in loro possesso e possono stabilire le condizioni per la condivisione e l'accesso ai dati.

The Closed LDT:

Il Closed LDT rappresenta il tipo di LDT più centralizzato nella nostra tipologia. È inteso come strumento di supporto decisionale interno all'amministrazione locale e quindi non è aperto all'ecosistema. Nel Closed LDT, tutti i dati provengono da fonti governative. Gli LDT chiusi vengono avviati, gestiti e pagati dal governo poiché il valore derivato va a beneficio diretto della città. Il governo controlla le condizioni per l'accesso e la condivisione dei dati. Determina inoltre quali componenti utilizzare per lo sviluppo del gemello digitale. Gli LDT chiusi, sebbene progettati per uso interno, sono solitamente realizzati utilizzando software open source poiché le città generalmente preferiscono non acquistare soluzioni proprietarie per evitare il vincolo del fornitore.

The Network-Oriented LDT:

È un passo avanti rispetto al Closed LDT. In questo scenario, la città avvia un progetto di gemello digitale con l'intenzione di renderlo disponibile alla comunità più ampia. Il costo di implementazione del Network Oriented LDT è generalmente sostenuto dal governo. Ciò riguarda l'infrastruttura tecnica, nonché la raccolta e la strutturazione dei dati. Dato il suo orientamento verso l'esterno, il Network Oriented LDT supporta il processo decisionale nei settori pubblico e privato. Il gemello digitale non è più limitato all'uso governativo, sia la città che le imprese possono creare nuovi servizi utilizzando approfondimenti e dati forniti dalla piattaforma. Pertanto, il Network Oriented LDT sfrutta i finanziamenti pubblici per aprire lo spazio dell'innovazione all'ecosistema.

The Network Owned LDT:

È qui che si riscontra il massimo livello di diffusione per quanto riguarda l'utilizzo e il controllo. Mentre altri tipi di LDT sono guidati dalle città, il Network Owned LDT è l'iniziativa di un ecosistema, che successivamente ne supervisiona l'implementazione e la gestione, lasciando al governo il compito di svolgere un importante ruolo di facilitazione insieme all'industria, alla scienza, alla ricerca e alla società civile. Il Network Owned LDT non è un progetto finanziato esclusivamente dalla città. In questo caso i costi vengono ripartiti proporzionalmente tra gli attori che hanno aderito all'iniziativa. Affinché questo tipo di gemello digitale urbano possa emergere, avremmo bisogno di un ecosistema digitale aperto in cui le informazioni e i servizi del settore pubblico, del settore privato, del mondo accademico e dei cittadini possano essere resi disponibili in modo affidabile. In sostanza, si tratterebbe di un ecosistema di dati federato di spazi collegati in rete basati su regole concordate per promuovere l'interoperabilità.

The Network Enabled LDT:

Presenta elevati livelli di decentralizzazione per quanto riguarda dati e infrastrutture, tuttavia i suoi obiettivi sono per lo più legati alle politiche, il che rende il governo l'unico utente della soluzione. Sebbene i dati provengano dall'ecosistema e alcune infrastrutture siano condivise con l'amministrazione locale, l'accesso allo strumento reale e ai risultati è limitato ai responsabili politici. Il Network Enabled LDT rappresenta quindi una parte chiusa di un ecosistema altrimenti aperto in cui il governo può creare la propria istanza di gemello digitale per uso privato.

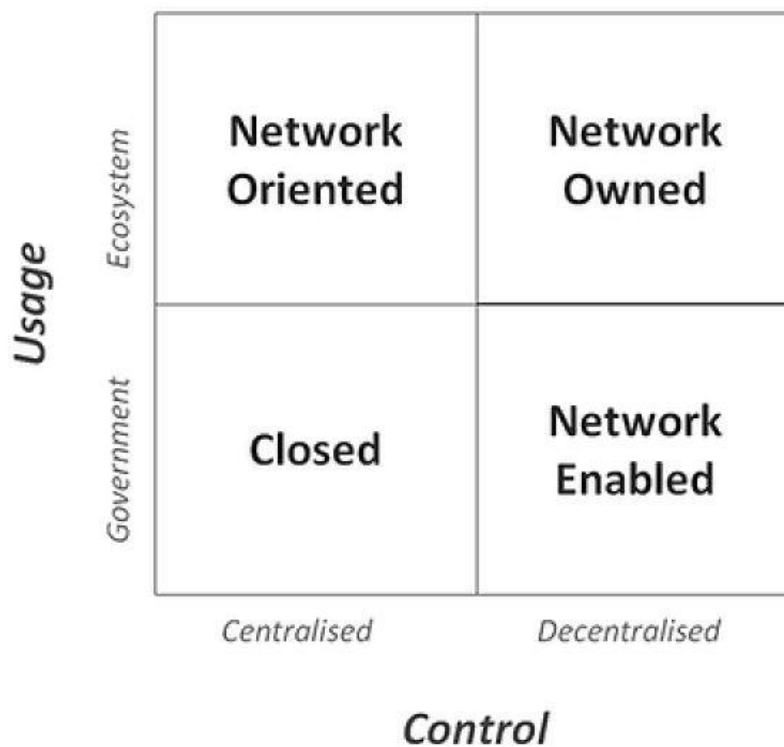
Luogo

Vienna, Helsinki, Rotterdam, Orebro

Keywords**Bibliografia/Sitografia**

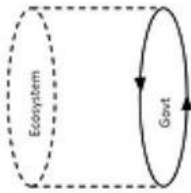
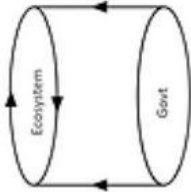
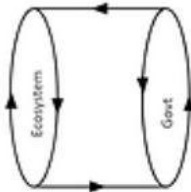
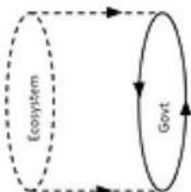
<https://www.digitalurbantwins.com/post/the-taxonomy-of-local-digital-twins-lessons-from-smart-cities>

THE TYPOLOGY OF LOCAL DIGITAL TWINS



La tipologia degli LDT. Fonte: elaborazione degli autori basata su [D2.4](#)

Fig

				
Purpose	Policy Making	Open Innovation Citizen Participation	Open Innovation Citizen Participation Policy Making	Policy Making
Owner	Government	Government	Ecosystem	Ecosystem
Data Type	Governmental Purchased Commercial	Governmental Purchased Commercial	Governmental Commercial Personal	Governmental Licensed Commercial
Data Control	Government	Government	Ecosystem	Government Ecosystem
Examples	Vienna	Helsinki	Rotterdam*	Örebro*

*A fledgling example of the LDT type in question

A Summary of LDT Characteristics

10	Titolo Articolo Recognition of digital twin city from the perspective of complex system theory: Lessons from Chinese practice	Fonte _ Autore_Data Journal of Urban Management Volume 12, Issue 2_Chuncheng Liu, Ying Tian_2023
Definizione DT <p>L'idea del gemello digitale è nata nel campo della produzione industriale e aerospaziale, dove è stata utilizzata per simulare e controllare sistemi complessi (Shafto et al., 2012 ; Digital, 2017 ; Bolton et al., 2018). Una città è un sistema adattivo complesso creato dall'uomo, che è diventato un campo importante per l'applicazione del gemello digitale. Il concetto di città gemellate digitali è stato introdotto per la prima volta nella seconda metà del 2017 durante la pianificazione e la costruzione della nuova area di Xiong'an, che ha coinvolto la pianificazione innovativa di questo concetto, nonché la sua struttura di base e i meccanismi di attuazione. Da allora, la ricerca sulle città gemelle digitali è aumentata rapidamente. Un gran numero di studi ha valutato la pratica e la tecnologia delle città gemelle digitali (Zhou& Liu, 2018 ; Ham & Kim, 2020 ; Lehner & Dorffner, 2020 ; Xue et al., 2020), ma manca una comprensione delle Digital Twin Cities dal punto di vista del sistema urbano (Shahat et al., 2021). La direzione delle Digital Twin Cities nella pratica non è chiara, l'obiettivo manca ed esistono numerosi problemi, tra cui la costruzione continua e il basso utilizzo della piattaforma.</p> <p>Il CDT ha tutte le caratteristiche di un sistema urbano complesso corrispondente al sistema urbano fisico. La sua essenza è l'agglomerato di persone, e la sua complessità può essere ricavata da quella delle persone in città. Il processo di risposta e adattamento delle CDT ai cambiamenti ambientali esterni è quello delle persone ai cambiamenti ambientali esterni. Le città gemelle digitali sono espresse intuitivamente quando la città fisica e il suo "specchio digitale" (o città cibernetica) crescono insieme, si evolvono insieme e interagiscono in tempo reale tra loro, riflettendo così varie caratteristiche di sistemi adattivi complessi.</p> <p>Le città gemelle digitali sono in grado di interagire con le informazioni urbane in tempo reale utilizzando nuovi mezzi tecnici, come l' Internet of Things, analisi di rete e simulazione intelligente.</p>		
Campo d'applicazione Città		
Scala Urbana		
Tecnologie_Software IoT, 5G, network analysis, intelligent simulation, city information platform, BIM, CIM		
Dati Statici	Dati Dinamici Big Data, Sensoristica	
Input	Output Scenari, simulazioni, valutazioni	
Esempi <p>Nel 2018, l'amministrazione della nuova area di Xiong'an ha dichiarato che "dall'inizio della pianificazione e della costruzione, dovremmo aderire alla pianificazione e alla costruzione sincrone di città digitali e città reali e costruire la nota chiave delle città gemelle digitali e delle città intelligenti ". In quanto città gemella digitale nativa, Xiong'an New Area ha caratteristiche simbiotiche, vantaggi sinergici e integrità del sistema che altre città non hanno. Ciò si riflette in quattro aspetti:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.La costruzione dell'infrastruttura digitale (ovvero, acquisizione e trasmissione di big data spaziotemporali globali basati sulla scienza dell'informazione geografica, dati di rilevamento urbano ad alta precisione, big data economici regionali e sociali e umanistici completi) ; 2.La costruzione simultanea di una piattaforma di gestione (utilizzando il Building Information Model [BIM] o un CIM per realizzare la costruzione digitale prima della costruzione fisica); 3.Un sistema standard di dati gemellati (dizionario dei dati urbani e sistema standard di gestione unificato); 4.Capacità operative e di collaborazione intelligenti a livello di città.(fig1, 2) 		

Altro

Teoria CAS (teoria dei Sistemi Adattivi Complessi):

i meccanismi e le caratteristiche di un sistema urbano complesso utilizzando la teoria dei sistemi complessi. Sulla base della teoria dei sistemi adattivi complessi di John Holland, in questo studio abbiamo adottato il concetto centrale di sistemi complessi, ovvero "agente" e sette caratteristiche attorno all'"agente". In particolare, abbiamo utilizzato:

aggregazione, non linearità, flusso e diversità come quattro caratteristiche della città come sistema complesso;
etichettatura, modello interno e elementi costitutivi come i tre meccanismi di base.

Le Cities Digital Twin producono nuovi agenti, comprese varie attrezzature fisiche e strutture che supportano l'interazione tra città virtuale e reale; organizzazioni governative e aziendali, come piattaforme di governo urbano; e organizzazioni di piattaforme di scambio di big data, che gestiscono e gestiscono gli enormi dati generati. I gemelli digitali corrispondono alle entità fisiche urbane nello spazio digitale per ottenere simulazioni complete, inclusi CIM e BIM.

Questi nuovi agenti rendono il sistema urbano più complesso. L'interazione tra i soggetti è più diversificata, il livello di aggregazione è più ampio e l'interazione è più non lineare. Le città gemelle digitali hanno nuove caratteristiche, gli agenti possono rompere le restrizioni dello spazio fisico e del tempo, comprese le loro identità e altri aspetti, e possono ottenere un'aggregazione più aperta, flessibile, su larga scala, con frequenza più elevata e più in tempo reale. Di conseguenza, possono formare "**moduli funzionali urbani**" con diverse funzioni, come centri di supercalcolo e blockchain. Le città gemelle digitali hanno anche rotto il modello lineare di "**pianificazione urbana-costruzione-operazione-scoperta di problemi-risoluzione di problemi**" e hanno formato una sequenza di sviluppo non lineare.

Dopo molti tentativi e analisi, questa ricerca ha scomposto il complesso sistema urbano in quattro ulteriori sottosistemi intuitivi.

Sottosistema di pianificazione:

I feedback intelligente e la valutazione dell'effetto di implementazione non solo possono realizzare un controllo rigido e avvisi precoci sugli indicatori di bottom-line, ma possono anche proporre l'ottimizzazione dinamica dei suggerimenti per gli indicatori di sviluppo.

Sottosistema di infrastrutture:

La costruzione di città gemelle digitali crea anche nuova offerta e domanda di infrastrutture. Nuove infrastrutture, come centri di supercalcolo, reti ottiche urbane, piattaforme CIM e blockchain, rendono i sistemi di supporto urbano più intelligenti e flessibile. È anche un complesso completo

sistema adattivo che svolge un ruolo di supporto nell'interazione informativa tra agenti urbani e tra agenti urbani e fisici ambiente. Questi agenti interagiscono anche in tempo reale ed emergono strato per strato, che è il principio alla base del processo decisionale urbano suggerimenti e anteprime multiscenario.

Sottosistema industriale: L'industria è il sistema energetico della città, e l'innovazione è la fonte fondamentale di energia industriale. Gli agenti del sistema industriale possono essere suddivisi in tre categorie: dinamico, partecipativo ed esterno. L'occupazione e l'identità di uno specifico individuo o organizzazione possono essere diverse. Nel sottosistema industriale, l'aggregazione degli agenti forma alla fine due grandi blocchi: industrie essenziali e aggiuntive.

La percezione olografica, la mappatura virtuale-reale e la simulazione intelligente forniscono anche una base per l'ottimizzazione dei processi di gestione e delle soluzioni tecniche all'interno dell'azienda e migliorano l'efficienza lavorativa e la creatività tra gli agenti partecipanti.

Sottosistema di servizi pubblici:

Il sistema di servizio pubblico è un sistema urbano equilibrato. Poiché le tensioni tra sopravvivenza e sviluppo e sicurezza e interessi esistono sempre, c'è un cambiamento dinamico. Offerta, esecuzione, domanda e supervisione sono i quattro agenti adattivi del sistema di equilibrio urbano.

Nelle città gemelle digitali, attraverso l'aggregazione delle informazioni in tempo reale e l'analisi dei big data di agenti e flussi di fattori, il pubblico specifico servizio agenti della domanda possono essere determinati con precisione. Il grado di asimmetria di informazione tra i quattro tipi di agenti sarà notevolmente ridotto, e fornitori di servizi pubblici in grado di fornire servizi più diversificati e raggiungere la produzione su larga scala di personalizzato servizi pubblici nel pieno rispetto delle informazioni private degli agenti. Attraverso il feedback immediato e dati di comportamento, la domanda e supervisione può essere realizzato, e sistemi di servizio pubblico possono essere ottimizzati.(fig.3, 4)

Luogo

Area di Xiong'an , Cina

Keywords

Digital twin city, Systems theory of cities, Complex adaptive systems, City subsystems, Planning system, Infrastructure system, Industrial system, Public service facility system

Bibliografia/Sitografia

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2226585623000249?via%3Dihub>

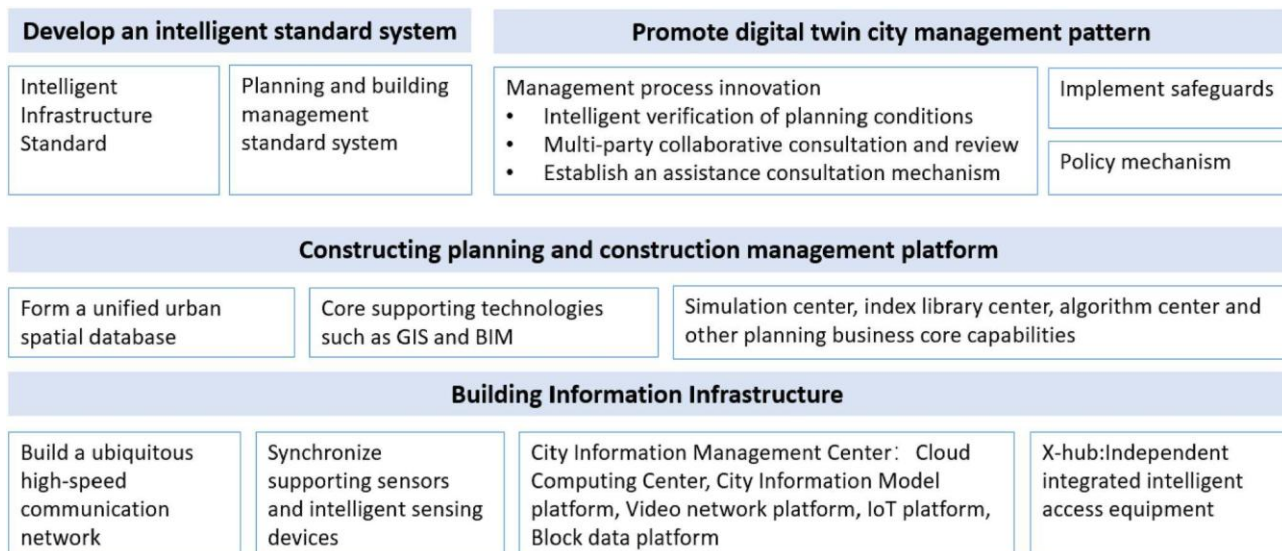


Tabella 2 . Punti chiave e caratteristiche di ogni città pilota.

nome della città	Obiettivi	Percorso di costruzione
Centro amministrativo municipale di Pechino	<ol style="list-style-type: none"> 1. Crea una piattaforma di base che includa i dati della città 2. Garantire progettazione e costruzione integrate a ciclo completo 	L'ambito di progettazione viene gradualmente ampliato sulla base del BIM e viene stabilita l'intera integrazione del processo per l'approvazione elettronica e l'applicazione di costruzione per espandersi gradualmente all'ambito urbano e costruire la piattaforma CIM urbana.
Canton	<ol style="list-style-type: none"> 1. Crea un database di base CIM e una piattaforma di base CIM 2. Crea un centro operativo integrato nella città intelligente 3. Creare due sistemi ausiliari basati sulla riforma del sistema di esame e approvazione. 4. Crea una piattaforma di gestione aziendale unificata 	L'obiettivo è accelerare la costruzione del sistema standard della piattaforma CIM. Viene costruito un sistema standard a livello di città e un modello tridimensionale e, concentrandosi sull'esame e l'approvazione dei progetti di costruzione ingegneristica, viene costruito un sistema di esame e approvazione ausiliario digitale tridimensionale.
Nanchino	Garantisci un processo decisionale con un solo clic, un'unica governance delle netcom e la condivisione dei servizi da un'unica estremità	L'attenzione si concentra sulla costruzione standard. Vengono costruiti i sistemi standard BIM e CIM per i progetti di costruzione di ingegneria urbana e viene avviata la compilazione degli standard BIM e CIM.
Shenzhen	Incentrato sui quattro collegamenti aziendali di preparazione della pianificazione, gestione dell'implementazione, supporto decisionale e partecipazione pubblica, fornisce supporto digitale agli utenti in ruoli diversi durante l'intero processo	Questo percorso parte dal modello spaziale. La costruzione di una piattaforma digitale spaziale urbana visiva è stata avviata a maggio 2018; ha perfezionato i dati di base per "terreno, edificio, stanza, proprietà, umano", prendendo la posizione spaziale come collegamento, integrando dati spaziali tridimensionali (inclusi BIM e fotografie inclinate), perseguendo capacità (ad esempio, servizio di localizzazione ad alta precisione, monitoraggio dinamico delle risorse naturali e informazioni geografiche, analisi spaziale e ottimizzazione) e fornendo l'unica infrastruttura spaziale per la costruzione del governo digitale e della città intelligente di Shenzhen.

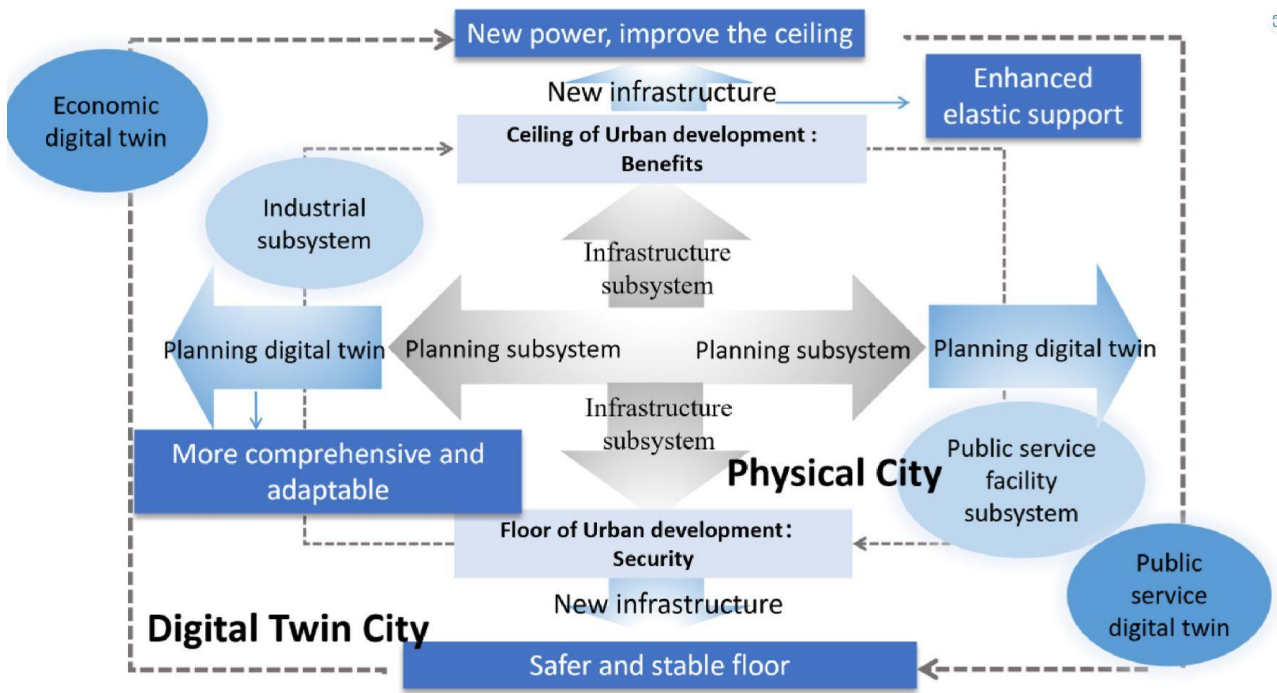
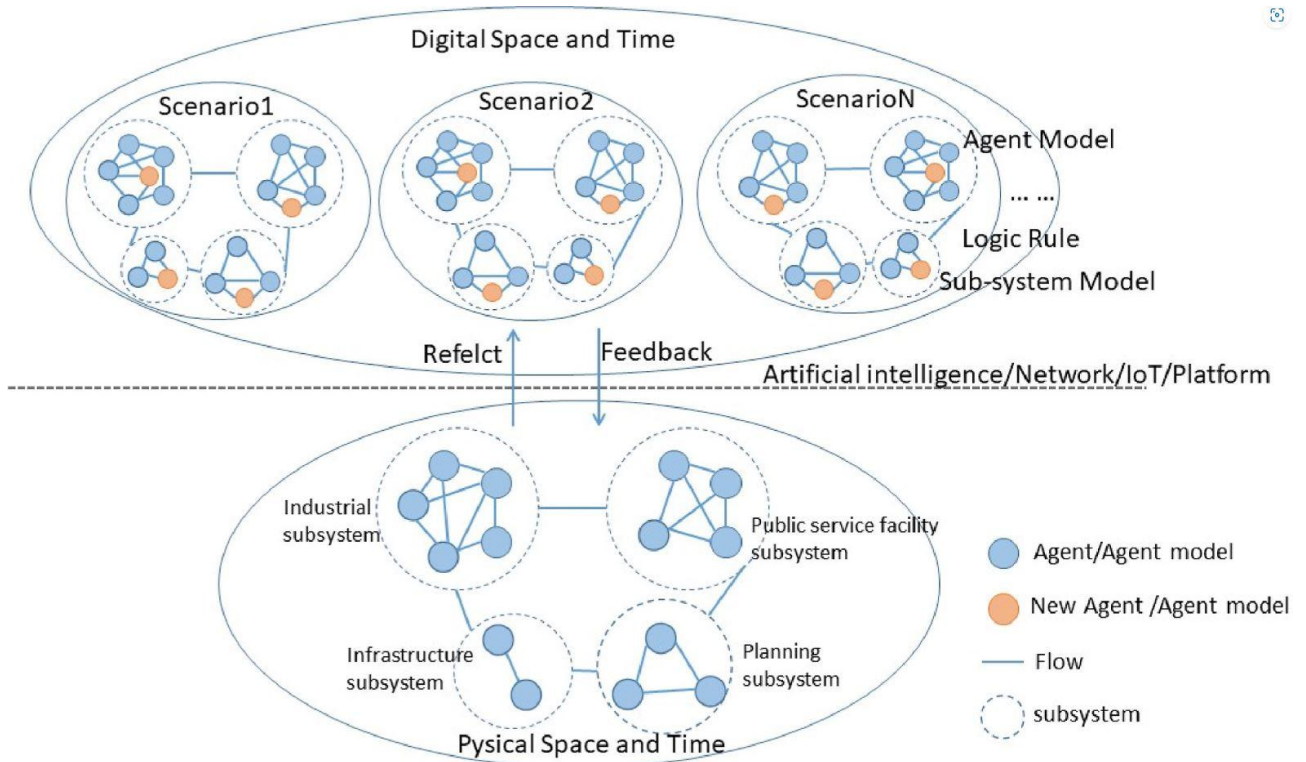


Fig.3 . Structural relationship of a digital twin city's four subsystems.



<h1>11</h1>	Titolo Articolo Developing a 3D City Digital Twin: Enhancing Walkability through a Green Pedestrian Network (GPN) in the City of Imola, Italy	Fonte _ Autore _ Data Land 2022, 11, 1917_M. Gholami , D. Torreggiani, P. Tassinari and A.o Barbaresi_2022
Definizione DT Ogni gemello digitale è uno spazio virtuale per l'integrazione di componenti chiave delle infrastrutture urbane. I gemelli digitali si basano su modelli virtuali che propongono ambienti di città reali. Una City Digital Twin è una serie di DT interconnessi che rappresentano alcuni aspetti del funzionamento degli ambienti urbani. Ogni gemello digitale riceve un flusso continuo di dati raccolti dai sensori in tempo reale, analizza i dati e presenta i risultati in vari modelli virtuali. Un gemello digitale tridimensionale del microclima della città dovrebbe fornire ruoli complementari e di supporto nella raccolta e nell'elaborazione di dati micrometeorologici e nella modellazione automatizzata e non può essere una tecnologia priva di contesto.		
Campo d'applicazione Città, Microclima		
Scala Urbana, di quartiere		
Tecnologie_Software Rhinoceros, EnergyPlus, Grasshopper, OpenFOAM, HoneyBee,		
Dati Statici Modello 3D	Dati Dinamici Sensoristica	
Input Dati meteorologici	Output Simulazioni, Analisi	
Esempi Dimostriamo un'ipotetica implementazione di un gemello digitale del comfort termico composto da <ul style="list-style-type: none"> - il mondo fisico, -una sezione integrante, - il mondo digitale (Figura 1). L'obiettivo principale del DT proposto è quello di rispecchiare il mondo fisico in tre fasi: <ul style="list-style-type: none"> - raccolta dei dati, - processo di apprendimento e analisi - processi post-implementazione e processo decisionale. La post-implementazione implementazione è un processo di validazione che ha lo scopo di mitigare gli effetti di fonti di dati climatici urbani incomplete per affrontare la situazione in cui una quantità significativa di incertezza solleva dubbi sull'affidabilità del modello. In questo studio è proposto un modello per integrazione di simulazioni microclimatiche offline con fonti di dati in tempo reale. Questo dimostra anche come il gemello digitale possa essere migliorato per una vasta gamma di fonti di dati e di simulazioni su scale e argomenti diversi. La stima del PET è l'obiettivo principale della prima sezione di questo gemello digitale GPN tridimensionale. La PET viene stimata utilizzando un modello ibrido costruito in codice Python 3.8.1 , che simula ogni parametro in un motore distinto. Per garantire la precisione dell'ordinamento degli input e degli output in ogni fase e, nello specifico, il risultato del modello nella fase finale, le interrelazioni dei parametri sono programmate come uno script Python completo. Tre motori - EnergyPlus, Grasshopper e OpenFOAM - sono alla base del modello. La connessione tra le fasi e il loro ordine è illustrata nella Figura 2. La creazione di un archivio di dati meteorologici per la previsione a breve termine è la fase iniziale della creazione DT. La rigenerazione del file di dati meteorologici richiede quattro componenti (temperatura di bulbo secco, umidità relativa, velocità del vento e copertura del cielo. I modelli per la temperatura del punto di rugiada orario, la radiazione solare sulla Terra e la decomposizione diretta e diffusa saranno indicati in base a questi fattori). Poiché grasshopper non può connettersi esplicitamente con EnergyPlus, è stato utilizzato lo strumento Honeybee per connettere Open Studio, EnergyPlus e Radiance per un processo automatizzato. Utilizzando un metodo automatizzato, sono stati modificati i componenti meteorologici in formato componenti meteorologiche formattate su base oraria. I calcoli delle fasi successive faranno uso di queste queste informazioni meteo.		
Altro Il presente lavoro propone un gemello digitale tridimensionale della città per valutare il comfort termico dei pedoni negli spazi urbani. Questo DT è il primo modello di comfort termico in tempo reale in grado di considerare anche la percorribilità del quartiere invece di mantenere la scala limitata a una strada. Il presente studio colma il divario tra comfort termico all'aperto e il livello di attività all'aperto e fornisce una comprensione reciproca su scala di quartiere. Si tratta di una strategia olistica che impiega una serie di motori e utilizza i risultati di una fase come dati per la fase successiva in modo integrato per ridurre gli errori di calcolo. Inoltre, viene proposto un metodo per la produzione di dati meteorologici in tempo reale per analizzare le temperature superficiali e ottenere risultati orari precisi.		

Luogo
Imola, Italia

Keywords

Street-level greenery, outdoor thermal comfort, digital twin, green pedestrian network, physiological equivalence temperature (PET)

Bibliografia/Sitografia

<https://doi.org/10.3390/land11111917>

Figure 1. Conceptual Framework of an Urban Digital Twin.

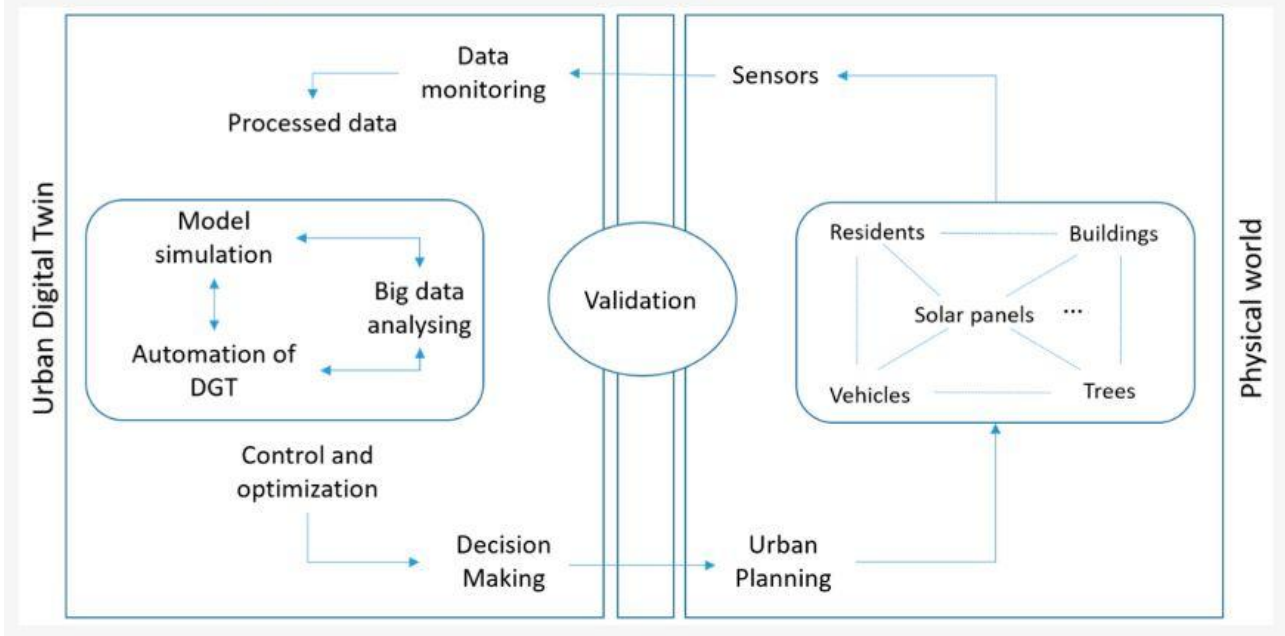
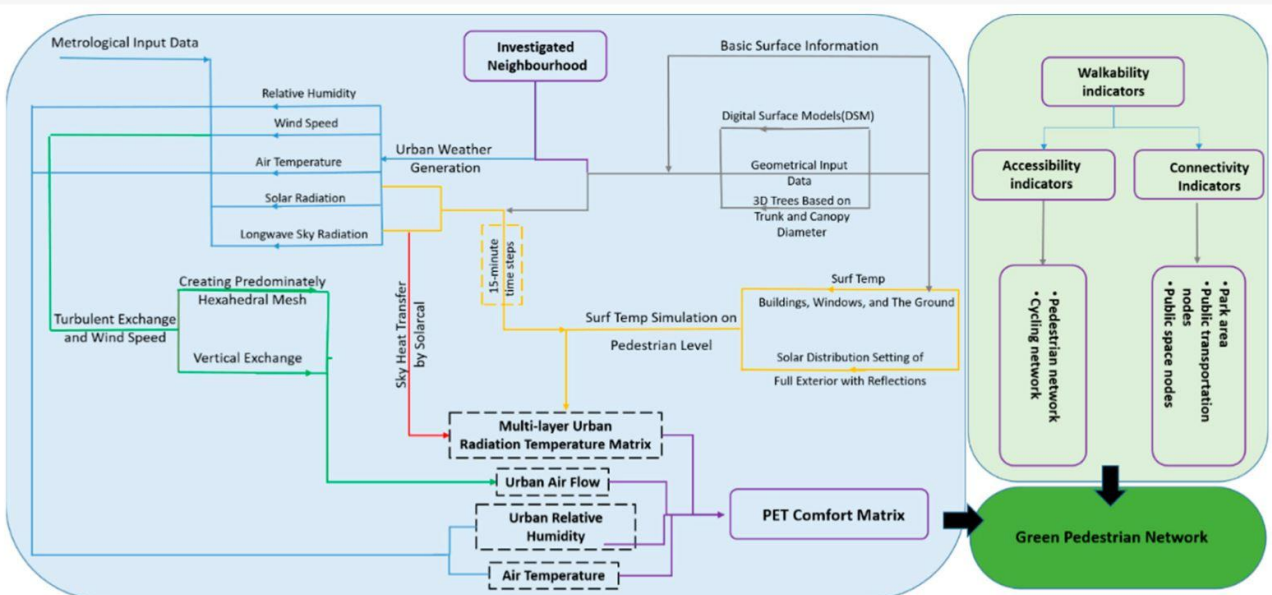


Figure 2. The methodology of City Digital Twin for Green Pedestrian Network.



12	Titolo Articolo City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda	Fonte _ Autore _ Data Sustainability 2021, 13, 3386_Ehab Shahat , Chang T. Hyun and Chunho Yeom_2021
<p>Definizione DT</p> <p>Il concetto di gemello digitale si riferisce allo sviluppo di una controparte digitale speculare di un sistema fisico e di collegare le sue informazioni durante il ciclo di vita della controparte fisica. Questa tecnologia rivoluzionaria ha dimostrato applicazioni di successo nella scienza della produzione, come la pianificazione e il controllo, la manutenzione e il ciclo di vita del prodotto. Si prevede che il gemello digitale migliorerà la modellazione architettonica come una fase progressiva che si sviluppa a partire dal BIM (Building Information Modeling) nel settore AEC (Architecture, Engineering, Construction).</p> <p>Si suggerisce inoltre che l'utilizzo dei gemelli digitali contribuirebbe a rendere più smart la città e a migliorarne la sostenibilità.</p> <p>Tuttavia, distinguere i gemelli digitali da altri tipi di modelli è fondamentale per comprendere l'applicabilità dell'utilizzo del DT completamente speculare per la modellazione a scala cittadina; cioè, il livello di integrazione dei dati, che varia a seconda del tipo di modello, tra le due controparti (digitale e fisica) del DT è decisivo per stabilire se il modello sviluppato è un gemello digitale o meno .</p>		
<p>Campo d'applicazione</p> <p>Urbanistica</p>		
<p>Scala</p> <p>Cittadina</p>		
<p>Tecnologie_Software</p> <p>BIM, GIS, IoT, VR, AR</p>		
<p>Dati Statici</p> <p>Modello 3D, immagini LiDAR, planimetrie catastali , fotogrammetria</p>	<p>Dati Dinamici</p> <p>Sensoristica</p>	
<p>Input</p> <p>Dati climatici, dati di mobilità, dati di pendolari...</p>	<p>Output</p> <p>Simulazioni, previsioni, ottimizzazioni</p>	
<p>Esempi</p> <p>La città di Zurigo.</p> <p>Come parte importante della strategia di smart city, il CDT di Zurigo è stato sviluppato per supportare il processo decisionale nella città attraverso un'immagine spaziale digitale, a partire dall'acquisizione dei dati, che si basa sui dati spaziali del modello 3D esistente della città. Il modello 3D è composto da tre modelli principali: modello del terreno, modello degli isolati e modello del tetto. I dati di questi modelli sono ottenuti da immagini LiDAR per il modello del terreno, da planimetrie del catasto cittadino per il modello dell'isolato e da fotogrammetria semiautomatica per il modello del tetto, con tre livelli di dettaglio (0, 1 e 2). Il gemello digitale di Zurigo consente la visualizzazione degli spazi stradali, dei servizi sotterranei e degli edifici pubblici scelti con livelli di dettaglio più elevati. Per migliorare l'interoperabilità e il reperimento dei dati, i dati spaziali e i metadati sono stati definiti e descritti in dettaglio in una legge federale che è stata la base per lo sviluppo del quadro di governance del gemello digitale. Inoltre, è stato sviluppato un geoportale che facilita la raccolta dei geodati aggiornati automaticamente, oltre a sviluppare un visualizzatore sul DT che consente di visualizzare le componenti 3D della città e i progetti di costruzione in corso. Tuttavia, il modello richiede ulteriori sviluppi come la necessità di aumentare il livello di dettaglio degli edifici e degli altri elementi della città, di integrare le applicazioni BIM e GIS per massimizzare l'uso delle loro potenzialità e ridurre il tempo che intercorre tra l'aggiornamento dei dati e l'elaborazione del modello 3D.</p>		
<p>Altro</p> <p>Dal modello 3D al DT:</p> <p>Recentemente, è stato assicurato che i benefici del BIM sono stati ampliati con l'impiego di strumenti di realtà virtuale (VR) e modelli di apprendimento a rete neurale per migliorare il lavoro collaborativo durante il ciclo di vita dei progetti edilizi. Inoltre, l'integrazione del BIM e dei sistemi informativi geografici (GIS) dovrebbe unire i benefici della modellazione degli edifici con l'ambiente circostante, ma le applicazioni su scala urbana sono finora in gran parte non sfruttate, oltre a presentare altre sfide come l'interoperabilità dei dati, gli standard aperti e l'integrazione della visualizzazione. Il vantaggio principale di un gemello digitale rispetto al BIM è l'interazione tra la realtà fisica e il</p>		

modello virtuale. Nel BIM, il modello comprende le informazioni geometriche e temporali dell'entità fisica, ma richiede l'inserimento manuale di dati per aggiornamenti a causa della mancanza di collegamento tra il modello e l'entità fisica, mentre l'utilizzo di un gemello digitale può fornire un'interazione reciproca tra le due controparti in tempo reale.

L'uso di sensori e tecnologie dell'Internet delle cose (IoT) può fornire il trasferimento di informazioni, che aggiornano il modello virtuale in base agli aggiornamenti in tempo reale della controparte fisica.

Inoltre, grazie alla possibilità di effettuare simulazioni sul modello virtuale, è possibile effettuare previsioni future e ottimizzare le prestazioni dell'entità fisica e quindi ottimizzare le prestazioni della controparte fisica.

Gestione dei dati:

A causa della complessità della città, diverse sfide devono ancora essere esplorate nel CDT. Ad esempio, un modello di grandi dimensioni di una città imporrebbe delle sfide per quanto riguarda la gestione e l'elaborazione dei dati. Inoltre, le attività e le relazioni divergenti nella città, a differenza dei prodotti manifatturieri, imporrebbero altri tipi di sfide di acquisizione e interpretazione dei dati. A causa delle diverse dimensioni della città e delle vaste quantità di dati eterogenei che possono essere generati e raccolti dalla città, la capacità di gestire ed elaborare i dati della città è sostanziale. Per risolvere il problema dei dati eterogenei, è stato suggerito l'utilizzo dell'approccio ontologico per migliorare l'interoperabilità semantica e garantire le future espansioni dei dati. È stato anche proposto di sviluppare un'architettura di sistema a più livelli per i modelli digitali della città, per gestire e integrare vari tipi di dati nel modello di gemello digitale hanno sviluppato una piattaforma di visualizzazione di big data spazio-temporali che utilizza la fusione di GIS e BIM per elaborare, analizzare, integrare e visualizzare i dati multi-fonte della città. Inoltre, collegando il modello con diversi set di dati per costruire un modello informativo della città, sono stati prodotti geodati grezzi temporalmente coerenti. La democratizzazione dei dati urbani è percepita come una questione essenziale per garantire l'accesso ai dati della città attraverso il DT dei cittadini attraverso un software open-source. Per elaborare e integrare i dati eterogenei di vari domini cittadini, è necessaria la standardizzazione dei dati eterogenei, e i quadri di condivisione dei dati per migliorare lo scambio di questi tra le applicazioni software.

Visualizzazione:

Una migliore visualizzazione può portare a una migliore comprensione dell'ambiente urbano e a una riduzione degli errori di progettazione. La capacità del DT di utilizzare e integrare altre applicazioni di modellazione e visualizzazione, promuove la sua esperienza visiva. Ad esempio, la navigazione visiva attraverso la città con diverse prospettive e scale è stata sviluppata utilizzando tecnologie VR e di realtà aumentata (AR).

Gli spazi stradali, le infrastrutture, i grattacieli e i modelli BIM possono essere sperimentati digitalmente attraverso la navigazione in un portale Internet, mentre è stata sviluppata una piattaforma di simulazione urbana per visualizzare un modello 3D aggiornato in tempo reale che mostra le interrogazioni e l'analisi di vari ambiti cittadini. Inoltre, per migliorare la visualizzazione del modello di gemello digitale della città, sono stati effettuati diversi sviluppi, come l'incorporazione di vari elementi della città, la visualizzazione di ambienti edificati sia esistenti che pianificati, la visualizzazione della città con scale multidimensionali e multispaziali, l'utilizzo di nuvole di punti per modellare senza limiti qualsiasi oggetto nella città e l'utilizzo di diversi LOD nel modello di gemello digitale per estrarre quello adatto in base all'applicazione.

Consapevolezza situazionale:

Rilevare le condizioni di salute dei cittadini; rappresentare e analizzare i dati di consumo energetico; rilevare il movimento per le attività di sicurezza pubblica; monitorare l'inquinamento acustico in città utilizzando la modellazione dinamica; fornire in tempo reale di informazioni durante i disastri e localizzare gli oggetti vulnerabili; e tracciare e monitorare il comportamento degli individui e localizzare le perturbazioni e i potenziali rischi per la gestione delle emergenze e dei disastri. Si prevede inoltre di migliorare l'analisi e la prevenzione dei rischi

L'analisi delle funzioni della città ha proposto diverse applicazioni, come l'analisi della sintassi dello spazio urbano e della rete stradale e dei modelli di movimento, l'individuazione dei modelli di pendolarismo, il confronto e l'analisi dei bisogni dei cittadini per i servizi urbani e l'analisi dello spazio urbano e della congestione del traffico.

Pianificazione e previsione:

La simulazione di possibili guasti di oggetti fisici in città attraverso il rilevamento partecipativo è stato utile per migliorare la gestione del rischio. Piani di sviluppo urbano e scenari climatici urbani e simulazioni sono stati testati per supportare decisioni in materia di pianificazione urbana. Diverse altre applicazioni di pianificazione e previsione legate al DT sono risultate utili, come l'analisi degli scenari di inondazione, la valutazione del potenziale dell'energia solare e dell'impatto del vento sull'ambiente costruito attraverso la simulazione dei cambiamenti meteorologici e simulazioni di mobilità urbana.

Attualmente, il livello di sviluppo raggiunto è in grado di migliorare la gestione dei dati della città, la visualizzazione digitale della città, la consapevolezza di diverse situazioni spazio-temporali, la previsione di scenari futuri e l'integrazione dei domini della città e delle parti interessate.

Luogo

Zurigo, Svizzera

Keywords

City Digital Twin; 3D Modeling; Smart City; Thematic Analysis

Bibliografia/Sitografia

<https://doi.org/10.3390/su13063386>

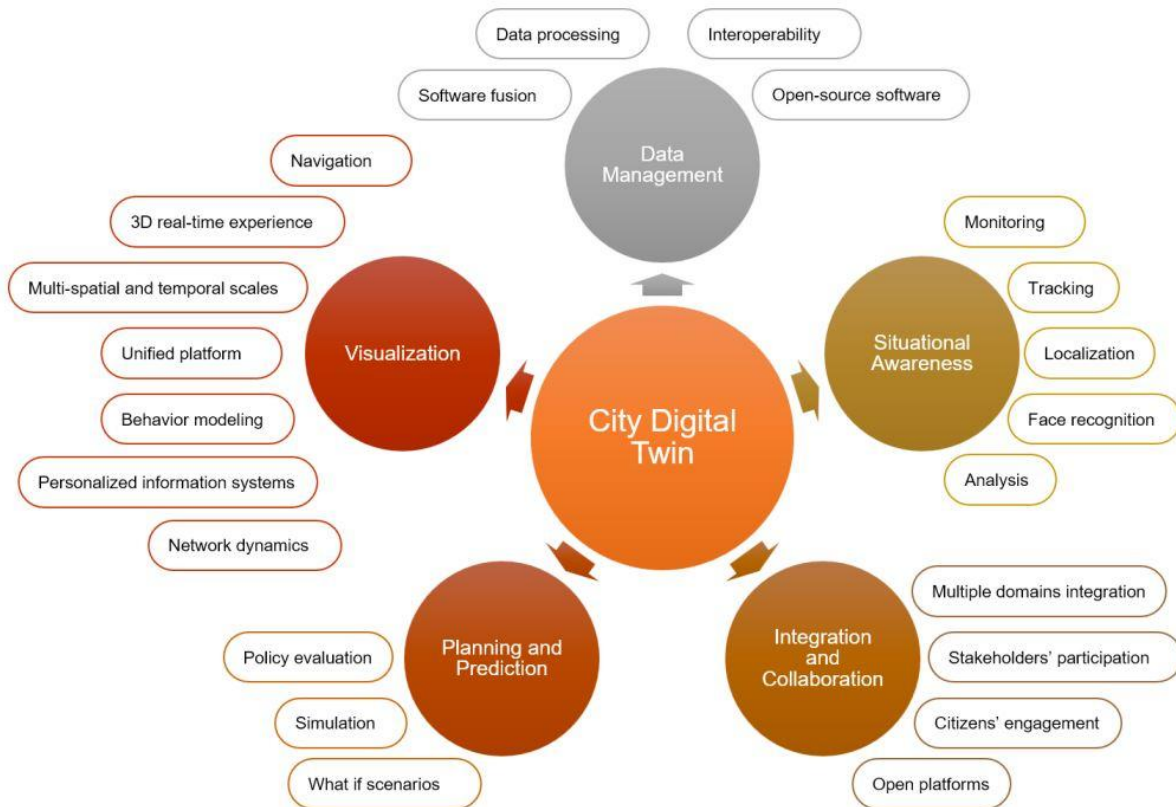


Figure 2. City digital twin potentials.

13	Titolo Articolo A Taxonomy of Digital Twins	Fonte _ Autore_ Data 26th Americas Conference on Information Systems (AMCIS) At: Salt Lake City, USA_Hendrik van der Valk, Hendrik Haße, Frederik Möller, Michael Arbter, Jan-Luca Henning, Boris Otto _2020
<p>Definizione DT</p> <p>Al di là di una semplice rappresentazione, i gemelli digitali comprendono, di solito, l' incorporazione di sensori, che generano dati che, a loro volta, sono la base per ulteriori analisi (Chhetri et al. 2019; Xiang et al. 2018; Zhang et al. 2017). Così, l'interazione di oggetti fisici intrecciati con la rappresentazione digitale e la tecnologia del sensore provoca la capacità di registrazione in tempo reale di una circostanza, che può innescare una reazione del mondo reale (Chhetri et al. 2019; Zhang et al. 2019).</p> <p>Attualmente non esiste una comprensione comune del termine Digital Twin (Cimino et al. 2019). Inoltre, varie definizioni e concetti dipendono fortemente dal rispettivo contesto di applicazione (Schleich et al. 2017). L'uso incoerente del termine rende molto più difficile identificare i componenti principali di un Digital Twin (Josifovska et al. 2019). La tabella 1 fornisce una panoramica delle definizioni che influenzano la nostra comprensione della terminologia del Digital Twin.</p> <p>Un tipico Digital Twin è costituito da un collegamento dati bidirezionale. Elabora i dati ed è fisicamente legato alla sua controparte del mondo reale. Il Digital Twin è un modello identico di un sistema fisico e contiene un'interfaccia uomo-macchina. Allo stesso tempo, determiniamo un'interfaccia macchina-macchina altrettanto importante. Il Digital Twin riceve aggiornamenti e processi costanti grezzi, nonché preprocessati dati.</p>		
<p>Campo d'applicazione Produzione, logistica, smart city</p>		
<p>Scala</p>		
<p>Tecnologie_Software</p>		
<p>Dati Statici</p>	<p>Dati Dinamici Sensoristica</p>	
<p>Input Dati generici</p>	<p>Output Monitoraggio, analisi, previsione o ottimizzazione</p>	
<p>Esempi</p>		

Altro

Il collegamento dati dimensionale (D1) specifica come avviene la comunicazione tra il Digital Twin e la sua controparte fisica, che può essere **unidirezionale** (C11) o **bidirezionale** (C12).

Unidirezionale descrive un collegamento in cui il flusso di dati ha origine dalla parte fisica a quella digitale o viceversa. La direzione non cambia mai durante la vita di un Digital Twin. Bakliwal et al. (2018) descrivono un Digital Twin unidirezionale, in cui i dati vengono estratti dalla parte fisica e trasferiti verso quella digitale. Se il flusso di dati avviene simultaneamente tra la rappresentazione digitale e fisica e viceversa, si tratta di un collegamento dati bidirezionale. Ad esempio, un collegamento dati bidirezionale è visto come una parte obbligatoria di un Digital Twin di Tao e Zhang (2017). Un Digital Twin può ottenere solo un collegamento dati unidirezionale o bidirezionale, il che rende la dimensione reciprocamente esclusiva.

Il modo di trattare i dati del Digital Twin ne determina lo **scopo generale** (D2). Distinguiamo tre possibili caratteristiche:

-Lo scopo del Digital Twin può essere il **trattamento dei dati** (C21). Questi processi possono essere, ad esempio, **monitoraggio, analisi, previsione o ottimizzazione** (Zheng et al. 2018).

-Il Digital Twin **trasferisce** (C22) **i dati** da un punto (ad esempio, la parte fisica) a un altro (ad esempio, un magazzino dati) come descritto da Horváth e Erdős (2017).

-Lo scopo del Digital Twin può essere quello di essere un **archivio dati** (C23).

Un Digital Twin può avere una, due o tutte e tre le caratteristiche contemporaneamente. Di conseguenza, questa dimensione non si esclude a vicenda.

L'aspetto degli **elementi concettuali** (D3) descrive il rapporto tra il Digital Twin e la sua controparte fisica. Mentre alcuni autori descrivono una profonda connessione tra la parte virtuale e fisica (Minos-Stensrud et al. 2018) e alcuni stanno sottolineando il punto che il sistema fisico è anche parte integrante dell'intero Digital Twin (Karadeniz et al. 2019), altri vedono solo una connessione allentata tra la rappresentazione digitale e il suo gemello fisico (Halénar et al. 2019). In questa tassonomia, definiamo due caratteristiche per questa dimensione:

- o un Digital Twin è **direttamente legato** (C32) **alla sua parte fisica** in un rapporto da uno a uno,

- oppure è **indipendente** (C31). Se è indipendente, un Digital Twin può essere visto in combinazione con altri sistemi fisici o un sistema può possedere più gemelli digitali.

La precisione del modello (D4) riguarda l'accuratezza della rappresentazione digitale dell'oggetto fisico espresso. Le caratteristiche possibili sono la stessa precisione (C41) o la precisione parziale (C42). Il primo descrive ogni dettaglio di un oggetto fisico nelle sue immagini digitali, come esemplificato da Alam e El Saddik (2017). Non si distingue se un particolare dettaglio sarà rilevante per il compito che il Digital Twin ha per eseguire o meno. Contrariamente a questo, la precisione parziale del modello viene applicata quando un'immagine digitale riflette solo parti cruciali dell'oggetto fisico. L'accuratezza del modello si esclude a vicenda.

L'interfaccia dimensionale (D5) riguarda la capacità di un Digital Twin di trasferire dati dopo l'elaborazione loro. Dopo alcuni cambiamenti a questa dimensione, abbiamo concluso che un gemello digitale potrebbe possedere una macchina-interfaccia-macchina (C51) o un'interfaccia uomo-macchina (C52). Tao et al. (2019) descrivono umano-interfacce macchina tramite realtà aumentata, mentre Boschert e Rosen (2016) ritraggono il loro Digital Twin

con un'interfaccia macchina-macchina ad altri modelli. Petrova-Antonova e Ilieva (2019) mostrano un Digital Twin, che contiene entrambi, un'interfaccia uomo-macchina e un'interfaccia macchina-macchina. Pertanto, questa dimensione non si esclude a vicenda.

La sincronizzazione dimensionale (D6) consiste di due caratteristiche:

- se un Digital Twin ottiene aggiornamenti dei dati durante il suo ciclo di vita (ad esempio, Negri et al. 2019), vi è una sincronizzazione tra il digitale Twin e la parte fisica (C61). Aivaliotis et al. (2019) descrivono anche la possibilità di aggiornamenti in tempo reale.

-Al contrario, potrebbe non esserci alcuna sincronizzazione (C62). Questo è riconosciuto come assenza. La sincronizzazione si esclude a vicenda.

La dimensione data input (D7) distingue tra **dati grezzi** (C71) e **dati elaborati** (C72). I gemelli digitali ricevono i loro dati da sensori o database. Tali dati potrebbero essere dati puri e grezzi raccolti direttamente da sensori o altri dispositivi di raccolta dati. Inoltre, i dati, che sono preprocessati (ad esempio, dal software analitico) prima di essere trasferiti ai gemelli digitali, potrebbero essere utilizzati. Boschert e Rosen (2016) descrivono come un Digital Twin

viene alimentato con dati grezzi dal sistema e con dati elaborati da modelli di simulazione allo stesso tempo, il che dimostra che l'input dei dati non si esclude a vicenda.

Il tempo della creazione (D8) distingue tre caratteristiche che determinano l'ordine cronologico in cui le rispettive parti del Gemello Digitale nascono. Pertanto, la dimensione distingue se la parte fisica (C81) o la parte digitale (C82) è sviluppata per prima. Inoltre, entrambe le parti possono essere sviluppate simultaneamente (C83). Haag e Anderl (2019) descrivono lo sviluppo di un Digital Twin parallelo alla realizzazione della sua controparte fisica. D'altra parte, Boschert e Rosen (2016) sottolineano il fatto che un Digital Twin dovrebbe essere sviluppato prima della sua controparte fisica. Tuttavia, come si può vedere nella sezione successiva, la maggior parte dei gemelli digitali sono progettati dopo un sistema fisico.

La maggior parte dei gemelli digitali contiene un collegamento dati bidirezionale tra la parte digitale e quella fisica. Più del 90% di tutti gli articoli descrivono un Digital Twin che elabora i dati. Solo pochissimi Digital Twins trasferiscono e memorizzano i dati come unico scopo. I DT che trasferiscono o memorizzano i dati spesso li elaborano. Quasi il 62% di tutti i gemelli digitali descritti utilizza i dati grezzi come input, mentre poco meno della metà utilizza dati preprocessati. Come introdotto da Uhlemann et al. (2017), l'acquisizione dati è una parte vitale di un Digital Twin. Spesso è condotta da sensori che stanno monitorando l'intero sistema (Kritzler et al. 2017). In un primo momento, abbiamo distinto tra un automatizzato e un'acquisizione manuale dei dati, ma durante l'analisi, è diventato evidente che quasi tutti DT contengono un'acquisizione automatica dei dati.

La parte digitale contiene informazioni aggiornate dovute a sincronizzazione dei dati grezzi, che sono arricchiti da dati preprocessati. La parte digitale dovrebbe sostenere l'introduzione di un prodotto fisico e quindi deve essere sviluppata prima della parte fisica. Si raccomanda l'utilizzo del Digital Twin durante l'intero ciclo di vita della parte fisica. Tao et al. (2018) descrive un Digital Twin con un collegamento dati bidirezionale e un'entità di elaborazione dati che simula, prevede e regola un sistema in tempo reale, ma trasferisce e memorizza anche i dati. Affermano che lo spazio fisico e digitale sono collegati e quindi legati l'uno all'altro. Mentre parlano di una riflessione reale con altissima fedeltà così come di altissima sincronizzazione, il loro Digital Twin è costituito da un modello identico che contiene anche una sincronizzazione tra la parte fisica e digitale. Tao et al. (2018) vede un Digital Twin in grado di trasferire dati elaborati (ad es. simulati o previsti) alla parte fisica.

Luogo

Keywords

Digital Twin, Literature Review, Taxonomy, Characteristics

Bibliografia/Sitografia

(PDF) A Taxonomy of Digital Twins (researchgate.net)

Definition	Source
<p>“A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The Digital Twin is ultra-realistic [...] integrates sensor data [...] maintenance history and all available historical and fleet data obtained”</p>	<p>Glaessgen and Stargel 2012, p. 7</p>
<p>“Digital Twin (DT) [...] is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. [...] That describes [...] Operational States captured from actual sensor data, current, past actual, and future predicted. [...] for a variety of purposes.”</p>	<p>Grieves and Vickers 2017, pp. 94-95</p>
<p>“The Digital Twin concept [...] contains three main parts: a) physical products in Real Space, b) virtual products in Virtual Space, and c) the [two-way] connections of data and information that ties the virtual and real products together.”</p>	<p>Grieves 2014, pp. 1-4</p>
<p>“[A] Digital Twin consists of three parts: physical product, virtual product, and connected data that tie the physical and virtual product. [...] the following characteristics of Digital Twin are summarized: (1) Real-time reflection. [...] the virtual space [...] can keep ultra-high synchronization and fidelity with the physical space. [...]”</p>	<p>Tao et al. 2018, p. 3566</p>

Table 1. Exemplary definitions of Digital Twin from the literature

14	Titolo Articolo Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions	Fonte _ Autore_Data Future Internet 2022, 14, 64_Cheng Qian, Xing Liu, Colin Ripley, Mian Qian, Fan Liang, Wei Yu_2022
<p>Definizione DT</p> <p>In generale, un DT è una piattaforma di emulazione software e hardware basata sui dati, che è una replica informatica di sistemi fisici. Nel frattempo, un DT descrive un sistema fisico specifico e tende a raggiungere le funzioni e i casi d'uso dei sistemi fisici. Poiché DT è un sistema digitale complesso, trovare un modo per rappresentare efficacemente una varietà di cose in modo tempestivo ed efficiente pone numerose sfide al networking, all'elaborazione e all'analisi dei dati per l'IoT. Inoltre, la progettazione di un DT per sistemi IoT deve tenere conto di numerosi requisiti eccezionali (ad esempio, latenza, affidabilità, sicurezza, scalabilità, sicurezza e privacy).</p> <p>Mentre le tecnologie avanzate di networking, calcolo e analisi dei dati possono aiutare la realizzazione di DT, ci sono una serie di questioni che devono essere affrontate, tra cui come definire le basi teoriche e le tecniche di modellazione in modo tale che DT rifletta in modo accurato e affidabile gli stati delle cose, come progettare modelli ML/DL per ottenere l'elaborazione dei big data in tempo reale, e come proteggere DT e proteggere la raccolta e la pubblicazione di informazioni sensibili alla privacy.</p> <p>Il DT deve avere una connessione con l'entità fisica di destinazione in modo che lo stato degli oggetti fisici possa essere raccolto e aggiornato. Pertanto, un modello DT può essere utilizzato per prevedere, controllare o ottimizzare la funzionalità delle cose e allo stesso tempo imparare dalle cose che rappresenta. Si noti che la funzione di un DT è più di una semplice simulazione; Può interagire con il sistema fisico in modo che possa adattarsi ai cambiamenti ambientali. Al fine di ottenere questa perfetta integrazione di DT e sistemi fisici, è fondamentale che il DT ottenga le informazioni sullo stato in tempo reale dei sistemi fisici (ad esempio, condividendo una connessione ai dati); questo è realizzato utilizzando sensori IoT e tecnologie di rete.</p> <p>La tecnologia di simulazione si è evoluta per diversi decenni ed è più comunemente utilizzata nella progettazione assistita da computer (CAD), dove una simulazione di un sistema può raccogliere informazioni per una possibile conclusione di uno scenario specifico. DT migliora questa tecnologia introducendo motori ML/DL per interpretare i dati in grado di interagire con il sistema fisico. Questa importante distinzione tra simulazioni tradizionali e DT è resa possibile grazie all'uso di sensori, reti di comunicazione, aggregazione e analisi dei dati, nonché a un nucleo decisionale economico e intelligente, in grado di interpretare il processo e fornire un feedback in tempo reale al sistema.</p>		
<p>Campo d'applicazione Informatica, urbanistica</p>		
<p>Scala Micro scala, macro scala, urbana</p>		
<p>Tecnologie_Software IoT, machine learning (ML), deep learning (DL), Big Data, edge computing, sistemi cyber-fisici (CPS), Lidar, realtà virtuale (VR), modellazione 3D, GIS, ArcGIS Urban, 4G, 5G</p>		
<p>Dati Statici Dati oggetto fisico</p>	<p>Dati Dinamici Sensoristica</p>	
<p>Input Caratteristiche del modello fisico</p>	<p>Output Monitoraggio , simulazioni, stime, linee guida,</p>	
<p>Esempi SMART GRID</p> <p>Con l'integrazione del sistema informatico, la rete elettrica di prossima generazione, denominata smart grid, è stata concepita per fornire un servizio energetico più efficiente per gli utenti, compresa una gestione affidabile e intelligente della distribuzione, l'integrazione delle energie rinnovabili, lo stoccaggio dell'energia, il monitoraggio e il controllo della rete e l'integrazione dei veicoli elettrici nella rete. In generale, la smart grid è un sistema di grid altamente distribuito, che integra tecniche di comunicazione delle informazioni, tra cui il rilevamento, le comunicazioni di rete, l'analisi dei dati e l'apprendimento automatico. Queste tecnologie possono migliorare l'affidabilità, l'efficienza e la resilienza della sicurezza del sistema di rete.</p>		

General Electric (GE) ha proposto due modelli relativi all'uso del DT nei parchi eolici. Inoltre, GE ha progettato un'interfaccia utente grafica (GUI) a livello applicativo per mostrare la rappresentazione digitale del parco ed eseguire le operazioni di controllo e gestione.

SMART TRANSPORTATION

Il sistema di trasporto intelligente può essere considerato come un CPS, che fornisce una varietà di servizi per il settore dei trasporti, incluso il controllo della gestione del traffico. Alcune applicazioni nei sistemi di trasporto intelligenti includono il pagamento dei pedaggi, il funzionamento dei veicoli, le emergenze, il controllo dei veicoli e la gestione della sicurezza, la manutenzione e la gestione della costruzione. In questo caso, il modello DT può utilizzare server cloud/edge ad alte prestazioni nel sistema digitale per condurre l'aggregazione dei dati e l'addestramento del modello in modo da ottenere l'elaborazione e la trasmissione in tempo reale.

Sulla base dell'architettura del DT di cui abbiamo parlato, il DT nel sistema di trasporto è costituito da quattro livelli:

-Il livello oggetto contiene i componenti dell'infrastruttura e dei partecipanti (ad esempio, i conducenti), inclusi i sensori sul veicolo, le telecamere del traffico e altri sensori del traffico.

-Il livello di comunicazione utilizza una varietà di gateway per elaborare i dati dei sensori dal livello dell'oggetto e gestire la trasmissione dei dati tra il livello dell'oggetto e quello dell'applicazione.

-Il livello dell'applicazione mappa il gateway dal livello di comunicazione per realizzare la trasmissione dei dati tra il livello di comunicazione e il livello dell'applicazione. In base ai dati e alle informazioni sui sensori provenienti dal gateway, il DT può utilizzare la tecnologia ML/DL per addestrare il modello e archivarlo nell'archiviazione dei dati.

-Il livello dell'utente finale può navigare in base ai dati elaborati dal livello dell'applicazione, assistere la guida di veicoli autonomi e cooperare con le città intelligenti e le reti intelligenti per ridurre i costi di trasporto, ridurre il consumo di energia e rendere più efficiente il processo di ricarica dei veicoli elettrici.

Peter et al. [74] hanno proposto uno schema per il trasporto intelligente guidato da DT che tenta di ottimizzare i flussi di traffico nelle aree urbane. Il sistema di trasporto intelligente proposto include un modello di intelligenza artificiale, una replica digitale della rete stradale e vari servizi di controllo e gestione del traffico. Il sistema ottiene i dati dal livello dell'oggetto, inclusi semafori, sensori e telecamere. Dopo che il sistema di trasporto intelligente ha elaborato i dati, creerà un'applicazione a livello di utente finale in base ai dati raccolti, che è chiamata sistema informativo del servizio cittadino. Inoltre, Sagar et al. [75] hanno proposto un controllo adattivo dei semafori (ATSC) basato su DT per ridurre i tempi di attesa agli incroci, migliorando così l'esperienza di guida del conducente. In tale studio, la simulazione del traffico urbano (SUMO) è stata utilizzata come piattaforma di simulazione.

Inoltre, Wang et al. [76] hanno progettato una piattaforma di verifica basata su DT per eseguire la verifica tra diversi sistemi metropolitani. Vengono raccolte informazioni a terra e sui treni e i dati vengono trasmessi al sistema

DT del livello applicativo attraverso vari protocolli di comunicazione, tra cui 4G, 5G, Ethernet e NB-IoT. La piattaforma DT utilizza ML/DL, fusione dei dati e modellazione dei dati per analizzare tutti i dati e assistere il livello dell'utente finale nella pianificazione, nel monitoraggio dei treni, nel monitoraggio dei pedoni, ecc. Allo stesso modo, Guo et al.

[78] hanno dimostrato un sistema di infrastruttura del veicolo collaborativo 3D basato su DT (CVIS) per visualizzare i dati stradali in tempo reale e utilizzare il LIDAR come sensori stradali. Hanno usato il ponte ROS come protocollo di comunicazione per comunicare tra il mondo fisico e quello virtuale

SMART CITIES

L'obiettivo della città intelligente è quello di sfruttare le tecnologie di comunicazione dell'informazione e dei dati in modo che le risorse possano essere utilizzate in modo efficiente, portando a una migliore qualità della vita, alla riduzione dell'input di risorse, ecc.

Le città intelligenti sono la combinazione di un'ampia gamma di domini IoT per affrontare le complesse sfide nelle città e devono incorporare il cloud/edge computing con la raccolta e l'analisi dei big data come tecniche essenziali per guidare la realizzazione dell'efficienza e dell'ottimizzazione.

Per dimostrare le prestazioni del DT, è necessario condurre ricerche sulla raccolta dei dati, la gestione dei dati, l'utilizzo dei big data, la realtà virtuale (VR), l'IoT e la modellazione 3D. Allo stesso modo, Shirowzhan et al. [100] hanno discusso le tecnologie che possono essere utili per consentire città più intelligenti. Hanno identificato le tendenze nella scienza geospaziale, in particolare nell'applicazione del sistema informativo geografico (GIS), e hanno osservato l'impatto delle applicazioni online di nuova concezione come ArcGIS Urban.

Altro

La tendenza tecnologica dell'Internet of Things (IoT) ha portato a un massiccio aumento del numero di dispositivi intelligenti connessi al cyberspazio. Affinché questi dispositivi intelligenti abbiano un impatto significativo, è importante che abbiano la capacità di acquisire informazioni relative all'uso previsto. A seconda di ciò per cui un dispositivo intelligente è progettato, può catturare le caratteristiche chiave delle cose in modo che l'efficienza e l'intelligenza dei sistemi cyber-fisici (CPS), inclusi l'energia, i trasporti, la produzione, l'agricoltura, l'assistenza sanitaria e altri sistemi di infrastrutture critiche, possano essere realizzati. A causa dell'elevato numero di punti dati introdotti in questi CPS, è importante adottare reti avanzate, analisi dei dati (ad esempio, deep learning) e cloud/edge computing. In questo modo, le informazioni rilevanti possono essere raccolte, trasmesse, analizzate e condivise in

modo tempestivo in modo che le informazioni utilizzabili possano fornire l'intelligenza per migliorare le capacità di monitoraggio e controllo dei sistemi fisici.

INCERTEZZE:

A seconda dello sviluppo dei big data e dell'IoT, l'adattamento di strumenti di analisi dei big data (ML/DL, data mining, statistiche, ecc.) può prevedere alcuni potenziali rischi, al fine di mitigare gli incidenti nelle reti intelligenti. Inoltre, sfruttando i big data si può creare un ambiente virtuale di smart grid per simulare incidenti reali, indagare e sviluppare piani di mitigazione. Un altro esempio è legato alle reti di sensori wireless, che possono essere utilizzati in diversi sistemi di monitoraggio ambientale. Ad esempio, l'agricoltura intelligente è un'applicazione emergente che collega i dispositivi IoT in modo da poter gestire la produzione agricola, la qualità del suolo e l'umidità della temperatura. A causa delle condizioni meteorologiche e degli ambienti avversi, ci sono numerose incertezze che potrebbero influire sull'affidabilità della connettività e dei dispositivi fisici nell'agricoltura intelligente.

Pertanto, la creazione di una replica informatica di sistemi fisici reali per emulare casi reali in quei sistemi fisici è una strategia efficiente, che prende il nome di Digital Twin (DT).

ARCHITETTURA

Il DT può essere suddiviso in tre parti (Fig.1):

- sistema fisico
- sistema digitale
- connessione tra di essi.

Il sistema fisico, rappresenta qualsiasi sistema reale nel mondo reale, comprese le reti intelligenti, i trasporti intelligenti, la produzione intelligente e le città intelligenti. Il sistema fisico può fornire servizi a più utenti. Tuttavia, può essere difficile aggiornare un modello fisico reale basato su una procedura operativa complessa. In tale circostanza, il DT può sfruttare un sistema fisico semplificato e, utilizzando i dati del nuovo ambiente, eseguire la simulazione e guidare il sistema fisico per eseguire il passaggio successivo.

VARIANTI DI DT

Sulla base di diversi tipi di condivisione dei dati tra sistemi fisici e digitali, possiamo classificare (Fig.2):

-**Digital Model**, si riferisce a una rappresentazione digitale di un sistema fisico esistente o del suo modello teorico. I sistemi digitali non possono manipolare automaticamente i sistemi fisici sulla base dei risultati della simulazione del sistema digitale. **Le modifiche alla rappresentazione fisica non influiranno sulla rappresentazione digitale e viceversa.**

-**Digital Shadow**, prende ulteriormente la simulazione e integra un flusso di dati unidirezionale dall'oggetto fisico alla rappresentazione digitale. Le modifiche allo stato dei sistemi fisici possono alterare dinamicamente la rappresentazione del modello digitale. Questo tipo di modellazione digitale può essere utilizzato come rappresentazione virtuale del sistema fisico. In questo modo, l'amministratore di sistema può osservare intuitivamente il funzionamento del sistema fisico e può rispondere in tempo in base ai problemi.

Le modifiche apportate al sistema fisico possono avere un impatto sul modello virtuale, ma non viceversa.

-**Digital Twin (DT)** è un'estensione dei due precedenti la netta differenza è il collegamento bidirezionale tra il sistema fisico e il modello digitale. Uno dei vantaggi del collegamento bidirezionale è la capacità di influenzare il sistema fisico in base alla rappresentazione digitale. I cambiamenti nel sistema fisico possono essere riflessi sul modello digitale in modo che i possibili risultati basati sulle variabili di sistema possano essere emessi. **Il collegamento al sistema fisico consente al sistema di controllo di interagire con il sistema fisico in modo da ottenere il risultato desiderato.**

TIPI DI DT (Fig.3)

Il DT può essere classificato in quattro tipi:

-**DT prototype (DTP)**, rappresenta un tipo di framework DT che sfrutta tutte le informazioni provenienti dal sistema fisico, necessarie per riprodurlo. Il flusso di dati viene trasferito dal sistema fisico al sistema digitale. Lo scopo del DTP è quello di migliorare l'efficienza in termini di tempo e costi del funzionamento del sistema fisico. Il DTP può essere utilizzato nei sistemi di **monitoraggio**, come i sistemi di monitoraggio delle reti intelligenti. Tuttavia, il flusso di dati DTP è un **flusso unidirezionale dal sistema fisico al sistema digitale**. Può solo monitorare il sistema e non può gestirlo in base ai dati in arrivo dal sistema fisico.

-**DT instance (DTI)**, è un tipo di DT che si connette alla destinazione fisica corrispondente. A differenza del DTP, il DTI gestisce il flusso di dati dal sistema digitale al sistema fisico. Il flusso di dati contiene **stime o linee guida, che consentono al sistema fisico di funzionare simultaneamente quando l'ambiente cambia**. Il DTI rappresenta solo un **singolo flusso di dati dal sistema digitale al sistema fisico**.

-**DT aggregation (DTA)**, rappresenta l'aggregazione di tutte le DTI. DTI/DTA può essere utilizzato per gestire i sistemi come flussi di dati dai sistemi digitali ai sistemi fisici. L'operatore può utilizzare il sistema fisico in base al risultato della previsione del sistema fisico. Tuttavia, il flusso di dati DTI/DTA non può essere trasferito direttamente dal sistema fisico al sistema digitale. È necessario implementare meccanismi aggiuntivi.

-**DT environment (DTE)**, può contenere più sistemi DT. Il DTE è responsabile della gestione di tutti i sistemi DT sotto

la sua copertura per assistere nel funzionamento dei sistemi fisici pertinenti. Dal punto di vista applicativo, DTE può essere utilizzato per gestire impianti di grandi dimensioni.

ARCHITETTURA PER SISTEMI IoT

Un'architettura generica per i sistemi IoT, che consiste di quattro livelli: (ad esempio, livello oggetto, livello comunicazione, livello applicazione e livello utente finale).

-Il **livello dell'oggetto** rappresenta tutti i sensori IoT e viene utilizzato per fornire dati e informazioni per diverse applicazioni basate sull'IoT. Contiene tutti i componenti che compongono il sistema fisico.

-Il **livello di comunicazione** fornisce l'infrastruttura di rete di comunicazione per raccogliere i dispositivi IoT e raccogliere i dati per DT. Ad esempio, è possibile implementare una serie di gateway edge per raccogliere e aggregare informazioni dai sensori e inviarle al livello dell'applicazione. **I sensori e i gateway IoT** utilizzano diversi protocolli di comunicazione per raccogliere e trasmettere informazioni. Dopo aver ottenuto le informazioni, il gateway nel livello oggetti trasmette i dati al livello dell'applicazione.

-Il **livello applicativo** comprende i sistemi digitali di DT. A questo livello, il sistema DT mappa prima tutte le informazioni del sensore e del gateway sul sistema digitale. Allo stesso tempo, possiamo utilizzare il servizio di denominazione IoT per nominare i sensori IoT mappati e i gateway locali, in modo che il sistema digitale possa localizzare risorse diverse. Il sistema digitale può quindi utilizzare **modelli ML/DL per eseguire previsioni e analisi**. In questo modo, il sistema digitale può controllare gli attuatori nel livello target in base ai risultati della previsione. Inoltre, i risultati della previsione e dell'analisi possono fornire diversi servizi a livello di utente finale.

-Il **livello dell'utente finale** fornisce servizi per gli utenti, che possono inviare richieste al livello dell'applicazione. Successivamente, il sistema digitale analizzerà le informazioni ottenute e risponderà con i risultati di conseguenza.

Sulla base dell'architettura del sistema DT, la rappresentazione dei dati e i protocolli di comunicazione sono essenziali per la condivisione dei dati all'interno del DT, nonché per la fornitura di servizi agli utenti finali.

RAPPRESENTAZIONE DEI DATI

La rappresentazione dei dati consente ai componenti di comprendere i dati provenienti da domini diversi (Tab.1).

L'architettura è costituita da tre componenti principali (Fig.3):

il sottosistema fisico, il modello di intelligenza artificiale (AI) e il modello DT.

Il **gateway IoT** di ogni sistema fisico **raccoglie e aggrega i dati** dal sistema fisico. Con il supporto dei protocolli di comunicazione, i dati possono essere trasmessi dal sistema fisico al modello AI. **Il modello AI** viene utilizzato per **l'analisi dei dati e la progettazione di modelli** basati sugli stati del sistema fisico. Quindi, il modello di intelligenza artificiale memorizza il modello addestrato come modello DT per rappresentare la prospettiva digitale del sistema fisico. Se la configurazione del sistema fisico non cambia, il modello DT può guidare il sistema fisico a reagire in base ai dati raccolti dal sistema fisico. Se la configurazione del sistema fisico cambia o deve rispondere in modo diverso alla stessa situazione, il modello di intelligenza artificiale può aggiornare il proprio modello in base alle modifiche del sistema fisico e rivedere il modello DT.

Luogo

Keywords

Digital Twin, Internet of Things (IoT), cyber-physical system, smart-world applications

Bibliografia/Sitografia

<https://www.mdpi.com/1999-5903/14/2/64>

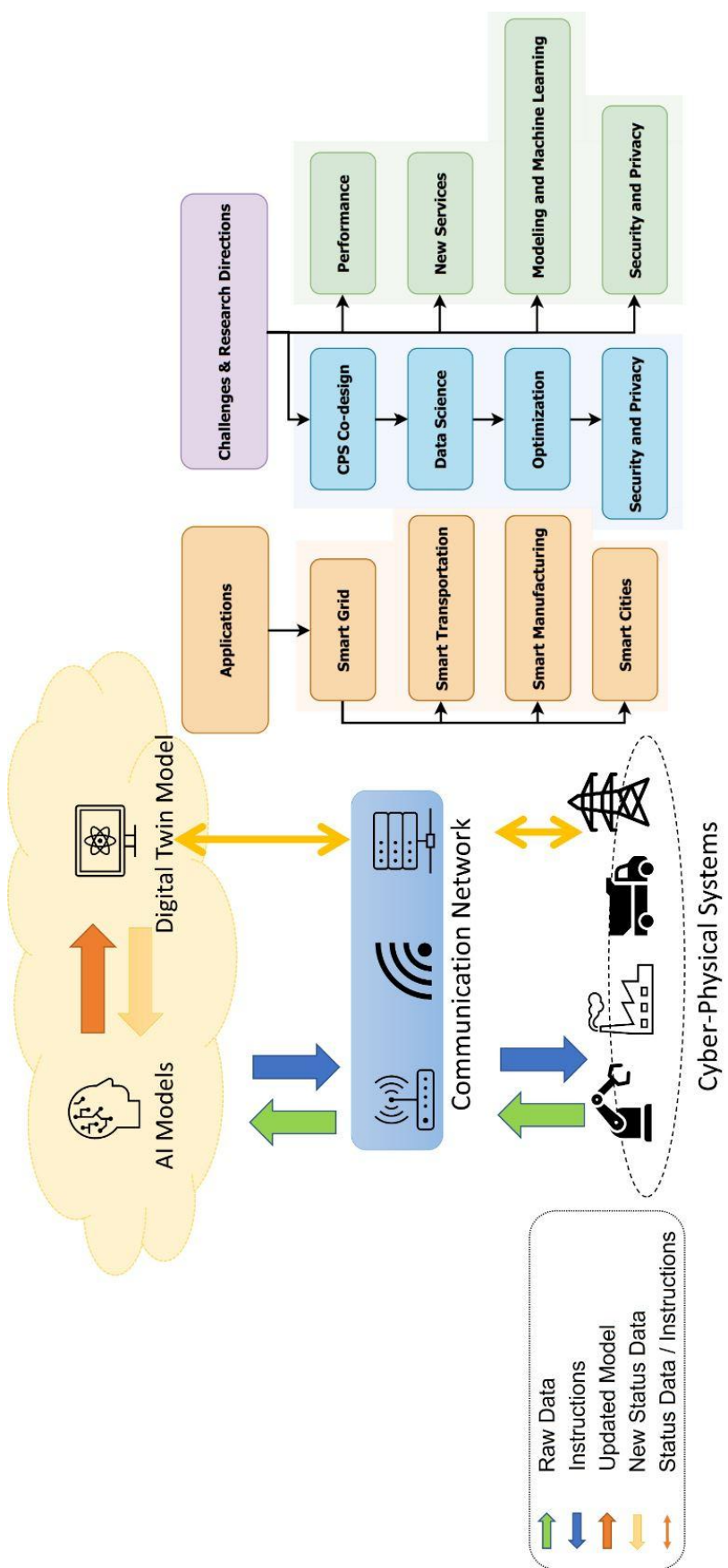


Figure 1. DT Architecture.

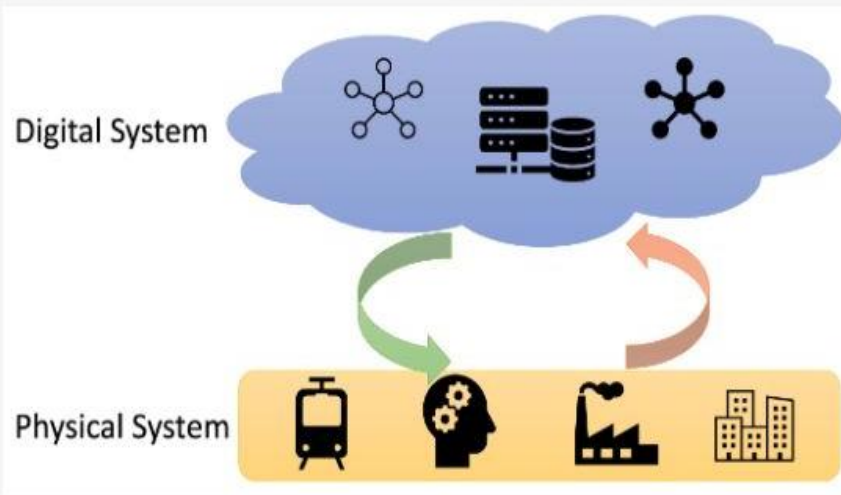


Figure 2. DT Variants.

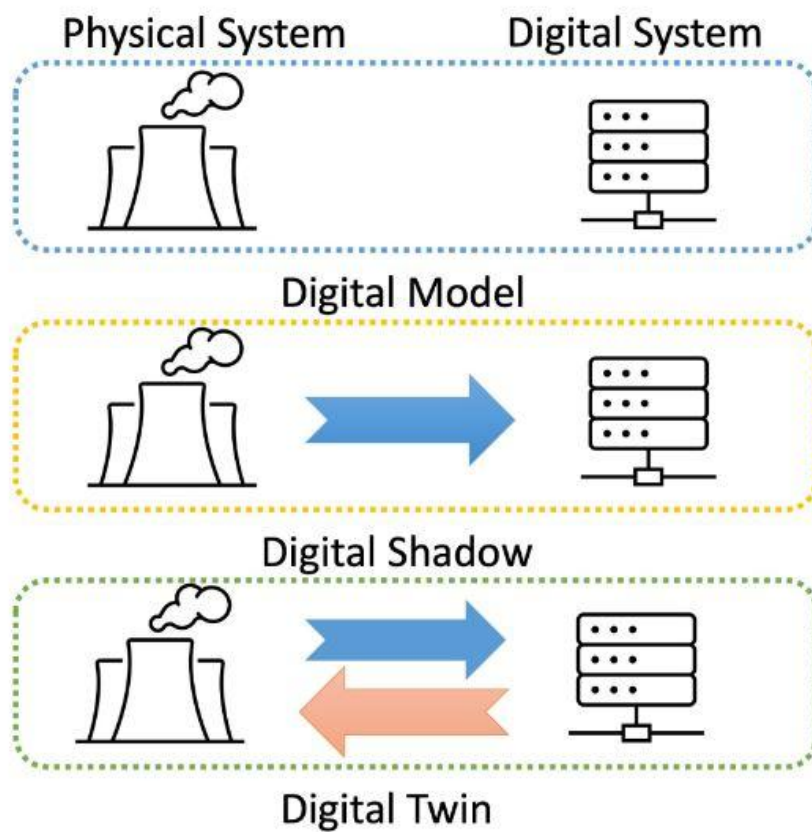
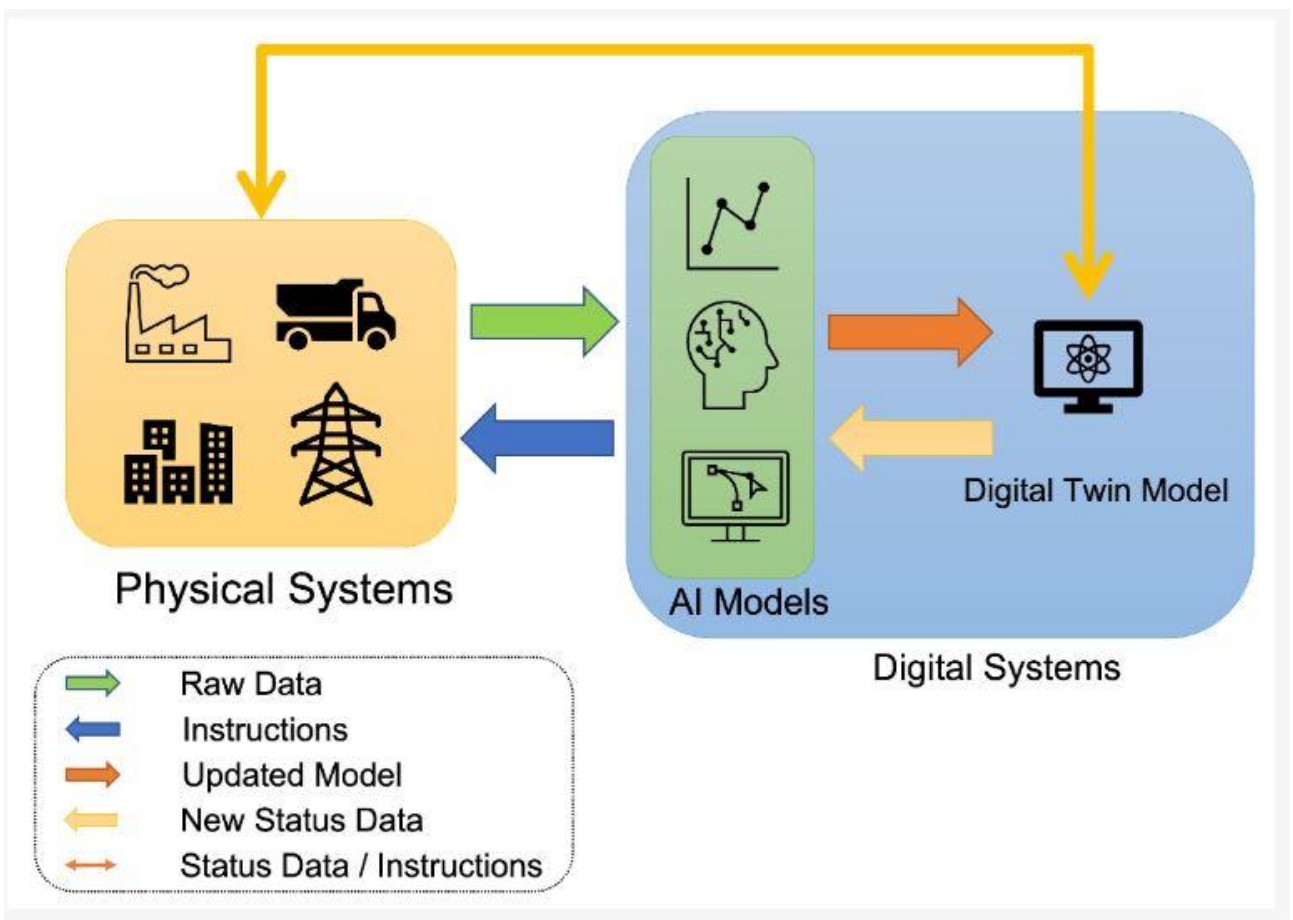


Table 1. Protocols of DTs.

Protocol Name	Protocol Type	Protocol Characteristics
DTDL	Data Representation	As an open-standard platform, it defines six characteristics of IoT components and enables seamless data transmission between different DTs.
FIWARE	Data Representation	It supports DT data transmission and the processing of contextual information received from various IoT components.
OPC UA	Data Representation	As a modeling framework, it can retrieve information from raw data, support data manipulation, and provide monitoring capabilities.
FDTF	Data Representation	As a DT structure, it enables the DT system to share information based on the data link between DT components.
CoAP	Communication	As a specialized web communication protocol based on the User Datagram Protocol (UDP), it is tailored for resource-restricted devices, supports the transmission of data via Hypertext Transfer Protocol (HTTP), and provides a publish and subscribe mechanism to simplify the process of obtaining continuous data from the sensor.
MQTT	Communication	As a communication protocol based on Transmission Control Protocol (TCP), it enables lightweight way for IoT devices to communicate, provides reliable data transfer, and can establish a long-existing outgoing TCP protocol to enable transmission.
Modbus TCP/IP	Communication	As a communication protocol based on Transmission Control Protocol (TCP), it realizes the connection between industrial devices, provides reliable data transfer, and contains built-in checksum protection.
URLLC	Communication	As a communication protocol, it tends to achieve low latency and reliability in the transmission process between IoT devices.



Tesi redatta con il cofinanziamento dell'Unione europea-*NextGeneration EU*
Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Missione 4 – Componente 1 –
Investimento 4.1. del PNRR – “Patrimonio culturale” – CUP I53C2200080006



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA