

Realtà virtuale immersiva e inclusione scolastica: un *framework* UDL-ECS per il *design* di esperienze VR nella scuola secondaria di secondo grado

Marcus Pingitore¹

¹ Università degli Studi di Macerata; m.pingitore@unimc.it

Abstract: La diffusione delle tecnologie di realtà estesa (XR) negli ambienti educativi apre prospettive inedite per la progettazione di contesti di apprendimento inclusivi. In particolare, la realtà virtuale immersiva (VR), attraverso il senso di presenza, il coinvolgimento sensorimotorio e la possibilità di agire mediante un corpo virtuale, può costituire una risorsa educativa. Per studenti con disabilità motorie o sensoriali e per studenti neurodivergenti, alcune caratteristiche della VR (dall'isolamento percettivo del visore alla *cybersickness*, dal sovraccarico sensoriale alle interfacce che richiedono coordinazione fine) possono tuttavia costituire barriere se non affrontate sistematicamente in fase di progettazione. Il contributo propone un *framework* teorico-analitico per il *design* di ambienti VR inclusivi, fondato su una proposta interpretativa che mette in dialogo i principi dell'*Universal Design for Learning* e la prospettiva dell'*Embodied Cognitive Science*: per ciascuno dei tre principi UDL vengono identificate dimensioni corporee ed esperienziali rilevanti, le *affordance* degli ambienti immersivi e indicatori di progettazione formulati in modo da poter essere sottoposti a verifica. Il *framework* viene declinato in una proposta didattica da implementare nella scuola secondaria di secondo grado, fondata sulla co-progettazione con gli studenti, sullo *scaffolding* progressivo verso l'immersione e su modalità valutative coerenti con la variabilità dei profili di apprendimento.

Parole chiave: Embodied Cognition; Realtà Virtuale Immersiva; Universal Design for Learning; didattica inclusiva; ambienti XR



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access
publication under the terms and
conditions of the Creative Commons
Attribution (CC BY) license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduzione

L'integrazione delle tecnologie immersive nei contesti educativi solleva questioni pedagogiche, epistemologiche e progettuali di notevole complessità. Nell'insieme delle tecnologie di realtà estesa (XR), che combinano ambiente reale e ambienti generati digitalmente, il presente lavoro si concentra sulla realtà virtuale immersiva (VR): ambienti tridimensionali fruiti mediante visori che sostituiscono integralmente il campo visivo dell'utente, consentendogli di percepire la scena simulata e di agirvi.

La letteratura sperimentale e le evidenze meta-analitiche indicano che la VR può produrre effetti positivi sugli apprendimenti, sebbene variabili in relazione al dominio disciplinare, al tipo di attività e alla condizione di confronto (Wu et al., 2020). Secondo il *Cognitive Affective Model of Immersive Learning* (CAMIL; Makransky & Petersen, 2021),

l'immersione e il controllo possono favorire il senso di presenza e di *agency*, influenzando processi cognitivi e affettivi rilevanti per l'apprendimento.

L'immersione, tuttavia, non garantisce di per sé risultati migliori: in determinate condizioni, la ricchezza sensoriale e gli elementi non funzionali all'obiettivo possono accrescere il carico cognitivo estraneo e distogliere risorse dall'elaborazione del contenuto (Parong & Mayer, 2018).

Questa tensione tra potenziale e rischio definisce il problema del presente contributo. La domanda non è se adottare la VR nella didattica, bensì come progettare esperienze inclusive fin dall'origine, senza delegare l'accessibilità ad adattamenti successivi, secondo la logica della progettazione universale che incorpora la variabilità degli studenti tra i vincoli iniziali del *design* (CAST, 2024).

A partire da tali premesse, il contributo, di natura teorico-argomentativa, propone un *framework* che integra *Universal Design for Learning* ed *Embodied Cognitive Science* e lo declina in un disegno applicativo da implementare nella scuola secondaria di secondo grado.

2. Quadro teorico di riferimento

2.1 L'*Universal Design for Learning* 3.0

L'*Universal Design for Learning* (UDL) è un quadro di progettazione didattica fondato su un principio di inversione: non sono gli studenti a doversi adattare a un ambiente di apprendimento standardizzato, ma è l'ambiente a dover essere progettato in funzione dell'eterogeneità della classe. Il quadro si articola in tre principi: offrire molteplici vie al coinvolgimento e alla motivazione, molteplici mezzi di rappresentazione dell'informazione e molteplici mezzi di azione ed espressione di ciò che si è appreso. Le barriere all'apprendimento non vengono quindi considerate come difficoltà proprie dei singoli studenti, ma come ostacoli che emergono dall'interazione tra persone e ambiente; il *design* dell'ambiente educativo può pertanto facilitare o ostacolare l'apprendimento (CAST, 2024).

La versione 3.0 delle linee guida pone maggiore enfasi su due aspetti rilevanti. Il primo è la *learner agency*: la progettazione universale non mira soltanto all'accesso ai contenuti, ma anche a promuovere scelta, partecipazione attiva e autodeterminazione. Il secondo riguarda identità e appartenenza e richiama l'attenzione sui *bias* e sui sistemi di esclusione che possono essere incorporati negli ambienti e nelle pratiche educative. In questa prospettiva, le dimensioni affettive e relazionali concorrono alla costruzione di un ambiente inclusivo (CAST, 2024).

2.2 L'*Embodied Cognitive Science*

L'*Embodied Cognitive Science* (ECS) considera la cognizione un'azione incarnata: i processi cognitivi non sono confinati al cervello, ma emergono dall'interazione tra corpo, mente e ambiente e si radicano nelle capacità sensomotorie di un organismo situato in un contesto biologico e culturale (Varela et al., 1991). Il corpo non è quindi un semplice canale di *input*, ma parte integrante della costruzione del significato. Secondo la prospettiva enattiva, che concepisce la conoscenza come un processo che si costituisce nell'agire stesso dell'organismo, la conoscenza non preesiste all'interazione con il mondo, ma emerge dall'accoppiamento strutturale tra soggetto e ambiente e si sviluppa attraverso l'esplorazione, la formulazione di domande e l'interazione corporea con il contesto (Ellis, 2010).

Per il *design* di ambienti immersivi risultano centrali due costrutti. Il primo è la simulazione incarnata, secondo cui la comprensione può coinvolgere la riattivazione dei sistemi sensomotori associati alle azioni (Gallese, 2005). Il secondo è la circolarità tra corpo, mente e contesto che, assunta come principio di progettazione educativa, trova sistematizzazione nella prospettiva dell'*Embodied Cognition Design*, orientata a tradurre le acquisizioni dell'ECS in criteri per la costruzione degli spazi e delle esperienze di apprendimento (Gomez Paloma et al., 2019). Questi riferimenti non sono assunti come sovrapponibili: l'enattivismo riguarda la costituzione situata della conoscenza, la simulazione incarnata il coinvolgimento dei sistemi sensomotori, mentre l'*embodied design* ne orienta la traduzione didattica. In quest'ultima prospettiva, non ogni movimento produce apprendimento: il gesto deve essere congruente e funzionalmente integrato nel compito cognitivo (Abrahamson & Lindgren, 2014; Johnson-Glenberg, 2018; Skulmowski & Rey, 2018).

Pur convergendo nell'attenzione alla relazione tra soggetto e ambiente, UDL ed ECS svolgono funzioni differenti nel *framework* proposto. L'UDL orienta la progettazione dell'ambiente di apprendimento in funzione della variabilità degli studenti e della rimozione delle barriere, mentre l'ECS offre una cornice interpretativa dei processi cognitivi corporei e situati che possono essere attivati nell'interazione con l'ambiente. La loro integrazione non presuppone quindi un'equivalenza tra le due prospettive, ma una complementarità funzionale assunta nel presente contributo come ipotesi progettuale.

In ambiente VR, tale distinzione richiede inoltre di non sovrapporre il senso di presenza al *sense of embodiment*. Quest'ultimo comprende *self-location*, *agency* e *body ownership*, cioè rispettivamente la localizzazione del sé nel corpo virtuale, il senso di controllo sulle sue azioni e il senso di appartenenza corporea (Kiltner et al., 2012). Il senso di presenza riguarda invece l'esperienza soggettiva di essere situati nell'ambiente virtuale e costituisce un costrutto distinto, sebbene possa interagire con processi cognitivi e affettivi rilevanti per l'apprendimento (Makransky & Petersen, 2021).

Né la presenza né l'*embodiment*, tuttavia, implicano di per sé un apprendimento incarnato. Perché il coinvolgimento corporeo assuma una funzione didatticamente significativa, il movimento deve essere congruente con l'obiettivo cognitivo e integrato funzionalmente nel compito, anziché costituire una semplice modalità di controllo dell'interfaccia (Skulmowski & Rey, 2018). Da questa prospettiva, la possibilità di modificare *avatar*, comandi e modalità di interazione rappresenta una risorsa progettuale, ma non coincide automaticamente con l'accessibilità, che dipende dalla relazione tra caratteristiche dell'ambiente e variabilità degli utenti.

3. Il *framework* UDL-ECS

Il *framework* UDL-ECS è una sintesi teorico-argomentativa elaborata nel presente contributo: non deriva da una revisione sistematica né da un precedente prototipo validato. La sua costruzione ha seguito tre passaggi: (a) la selezione, per ciascun principio UDL, delle dimensioni *embodied* ritenute più pertinenti alle modalità di interazione considerate negli ambienti VR; (b) l'individuazione delle *affordance* e delle funzioni tecniche potenzialmente in grado di sostenerle, sulla base della letteratura sull'*embodied design*, sull'*embodiment* e sull'accessibilità XR (Johnson-Glenberg, 2018; Creed et al., 2024; W3C, 2021); (c) la traduzione di tali elementi in scelte didattico-progettuali e indicatori osservabili da sottoporre a verifica empirica.

L'integrazione UDL-ECS va pertanto intesa come una proposta interpretativa dell'autore e non come una convergenza già consolidata tra due cornici di pari statuto.

Operativamente, la matrice mette in relazione, per ciascun principio UDL, le dimensioni *embodied* selezionate, le *affordance* tecnologiche degli ambienti immersivi, le scelte didattico-progettuali e gli indicatori osservabili attraverso cui tali scelte potranno essere analizzate e sottoposte a verifica empirica (Tabella 1). L'UDL orienta le condizioni di accesso, partecipazione ed espressione, mentre l'ECS offre una cornice interpretativa del ruolo del corpo e dell'azione nei processi di costruzione del significato.

Indicatori osservabili	Scelte didattico-progettuali	Funzioni/ <i>affordance</i> VR	Esperienze/ dimensioni rilevanti	Principio UDL
Opzioni modificabili dall'utente; sessione interrompibile/ripetibile; comfort e controllo percepito rilevabili	Accesso graduale; familiarizzazione non valutata; possibilità di scelta, pausa e ripetizione	<i>Avatar</i> configurabile; controllo dell'ambiente; reversibilità dell'interazione	Presenza (distinta dal <i>sense of embodiment</i>); <i>agency</i> ; <i>self-location</i> ; <i>body ownership</i>	Coinvolgimento
Informazione essenziale disponibile in forme alternative; raccordo 3D-2D esplicito; regolazioni attivabili	Canali ridondanti; densità sensoriale regolabile; sottotitoli/descrizioni ove supportati	Visualizzazione 3D dinamica; prospettiva egocentrica; raccordo sincro 3D-2D	Percezione multimodale; simulazione incarnata	Rappresentazione
Compito eseguibile con modalità diverse; criteri comuni; gesto semanticamente congruente al concetto	Mappatura flessibile dei comandi; obiettivi e criteri comuni; formati di prestazione alternativi	Manipolazione diretta; <i>input</i> alternativi ove supportati	Gesto integrato nel compito; corpo virtuale	Azione ed espressione

Tabella 1. Il *framework* UDL-ECS per il *design* inclusivo di esperienze VR

Le associazioni proposte nella matrice hanno carattere operativo e non esclusivo. Presenza e *agency* sono ricondotte prevalentemente al principio del coinvolgimento, poiché il senso di controllo, la possibilità di scelta e l'esperienza di essere situati nell'ambiente possono concorrere alla dimensione affettivo-motivazionale dell'apprendimento. La simulazione incarnata e la percezione multimodale sono invece associate alla rappresentazione, in quanto il raccordo tra percezione, azione e visualizzazioni 3D-2D può sostenere la costruzione del significato. Il gesto integrato nel compito e il corpo virtuale sono infine riferiti all'azione e all'espressione, poiché possono costituire modalità attraverso cui operare sul contenuto e manifestare la comprensione. Tali associazioni non implicano corrispondenze biunivoche: le medesime dimensioni possono infatti attraversare più principi UDL. La *learner agency* è tradotta trasversalmente attraverso possibilità di scelta, reversibilità delle azioni, modalità alternative di partecipazione e co-progettazione; l'attenzione a *bias* e processi di esclusione orienta invece l'individuazione delle barriere e il mantenimento di obiettivi di apprendimento comuni a fronte della flessibilità dei mezzi (CAST, 2024).

Il *framework* è pensato principalmente come strumento di analisi e guida progettuale, non come protocollo validato. Gli indicatori sono formulati in termini osservabili affinché possano essere sottoposti a verifica empirica e costituire, in prospettiva, una base per la valutazione dell'accessibilità delle esperienze progettate. Funzioni quali *input* alternativi, regolazione della stimolazione sensoriale e descrizioni audio possono non essere native della piattaforma adottata: la loro effettiva implementabilità deve pertanto essere distinta dalle scelte pedagogiche e accertata mediante prototipazione tecnica e test con gli utenti.

4. La proposta applicativa: la geometria solida in VR

4.1 La scelta disciplinare e le evidenze che la sostengono

La proposta didattica riguarda la geometria solida – poliedri, solidi di rotazione e sezioni piane – ed è destinata alle classi seconde e terze della scuola secondaria di secondo grado. La scelta disciplinare risponde a tre criteri. Il primo è la trasversalità, poiché la geometria ricorre nei curricula di diversi percorsi della secondaria di secondo grado. Il secondo è la pertinenza cognitiva: questi contenuti richiedono ragionamento visuospatiale e coordinamento tra rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali, rotazioni mentali, sezioni e cambi di prospettiva. Tali operazioni possono risultare complesse quando devono essere inferite da immagini statiche, soprattutto in presenza di abilità visuospatiali iniziali meno sviluppate. Il terzo è la coerenza teorica: l'*embodied design* ha trovato nella didattica della matematica uno dei principali ambiti di sviluppo (Abrahamson & Lindgren, 2014).

Le evidenze disponibili sostengono la plausibilità della scelta, senza dimostrare l'efficacia della specifica proposta. Uno studio pionieristico sulla sezione dei solidi con studenti della scuola secondaria di secondo grado ha evidenziato l'importanza della rotazione dinamica della scena e della qualità dell'interfaccia per l'usabilità dell'ambiente VR (Kovárová & Sokolský, 2011).

Un esperimento controllato condotto con alunni della scuola primaria sull'apprendimento dei solidi geometrici – un gruppo in realtà virtuale, uno in realtà aumentata e un gruppo di controllo su materiali tradizionali – ha rilevato, pur su un campione contenuto, una comprensione dei concetti migliore nelle condizioni VR e AR rispetto ai materiali tradizionali, senza differenze rilevanti tra le due tecnologie (Demitriadou et al., 2020). Una meta-analisi di 21 studi K-6 ha rilevato effetti positivi della VR sugli apprendimenti, più elevati negli interventi immersivi e di durata contenuta (Villena-Taranilla et al., 2022). Più vicino alla popolazione target, uno studio quasi-sperimentale di cinque settimane con 40 studenti della scuola superiore ha riportato risultati e motivazione più favorevoli nella condizione VR per contenuti geometrici; il campione ridotto e il disegno impongono tuttavia cautela nella generalizzazione (Su et al., 2022).

Sul piano cognitivo, una meta-analisi di 36 studi ha rilevato un effetto medio delle tecnologie virtuali, immersive e non immersive, sulle abilità spaziali ($ES = 0,617$; Di & Zheng, 2022). Poiché gli studi inclusi impiegavano tecnologie e livelli di interattività differenti, il risultato sostiene la plausibilità della scelta disciplinare senza consentire di attribuire l'effetto alla sola immersione. Una revisione sistematica mostra inoltre che gli effetti dell'interazione in VR variano in funzione delle abilità spaziali iniziali: alcune modalità interattive possono avvantaggiare gli studenti con abilità elevate e porre maggiori difficoltà a quelli con abilità più basse, pur offrendo possibilità di *training* soprattutto per questi ultimi (Gittinger & Wiesche, 2024). Poiché le abilità spaziali sono allenabili e trasferibili anche a compiti non direttamente esercitati (Uttal et al., 2013), esse costituiscono un esito da misurare nella validazione, non un beneficio da assumere a priori.

Uno studio qualitativo in geometria immersiva ha inoltre mostrato come il corpo possa diventare una risorsa per il pensiero spaziale e come la connessione sincrona tra esperienza tridimensionale in prima persona e rappresentazione bidimensionale sostenga il coordinamento di prospettive differenti (Price et al., 2020). Nel complesso,

la letteratura individua nella geometria un ambito pertinente per impiegare manipolazione, prospettiva egocentrica e visualizzazione dinamica; resta da verificare se il percorso proposto produca vantaggi rispetto a modalità meno immersive.

4.2 L'architettura della proposta

La proposta assume Delightex Edu come possibile ambiente di prototipazione, non come scelta tecnologica definitiva. La piattaforma consente di creare scene 3D, animarle mediante programmazione visuale a blocchi e fruirle su schermo o con visore (Delightex, n.d.). La scelta risponde a tre requisiti: fruibilità multiplatforma, modificabilità delle scene e orientamento educativo. Nel presente contributo non viene descritto un prototipo già implementato: la generazione dinamica delle sezioni, il raccordo 3D-2D, il calcolo automatico delle misure e gli *input* alternativi descritti di seguito costituiscono requisiti progettuali da verificare e potrebbero richiedere programmazione dedicata, integrazioni esterne o una piattaforma differente.

L'esperienza si articola in tre livelli a complessità crescente, secondo il principio dello *scaffolding* progressivo. Nel primo, di esplorazione libera, gli studenti accedono a una galleria di solidi trasparenti, che possono ruotare, avvicinare e allontanare senza obiettivi valutativi, familiarizzando con forme, comandi e immersione; sul piano disciplinare, questa fase è orientata al riconoscimento delle proprietà fondamentali dei solidi e delle loro relazioni spaziali. Nel secondo, di osservazione guidata, etichettano vertici, spigoli, facce e assi di simmetria e posizionano un piano semitrasparente su solidi sezionabili; la sezione generata viene visualizzata anche come figura piana su un pannello laterale, realizzando il raccordo sincrono tra rappresentazione 3D e 2D indicato dalla letteratura (Price et al., 2020). L'obiettivo è favorire il coordinamento tra la configurazione tridimensionale del solido e la rappresentazione bidimensionale delle sue sezioni. Nel terzo, di manipolazione e simulazione, gli studenti risolvono problemi operando direttamente sui solidi: per esempio, sezionano un prisma con un piano passante per punti assegnati, ricavano la figura e ne calcolano area e perimetro, confrontando il risultato con le misure del sistema, qualora tale funzione sia implementata. In questa fase l'obiettivo è applicare le conoscenze geometriche alla risoluzione di problemi attraverso la manipolazione delle configurazioni spaziali. Il taglio, l'orientamento del piano e lo spostamento del punto di osservazione assumono così il valore di azioni epistemiche, compiute per trasformare lo stato di conoscenza di chi le esegue (Kirsh & Maglio, 1994).

La proposta non assume che la modalità immersiva sia necessariamente superiore a modelli fisici, realtà aumentata o software tridimensionali fruiti su schermo. Il possibile valore aggiunto della VR, da verificare empiricamente, risiede nella combinazione tra prospettiva in prima persona, manipolazione corporea e variazione dinamica del punto di osservazione, particolarmente pertinente per attività che richiedono il coordinamento tra rappresentazioni spaziali differenti.

Il percorso si conclude con un compito autentico, cioè una situazione-problema verosimile che richiede di mobilitare conoscenze e abilità in un contesto significativo (Wiggins, 1998). I gruppi progettano una sala espositiva di un museo della scienza dedicata ai solidi geometrici attraverso ruoli differenziati: l'esploratore analizza gli oggetti in VR; il misuratore calcola volumi, superfici e angoli di sezione; il documentarista registra le procedure; il relatore presenta le scelte alla classe. La distribuzione dei ruoli consente di contribuire attraverso competenze diverse e riduce il rischio che la padronanza tecnologica diventi un fattore escludente. I ruoli sono

previsti in rotazione nelle diverse fasi dell'attività, affinché tutti gli studenti possano accedere agli apprendimenti geometrici essenziali e sperimentare compiti di manipolazione, analisi e rappresentazione, pur attraverso modalità di partecipazione differenti.

L'uso del visore non costituisce una condizione obbligatoria per la partecipazione. L'esperienza resta fruibile anche su *desktop* o *tablet*, offrendo un canale alternativo senza presumere che la modalità su schermo sia percettivamente equivalente a quella immersiva o elimini ogni possibile barriera. L'equivalenza ricercata riguarda l'accesso ai medesimi obiettivi di apprendimento e criteri di valutazione, non l'identità dell'esperienza percettiva.

5. L'accessibilità come co-progettazione strutturale

L'elemento inclusivo qualificante della proposta è la co-progettazione: prima dell'avvio delle attività, gli studenti contribuiscono alla scelta delle scene, alla personalizzazione dell'*avatar* e alla configurazione dei comandi. La partecipazione degli studenti con disabilità e degli studenti neurodivergenti non è accessoria ma costitutiva, perché la loro esperienza diretta può rendere visibili barriere che il *design* deve considerare e, ove possibile, rimuovere. Trattare l'accessibilità come adattamento successivo può produrre soluzioni marginali, onerose e potenzialmente stigmatizzanti; assumerla come condizione strutturale significa far precedere le decisioni di accessibilità alle altre scelte progettuali. La ricerca sulle tecnologie immersive ha infatti identificato 49 barriere motorie, cognitive, visive e uditive e sottolinea la necessità di coinvolgere direttamente le persone con disabilità nelle diverse fasi del *design* (Creed et al., 2024). In questa direzione, anche le *XR Accessibility User Requirements* del W3C richiamano l'importanza del supporto multimodale, della personalizzazione e della compatibilità tra differenti modalità di *input* e *output* negli ambienti XR (W3C, 2021).

Operativamente, la co-progettazione è prevista in più momenti del percorso: una fase iniziale di rilevazione di barriere, preferenze e modalità di accesso; una fase di prova e revisione delle scene e dei comandi durante la familiarizzazione; una fase successiva di valutazione dell'esperienza, i cui esiti possono orientare ulteriori modifiche. Le osservazioni e le decisioni progettuali possono essere documentate attraverso un *design log*, così da rendere tracciabile il processo di revisione. In presenza di esigenze differenti o potenzialmente contrastanti, la scelta delle soluzioni resta responsabilità del gruppo di progettazione e viene orientata alla possibilità di offrire modalità alternative di accesso e partecipazione senza modificare gli obiettivi essenziali di apprendimento. Il coinvolgimento degli studenti è previsto su base volontaria e informata e non attribuisce agli studenti con disabilità la responsabilità esclusiva di individuare o risolvere le barriere.

A tali barriere la proposta risponde con requisiti progettuali espliciti, derivati dagli indicatori del *framework*. L'alternativa bidimensionale su *desktop* offre un canale di partecipazione a chi non utilizza il visore, senza garantire di per sé la piena accessibilità; la possibilità di regolare la stimolazione sensoriale – luminosità, *texture* e segnali sonori – risponde al rischio di sovraccarico, mentre l'integrazione di comandi vocali o dispositivi di puntamento adattivi costituisce un requisito da verificare in fase di prototipazione. Moon, Choi e Seo (2023) sottolineano la necessità di adattare il *design* degli ambienti VR alle specificità sensoriali e cognitive delle persone autistiche;

coerentemente, la proposta prevede una fase non valutativa di familiarizzazione e un controllo prevedibile dell'esperienza. È inoltre prevista, qualora supportata dall'ambiente condiviso, la possibilità per il docente o per un tutor di entrare nell'ambiente virtuale e fornire supporto individualizzato, condizione rilevante per gli studenti che necessitano di mediazione costante o che possono provare ansia o disorientamento in ambiente immersivo.

Queste scelte sono coerenti con un corpo di evidenze empiriche in crescita: una revisione sistematica degli interventi basati su realtà virtuale con bambini e adolescenti nello spettro autistico riporta risultati complessivamente promettenti, soprattutto nelle abilità sociali, emotive e comunicative, ma evidenzia anche l'eterogeneità metodologica degli studi disponibili (Mesa-Gresa et al., 2018); una rassegna degli interventi condotti in contesti scolastici primari e secondari rileva che la maggior parte dei 25 studi K-12 esaminati impiega ambienti non immersivi su schermo (Carreon et al., 2022), dato coerente con la scelta di non subordinare la partecipazione all'uso del visore.

Completano il disegno tre dispositivi di valutazione e tutela. Il primo riguarda gli apprendimenti: accanto alle verifiche tradizionali, gli studenti possono documentare le competenze attraverso prestazioni corporee osservabili nell'ambiente, come individuare gli assi di simmetria o ricostruire lo sviluppo piano di un solido. La flessibilità riguarda il formato, non gli obiettivi e i criteri, che restano comuni; tali prestazioni sono indicatori ipotetici di competenza e dovranno essere validate mediante rubriche e confronto con prove disciplinari e giudizi esperti. Il secondo dispositivo riguarda la *cybersickness*: sono previste sessioni brevi, pause programmate, locomozione a punti fissi, possibilità di interrompere immediatamente l'esperienza e rilevazione dei sintomi. Una revisione sistematica di studi educativi segnala soprattutto disturbi oculomotori e disorientamento e raccomanda informazione preventiva e segnalazione dei sintomi (Cossio et al., 2025). Il terzo dispositivo riguarda la valutazione dell'accessibilità, intesa come un processo attraverso cui il *feedback* degli studenti contribuisce alla revisione iterativa e al miglioramento progressivo della proposta.

Nella futura implementazione dovranno inoltre essere considerate la sicurezza fisica durante l'uso del visore, la gestione e l'igienizzazione dei dispositivi condivisi, la tutela dei dati eventualmente generati dalle interazioni e la sostenibilità economica e organizzativa dell'attività. La partecipazione all'esperienza immersiva dovrà poter essere interrotta o rifiutata senza conseguenze valutative, mantenendo disponibili modalità alternative per accedere ai medesimi obiettivi di apprendimento.

È tuttavia necessario dichiarare con chiarezza un limite di applicabilità dell'attuale configurazione progettuale. L'informazione fondamentale per la comprensione dell'esperienza, ovvero la configurazione del solido e la sezione generata dall'intersezione, viene infatti veicolata prevalentemente attraverso il canale visivo, sia nell'ambiente immersivo sia nella versione su schermo. Di conseguenza, per studenti con cecità o con ipovisione grave la barriera all'accesso non è legata semplicemente alla modalità di fruizione, ma alla struttura stessa dell'esperienza progettata.

Per garantire l'accesso ai medesimi obiettivi di apprendimento sarebbero necessari ulteriori canali percettivi e rappresentativi, come modelli tattili e manipolabili, descrizioni spaziali dettagliate e, ove disponibili, sistemi aptici o forme di sonificazione. Tali mediatori possono essere considerati coerenti con la logica multimodale del *framework* UDL-ECS, ma non sono attualmente integrati nella

configurazione qui proposta. Pertanto, la sola trasposizione dell'esperienza in modalità su schermo non è sufficiente a eliminare questa barriera, poiché mantiene la dipendenza principale dall'elaborazione visiva.

6. Discussione

Il punto di forza principale del *framework* UDL-ECS risiede nella possibilità di mettere in relazione principi pedagogici generali sull'inclusione (CAST, 2024) con prospettive teoriche che assegnano al corpo e all'interazione situata un ruolo costitutivo nei processi cognitivi (Varela, Thompson, & Rosch, 1991), traducendo tale integrazione in una griglia di indicatori formulati in modo da poter essere sottoposti a verifica. Come già precisato, questa integrazione costituisce una proposta interpretativa del presente contributo e non una convergenza già consolidata tra UDL ed ECS. Tale approccio sposta l'attenzione didattica dal deficit individuale alla relazione tra persona e ambiente, considerando le barriere come esito dell'interazione tra la variabilità degli studenti e le caratteristiche della progettazione.

Tuttavia, l'applicazione del *framework* solleva sfide rilevanti che vanno lette come limiti dell'attuale proposta. Il primo nodo critico riguarda la complessa gestione del carico cognitivo. Sebbene la letteratura teorica individui presenza, *embodiment* e *agency* come dimensioni rilevanti dell'esperienza immersiva (Makransky & Petersen, 2021; Kiltner, Groten, & Slater, 2012), tali dimensioni non garantiscono di per sé un apprendimento più efficace. L'elevata interattività e la forte densità sensoriale degli ambienti VR possono, in determinate condizioni, accrescere il carico cognitivo estraneo e sottrarre risorse all'elaborazione del contenuto (Parong & Mayer, 2018). La gradualità dell'approccio, le fasi non valutative di familiarizzazione e la possibilità di personalizzare l'*input* sensoriale costituiscono pertanto risposte progettuali ipotizzate, la cui efficacia dovrà essere verificata empiricamente.

Il secondo limite investe la fattibilità tecnica, le dotazioni strutturali e la formazione del personale scolastico. L'effettiva implementazione del *framework* sul campo dipende dalle funzioni e dai vincoli della piattaforma di prototipazione, dalle infrastrutture e dalla disponibilità dei dispositivi nelle scuole e, fattore cruciale, dalla capacità del corpo docente di integrare competenze tecniche, didattiche disciplinari e cornici progettuali e teoriche quali UDL ed ECS. La fattibilità tecnica non coincide inoltre con l'accessibilità né con l'efficacia didattica: una soluzione tecnicamente funzionante può presentare barriere per alcuni studenti oppure non produrre vantaggi disciplinari rispetto a modalità meno immersive.

Il terzo limite concerne lo statuto stesso della proposta applicativa sulla geometria solida. Trattandosi, al momento, di un disegno progettuale da implementare, non è possibile trarre conclusioni sull'efficacia rispetto agli apprendimenti, allo sviluppo delle abilità visuospatiali (Di & Zheng, 2022; Gittinger & Wiesche, 2024) o alla partecipazione degli studenti. Inoltre, il perimetro dell'accessibilità rimane incompleto per alcune condizioni: per studenti con cecità o ipovisione grave, l'attuale architettura dell'informazione, basata in larga parte sul canale visivo, costituisce una barriera strutturale che non viene risolta dal semplice passaggio alla fruizione bidimensionale su schermo. L'inclusione deve pertanto essere considerata un obiettivo della progettazione da sottoporre a verifica, e non una proprietà automaticamente derivante dall'impiego della tecnologia immersiva.

Un ulteriore limite riguarda il carattere selettivo e teorico-argomentativo della letteratura mobilitata. Il contributo non deriva da una revisione sistematica e le evidenze richiamate sostengono la plausibilità delle singole componenti teoriche e progettuali del *framework*, senza costituire una validazione del modello UDL-ECS nel suo complesso.

Da questi limiti discendono le prospettive per la ricerca futura. La validazione della proposta dovrà distinguere almeno tre livelli: la fattibilità tecnica delle funzioni previste; l'accessibilità e l'usabilità per studenti con differenti profili e modalità di accesso; il contributo didattico rispetto agli apprendimenti disciplinari e allo sviluppo delle abilità visuospatiali. I tre livelli dovranno essere valutati separatamente, poiché il funzionamento tecnico di un ambiente non ne garantisce l'accessibilità e, analogamente, un ambiente accessibile non implica necessariamente un vantaggio didattico rispetto a modalità alternative.

Una possibile direzione metodologica è rappresentata da cicli iterativi di *Design-Based Research*, attraverso i quali sviluppare e progressivamente raffinare la proposta in contesti reali, eventualmente integrati con disegni comparativi e metodi misti. Le misurazioni potranno riguardare l'apprendimento disciplinare, l'evoluzione delle abilità visuospatiali, il carico cognitivo, l'incidenza della *cybersickness* (Cossio et al., 2025), la motivazione, l'usabilità e l'accessibilità percepita. L'integrazione tra *log* di interazione, rubriche osservative, questionari, prove disciplinari e interviste potrà contribuire a chiarire non soltanto se la proposta produca gli esiti attesi, ma per quali studenti, in quali condizioni e attraverso quali dinamiche interattive.

7. Conclusioni

La progettazione inclusiva di ambienti di apprendimento in realtà virtuale immersiva non può essere delegata a intuizioni estemporanee o ad adattamenti realizzati a posteriori, ma richiede l'adozione di criteri espliciti, fondati su basi teoriche e formulati in termini operativi e osservabili. Il *framework* UDL-ECS risponde a tale esigenza mettendo in relazione l'approccio universale alla progettazione (CAST, 2024) con prospettive della cognizione incarnata (Ellis, 2010; Gomez Paloma, Borrelli, & Buondonno, 2019), orientando l'analisi delle scelte di *design* in funzione della variabilità cognitiva, sensoriale e motoria degli studenti.

La proposta applicativa, focalizzata sull'insegnamento della geometria solida nella scuola secondaria di secondo grado, rappresenta una prima traduzione operativa di questo impianto. Essa si articola attorno ad alcuni criteri progettuali centrali: la co-progettazione con gli utenti (Creed et al., 2024), lo *scaffolding* progressivo verso l'immersione, la centralità della manipolazione come azione epistemica (Kirsh & Maglio, 1994) e la disponibilità di una pluralità di mezzi di azione ed espressione. Assumere l'accessibilità come condizione strutturale della progettazione, e non come correttivo successivo, consente di considerare le potenziali barriere fin dalle prime fasi del *design*. L'inclusione, tuttavia, costituisce un obiettivo progettuale da sottoporre a verifica e dipende dall'insieme delle scelte didattiche, tecnologiche e organizzative, non dall'impiego della realtà virtuale in sé.

La letteratura pedagogica, sperimentale e meta-analitica esaminata (es. Wu, Yu, & Gu, 2020; Villena-Taranilla et al., 2022) sostiene la plausibilità delle singole componenti teoriche e progettuali della proposta e documenta il potenziale degli ambienti immersivi in specifiche condizioni, ma non consente di inferire l'efficacia del

framework UDL-ECS nel suo complesso. Il presente contributo, di natura teorico-argomentativa, non ne assume pertanto un'efficacia già acquisita. I prossimi passi richiederanno l'implementazione della proposta e una validazione empirica capace di distinguerne la fattibilità tecnica, l'accessibilità e l'usabilità, nonché il contributo agli apprendimenti. Solo attraverso la sperimentazione in contesti reali sarà possibile valutarne la trasferibilità, l'efficacia e la sostenibilità.

Bibliografia

- Abrahamson, D., & Lindgren, R. (2014). Embodiment and embodied design. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (2nd ed., pp. 358–376). Cambridge University Press.
- Carreon, A., Smith, S. J., Mosher, M., Rao, K., & Rowland, A. (2022). A review of virtual reality intervention research for students with disabilities in K–12 settings. *Journal of Special Education Technology*, 37(1), 82–99. <https://doi.org/10.1177/0162643420962011>
- CAST. (2024). *Universal Design for Learning Guidelines version 3.0*. CAST. <https://udlguidelines.cast.org/>
- Cossio, S., Chiappinotto, S., Dentice, S., Moreal, C., Magro, G., Dussi, G., Palese, A., & Galazzi, A. (2025). Cybersickness and discomfort from head-mounted displays delivering fully immersive virtual reality: A systematic review. *Nurse Education in Practice*, 85, 104376. <https://doi.org/10.1016/j.nepr.2025.104376>
- Creed, C., Al-Kalbani, M., Theil, A., Sarcar, S., & Williams, I. (2024). Inclusive AR/VR: Accessibility barriers for immersive technologies. *Universal Access in the Information Society*, 23(1), 59–73. <https://doi.org/10.1007/s10209-023-00969-0>
- Delightex. (n.d.). *Delightex Edu*. Consultato il 5 luglio 2026 da <https://www.delightex.com/edu>
- Demitriadou, E., Stavroulia, K.-E., & Lanitis, A. (2020). Comparative evaluation of virtual and augmented reality for teaching mathematics in primary education. *Education and Information Technologies*, 25(1), 381–401. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09973-5>
- Di, X., & Zheng, X. (2022). A meta-analysis of the impact of virtual technologies on students' spatial ability. *Educational Technology Research and Development*, 70(1), 73–98. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10082-3>
- Ellis, R. D. (2010). The enactive approach to education. *Philosophy in the Contemporary World*, 17(2), 131–141.
- Gallese, V. (2005). Embodied simulation: From neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 4(1), 23–48.
- Gittinger, M., & Wiesche, D. (2024). Systematic review of spatial abilities and virtual reality: The role of interaction. *Journal of Engineering Education*, 113(4), 919–938. <https://doi.org/10.1002/jee.20568>
- Gomez Paloma, F., Borrelli, M., & Buondonno, E. (2019). *Scuole Innovative. L'Embodied Cognition Design come paradigma dei nuovi spazi scolastici*. Edizioni Nuova Cultura.

- Johnson-Glenberg, M. C. (2018). Immersive VR and education: Embodied design principles that include gesture and hand controls. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 81. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00081>
- Kiltien, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(4), 373–387. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00124
- Kirsh, D., & Maglio, P. (1994). On distinguishing epistemic from pragmatic action. *Cognitive Science*, 18(4), 513–549.
- Kovárová, A., & Sokolský, M. (2011). Using virtual reality for teaching solid geometry: A case study for a cube section. In 2011 *14th International Conference on Interactive Collaborative Learning* (pp. 428–433). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICL.2011.6059620>
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. *Educational Psychology Review*, 33(3), 937–958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
- Mesa-Gresa, P., Gil-Gómez, H., Lozano-Quilis, J.-A., & Gil-Gómez, J.-A. (2018). Effectiveness of virtual reality for children and adolescents with autism spectrum disorder: An evidence-based systematic review. *Sensors*, 18(8), 2486. <https://doi.org/10.3390/s18082486>
- Moon, J., Choi, G. W., & Seo, J. Y. (2023). Revisiting multimedia learning design principles in virtual reality-based learning environments for autistic individuals. *Virtual Reality*, 27(4), 3101–3113. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00856-2>
- Parong, J., & Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 110(6), 785–797. <https://doi.org/10.1037/edu0000241>
- Price, S., Yiannoutsou, N., & Vezzoli, Y. (2020). Making the body tangible: Elementary geometry learning through VR. *Digital Experiences in Mathematics Education*, 6(2), 213–232. <https://doi.org/10.1007/s40751-020-00071-7>
- Skulmowski, A., & Rey, G. D. (2018). Embodied learning: Introducing a taxonomy based on bodily engagement and task integration. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3, 6. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0092-9>
- Su, Y.-S., Cheng, H.-W., & Lai, C.-F. (2022). Study of virtual reality immersive technology enhanced mathematics geometry learning. *Frontiers in Psychology*, 13, 760418. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.760418>
- Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352–402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press.

- Villena-Taranilla, R., Tirado-Olivares, S., Cózar-Gutiérrez, R., & González-Calero, J. A. (2022). Effects of virtual reality on learning outcomes in K-6 education: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 35, 100434. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100434>
- W3C. (2021). *XR Accessibility User Requirements (XAUR)*. W3C Working Group Note, 25 August 2021. <https://www.w3.org/TR/xaur/>
- Wiggins, G. (1998). *Educative Assessment: Designing Assessments to Inform and Improve Student Performance*. Jossey-Bass.
- Wu, B., Yu, X., & Gu, X. (2020). Effectiveness of immersive virtual reality using head-mounted displays on learning performance: A meta-analysis. *British Journal of Educational Technology*, 51(6), 1991–2005. <https://doi.org/10.1111/bjet.13023>