

Online laboratories for science education: a summary of evidence

I laboratori online per l'apprendimento scientifico: sintesi delle evidenze

Daniela Fadda

University of Cagliari, Dept. of Pedagogy, Psychology, Philosophy, Cagliari (Italy)

Giuliano Vivanet

University of Cagliari, Dept. of Pedagogy, Psychology, Philosophy, Cagliari (Italy)

OPEN ACCESS

Double blind peer review

Citation: Fadda, D., Vivanet, G., (2021). Online laboratories for science education: a summary of evidence. *Italian Journal of Educational Research*, 26, 105-117.

Corresponding Author: Daniela Fadda
danielafadda@unica.it

Copyright: © 2021 Author(s). This is an open access, peer-reviewed article published by Pensa Multimedia and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. IJEDuR is the official journal of Italian Society of Educational Research (www.sird.it).

Received: March 16, 2021

Accepted: May 27, 2021

Published: June 22, 2021

Pensa MultiMedia / ISSN 2038-9744
<https://doi.org/10.7346/sird-012021-p105>

Abstract

In this study, the results of a second-order systematic review concerning the impact of online (virtual and remote) laboratories on learning in STEM education for secondary school students are discussed. After the selection phase, based on eligibility criteria, ten systematic reviews and meta-analyses were included. The comparative analysis of data provides useful information for the instructional design of laboratory activities mediated by technologies and for the future research. In particular, results showed that online laboratories generally support learning outcomes comparable to those in traditional laboratories; and they suggest that some factors (e.g. teacher training; coherence of goals, laboratory activities, assessment; teacher feedback; integration of online-traditional laboratory activities) can maximize their efficacy. In addition, methodological limitations of current literature suggest the need for further primary studies with a more rigorous design.

Keywords: science education; online laboratory; systematic-reviews; meta-analysis; evidence based education.

Riassunto

In questo lavoro, si presentano e discutono i risultati di una revisione sistematica di secondo ordine sull'efficacia dei laboratori online (virtuali e remoti) per il miglioramento degli apprendimenti nell'educazione STEM, in contesti di scuola secondaria. Al termine della fase di selezione, sulla base dei criteri di eleggibilità adottati, sono stati inclusi dieci studi secondari (revisioni sistematiche e meta-analisi). L'analisi comparativa di questi ultimi fornisce indicazioni utili per la progettazione didattica di attività laboratoriali mediate da tecnologie e per gli sviluppi futuri della ricerca. I risultati consentono di affermare che tendenzialmente i laboratori online permettono agli studenti di raggiungere risultati di apprendimento comparabili a quelli dei laboratori tradizionali e suggeriscono la rilevanza di determinati fattori (tra cui, la formazione degli insegnanti; la coerenza tra obiettivi, strategia laboratoriale e valutazione; il feedback dell'insegnante; l'integrazione tra attività laboratoriali online e in presenza) al fine di massimizzare l'efficacia. Allo stesso tempo, si rilevano alcuni limiti metodologici della letteratura esistente, tali per cui ulteriori studi e un maggior rigore nel design di questi appaiono auspicabili.

Parole chiave: apprendimento scientifico; laboratori online; revisioni sistematiche; meta-analisi; educazione basata su evidenze.

Credit author statement

Nell'ambito di un lavoro condiviso, a Daniela Fadda sono da attribuirsi i par. 2 e 3 e a Giuliano Vivanet i par. 1, 4 e 5.

1. Introduzione

All'educazione STEM, volta allo sviluppo di competenze scientifico-tecnologiche integrate in un curriculum interdisciplinare (Gonzalez & Kuenzi, 2012), è riconosciuto un ruolo chiave per il progresso delle conoscenze e l'innovazione tecnologica, fattori in grado di generare, a loro volta, sviluppo del lavoro e dell'economie nazionali (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018). In tale ambito, sia la letteratura internazionale (cfr. Hofstein & Mamlok-Naaman, 2007) sia i più recenti indirizzi del MIUR sull'innovazione scolastica (MIUR, 2015) riconoscono l'importanza della pratica laboratoriale per l'apprendimento scientifico.

In generale, ci si riferisce a tale strategia didattica, in linea con il paradigma dell'attivismo pedagogico di origine deweyana (Dewey, 1949), comprendendo una pluralità di esperienze di insegnamento-apprendimento caratterizzate dalla interazione degli studenti con strumentazioni e materiali per l'osservazione e la comprensione del mondo naturale. Gli obiettivi possono essere molteplici, quali (NRC, 2006):

- il miglioramento della padronanza delle materie scientifiche (es. comprensione dei concetti scientifici, delle loro relazioni e di specifici fenomeni);
- lo sviluppo di competenze di ragionamento scientifico (es. formulazione di ipotesi; sviluppo e revisione di modelli scientifici; argomentare sulla base di evidenze) e di abilità pratiche (es. applicazione delle procedure e utilizzo degli strumenti per l'indagine scientifica);
- la comprensione della complessità della ricerca empirica (es. condurre osservazioni e manipolazioni controllate ed effettuare misurazioni; trattare e interpretare i dati e gli errori di misurazione);
- lo sviluppo della motivazione e dell'interesse per la scienza (es. consapevolezza della scienza come prodotto della mente umana e delle teorie e modelli scientifici come sistemi di conoscenze continuamente revisionabili sulla base del progresso delle scoperte; comprenderne la rilevanza per la vita quotidiana);
- lo sviluppo di competenze di lavoro di gruppo (es. collaborazione nello svolgimento di compiti complessi, assunzione di ruoli e responsabilità).

Tuttavia, a fronte di ciò, si deve rilevare come differenti fattori possano limitare l'effettiva applicazione delle strategie laboratoriali nei contesti scolastici, tra cui i costi spesso elevati necessari per l'allestimento e/o la manutenzione di strumentazioni e materiali; la disponibilità di personale tecnico qualificato; la conformità degli ambienti alle normative vigenti; i rischi potenziali talvolta connessi alla messa in atto di sperimentazioni che comportano la manipolazione di strumenti sofisticati e sostanze.

Considerate tali problematiche, le tecnologie digitali possono offrire delle opportunità per la didattica laboratoriale nella scuola; le principali applicazioni sviluppate in questi anni sono i laboratori virtuali e i laboratori remoti. I primi possono essere definiti degli ambienti digitali (software) interattivi che consentono allo studente di condurre attività laboratoriali simulate e/o manipolare le rappresentazioni digitali di strumenti e/o componenti di un laboratorio fisico. I secondi invece possono essere definiti dei sistemi misti virtuale-reale che permettono agli studenti di condurre a distanza attività laboratoriali, interagendo con strumenti e/o componenti di un laboratorio fisico.

Obiettivo di questo lavoro è valutare l'efficacia dei laboratori virtuali e remoti per il miglioramento degli apprendimenti nell'educazione STEM, in contesti di scuola secondaria. A tal fine, è stata condotta una revisione sistematica di secondo ordine in cui sono stati selezionati dieci studi secondari (revisioni sistematiche e meta-analisi). Il lavoro è strutturato come segue: nel par. 2 sono esplicitati i criteri metodologici adottati per la conduzione dello studio; nel par. 3 sono presentati i risultati tratti dai singoli studi secondari; nel par. 4 sono discusse le evidenze emergenti dall'analisi comparativa di questi ultimi; infine, nel par. 5 si perviene alle conclusioni¹.

1 I risultati qui presentati sono l'esito di un progetto più ampio, finanziato da Fondazione Cariplo, volto a indagare l'efficacia delle tecnologie digitali nell'educazione STEM, in contesti di scuola secondaria (Fadda & Vivanet, 2021).

2. Metodo

2.1 Criteri di eleggibilità

Al fine di rispondere alla domanda di ricerca di questo studio, è stata condotta una revisione sistematica di secondo ordine, un metodo per compiere una rassegna e integrazione dei risultati di più studi secondari (Becker & Oxman, 2008; Polanin, Maynard & Dell, 2017; Pellegrini & Vivanet, 2018). In fase di selezione degli studi sono stati adottati i seguenti criteri:

- intervento: sono inclusi solo studi relativi agli effetti dei laboratori online (virtuali o remoti) sugli apprendimenti in discipline STEM;
- partecipanti: sono inclusi solo studi aventi come referenti studenti di scuola secondaria (con l'esclusione di studi aventi come soli referenti studenti della scuola primaria e/o dell'istruzione post-secondaria);
- disegno di ricerca: sono inclusi solo studi secondari di revisione sistematica o meta-analisi (con l'esclusione di sintesi narrative);
- misure: sono inclusi solo studi interessati alla misurazione qualitativa o quantitativa dei risultati di apprendimento, con particolare riferimento a quelli cognitivi;
- periodo di pubblicazione: sono inclusi solo studi pubblicati tra il 01/01/2010 e il 31/12/2020;
- lingua di pubblicazione: sono inclusi solo studi pubblicati in lingua inglese o italiana;
- tipo di pubblicazione: sono inclusi solo studi pubblicati su riviste scientifiche, atti di convegni o capitoli di libro; è stata esclusa la letteratura grigia.

2.2 Strategia di ricerca

Sono stati interrogati i database elettronici ERIC, SCOPUS e Web of Science, utilizzando le query riportate nella tabella 1, date dalla combinazione di keywords, operatori booleani e filtri quali la ricerca delle parole chiave nell'abstract, titolo e keywords (ABS-TIT-KEI) o nell'intero testo (ALL).

| | ERIC | SCOPUS | Web of Science |
|------------------------|---|---|---|
| Variabile indipendente | ("remote lab*" OR "virtual lab*" OR "simulated lab*" OR "online lab*" OR "internet-based laboratory") | ABS-TIT-KEY ("remote lab*" OR "virtual lab*" OR "simulated lab*" OR "online lab*" OR "internet-based laboratory") | ALL=("remote lab*" OR "virtual lab*" OR "simulated lab*" OR "online lab*" OR "internet-based laboratory") |
| Variabile dipendente | (learning OR achievement OR knowledge OR skills OR satisfaction OR motivation OR attitude) | ALL (learning OR achievement OR knowledge OR skills OR satisfaction OR motivation OR attitude) | ALL=(learning OR achievement OR knowledge OR skills OR satisfaction OR motivation OR attitude) |
| Argomento | (STEM OR math OR mathematics OR science OR technology OR engineer* OR chemistry OR biology OR physics) AND (school OR education OR instruction OR teaching) | ALL (STEM OR math OR mathematics OR science OR technology OR engineer* OR chemistry OR biology OR physics) AND ALL (school OR education OR instruction OR teaching) | ALL=(STEM OR math OR mathematics OR science OR technology OR engineer* OR chemistry OR biology OR physics) AND ALL=(school OR education OR instruction OR teaching) |
| Disegno di ricerca | ("meta-analysis" OR review OR synthesis OR "systematic map" OR survey) | ALL ("meta-analysis" OR review OR synthesis OR "systematic map" OR survey) | ALL=("meta-analysis" OR review OR synthesis OR "systematic map" OR survey) |

Tabella 1: Query per l'interrogazione dei database elettronici

2.3 Selezione degli studi e codifica

Dapprima sono stati eliminati i duplicati dei risultati ottenuti con le query nei diversi database; quindi due autori indipendenti hanno proceduto a una prima selezione degli studi, applicando i criteri di eleggi-

bilità di cui al par. 2.1, basata sulla analisi dei titoli e degli abstract. Successivamente, gli studi rimanenti sono stati sottoposti a una seconda fase di screening focalizzata sulla lettura del full-text. Infine, gli studi selezionati sono stati analizzati per la codifica dei dati, estraendo quelli relativi a (i) riferimento bibliografico (autore, titolo, anno di pubblicazione e collocazione editoriale); (ii) tipo di studio secondario (meta-analisi o revisione sistematica), numero di studi primari inclusi, periodo di pubblicazione di questi ultimi; (iii) tipo di intervento (laboratorio virtuale, laboratorio remoto, entrambi); (iv) grado di istruzione; (v) area disciplinare; (vi) risultati.

3. Risultati

3.1 Risultati

La selezione degli studi, condotta secondo la procedura descritta nel par. 2.3, ha portato a includere dieci studi secondari, di cui nove revisioni sistematiche e una meta-analisi (Figura 1).

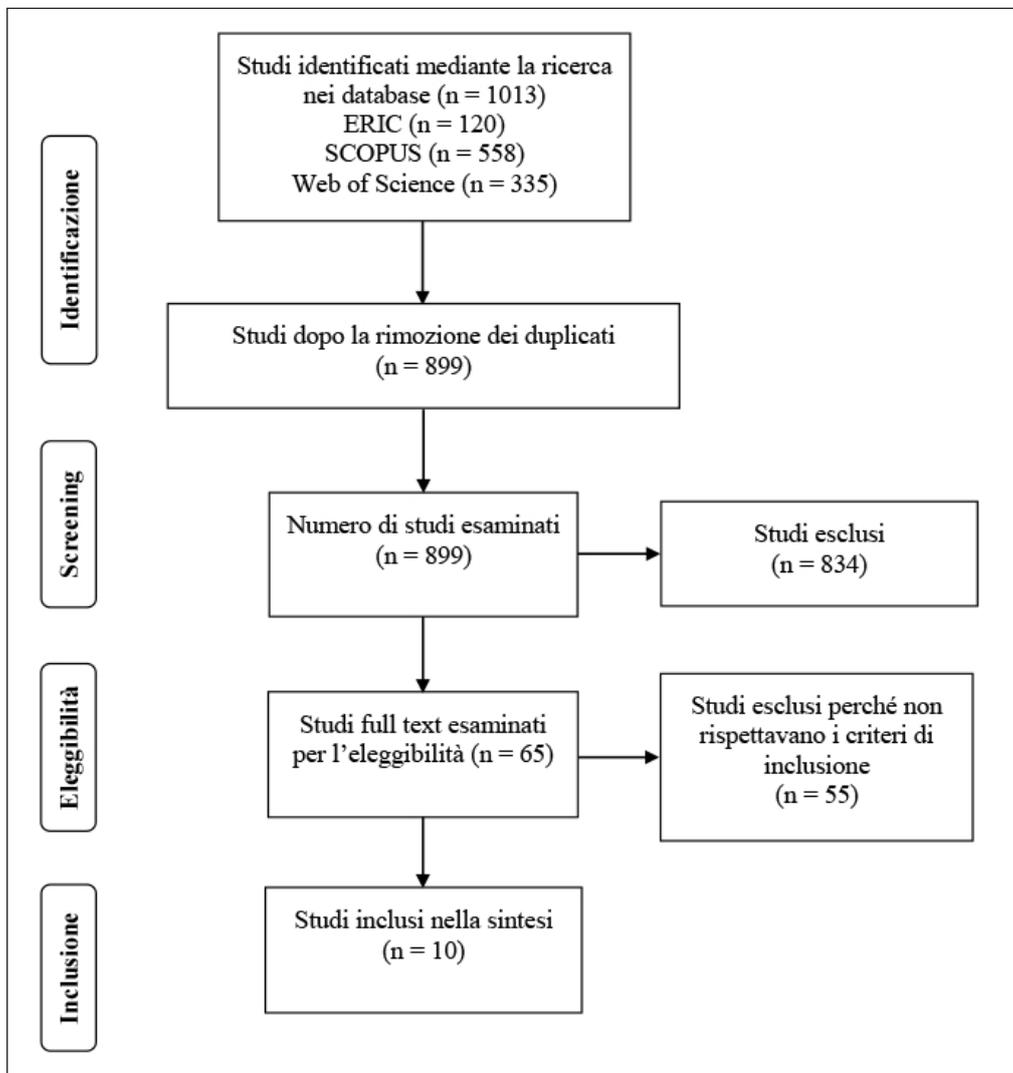


Figura 1: Diagramma di flusso della selezione degli studi (tratto da PRISMA; Moher et al., 2009)

3.2 Descrizione degli studi

Nella tabella 2, sono riportati i principali dati relativi a ciascuno studio selezionato.

| Autori | Anno | Titolo | Rivista | Tipologia rassegna | Numero di studi | Anni di riferimento | Tipo di laboratori | Livello scolastico | Area disciplinare |
|---|------|--|--|-----------------------|-----------------|---------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Scalise, Timms, Moorjani, Clark, Holtermann & Irvin | 2011 | Student learning in science simulations: Design features that promote learning gains | Journal of Research in Science Teaching | Revisione sistematica | 79 | 1995-2009 | Virtuale | K6-12 | STEM |
| Wang et al. | 2014 | A review of research on technology-assisted school science laboratories | Educational Technology and Society | Revisione sistematica | 42 | 1990-2011 | Virtuale remoto | K-16 | STEM |
| Brinson | 2015 | Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research | Computer & Education | Revisione sistematica | 56 | 2005-2015 | Virtuale remoto | K-12 e alta educazione | STEM |
| Zacharia et al. | 2015 | Identifying potential types of guidance for supporting student inquiry when using virtual and remote labs in science: a literature review | Educational Technology Research and Development | Revisione sistematica | 31 | 2006-2015 | Virtuale remoto | K-12 e alta educazione | STEM |
| Brinson | 2017 | A Further Characterization of Empirical Research Related to Learning Outcome Achievement in Remote and Virtual Science Labs | Journal of Science Education and Technology | Revisione sistematica | 56 | 2005-2015 | Virtuale remoto | K-12 e alta educazione | STEM |
| Tho, Yeung, Wei, Chan & So | 2017 | A Systematic Review of Remote Laboratory Work in Science Education with the Support of Visualizing its Structure through the HistCite and CiteSpace Software | International Journal of Science and Mathematics Education | Revisione sistematica | 62 | 1992-2014 | Remoto | K-12 e alta educazione | STEM |
| Sypsas e Kalles | 2018 | Virtual Laboratories in Biology, Biotechnology and Chemistry education: A Literature Review | 22nd Pan-Hellenic Conference | Revisione sistematica | 29 | precedenti al 2018 | Virtuale | K-12 e alta educazione | Biologia, Biotecnologia e Chimica |
| Tsihouridis, Vavougios, Batsila, & Ioannidis | 2019 | The Timeless Controversy Between Virtual and Real Laboratories in Science Education—"And the Winner Is..." | International Conference on Interactive Collaborative Learning | Meta-analisi | 106 | 1978-2018 | Virtuale | K-12 e alta educazione | STEM |
| Rubim, Mota, Garcia, Brito & Santos | 2019 | The Use of Remote Experimentation as a Teaching Tool: A Literature Review | International Journal of Information and Education Technology | Revisione sistematica | 99 | 2003-2015 | Remoto | K-12 e alta educazione | STEM |
| Udin, Ramli, & Muzzazinah | 2020 | Virtual laboratory for enhancing students' understanding on abstract biology concepts and laboratory skills: A systematic review | Journal of Physics: Conference Series | Revisione sistematica | 47 | 2010-2018 | Virtuale | K-12 e alta educazione | Biologia, Biotecnologia e Chimica |

Tabella 2: Studi secondari inclusi

Di seguito, è fornita una descrizione sintetica di ciascuno studio e dei risultati in esso registrati, relativamente al confronto tra i laboratori online e quelli tradizionali, ai fattori che ne influenzano l'efficacia, agli obiettivi, ai risultati di apprendimento e ai principi di progettazione didattica per l'ottimizzazione del loro impiego. Per gli studi di revisione che consideravano più fasce d'età sono stati discussi i risultati relativi alla scuola secondaria.

Scalise et al. (2011) hanno condotto una revisione di settantanove studi focalizzati sui laboratori virtuali e le simulazioni dei fenomeni scientifici, principalmente applicati all'ambito della fisica ($n = 48$) e delle scienze della vita ($n = 44$) e in misura minore delle scienze della terra ($n = 13$) e della tecnologia ($n = 6$)². La metà degli studi esaminati ($n = 41$) ha utilizzato un confronto pre-post per valutare gli effetti sugli apprendimenti, tuttavia nella maggioranza di essi manca una stima quantitativa di questi, pur registrandosi ten-

2 La somma degli studi non è pari al totale in quanto ciascuno studio può aver analizzato applicazioni laboratoriali in differenti aree disciplinari.

denzialmente un effetto positivo. Dei restanti studi inclusi, 33 erano quasi esperimenti, 13 casi di studio e 8 non rientravano nelle categorie precedenti. Gli autori descrivono i principi relativi all'interfaccia software (soprattutto in relazione all'attenzione degli studenti) e alla visualizzazione (es. zoom, prospettive alternative, controllo della velocità) che appaiono più rilevanti per l'efficacia dei laboratori e delle simulazioni, facilitando la percezione positiva del laboratorio e la comprensione degli argomenti trattati. Gli autori identificano inoltre alcuni principi didattici per le pratiche laboratoriali virtuali secondo una progressione dal livello di base a quello avanzato. In particolare, gli autori consigliano di favorire l'indagine attiva dello studente a partire dal saper identificare il problema di ricerca e sviluppare le ipotesi; dare priorità all'evidenza, facendo osservazioni e raccogliendo i dati; stimolare il processo decisionale dello studente, fornendo ad ognuno i propri tempi; dare spazio alla valutazione delle spiegazioni plausibili dei risultati, anche di quelli inaspettati; imparare a comunicare, giustificare e discutere i risultati portando gli studenti a pensare come scienziati.

Wang et al. (2014) hanno condotto una revisione sistematica di quarantadue studi (tutti riportanti dati empirici, compresi disegni sperimentali, studi esplorativi e casi di studio) sull'uso dei laboratori virtuali e remoti in vari domini scientifici, soprattutto in fisica ($n = 18$) e nella chimica ($n = 15$), trovando effetti positivi sugli apprendimenti per entrambi i tipi di laboratorio pur con una certa variabilità. Riguardo gli specifici risultati di apprendimento, gli autori riportano che la maggior parte degli studi ha indagato gli effetti della pratica laboratoriale online sulla comprensione concettuale e i processi cognitivi degli studenti ($n = 41$), quali la manipolazione di variabili, la visualizzazione dei dati o dei fenomeni scientifici; la metà di queste misurazioni viene integrata con la misura dell'atteggiamento degli studenti ($n = 22$), perlopiù relativo alla soddisfazione, all'interesse e alle preferenze per le tecnologie utilizzate, piuttosto che alla motivazione verso la disciplina scientifica; vengono poco indagati gli aspetti psicomotori (es. abilità operazionali o di visualizzazione; $n = 4$) e le abilità integrate necessarie per svolgere un compito complesso come le capacità di ragionamento e di indagine scientifica ($n = 5$). In particolare, gli autori trovano che le simulazioni o manipolazioni virtuali promuovano gli apprendimenti (conoscenza e processi cognitivi) e la percezione positiva della tecnologia, soprattutto quando combinati con attività di laboratorio fisico. Al riguardo, secondo quanto rilevato dagli autori, i laboratori remoti, seppur efficaci per l'apprendimento, necessitano di ulteriori evidenze empiriche in quanto meno studiati rispetto a quelli virtuali. Con riferimento alle caratteristiche degli interventi, si riscontrano prevalentemente interventi a breve termine (un giorno, $n = 5$; una/due settimane, $n = 14$; tre/otto settimane, $n = 15$; intero semestre, $n = 6$), con gli studenti invitati a lavorare perlopiù in piccoli gruppi ($n = 23$) o individualmente ($n = 18$) tramite l'ausilio del computer. Infine, sebbene la formazione degli insegnanti (in termini di conoscenza del contenuto pedagogico e delle conoscenze tecnologiche per strutturare le interazioni degli studenti con una simulazione) possa migliorare significativamente la qualità dell'apprendimento in laboratorio, tale fattore non è adeguatamente indagato negli studi selezionati.

Brinson (2015) nella sua revisione sistematica ha sintetizzato cinquantasei studi empirici in cui sono comparati i risultati di apprendimento nei laboratori tradizionali (gruppo di controllo) e online (gruppo sperimentale), sia virtuali sia remoti. Emergono forti evidenze a favore dell'efficacia dei laboratori online, con risultati di apprendimento comparabili ($n = 14$) o maggiori ($n = 36$) nei laboratori online rispetto a quelli tradizionali in tutti i risultati di apprendimento considerati. In particolare, quasi tutti gli studi hanno misurato la conoscenza e la comprensione degli studenti (95%; $n = 53$) e l'87% ($n = 46$) di questi studi ha fornito un'evidenza di uguali o maggiori risultati nei laboratori online rispetto a quelli tradizionali. Riguardo gli altri risultati di apprendimento, il 7% ($n = 4$) degli studi ha considerato le capacità di indagine, il 16% ($n = 9$) le abilità pratiche, il 53% ($n = 28$) la percezione, il 15% ($n = 8$) le capacità analitiche, il 9% ($n = 5$) le capacità di comunicazione sociale e scientifica. Quasi tutti gli studi hanno misurato la conoscenza e comprensione degli studenti con quiz o esami di tipo tradizionale ($n = 40$) e solo pochi hanno misurato i risultati di apprendimento attraverso altri metodi quali esami pratici ($n = 5$) o report di laboratorio ($n = 5$). Sulla base dell'analisi condotta, l'autore propone un'interessante categorizzazione degli obiettivi di apprendimento, basata sulle indicazioni del National Research Council (NRC, 2006). Il modello proposto (KIPPAS) si basa sull'importanza di sviluppare: la conoscenza e comprensione dei concetti teorici; le capacità di indagine e di sviluppo del ragionamento scientifico; le abilità pratiche e di gestione delle attrezzature; la percezione legata all'impegno e all'interesse per la scienza; le capacità analitiche di prevedere, criticare, integrare e interpretare i dati; la comunicazione sociale e scientifica intesa sia come lavoro di squadra sia come capacità di riassumere e presentare i dati.

Zacharia et al. (2015) hanno condotto una revisione sistematica di trentuno studi che forniscono dati empirici, al fine di identificare gli strumenti di guida utilizzati dall'insegnante nelle diverse fasi dei laboratori online (virtuali e remoti), valutandone l'efficacia sugli apprendimenti. In particolare, gli autori hanno classificato tali strumenti in: *dashboard* (adattare il comportamento di ricerca individuale fornendo informazioni sui suoi risultati e processi); vincoli (ridurre o restringere le attività non necessarie degli studenti); euristiche (suggerire che cosa fare); *prompt* (dare agli studenti specifiche indicazioni su cosa fare); *scaffold* (dare delle strutture o "impalcature" per svolgere un compito che altrimenti sarebbe al di fuori delle loro capacità); presentazione diretta delle informazioni. Ogni strumento di guida identificato (n = 89) mirava a fornire agli studenti un supporto personalizzato, per adattare l'ambiente laboratoriale alle proprie esigenze cognitive e metacognitive in una specifica fase di intervento: orientamento, concettualizzazione, indagine, conclusione, discussione. Gli autori trovano che gli strumenti di guida sono stati utilizzati ampiamente in più fasi per guidare il processo di apprendimento degli studenti (n = 31 in totale), riportando un impatto positivo sull'apprendimento nella maggior parte dei casi (n = 17). La fase che ha ricevuto più indicazioni è stata quella di indagine (n = 27), in cui vengono fornite numerose euristiche (n = 13) utilizzate, ad esempio, per confermare l'ipotesi, gestire valori estremi, creare un grafico, interpretare risultati inaspettati.

Brinson (2017), in una successiva pubblicazione, ha indagato ulteriori fattori (nazionalità dei partecipanti, livello di istruzione, disciplina scientifica, genere dei partecipanti, conoscenze pregresse e metodologia di ricerca), oltre a quelli già analizzati nella precedente revisione sistematica (Brinson, 2015), relativa al confronto tra laboratori virtuali e remoti (gruppo sperimentale) con quelli tradizionali (gruppo di controllo). In particolare, emerge che la maggior parte degli studi è stata condotta nei paesi occidentali (n = 43) e che vi è stato un aumento degli interventi su studenti universitari che rimangono assieme a quelli della scuola secondaria i più studiati con un incremento degli studi nell'ambito delle scienze naturali (n = 46), rispetto all'ingegneria (n = 9). Solo due studi sui laboratori virtuali hanno esaminato le differenze di genere, non trovando differenze significative; e pochi studi analizzano le conoscenze/esperienze pregresse o lo stile di apprendimento (n = 7) al fine di valutarne l'influenza sugli apprendimenti. Dal punto di vista metodologico, la maggior parte degli studi utilizza metodi di ricerca quantitativi (n = 44) piuttosto che qualitativi (n = 12) e l'86% degli studi quantitativi fa impiego di analisi statistiche inferenziali (es. t-test, regressione, analisi della varianza) piuttosto che sole analisi descrittive (frequenze, medie, deviazioni standard) per la valutazione dei report di laboratorio, compiti scritti, test, quiz, esercitazioni e/o voti del corso.

Tho et al. (2017) hanno condotto una revisione sistematica volta ad indagare gli effetti dei laboratori remoti sull'apprendimento scientifico. Gli autori registrano una prevalenza di studi empirici nell'area della fisica, su piccoli campioni (n < 200; 85%); con un design di tipo non sperimentale (n = 16) e metodi quantitativi per l'analisi dei dati (n = 18). La maggioranza degli studi non ha riportato dati relativi alla dimensione dell'effetto sugli apprendimenti e solo sette dei dieci studi sperimentali hanno indicato chiaramente il numero dei partecipanti a ogni gruppo; da notare che in quattro studi i laboratori remoti sembrano essere una valida esperienza di apprendimento alternativa o di supplemento al laboratorio tradizionale. I risultati relativi alla comprensione concettuale sono normalmente raccolti tramite test di conoscenza (n = 17), ed è frequente l'uso del questionario per misurare le attitudini, quali il divertimento, la soddisfazione, la motivazione e la fiducia in sé (n = 16). Inoltre, sebbene il laboratorio remoto presenti vantaggi in termini di design, senso della realtà, interesse, usabilità e utilità, gli autori ne sottolineano i limiti relativi alla difficoltà per alcuni studenti di svolgere i compiti in una maniera cui non sono abituati e limiti legati all'accesso come arresti anomali del sistema o problemi con la connessione internet. Gli autori segnalano infine che solo uno studio ha considerato le differenze di genere associate all'apprendimento degli studenti, non rilevando differenze significative, mentre due studi hanno affermato di non aver potuto analizzare questo dato a causa del basso numero di ragazze presenti nel campione esaminato.

Sypsas e Kalles (2018) hanno incluso ventinove studi nella loro revisione sistematica volta ad analizzare le applicazioni dei laboratori virtuali in biologia, biotecnologia e chimica. Per quanto riguarda l'efficacia degli interventi, i risultati mostrano che i laboratori virtuali hanno effetti positivi sulle conoscenze, sul ragionamento scientifico, sul *problem solving*, sul pensiero critico e sulla motivazione degli studenti supportando il lavoro in classe dell'insegnante. Inoltre, nella scuola secondaria, per i laboratori virtuali si registrano effetti comparabili a quelli dei laboratori tradizionali, promuovendo l'apprendimento autonomo e aumentando la preparazione degli studenti alla materia. Gli autori riscontrano che in più della metà (61%) degli studi è utilizzato un metodo di apprendimento misto laboratorio virtuale-laboratorio tradizionale. Nelle

aree disciplinari indagate, i laboratori virtuali favoriscono una prima familiarizzazione alla pratica laboratoriale, consentendo ad esempio le pratiche sperimentali di base (es. dissezione) che non sarebbero altrimenti possibili nel campo della biologia e fornendo rappresentazioni visive dei concetti astratti di chimica.

Tsihouridis et al. (2019) hanno indagato l'efficacia dei laboratori tradizionali e virtuali nell'ambito delle scienze naturali tramite una meta-analisi che ha sintetizzato i risultati di centosei studi primari. I dati mostrano un effetto significativo ($F(4) = 13.289$, $p = 0.039$) nella relazione tra livello scolastico ed efficacia dell'intervento. In particolare, per quanto riguarda gli studi focalizzati sulla scuola secondaria, nel 62% dei casi, si registrano risultati di apprendimento simili nel confronto tra laboratori tradizionali e virtuali; mentre nel 31% dei casi, i laboratori virtuali risultano essere la strategia di apprendimento più efficace. Gli autori notano che, sebbene i laboratori virtuali stimolino l'interesse degli studenti, quando viene chiesto di esprimere una preferenza sul tipo di laboratorio (tradizionale o virtuale), indipendentemente dai risultati di apprendimento, gli studenti preferiscono la combinazione delle due strategie, piuttosto che il solo utilizzo dell'una o dell'altra. In termini di sviluppo della ricerca, gli autori osservano una crescente tendenza negli anni di studi sull'apprendimento che coinvolgono ambienti virtuali, dall'istruzione primaria a quella secondaria, probabilmente derivante dalla graduale integrazione delle nuove tecnologie nelle scuole.

Rubim et al. (2019) hanno condotto una revisione sistematica in cui sono sintetizzati i risultati di novantanove studi empirici sui laboratori remoti con lo scopo di esaminare sia le caratteristiche degli studi (articoli più citati, nazionalità, area disciplinare, tecnologia server e client) sia i benefici e le difficoltà associate a questi interventi, rispetto a quelli basati sui laboratori tradizionali. I risultati mostrano che i livelli di apprendimento raggiunti dagli studenti sono uguali o superiori nei laboratori remoti rispetto a quelli registrati nei laboratori tradizionali in tutte le categorie di obiettivi indagate: conoscenza e comprensione, abilità di indagine, abilità pratiche, percezione, abilità analitiche e comunicazione sociale e scientifica. Nonostante ciò, gli autori affermano che i laboratori remoti non possono sostituire quelli tradizionali e i risultati hanno mostrato che, a seconda degli studi esaminati, una stessa caratteristica dei laboratori remoti può costituire un vantaggio o uno svantaggio. Relativamente alle caratteristiche degli studi, è interessante l'informazione relativa alle tecnologie utilizzate. In particolare, gli autori rilevano che, lato server, vi sia un ampio ricorso a *LabView* (per il suo linguaggio completo e un facile utilizzo) e, lato client, a *Java Applet* (grazie alla sua popolarità e indipendenza dal sistema operativo).

Udin et al. (2020) hanno indagato, tramite una revisione sistematica, i risultati di ventitré report di ricerca relativi ai laboratori virtuali nell'apprendimento della biologia. I risultati, seppur con un'ampia variabilità presente tra gli studi, mostrano che i laboratori virtuali integrati da attività pratiche risultano più efficaci dei soli laboratori tradizionali o dei soli laboratori virtuali. Al riguardo, si evidenzia come l'obiettivo di apprendimento più indagato sia la comprensione concettuale, rispetto ad esempio al ragionamento scientifico; in particolare, i miglioramenti più elevati nella comprensione della biologia si avrebbero per gli studenti dalle basse prestazioni scolastiche. I laboratori tradizionali risultano un ambiente migliore per le interazioni e la collaborazione degli studenti; mentre i laboratori virtuali hanno effetti positivi significativi sulle capacità di svolgere una corretta attività di sperimentazione, oltre che aumentare la fiducia in sé e la motivazione degli studenti. Inoltre, risultano avere effetti positivi sulla comprensione se supportati da libri di testo e attrezzature adeguate, cioè combinando i laboratori virtuali con altri mezzi di apprendimento. Infine, gli autori segnalano che i laboratori virtuali possono essere più efficaci di quelli tradizionali se: a) i materiali e le attrezzature per gli esperimenti tradizionali sono troppo costosi o eccessivamente sofisticati; b) la disponibilità di tempo è limitata; c) vi sono problemi etici connessi alla sperimentazione reale; (d) vi è difficoltà nell'interpretazione dei risultati; e (f) è necessaria la manipolazione di sostanze pericolose.

4. Discussione

La triangolazione dei risultati presentati nel paragrafo precedente è stata finalizzata a mettere in luce da un lato (i) indicazioni per la progettazione e la pratica didattica, mettendo in luce quelle su cui essi tendono a convergere, ma anche cercando di individuare quei fattori in grado di spiegare la variabilità dei dati riscontrata (cercando di rispondere alla domanda "in che modo le evidenze disponibili possono informare le decisioni in merito all'uso delle strategie laboratoriali online?") e dall'altro (ii) indicazioni per la ricerca futura, sia relativamente alle ipotesi da sottoporre ancora a riscontro empirico sia gli elementi di design

della ricerca su cui si rilevano maggiori limiti metodologici (cercando di rispondere alla domanda “in che modo le evidenze disponibili possono orientare gli sviluppi della ricerca in questo campo?”).

Con riferimento alla prima dimensione (la progettazione e la pratica didattica), il macro-dato verso cui tendono a convergere gli studi selezionati è la sostanziale equiparabilità degli effetti sui livelli di apprendimento degli studenti tra laboratori online e laboratori tradizionali, a causa anche della grande variabilità dei contesti STEM e dei risultati di apprendimento indagati (Ndoro, 2017; Serrano-Perez et al., 2021). Si riscontra infatti che gli studenti dei laboratori virtuali e remoti tendenzialmente ottengono risultati equiparabili (Sypas e Kelles, 2018; Tsihouridis et al., 2018; Wang et al., 2014) o perfino migliori rispetto a quelli registrati nei laboratori tradizionali (Brinson, 2015, 2017; Rubim et al., 2019), pur nella variabilità dei dati cui cercheremo di dare possibili spiegazioni di seguito nella discussione. Oltre a ciò, l'analisi comparativa dei risultati, relativamente alle dimensioni extra-cognitive, mostra che a tali risultati di apprendimento si accompagna una percezione positiva da parte degli studenti dell'esperienza laboratoriale (Brinson, 2015; Tho et al., 2017), mentre risulta meno indagato l'effetto sulla motivazione verso la disciplina scientifica (Wang et al., 2014).

Tuttavia, nella analisi degli effetti sui risultati di apprendimento, si deve sottolineare come nella maggior parte degli studi selezionati si privilegi una valutazione del raggiungimento di obiettivi strettamente legati alla conoscenza e comprensione, mentre risulta poco indagato lo sviluppo di abilità pratiche (Brinson, 2015; Udin et al., 2020; Wang et al., 2014). Al riguardo, i dati disponibili, seppur limitati, mostrano degli effetti positivi dei laboratori online (Brinson, 2015; Udin et al., 2020), ad esempio relativamente alla capacità di condurre correttamente le procedure sperimentali (applicazione dei protocolli e delle tecniche di misurazione, utilizzo della strumentazione), con risultati particolarmente positivi quando i laboratori virtuali sono supportati da adeguati libri di testo e attrezzature fisiche (Udin et al., 2020).

Non solo si rileva una limitata valutazione del “saper fare”, ma allo stesso tempo pochi studi indagano risultati di apprendimento che possano essere indicatori di competenze tipiche del ragionamento scientifico, quali definizione delle ipotesi, analisi delle evidenze empiriche, corroborazione e/o falsificazione di un'ipotesi, limiti della conoscibilità scientifica, etc. (Brinson, 2015; Scalise et al., 2011); nonostante l'analisi della letteratura porti a rilevare come negli studi che hanno indagato tali competenze, i laboratori online risultino supportarle con risultati uguali o superiori rispetto ai laboratori tradizionali (Brinson, 2015; Sypas e Kelles, 2018; Wang et al., 2014).

Coerentemente con quanto fin qui discusso, si rileva come i metodi di valutazione degli apprendimenti utilizzati privilegino le domande teoriche volte a rilevare principalmente conoscenze, in particolare nella forma di item a risposta aperta o chiusa (Brinson, 2015; Tho al., 2017), mentre in pochi studi si riscontra l'utilizzo di prove pratiche, stesura di report o modalità di valutazione alternative, per la rilevazione del raggiungimento di obiettivi di apprendimento differenti dalla mera conoscenza (Brinson, 2015; Tho al., 2017). In ogni caso, quali siano le modalità di valutazione utilizzate, emerge l'importanza della loro coerenza con gli obiettivi didattici dell'esperienza laboratoriale.

Per quanto concerne la strategie di uso dei laboratori online, dalla triangolazione dei risultati emergono elementi a favore di una forte integrazione tra laboratori virtuali e remoti e attività pratiche, condizione didattica a seguito della quale si registrano significativi vantaggi sugli apprendimenti, risultando tale strategia più efficace (e preferita dagli studenti) rispetto all'uso del solo laboratorio tradizionale o del solo laboratorio virtuale (Sypas & Kelles, 2018; Tsihouridis et al., 2019; Udin et al., 2020; Wang et al., 2014). In tal senso, il laboratorio virtuale può essere utilizzato come un ambiente preparatorio per i tradizionali esperimenti scolastici, avendo il vantaggio di fornire una prima esperienza di familiarizzazione alla pratica laboratoriale (Sypas & Kalles, 2018) e i laboratori remoti possono costituire una valida esperienza di integrazione al lavoro pratico (Tho et al., 2017); pur non potendo sostituire del tutto quelli tradizionali (Rubim et al., 2019; Udin et al., 2020).

Inoltre, affinché simili esperienze laboratoriali possano offrire un valore didattico aggiunto, Scalise et al. (2011) sottolineano l'importanza di alcuni principi utili alla progettazione che seguono una progressione del ragionamento scientifico, dal livello di base a quello avanzato, favorendo l'indagine attiva dello studente a partire dal saper identificare il problema di ricerca e sviluppare le ipotesi; dare priorità all'evidenza, facendo osservazioni e raccogliendo i dati; stimolare il processo decisionale dello studente, fornendo a ognuno i propri tempi; dare spazio alla valutazione delle spiegazioni plausibili dei risultati, anche di quelli inaspettati; imparare a comunicare, giustificare e discutere i risultati.

Tra i diversi fattori indagati, un ruolo chiave per una pratica laboratoriale efficace risulta essere il *feedback* dell'insegnante. L'apprendimento degli studenti, infatti, seppur supportato anche da elementi quali l'interfaccia dei sistemi digitali utilizzati (Scalise et al., 2011), non appare attribuibile alla tecnologia del laboratorio in sé, ma piuttosto alla gestione della didattica laboratoriale e delle interazioni da parte dell'insegnante (Zacharia et al., 2015). Dagli studi selezionati, infatti, risulta che nella conduzione dei laboratori online, la maggior parte delle indicazioni da parte degli insegnanti sono solitamente concentrate nella fase di indagine in cui gli studenti vengono coinvolti nell'esplorazione e sperimentazione. In particolare, gli insegnanti aiutano gli studenti tramite numerose euristiche utilizzate, ad esempio, per confermare ipotesi, gestire valori estremi e interpretare risultati inaspettati. Sono ampiamente impiegate tecniche di *scaffold* sia nella fase di concettualizzazione, per supportare gli studenti nella formulazione delle domande di ricerca e delle ipotesi per i loro esperimenti (Zacharia et al., 2015) sia in quella successiva di indagine. L'insieme di queste riflessioni porta a evidenziare la centralità del tema della formazione dell'insegnante all'uso didatticamente efficace delle tecnologie laboratoriali digitali, che invece appare un'area di ricerca ancora non sufficientemente sviluppata (Wang et al., 2014). L'ampia gamma di tipologie di guida fornita dalla revisione di Zacharia et al. (2015) rappresenta una risorsa prontamente disponibile per incoraggiare la progettazione di laboratori scientifici online. Imparare a guidare gli studenti identificando e utilizzando il tipo di feedback più adatto alla fase di intervento, può infatti portare a sviluppare un nuovo processo di apprendimento basato sull'indagine in cui gli studenti sono incoraggiati a porre domande ed a risolvere problemi, rappresentando un grande vantaggio in termini di apprendimento, ma anche di pensiero critico, curiosità e motivazione (Chatterjee, 2020).

Inoltre, si segnala come la maggior parte degli studi sia relativa a interventi a breve termine (Wang et al., 2014), su piccoli campioni, che non consentono di valutare la persistenza degli apprendimenti, per la cui stima sarebbe necessario utilizzare maggiormente rilevazioni di *follow-up*.

Infine, relativamente alle indicazioni per la progettazione e la pratica didattica, un'ultima nota relativa ai supporti tecnologici, riguardante il fatto che sebbene *smartphone*, *tablet* e lavagne interattive stiano diventando sempre più diffusi nelle classi, il computer rimane il supporto hardware maggiormente utilizzato per la conduzione dei laboratori scientifici (Wang et al., 2014).

Spostando l'attenzione sulla seconda dimensione (gli sviluppi della ricerca futura), emerge la necessità di ulteriori indagini per sottoporre a riscontro empirico differenti ipotesi utili a stimare l'effetto dei laboratori online su dimensioni differenti da quella meramente cognitiva e il possibile ruolo di mediazione di variabili finora poco indagate. In particolare, come già emerso dalla discussione finora condotta, è necessario disporre di risultati validi e attendibili circa gli effetti dei laboratori virtuali e remoti sulla motivazione verso l'apprendimento scientifico (non solo dunque verso quella diretta all'esperienza laboratoriale in sé), in ragione del fatto che questa rappresenta un fattore in grado di influenzare l'apprendimento, la persistenza di fronte alle difficoltà e le future scelte di carriera in ambito scientifico (Wigfield & Eccles, 2000). Oltre a ciò, sulla base della letteratura esistente, si suggerisce di concentrare gli studi futuri maggiormente sulla valutazione degli effetti su obiettivi di apprendimento differenti da quelli della conoscenza e comprensione, e specificamente verso lo sviluppo delle competenze tipiche del ragionamento scientifico (Scalise et al., 2011; Brinson, 2015) e di abilità pratiche (Brinson, 2015; Udin et al., 2020; Wang et al., 2014), essendo questi obiettivi rilevanti nell'ambito specifico delle strategie didattiche laboratoriali, non ancora sufficientemente indagati nella letteratura selezionata, ma su cui si registrano dati tendenzialmente promettenti.

Rispetto alla integrazione tra laboratori online e laboratori tradizionali, inoltre, studi futuri dovrebbero indagare meglio quali aspetti delle esperienze fisiche possono o non possono essere sostituiti con esperienze virtuali o remote, nonché in che misura questa sostituzione o integrazione influenzi lo sviluppo delle capacità psicomotorie e l'atteggiamento degli studenti nei confronti dell'apprendimento scientifico (Wang et al., 2014).

Per quanto concerne aspetti più specificamente metodologici, si deve considerare che, nonostante la didattica laboratoriale sia una strategia di insegnamento con una lunga tradizione, a oggi dobbiamo riconoscere che il concetto di laboratorio scolastico sia spesso usato in letteratura senza che sia possibile rintracciarne una definizione sufficientemente condivisa (Hofstein & Mamlok-Naaman, 2007), facendo riferimento a esperienze che possono differenziarsi ampiamente nelle loro modalità: individuale, cooperativa o collaborativa; con minore o maggiore grado di strutturazione; con ruoli differenti assunti da parte

dell'insegnante; elemento da considerarsi criticamente rispetto alla effettiva comparabilità degli studi selezionati.

Inoltre, da segnalarsi la scarsa letteratura di sintesi quantitativa disponibile, necessaria per pervenire a una stima attendibile della grandezza degli effetti sugli apprendimenti. Solo la meta-analisi di Tsihouridis et al. (2019) fornisce un'evidenza quantitativa riguardo l'efficacia dei laboratori virtuali rispetto a quelli tradizionali. Questo elemento di riflessione è da tenere in considerazione insieme a quelli derivanti dall'analisi dei disegni di ricerca adottati nei singoli studi. Infatti, si riscontrano oltre a sperimentazioni propriamente dette con un confronto dei risultati degli studenti pre-post trattamento anche metodi non sperimentali (Scalise et al., 2011; Tho et al., 2017; Wang et al., 2014), che in quanto tali presentano forti limiti nella analisi degli effetti della variabile indipendente (laboratori virtuali e remoti) sulla variabile dipendente (gli apprendimenti). Ciò che ne deriva è che nella maggior parte degli studi non siano riportati dati quantitativi relativi alla dimensione dell'effetto dei laboratori sugli apprendimenti, costringendo i ricercatori a scegliere di utilizzare la tecnica di revisione sistematica piuttosto che di meta-analisi per testare le ipotesi di studio (Scalise et al., 2011; Wang et al., 2014). Negli studi ad approccio più quantitativo si ricorre ad analisi statistiche, quali t-test, regressione e analisi della varianza che permettono di fare delle inferenze; mentre un numero minore di studi riporta unicamente statistiche meramente descrittive (frequenze, medie, deviazioni standard), per riportare i dati di base ottenuti dalla valutazione delle esperienze laboratoriali, quali compiti scritti, test/quiz/esercitazioni e/o voti del corso (Brinson, 2017). Oltre a ciò, si rileva che in alcuni studi non sono riportati dati essenziali, quali la numerosità dei gruppi sperimentali e di controllo (Tho et al., 2017), elemento rilevante anche al fine di stimare la validità esterna delle conclusioni cui pervengono.

Poco indagato è infine l'eventuale ruolo moderatore di variabili relative (i) alle caratteristiche degli studenti, quali fattori demografici, precedenti conoscenze/esperienze (Brinson, 2017) e differenze di genere (Brinson, 2017; Tho et al., 2017) e (ii) alle caratteristiche dell'intervento, quali l'influenza delle attività collaborative e di quelle individuali (con dati tendenzialmente, per quanto limitati, favorevoli alla integrazione di attività collaborative di coppia e in piccoli gruppi), la durata dell'attività laboratoriale e la qualità metodologica del design dello studio (Wang et al., 2014), tutti elementi che richiedono studi ulteriori.

5. Conclusioni

Obiettivo di questo studio era la valutazione dell'efficacia dei laboratori virtuali e remoti sugli apprendimenti nell'educazione STEM, in contesti di scuola secondaria. A tal fine, è stata condotta una revisione sistematica di secondo ordine in cui sono stati integrati i risultati di dieci studi secondari (nove revisioni sistematiche e una meta-analisi) in cui sono riportati i risultati di 607 studi primari.

Le evidenze emergenti hanno portato a formulare alcune indicazioni orientate alla progettazione e pratica didattica da una parte e agli sviluppi della ricerca futura dall'altra. In particolare, esse portano prove a favore dell'efficacia dei laboratori virtuali e remoti che tendenzialmente registrano effetti sugli apprendimenti comparabili a quelli dei laboratori tradizionali, specialmente nella condizione di integrazione tra questi e i laboratori tradizionali, pur nella variabilità dei dati e tenuto conto dei limiti metodologici discussi nel paragrafo precedente che invitano comunque a una certa cautela nella interpretazione dei risultati e alla conduzione di ulteriori studi (soprattutto sperimentali e di sintesi quantitativa) più rigorosi. A partire da questo macro-dato più generale, considerato che l'analisi comparativa degli studi consente di affermare la rilevanza delle condizioni didattiche per massimizzare l'efficacia sugli apprendimenti di tali pratiche laboratoriali, si vuole in conclusione qui sottolineare il ruolo strategico che assume la formazione degli insegnanti all'uso efficace di tali strategie e tecnologie, tema già sottolineato con forza in passato dalla National Science Teachers Association (NSTA, 2007)³. Elemento che peraltro risulta coerente con la letteratura di settore più ampia sull'efficacia delle tecnologie digitali sugli apprendimenti nei differenti gradi scolastici (Higgins, Xiao e Katsipataki, 2012; Vivanet, 2017).

3 La National Science Teachers Association ha formulato al riguardo alcune raccomandazioni fondamentali, per le quali si rimanda al riferimento bibliografico (NSTA, 2007).

Ringraziamenti

Questo progetto di ricerca è stato reso possibile grazie al finanziamento della Fondazione Cariplo. Gli autori desiderano ringraziare in particolare Camilla Andreatta, Gian Paolo Barbetta, Paolo Canino, Stefano Cima e Diana Pozzoli, con cui hanno avuto il piacere di condividere riflessioni critiche essenziali per lo sviluppo di questo lavoro.

Conflitto di interesse

Gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse.

Riferimenti bibliografici

- Becker, L. A., & Oxman, A. D. (2008). Overviews of Reviews. In J.P.T. Higgins, S. Green (Eds.), *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions: Cochrane Book Series*, 607-631. The Cochrane Collaboration and John Wiley & Sons Ltd.
- *Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual, remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computer & Education*, 87, 218-237.
- *Brinson, J. R. (2017). A further characterization of empirical research related to learning outcome achievement in remote and virtual science labs. *Journal of Science Education and Technology*, 26, 546-560.
- Chatterjee, S. (2021). A primer for transitioning to online science labs: “Identifying potential types of guidance for supporting student inquiry when using virtual and remote labs in science”. *Educational Technology Research and Development*, 69, 249-253.
- Dewey, J. (1949). *Scuola e società*. Firenze: La Nuova Italia.
- Fadda, D., & Vivanet, G. (2021). *Tecnologie digitali e didattica laboratoriale nell'educazione STEM: Evidenze scientifiche e raccomandazioni pratiche*. Quaderni dell'Osservatorio n. 37, Fondazione Cariplo. URL: <https://www.fondazione-cariplo.it/it/strategia/osservatorio/quaderni/tecnologie-digitali-e-didattica-laboratoriale-nell-educazione-stem-evidenze-scientifiche-e-raccomandazioni-pratiche.html>
- Gonzalez, H. B., & Kuenzi, J. J. (2012). *Science, technology, engineering, and mathematics (STEM) education: A primer*. Washington, DC: Congressional Research Service, Library of Congress.
- Higgins, S., Xiao, Z., & Katsipataki, M. (2012). *The Impact of Digital Technology on Learning: a Summary for the Education Endowment Foundation*. EEF – Education Endowment Foundation. URL: [https://educationendowmentfoundation.org.uk/public/files/Presentations/Publications/The_Impact_of_Digital_Technologies_on_Learning_\(2012\).pdf](https://educationendowmentfoundation.org.uk/public/files/Presentations/Publications/The_Impact_of_Digital_Technologies_on_Learning_(2012).pdf).
- Hofstein, A., & Mamlok-Naaman, R. (2007). The laboratory in science education: The state of the art. *Chemistry education research and practice*, 8(2), 105-107.
- MIUR - Ministero dell'istruzione, dell'università e della ricerca (2015). Piano Nazionale Scuola Digitale. <https://www.miur.gov.it/documents/20182/50615/Piano+nazionale+scuola+digitale.pdf/5b1a7e34-b678-40c5-8d26-e7b646708d70?version=1.1&t=1496170125686>.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6(7), <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2018). *Indicators for monitoring undergraduate STEM education*. Washington, DC, USA: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24943>.
- Ndoro, M. C. (2017). *Learner performance in integrated science process skills and attitudes in hands-on practical work versus virtual practical work*. Master's thesis, University of Cape Town.
- NRC – National Research Council (2006). *America's lab report: Investigations in high school science*. Washington, DC, USA: National Academy Press.
- NSTA – National Science Teachers Association (2007). *The integral role of laboratory investigations in science instruction*. Arlington, VA: NSTA – www.nsta.org.
- Pellegrini, M., & Vivanet, G. (2018). *Sintesi di ricerca in educazione. Basi teoriche e metodologiche*. Roma: Carocci.
- Polanin, J. R., Maynard, B. R., & Dell, N. A. (2017). Overviews in education research: A systematic review and analysis. *Review of Educational Research*, 87(1), 172-203.
- *Rubim, J. P., Mota, V. P., Garcia, L. G., Brito, G. L. R., & Santos, G. F. (2019). The use of remote experimentation

- as a teaching tool: A literature review. *International Journal of Information and Education Technology*, 11, 826-830.
- *Scalise, K., Timms, M., Moorjani, A., Clark, L., Holtermann, K., & Irvin, P. S. (2011). Student learning in science simulations: Design features that promote learning gains. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(9), 1050-1078.
- Serrano-Perez, J. J., González-García, L., Flacco, N., Taberner-Cortés, A., García-Arnandis, I., Pérez-López, G., ... Romá-Mateo, C. (2021). Traditional vs. Virtual Laboratories in Health Sciences Education. *Journal of Biological Education*, 1-15.
- *Sypsas, A., & Kalles, D. (2018, November-December). Virtual laboratories in biology, biotechnology and chemistry education: A literature review. In *Proceedings of the 22nd Pan-Hellenic Conference on Informatics (Proceedings of PCI '18)*, Athens, Greece.
- *Tho, S. W., Yeung, Y. Y., Wei, R. Chan, K. W., & So, W. W. (2017). A systematic review of remote laboratory work in science education with the support of visualizing its structure through the HistCite and CiteSpace software. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15, 1217-1236.
- *Tsihouridis, C., Vavougiou, D., Batsila, M., & Ioannidis, G. S. (2019). The timeless controversy between virtual and real laboratories in science education—"And the winner is...". In M. Auer, & T. Tsiatsos (Eds.), *The Challenges of the Digital Transformation in Education*. ICL 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, 916. Springer.
- *Udin, W. N., Ramli, M., & Muzzazinah (2020). Virtual laboratory for enhancing students' understanding on abstract biology concepts and laboratory skills: A systematic review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1521(4), 1-5.
- Vivanet, G. (2017). Tecnologie per apprendere. Quando e come utilizzarle. In G. Bonaiuti, A. Calvani, L. Menichetti & G. Vivanet (Eds.), *Le tecnologie educative*, 81-125. Roma: Carocci editore.
- *Wang, C. Y., Wu, H. K., Lee, S. W. Y., Hwang, F. K., Chang, H. Y., Wu, Y. T., ... Tsai, C. C. (2014). A review of research on technology-assisted school science laboratories. *Educational Technology & Society*, 17(2), 307-320.
- Wigfield, A., & Eccles, J. S. (2000). Expectancy-value theory of achievement motivation. *Contemporary Educational Psychology*, 25, 68-81.
- *Zacharia, Z. C., Manoli, C., Xenofontos, N., de Jon, T., Pedaste, M., van Riesen S. A. N., ... Tsourlidak, E. (2015). Identifying potential types of guidance for supporting student inquiry when using virtual and remote labs in science: A literature review. *Educational technology research and development*, 63, 257-302.

* studi secondari inclusi nella revisione sistematica di secondo ordine.