

LA FABRICACIÓN DIGITAL EN LA EDUCACIÓN INCLUSIVA PARA ESTUDIANTES CON DISCAPACIDAD VISUAL

Análisis literario y bibliométrico

DIGITAL FABRICATION IN INCLUSIVE
EDUCATION FOR STUDENTS WITH VISUAL
IMPAIRMENT AND BLINDNESS

Literary and Bibliometric Analysis

NALDI SUSAN CARRIÓN PUELLES

Centro de Innovación Tecnológica Fab Lab ESAN,
Universidad ESAN
0000-0002-5849-4758

CARLOS EDUARDO SILVA OSORES

Centro de Innovación Tecnológica Fab Lab ESAN,
Universidad ESAN
0000-0002-3810-6594

JORGE VALERIO ARAOZ

Centro de Innovación Tecnológica Fab Lab ESAN,
Universidad ESAN
0000-0002-5849-4758

Recibido: 14 de septiembre del 2021

Aprobado: 3 de julio del 2022

doi: <https://doi.org/10.26439/limaq2022.n010.5319>

La integración de la tecnología en los procesos de enseñanza de las personas con discapacidad es primordial y ha generado las denominadas tecnologías de asistencia. Entre ellas, las tecnologías de fabricación digital, consideradas transformadoras, vienen acelerando su personalización, facilitando el acceso y asequibilidad principalmente para la población con discapacidad visual. La presente investigación combina la técnica de revisión de literatura con la bibliométrica para evaluar la aplicación de las tecnologías de fabricación digital en el proceso de aprendizaje de estudiantes con discapacidad visual. Asimismo, analiza su aporte en la implementación de la instrucción explícita, una metodología de enseñanza fundamental y transversal a la enseñanza de personas con y sin discapacidad visual, que ofrece una experiencia educativa multisensorial, teniendo potencial para fungir de catalizadora en el incremento de espacios educativos inclusivos.

educación para personas con discapacidad visual, fabricación digital, instrucción explícita, tecnologías de asistencia

Technology integration in teaching people with disabilities is essential and has generated the so-called assistive technologies. Among them, digital manufacturing technologies, considered transformative, have made personalization faster and access easier and more affordable, mainly for the visually impaired. This research combines a literature review with bibliometrics to evaluate the application of digital fabrication technologies in the learning process of students with visual disabilities. Likewise, it analyzes its contribution to implementing explicit instruction, a fundamental and transversal methodology for teaching people with and without visual disabilities. It offers a multisensory educational experience and can potentially increase the number of inclusive educational spaces.

digital fabrication, DIY assistive technology, explicit instructions, visual disability education

INTRODUCCIÓN

La tecnología, como un conjunto de sistemas diseñados para llevar a cabo ciertas funciones, compone y adapta artefactos y herramientas para facilitar diferentes aspectos de nuestra vida diaria, entre ellos, los procesos de enseñanza y aprendizaje (Neira et al., 2017). La tecnología proporciona herramientas de soporte para la adquisición de habilidades académicas, sociales y funcionales, con un rol transformador en la enseñanza para personas con discapacidad, denominándoseles en ese caso tecnologías de asistencia (AT, por sus siglas en inglés) (Bouck, 2010). En este contexto, si bien las tecnologías de asistencia se aplican comúnmente en espacios educativos exclusivos para personas con discapacidad, hay una creciente tendencia a extender su uso en otros escenarios (Rogers & Johnson, 2018). Debido a que estas tecnologías poseen un amplio y transversal espectro de aplicación en el campo de la educación especial, se busca que, desde su naturaleza de creación, faciliten procesos de inclusión en ambientes educativos generales, incluyendo en su diseño características de accesibilidad (Shaheen & Lohnes Watulak, 2019), y asistan funcionalmente al estudiante con discapacidad, cubriendo también otras necesidades durante el proceso de aprendizaje (Bouck, 2010; Fachinetti & Carbone Carneiro, 2017; Shaheen & Lohnes Watulak, 2019).

Qahmash (2018) sugiere impulsar investigaciones en el rubro de las tecnologías instructivas-educativas para emplear dispositivos digitales emergentes (tecnología móvil, teléfonos inteligentes, tabletas), considerando que revolucionan el proceso de aprendizaje de las personas con discapacidad, acompañadas de la personalización del diseño de instrucciones de contenido, métodos y forma de enseñanza, conllevando a variar las prácticas docentes y las estrategias educativas (Riccomini et al., 2017), y del desarrollo de prácticas de nivel superior (high-leverage practices-HLP), entre las cuales resalta la instrucción explícita (McLeskey et al., 2017). Sin embargo, su análisis no contempla el uso de otras tecnologías disruptivas emergentes, como las de fabricación digital o las tecnologías 3D, a pesar de que en su aplicación a procesos educativos para personas sin discapacidad son consideradas tecnologías transformadoras (D'Aveni, 2013), introduciéndose rápidamente en entornos universitarios (Gordy et al., 2020; Monllor & Soto-Simeone, 2020; Neira et al., 2017; Ramírez & Gordy, 2020), y que se cuenta con la disponibilidad instantánea

de modelos 3D compartidos en línea que permitirían extender su aplicación (Parry-Hill et al., 2017).

Se sabe que el desarrollo experimental de las tecnologías de asistencia del tipo “Do it yourself” (“Hágalo usted mismo”; DIY, por sus siglas en inglés) aplicadas a entornos de educación especial viene creciendo (Hurst & Tobias, 2011; Parry-Hill et al., 2017; Singhal & Balaji, 2020), identificándose investigaciones que detallan el uso de tecnologías de fabricación digital circunscritas a ambientes educativos exclusivos para personas con discapacidad (Brulé & Bailly, 2021; Giraud et al., 2017), sobre todo de la impresión 3D (Brulé & Bailly, 2021; Buehler et al., 2016; Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021; Ford & Minshall, 2019; Giraud et al., 2017; Götzelmann, 2018; Gual-Ortí et al., 2015; Hernández Sánchez et al., 2020; Jain et al., 2018; Jo et al., 2016; Molins-Ruano et al., 2018; Parry-Hill et al., 2017; Smith et al., 2020; Wedler et al., 2012; Wu et al., 2020).

En este contexto, se requiere profundizar en el estudio del amplio espectro de aplicación de las tecnologías de fabricación digital para asistir al aprendizaje en una diversidad de discapacidades (Hurst & Tobias, 2011). Esta investigación se enfoca en evaluar el potencial de su aplicación para impulsar procesos de inclusión educativa, especialmente entre personas con discapacidad visual moderada a severa,¹ con una población de estas características que a escala global alcanza el billón de individuos y cuya proyección a futuro se mantiene en crecimiento (WHO, 2021). Se requiere promover el desarrollo de materiales didácticos especializados (Jo et al., 2016), que en muchos casos son introducidos por los profesores de educación especial, quienes adaptan todo el material requerido por los estudiantes con discapacidad visual moderada a severa (Brulé & Bailly, 2021). Así, nos centramos en investigar el rol que las tecnologías de fabricación digital (manufactura aditiva, corte láser, CNC, entre otras) desempeñan en la educación de personas con esa discapacidad.

Las preguntas que nos planteamos son las siguientes: ¿las tecnologías de fabricación digital son utilizadas en la promoción de entornos educativos inclusivos para estudiantes con discapacidad visual

¹ Personas con un amplio rango de capacidades visuales disminuidas de nivel moderado a severo o con pérdida total de visión (Brulé & Bailly, 2021).

moderada a severa?; ¿cuáles son los contextos prácticos de su aplicación?; ¿cómo se aplican?; ¿cuáles son las tecnologías de fabricación digital más utilizadas? Combinamos los procesos de revisión de literatura y análisis bibliométrico para identificar las experiencias de aplicación de las tecnologías de fabricación digital al campo de la educación formal de personas con discapacidad visual moderada a severa. Y, teniendo en cuenta que la instrucción explícita es la metodología base para el desarrollo de capacidades académicas, tanto en entornos educativos convencionales como en los de educación especial (McLeskey et al., 2017), utilizamos como marco de evaluación los pilares de la metodología para el análisis, clasificación y síntesis cualitativa de casos, evaluando el rol que desempeña en la promoción de la educación inclusiva para personas con discapacidad visual moderada a severa.

LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DIGITAL EN EL IMPULSO DE LAS TECNOLOGÍAS DE ASISTENCIA DEL TIPO “DO IT YOURSELF” PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD VISUAL

Las tecnologías de asistencia son todos los productos, equipos, recursos, metodologías, estrategias, prácticas y servicios que se utilizan para aumentar, mantener o mejorar las capacidades funcionales de una persona con discapacidad, y que desarrollados comercialmente, modificados o personalizados, promueven su independencia y autonomía (Sec. 300.5 Assistive Technology Device, 2004; Leria et al., 2021). Son implementadas en la educación de estas personas para el uso personal de los estudiantes, y requieren de la capacitación de profesores, no solo para su empleo en clase, sino para su instalación, operación y mantenimiento (Leria et al., 2021). Se busca así empoderar a las personas con discapacidad, para que adquieran la capacidad de realizar tareas que de otra forma no podrían y/o aumentando la facilidad y seguridad al realizarlas (Hook et al., 2014; Hurst & Tobias, 2011).

El uso de tecnologías emergentes aplicadas en el diseño y fabricación de las tecnologías de asistencia para procesos de enseñanza exclusivos para personas con discapacidad es amplio (Qahmash, 2018). Se considera que estas tecnologías podrían facilitar también procesos de inclusión en ambientes de educación general (Fachinetti & Carbone Carneiro, 2017). Se registra, sin embargo, una alta tasa de abandono en el uso de las tecnologías de asistencia, debido, entre otras causas, a la falta de soporte técnico, alto costo, baja accesibilidad y diseños inapropiados (Brulé &

Bailly, 2021; Hook et al., 2014; Hurst & Tobias, 2011). Las tecnologías de asistencia deben tener como característica básica la capacidad de ajustarse a las reales y cambiantes necesidades del usuario (Hamidi et al., 2014; Hook et al., 2014; Hurst & Tobias, 2011). Y en el caso de personas con discapacidad visual moderada a severa, deben complementar la limitada cantidad de datos sensoriales disponibles para el estudiante, basándose firmemente en el desarrollo de productos con un enfoque multisensorial (Fraser & Maguvhe, 2008).

En este contexto, el movimiento “Do it yourself” viene impulsando la creación, modificación y construcción personalizada de las tecnologías de asistencia en ambientes educativos exclusivos para personas con discapacidad visual moderada a severa (Brulé & Bailly, 2021; Hamidi et al., 2014; Hook et al., 2014; Hurst & Tobias, 2011; Parry-Hill et al., 2017), promoviendo el aprendizaje de asignaturas de ciencias, tecnologías, ingeniería y matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés) (Ford & Minshall, 2019). Estos procesos pueden realizarse sin aplicar tecnologías sofisticadas o utilizando recursos y capacidades localmente disponibles (De Couvreur et al., 2011; Hamidi et al., 2014; Hook et al., 2014; Hurst & Tobias, 2011). Hay un creciente interés en utilizar tecnologías de fabricación digital, también denominadas tecnologías de prototipado rápido (Brulé & Bailly, 2021; Buehler et al., 2016; Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021; Ford & Minshall, 2019; Giraud et al., 2017; Götzelmann, 2018; Gual-Ortí et al., 2015; Hernández Sánchez et al., 2020; Hurst & Tobias, 2011; Jain et al., 2018; Molins-Ruano et al., 2018; Okerlund & Wilson, 2019; Parry-Hill et al., 2017; Smith et al., 2020; Wedler et al., 2012; Wu et al., 2020).

Las tecnologías de fabricación digital se centran en el proceso de control numérico computacional de maquinaria y/o equipos que facilitan la producción de artefactos físicos a partir de modelos digitales (Brulé & Bailly, 2021). Estas tecnologías se consideran emergentes, al tratarse de tecnologías asociadas con un entorno digital que poseen un potencial disruptivo para transformar o generar cambios en los procesos donde se utilizan (Neira et al., 2017). Entre las tecnologías de fabricación digital más difundidas, y que se considera pueden ser usadas por no-especialistas, se encuentran las impresoras 3D, los equipos de corte láser y las máquinas fresadoras de eje múltiple (Brulé & Bailly, 2021; Ford & Minshall, 2019; Hurst & Tobias, 2011; Parry-Hill et al., 2017; Singhal & Balaji, 2020). Estas tecnologías son cada vez más accesibles por la amplia disponibilidad instantánea de

modelos compartidos en línea (Brulé & Bailly, 2021; Hamidi, 2019; Hamidi et al., 2014; Hurst & Tobias, 2011; Parry-Hill et al., 2017). Su gran difusión durante la década pasada les valió ser catalogadas como tecnologías transformadoras, con el potencial para cambiar el mundo (D’Aveni, 2013). Por otro lado, vienen transformando también los entornos de enseñanza para personas con discapacidad visual (Brulé & Bailly, 2021). Y en los últimos años, su uso en el desarrollo de tecnologías de asistencia del tipo “Do it yourself” para personas con discapacidad visual se ha acelerado, encontrándose casos de herramientas de enseñanza táctiles (Horowitz & Schultz, 2014; Jo et al., 2016; Smith et al., 2020; Stangl et al., 2014; Wu et al., 2020) y mapas de líneas en relieve (Giraud et al., 2017; Horowitz & Schultz, 2014).

LA INSTRUCCIÓN EXPLÍCITA PARA LA INCLUSIÓN DE ESTUDIANTES CON DISCAPACIDAD VISUAL

Riccomini et al. (2017) señalan que los ambientes exclusivos para la educación especial, además de cambiar las prácticas docentes y las estrategias de enseñanza, requieren el diseño personalizado de las instrucciones del contenido, métodos y herramientas, siendo recomendable que el profesor aplique una serie de prácticas generativas. Se reportan veintidós prácticas de nivel superior que el docente debe dominar para aplicarlas en la educación especial, empleando cuatro componentes entrelazados en el ejercicio de la docencia: la colaboración, la evaluación, el soporte de las necesidades socioemocionales-conductuales y la metodología de instrucción (McLeskey et al., 2017). En esta última se encuentra el enfoque de instrucción explícita, con un rol preponderante en el impulso de diversas prácticas de nivel superior (McLeskey et al., 2017), siendo muy relevante en la selección, diseño e implementación efectiva de la educación especial, y estratégica en procesos que promueven la inclusión de personas con discapacidad visual moderada a severa (Riccomini et al., 2017). Por el gran impacto social que puede generar, hay un fuerte interés en su aplicación (Fachinetti & Carbone Carneiro, 2017; Fraser & Maguvhe, 2008; Hollier, 2017; Leria et al., 2021; Ramírez & Gordy, 2020; Rogers & Johnson, 2018).

La instrucción explícita está compuesta por un grupo de conductas educativas muy estudiadas, sirve para diseñar y llevar a cabo los procesos de instrucción, y proporciona el soporte necesario para desarrollar un aprendizaje exitoso a través de la claridad del lenguaje

y del correcto direccionamiento y condensación de la carga cognitiva (Riccomini et al., 2017). Promueve, asimismo, la participación de los estudiantes, al requerir respuestas frecuentes y variadas, seguidas de una retroalimentación afirmativa y correctiva, contribuyendo a la retención de largo plazo a través del uso de estrategias prácticas específicas (Hughes et al., 2017). Es efectiva para la enseñanza de habilidades académicas, en la que el profesor proporciona una explicación o modelo, guía a los estudiantes a través de la aplicación de la habilidad o concepto, y proporciona la oportunidad para, de manera independiente, aplicar lo aprendido y así asegurar un aprendizaje exitoso (McLeskey et al., 2017). La instrucción explícita se encuentra inmersa en las prácticas de nivel superior, y es clave para la instrucción especialmente diseñada para personas con discapacidad, siendo indispensable adaptar o modificar el contenido, metodología o forma de enseñanza para satisfacer las necesidades únicas de estas personas (Riccomini et al., 2017). Debido a su relevancia ahondaremos en sus componentes esenciales.

Al respecto, según plantean Riccomini et al. (2017), detallaremos cinco componentes esenciales considerados los pilares de la instrucción explícita:

1. Capacidad de segmentación de la complejidad (segmentación de la complejidad): aplicando la enseñanza en forma secuencial y lógica, ayuda a reducir la complejidad cognitiva, al hacer manejable los componentes y conceptos complejos, permitiendo un aprendizaje incremental.
2. Conducir la atención de los estudiantes hacia las características relevantes del contenido, a través del modelamiento y la discusión (modelamiento y discusión): se utiliza la demostración y/o presentación de ejemplos de manera clara, concisa y consistente en el desarrollo de actividades. Se recurre al modelamiento y la discusión para evidenciar explícitamente los procesos internos y externos que generan el aprendizaje.
3. Promover la exitosa participación a través del uso sistemático de apoyos/indicaciones temporales (prácticas guiadas): se realizan actividades que brindan la oportunidad de practicar y mejorar, generando confianza en los estudiantes, ofreciendo una guía progresiva descendiente, hasta que el alumno alcanza la efectividad y el entendimiento, permitiendo un proceso de monitoreo hasta la práctica autónoma.

4. Brindar a los estudiantes la oportunidad de recibir y responder a la retroalimentación (retroalimentación hacia/del estudiante): al alentar la participación activa en clase, se promueve la receptividad a la retroalimentación que brinda el alumno y una respuesta oportuna que la reafirme o corrija. Con retroalimentaciones que se dan de múltiples formas, se promueve una respuesta gradual o escalonada, según se requiera.
5. Crear oportunidades para la generación de prácticas orientadas hacia un propósito de aprendizaje (oportunidades de prácticas): se promueven las prácticas autónomas, estableciendo metas específicas, y se lo combina con una adecuada retroalimentación para incrementar su efectividad de tres a cuatro veces.

METODOLOGÍA

Se busca identificar las aplicaciones de las tecnologías de fabricación digital en la educación inclusiva para las personas con discapacidad, seleccionando casos para luego evaluar cómo su uso aporta a los pilares de la instrucción explícita. Esta sección describe el alcance de la revisión y métodos de recolección de información para identificar los trabajos académicos más representativos. Al respecto, dada la naturaleza exploratoria del presente artículo, se aplicaron los dos primeros pasos de la metodología propuesta por Eisenhardt (1989):

1. Establecer la pregunta de investigación: ¿cuál es el rol que desempeñan las tecnologías de fabricación digital en la educación para estudiantes con discapacidad, especialmente visual?
2. Seleccionar casos de estudio: para la selección de un motor de búsqueda adecuado, tomamos en consideración el trabajo de Shah y Mahmood (2017), que compara Web of Science, Scopus y Google Scholar para investigaciones centradas en la educación inclusiva, y que concluye que no hay diferencias de performance entre ellas.

Considerando la facilidad de acceso y las herramientas que brinda para los análisis cualitativo y cuantitativo de las investigaciones académicas, en el presente artículo empleamos la plataforma Web of Science, que dispone de artículos de revista de Q1 a Q4 publicados entre los años 2001 y 2021.

Asimismo, luego de identificar los artículos más importantes, se aplicó la técnica bibliométrica, agrupando las publicaciones por relevancia

de acuerdo al número de citas y dimensionando el interés en el tópico central de nuestra investigación (Waltman et al., 2010).

La primera fase de análisis cuantitativo se divide en cuatro etapas:

1. Para establecer el número de publicaciones sobre tecnologías de fabricación digital, se tuvo en cuenta que estas están inmersas en el tópico tecnología, realizándose un mapeo y comparación entre la cantidad de artículos que combinan las palabras clave: “technology” + “disabilities” y “technology” + “blind”, frente a “digital fabrication” + “disabilities” y “digital fabrication” + “blind”.
2. Establecido el panorama general, la investigación se enfoca luego en la producción bibliográfica sobre fabricación digital y educación para las personas con discapacidad. En la búsqueda se introduce el término “education”, que enmarca de forma global cualquier enfoque educativo (“digital fabrication” + “education” + “disabilities” or “blind”). Asimismo, se intercambia el término “education” con “explicit instructions”.
3. Posteriormente, con la finalidad de evitar la exclusión de publicaciones académicas que aborden de manera individual las tecnologías de fabricación digital, se intercambia el término “digital fabrication” con las palabras clave “3D printing”, “laser cutting” y “CNC milling”.
4. Finalmente, se amplía la búsqueda de la aplicación de las tecnologías de fabricación digital fuera del sector educación, extendiéndola a otros sectores, para identificar posibles aplicaciones futuras en las técnicas o herramientas de enseñanza que promuevan la instrucción explícita. Se utilizaron como palabras clave: “nombre de la tecnología de fabricación digital de mayor aplicación en el sector educativo” + “disabilities”, “blind” y “visual impairment”. El potencial de aplicación futura en el sector educación se definirá en la fase cualitativa, identificando su relevancia y aporte metodológico.

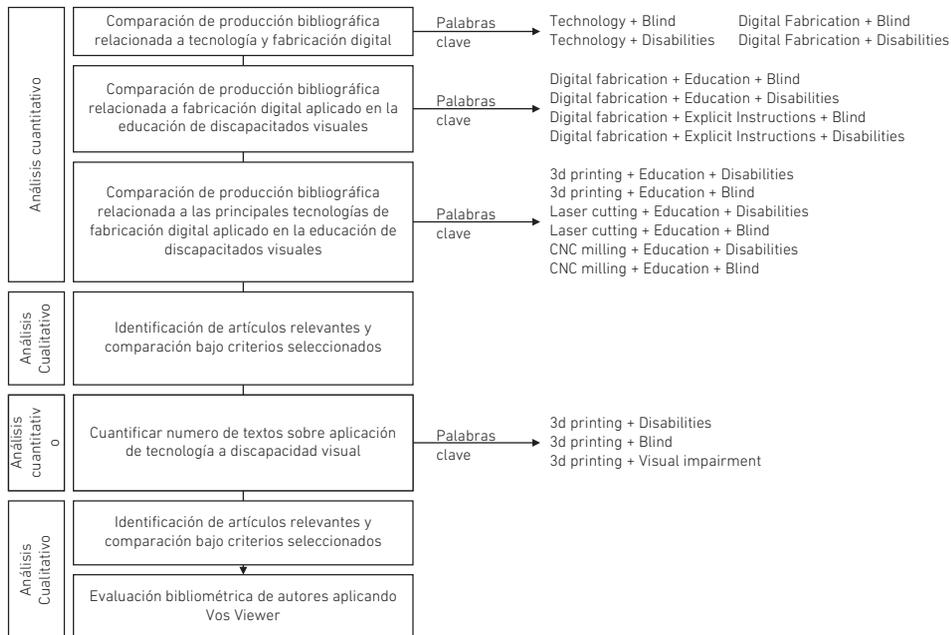
La segunda fase de análisis cualitativo consta de dos etapas:

1. Revisión y evaluación de la temática de los artículos identificados en la fase cuantitativa. Se contrasta su focalización en el tema de investigación: la aplicación de la tecnología de fabricación digital en la educación de las personas con discapacidad.

2. Los artículos seleccionados son luego analizados en contenido, para su sistematización y el análisis del aporte en el desarrollo de la instrucción explícita, eje metodológico que impulsa la inclusión de estudiantes con discapacidad visual moderada a severa en ambientes de enseñanza tradicional. Los artículos se comparan bajo los siguientes criterios:
 - a. Caracterización del artículo: título y autor; palabras clave de la publicación; revista; ciudad y año de publicación.
 - b. Descripción general de la investigación: señala la nacionalidad y grado de instrucción de los participantes; la población del experimento; la materia o habilidad en que la investigación incide; el enfoque del estudio, indicando si se centra en el profesor o en el estudiante, la propuesta de material didáctico, etcétera; y tipo de aplicación del estudio, ya sea taller, demostración teórica, etcétera.

Finalmente, con el grupo final de artículos que presentan relación con nuestro tema de estudio, se realiza el análisis bibliométrico para identificar los principales autores. Se utilizó el software VOSViewer y, tomando como base el trabajo de Santhakumar (2020), se filtraron los autores con más de 45 citas.

Figura 1
Metodología aplicada a la investigación



RESULTADOS

Luego de la búsqueda combinada de las palabras clave “technology”, “digital fabrication”, “disabilities” y “blind”, se utilizaron las herramientas de la plataforma Web of Science para establecer un panorama general de la cantidad de artículos centrados en educación. En la Tabla 1 se observa que con el término “technology” hay una cantidad de publicaciones muy superior que con “digital fabrication”.

Tabla 1

Búsqueda de las palabras clave “technology” y “digital fabrication” en combinación con “disabilities” y “blind”

N.º	Palabras clave	# Artículos hallados	# Artículos en categoría educación
1	Technology + Disabilities	18 944	1996
2	Digital fabrication + Disabilities	5	0
3	Technology + Blind	22 365	191
4	Digital fabrication + Blind	22	0

Fuente: Web of Science, 11/2021

La combinación de “technology” + “disabilities” arrojó 1196 artículos en la categoría educación, que incluye los tópicos “education special”, “education educational research”, “psychology educational” y “education scientific disciplines”. La combinación con la palabra clave “blind” generó una disminución radical del número de publicaciones a 191 en los tópicos “education educational research”, “education scientific disciplines” y “education special”. Similar procedimiento se aplicó para las combinaciones con “digital fabrication”, no encontrándose, en ninguno de los casos, artículos en la categoría educación.

Figura 2
Categorías de los artículos hallados con las palabras clave “digital fabrication” + “disabilities”

Fuente:
Web of Science,
11/2021

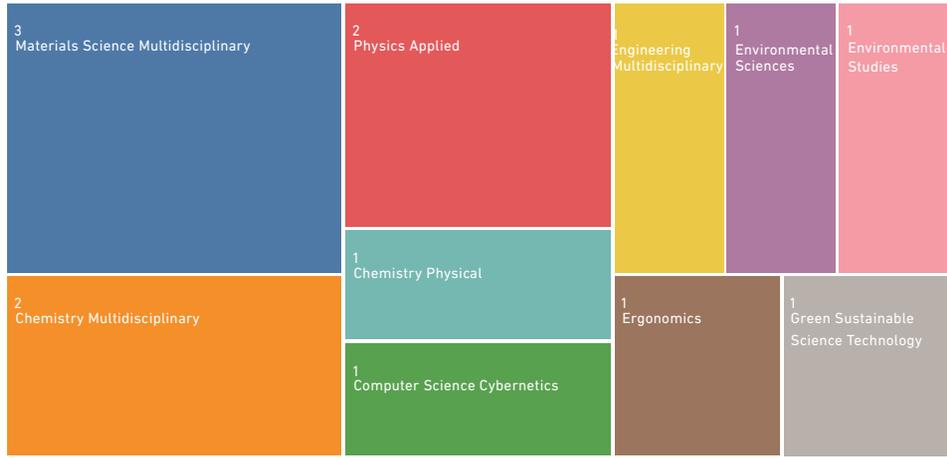
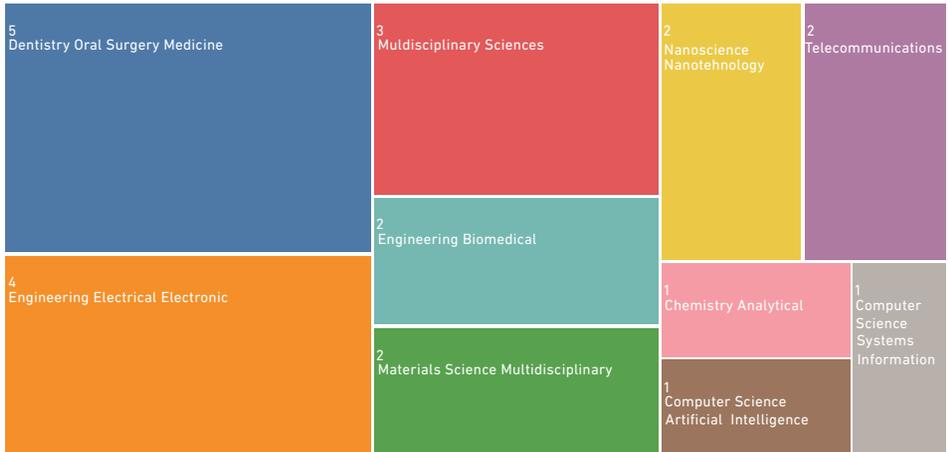


Figura 3
Categorías de los artículos hallados con las palabras clave “digital fabrication” + “blind”

Fuente:
Web of Science,
11/2021



Considerando los resultados de la etapa cuantitativa, al variarse los términos de búsqueda utilizando la palabra clave “digital fabrication” en combinación con “education”, “explicit instructions”, “blind” y “disabilities”, se obtuvo los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Búsqueda de la palabra clave “digital fabrication” en combinación con “education”, “explicit instructions”, “blind” y “disabilities”

N.º	Palabras clave	# Artículos hallados
1	Digital fabrication + Education + Blind	1
2	Digital fabrication + Education + Disabilities	1
3	Digital fabrication + Explicit instructions + Blind	0
4	Digital fabrication + Explicit instructions + Disabilities	0

Fuente: Web of Science, 11/2021

En la tercera etapa cuantitativa, al introducir en la combinación palabras que identifican las principales tecnologías de fabricación digital (impresión 3D, corte láser, fresado CNC), se incrementó el número de resultados. Con impresión 3D se encontraron dieciocho artículos relacionados con educación y discapacidades, y veintitrés artículos vinculados a educación y ceguera. Para corte láser solo se identificaron siete publicaciones; para fresado CNC no se encontraron resultados (ver Tabla 3). El uso de la palabra clave “explicit education”, en lugar de “education”, no generó resultados. El total de 48 artículos que relacionan las tecnologías de fabricación digital con la educación especial publicados en las últimas dos décadas, sugiere un incipiente desarrollo de esta línea de investigación.

Tabla 3

Búsqueda de las distintas tecnologías de fabricación digital en combinación con “education”, “disabilities” y “blind”

N.º	Palabras clave	# Artículos hallados
1	3D printing + Education + Disabilities	18
2	3D printing + Education + Blind	23
3	Laser cutting + Education + Disabilities	0
4	Laser cutting + Education + Blind	7
5	Milling + Education + Disabilities	0
6	CNC milling + Education + Blind	0

Fuente: Web of Science, 11/2021

Considerando que el 85 % de las publicaciones encontradas se vinculan con la impresión 3D, mientras que para corte láser ninguna se relaciona con el entorno educativo, en la última etapa de la fase cuantitativa focalizamos la búsqueda en el término “impresión 3D”, al ser la tecnología de fabricación digital con mayor aplicación. Así, al combinarlo con las palabras clave “disabilities”, “blind” y “visual impairment”, se amplió el número de artículos, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Búsqueda de la palabra clave “3D printing” en combinación con “disabilities”, “blind” y “visual impairment”

N.º	Palabras clave	# Artículos hallados
1	3D printing + Disabilities	50
2	3D printing + Blind	50
3	3D printing + Visual impairment	17

Fuente: Web of Science, 11/2021

Seguidamente, en la fase cualitativa se analizaron los 48 primeros artículos, identificándose catorce publicaciones relevantes por su relación directa con el sector educativo o por su potencial aplicación en ese sector. Se presentan en ellas propuestas de investigación o experiencias sobre la aplicación de la impresión 3D en la educación para discapacitados visuales. Similar procedimiento se usó para el segundo grupo de resultados, clasificando los artículos en dos categorías: publicaciones relacionadas con la educación y publicaciones con potencial de aplicarse en el sector educación. En la primera categoría se identificaron cinco publicaciones; en la segunda, tres.

Finalmente, con todas las publicaciones vinculadas con el campo de la impresión 3D en la educación, se realizó un análisis bibliométrico conjunto, usando VOSViewer (ver Figura 4). Se analizaron 49 artículos obtenidos de las búsquedas “3D printing + education + disabilities” y “3D printing + education + blind”, identificándose los autores más citados, tomando como mínimo valor 45 citas (Santhakumar, 2020). Solo tres artículos superaron el criterio. Su análisis cualitativo arrojó un total de dos artículos directamente relacionados con temas educativos, pero aplicados al sector médico.

Tabla 5
Publicaciones más citadas

N.º	Autores	Título	Revista	Año	# Citas
1	Weinstock, P., Rehder, R., Prabhu, S. P., Forbes, P. W., Roussin, C. J., & Cohen, A. R.	Creation of a Novel Simulator for Minimally Invasive Neurosurgery: Fusion of 3D Printing and Special Effects	Journal of Neurosurgery-Pediatrics	2017	52
2	Lim, K. H. A., Loo, Z. Y., Goldie, S. J., Adams, J. W., & McMenamin, P. G.	Use of 3D Printed Models in Medical Education: A Randomized Control Trial Comparing 3D Prints Versus Cadaveric Materials for Learning External Cardiac Anatomy	Anatomical Sciences Education	2016	117
3	Kostakis, V., Niaros, V., & Giotitsas, C.	Open-source 3D Printing as a Means of Learning: An Educational Experiment in Two High Schools in Greece	Telematics and Informatics	2015	72

Fuente: Web of Science, 11/2021

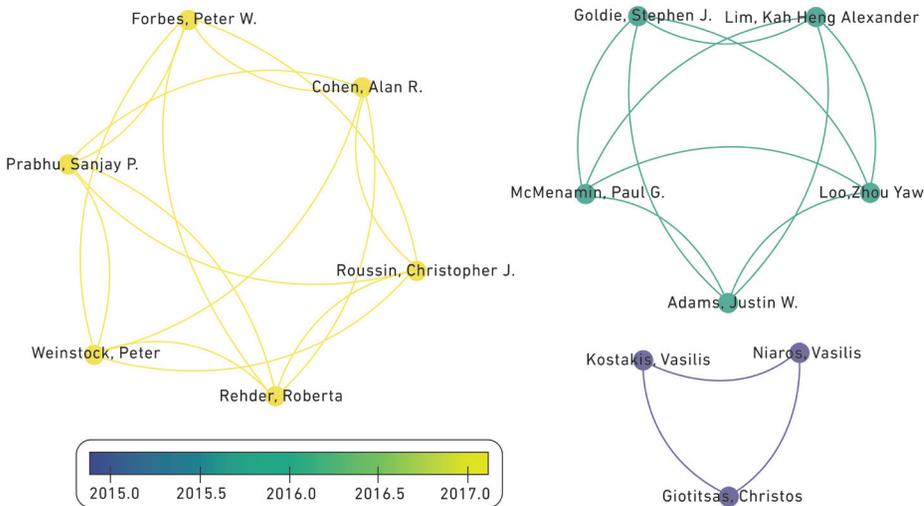


Figura 4
Análisis de autores más citados aplicando VOSViewer

Fuente: Web of Science, 11/2021, elaboración VOSViewer

DISCUSIÓN

De la comparación de resultados sobre los términos “digital fabrication” + “blind”, frente a “technology” + “blind”, podemos afirmar que la cantidad de publicaciones es poco representativa por encontrarse solo una relación de uno a mil. Similar situación se registra reemplazando el término “blind” por “disabilities”, donde la relación de publicaciones se reduce de uno a tres mil. De esta manera, se observa que la aplicación de las palabras clave “technology” y “digital fabrication” marca una diferencia significativa en los resultados y sugiere que hay un campo incipiente para explorar, discutir e investigar la aplicación de la fabricación digital vinculada a casos de discapacidad de diversa índole.

Cuando la búsqueda de “technology” + “disabilities” se focaliza en las investigaciones catalogadas en el área educativa (especial, psicológica, disciplinas científicas y de investigación), encontramos un 10,5 % de publicaciones, un valor que disminuye a menos del 1 % al centramos en las personas con discapacidad visual (uso del término “blind”). Para el caso de la combinación “digital fabrication” + “blind” o “digital fabrication” + “disabilities”, no encontramos resultados catalogados en el área educativa. Solo cuando a esta última combinación se le suma la palabra clave “education”, se obtienen dos publicaciones.

Sin embargo, los resultados se optimizan al reemplazar “digital fabrication” por cada tecnología que la componen: “3D printing”, “laser cutting” y “CNC milling”. En este contexto, se observa mayor recurrencia de investigaciones centradas en la aplicación de la impresión 3D en el área de educación para personas con discapacidad. Identificamos un total de 41 investigaciones aplicadas, el 34 % (14 estudios) referido directamente al uso y/o impacto en la educación para personas con discapacidad visual moderada a severa. Mientras que para “laser cutting” y “CNC milling”, hallamos siete resultados solo enfocados en corte láser, no aplicados al sector educativo.

Este escenario muestra que las investigaciones no relacionan la tecnología de impresión 3D con el concepto de fabricación digital, posicionándose por encima del término. Bajo este esquema, de manera inductiva, suprimimos la restricción de búsqueda en el área educativa para explorar la variedad de aplicaciones en otros sectores y su potencial aplicación al área académica. Así, ubicamos publicaciones con los términos “3D printing” + “disabilities”, “3D printing” + “blind”

y “3D printing” + “visual impairment”. Esta expansión de búsqueda arrojó 117 publicaciones, ampliando el universo de artículos para la fase de revisión cualitativa a 158.

En la fase cualitativa se obtuvo un total de veintidós publicaciones referidas a la aplicación de la tecnología de impresión 3D a entornos educativos y trece estudios desarrollados en otros sectores y con potencial de uso en la enseñanza. El análisis cualitativo de contenido se dividió en dos. El primer grupo de artículos con directa aplicación en la enseñanza para personas con discapacidad visual moderada a severa, permite plantear la discusión sobre el rol actual de la fabricación digital, representada en este caso por la impresión 3D. El segundo grupo de artículos nos permitió analizar la posible ampliación de su uso.

Análisis del primer grupo de artículos

Para el análisis del rol actual de la fabricación digital en el proceso educativo para personas con discapacidad visual moderada a severa, utilizamos el marco de referencia sobre la instrucción explícita (Hughes et al., 2017). Esto incluye conocer el aporte de la tecnología en el proceso de enseñanza, analizando su adhesión a los pilares de la instrucción explícita, evaluando el impacto de la impresión 3D sobre la educación y registrando lo siguiente:²

- Tecnología de impresión 3D utilizada
- Material utilizado
- Fuentes de los modelos 3D utilizados
- Aplicación de la tecnología
- Contexto de la aplicación
- Evaluación de la utilidad del producto fabricado
- Rol identificado para el producto fabricado
- Características reconocidas al producto fabricado
- Rol del producto en el experimento
- Adherencia a los pilares de la instrucción explícita

² Revisar anexos en el link digital.

El análisis de adhesión de las investigaciones a los pilares de la instrucción explícita nos revela que en el 75 % de artículos la impresión 3D aporta a los cinco pilares. Como se observa en la Figura 5, el 100 % de los casos aporta a los dos primeros pilares: segmentación de habilidades complejas y modelado-discusión del contenido. ¿Cómo es esto posible? En los siguientes párrafos revisamos algunos casos particulares.

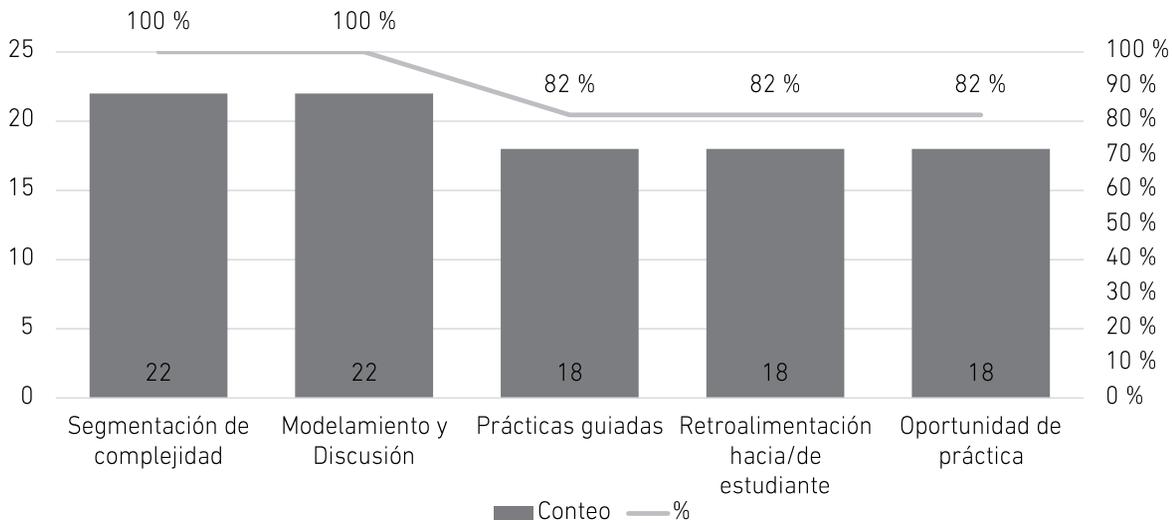


Figura 5
Adhesión de los artículos a los pilares de la instrucción explícita

Nueve estudios desarrollan material didáctico, se centran en la creación de modelos táctiles para simplificar conceptos que pueden resultar complejos o abstractos. En el caso de Fittle (Jain, 2018), el producto divide la palabra escrita en braille en un rompecabezas, facilitando que el usuario identifique segmentos de la palabra de forma lúdica, promoviendo la participación. En los casos de maquetas para representar espacios urbanos (Hernández Sánchez, 2020; Giraud, 2017; Gual-Orti, 2015), los usuarios tienen más facilidad para identificar de forma aislada los distintos componentes por medio de la textura y escritura en braille, entre otros elementos, lo que permite una participación más activa.

Cuatro publicaciones proponen implementar procesos para usar la tecnología y muestran la necesidad de desarrollar habilidades específicas para su manejo. Así, Götzelmann (2018) plantea la automatización del proceso de impresión 3D para personas con discapacidad visual, lo que supone crear interfaces para la accesibilidad del usuario invidente

y lograr una mayor independencia en el uso de la herramienta. Por su lado, Mcloughlin (2016) presenta el proyecto SHIVA, que provee herramientas virtuales de diseño de esculturas para estudiantes con discapacidades complejas, incluidas las visuales, segmentando procesos, que pueden suponer un reto, en procedimientos más sencillos.

Con respecto a la adhesión a los otros tres pilares, enfocados en la puesta en práctica y asimilación de conocimiento y/o habilidades, el análisis se enmarca en el tipo de aplicación del producto impreso en 3D. Realizamos el primer análisis sobre los talleres prácticos y teóricos-prácticos que dan espacio a que los estudiantes realicen actividades guiadas y reciban *feedback* por parte del tutor. Por ejemplo, Singhal y Balaji (2020) plantean el uso de modelos para la representación atómica de ecuaciones químicas que, pasando por alto limitaciones logísticas, da pie a la ejecución de sesiones donde los estudiantes puedan poner en práctica los conocimientos recibidos, ya sea de forma guiada o independiente. Por otro lado, en el caso de los artículos de demostraciones de concepto, estos espacios de experimentación se ven limitados. Por ejemplo, el trabajo de Koelemeijer y Winterbourne (2021) plantea una metodología para convertir superficies a modelos 3D para la explicación en clase, mas no desarrolla las actividades prácticas.

De lo anterior se desprende que una limitante para adherirse a estos tres pilares es la conceptualización de uso y propósito que se le da a la impresión 3D. Así, en aquellos casos donde se espera que el alumno realice alguna actividad (ya sea directamente con la tecnología o con un producto impreso), se tiene una mayor posibilidad de adhesión que en los casos que se enfocan solo en la producción de maquetas demostrativas. Esto debido a que hay una menor retroalimentación entre el estudiante y el profesor.

Considerando que la totalidad de las publicaciones presentan una alta adhesión a los pilares de la instrucción explícita, es importante caracterizar la producción académica. De acuerdo al origen de la investigación, la Figura 6A no reporta aportes de países latinoamericanos y africanos, con excepción de México. La mayoría proviene de países europeos (52 %) (Giraud, 2017; Mcloughlin, 2016; Bonnet de León, 2020; Evelyn-Wright et al., 2020; Molins-Ruano, 2018; Clements, 2016; Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021; Götzelmann, 2018; Gual-Orti, 2015; Koelemeijer & Winterbourne, 2021; Kostakis et al., 2015). Las publicaciones restantes se distribuyen

entre Norteamérica, con 29 % (Hernández Sánchez, 2020; Smith, 2020; Grumman & Carroll, 2019; Wedler, 2012; Buehler, 2016; VanderMolen & Fortuna, 2021; LeSuer, 2019), y Asia, con 19 % (Jain, 2018; Singhal & Balaji, 2020; Wu, 202; See, 2021).

En cuanto al nivel educativo de aplicación, la Figura 6B arroja un 29 % de trabajos en educación primaria (Jain, 2018; Hernández Sánchez, 2020), educación secundaria (Singhal & Balaji, 2020; Wu, 202; Smith, 2020; Kostakis et al., 2015) y educación preuniversitaria (Molins-Ruano, 2018). Un 24 % se enfoca en educación superior (Clements, 2016; Grumman & Carroll, 2019; Wedler, 2012; LeSuer, 2019) y en centros de educación especial (Giraud, 2017; Mcloughlin, 2016; Bonnet de León, 2020). La mayoría de artículos (47 %) realizan investigaciones dirigidas al público en general (Götzelmann, 2018; Gual-Orti, 2015; Koelemeijer & Winterbourne, 2021; Buehler, 2016; VanderMolen & Fortuna, 2021), programas comunitarios (Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021) y conferencias (Evelyn-Wright et al., 2020). Se centran principalmente en el desarrollo de competencias espaciales y soporte para la explicación de conceptos. Se observa que los estudios no se limitan únicamente al ámbito de la escolaridad formal, pues tienen un alcance comunitario.

Al analizar el enfoque de los estudios (Figura 6C), se observa que el 42 % de las publicaciones presentan propuestas y evaluaciones de materiales didácticos (Giraud, 2017; Evelyn-Wright et al., 2020; Molins-Ruano, 2018; Jain, 2018; Hernández Sánchez, 2020; Singhal & Balaji, 2020; Gual-Orti, 2015; Koelemeijer & Winterbourne, 2021; Mcloughlin, 2016; See, 2021), y un 29 % plantean procesos para incorporar tecnología o facilitar el acceso de la misma a estudiantes con discapacidad visual moderada a severa (Bonnet de León, 2020; VanderMolen & Fortuna, 2021; Clements, 2016; Götzelmann, 2018; Kostakis et al., 2015; LeSuer, 2019). Es decir, el 71 % de las propuestas discuten el uso de la tecnología desde la perspectiva del producto y/o proceso de aplicación. El resto de las investigaciones presenta un análisis desde la perspectiva del profesor (Buehler, 2016), alumno (Smith, 2020; Grumman & Carroll, 2019; Wedler, 2012; Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021; Wu, 202) o personal administrativo (Buehler, 2016), discutiendo los beneficios, retos y limitaciones del uso e implementación de la tecnología.

Finalmente, cuando se analiza el tipo de aplicación (figura 6D), se determina que casi un 77 % se enfoca en talleres prácticos (Smith, 2020;

Grumman & Carroll, 2019; Wedler, 2012; Wu, 202; Bonnet de León, 2020; Giraud, 2017; Jain, 2018; Hernández Sánchez, 2020; Singhal & Balaji, 2020; Gual-Orti, 2015; Götzelmann, 2018; Mcloughlin, 2016; Kostakis et al., 2015; See, 2021) o teórico prácticos (Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021; Molins-Ruano, 2018; Buehler, 2016). Esta tendencia podría indicar la búsqueda de participación de los estudiantes con discapacidad visual moderada a severa, que es coherente con la adherencia a los pilares de la instrucción explícita. El resto de publicaciones se centran en demostraciones de conceptos (Clements, 2016; Koelemeijer & Winterbourne, 2021; Evelyn-Wright et al., 2020; Buehler, 2016; LeSuer, 2019).

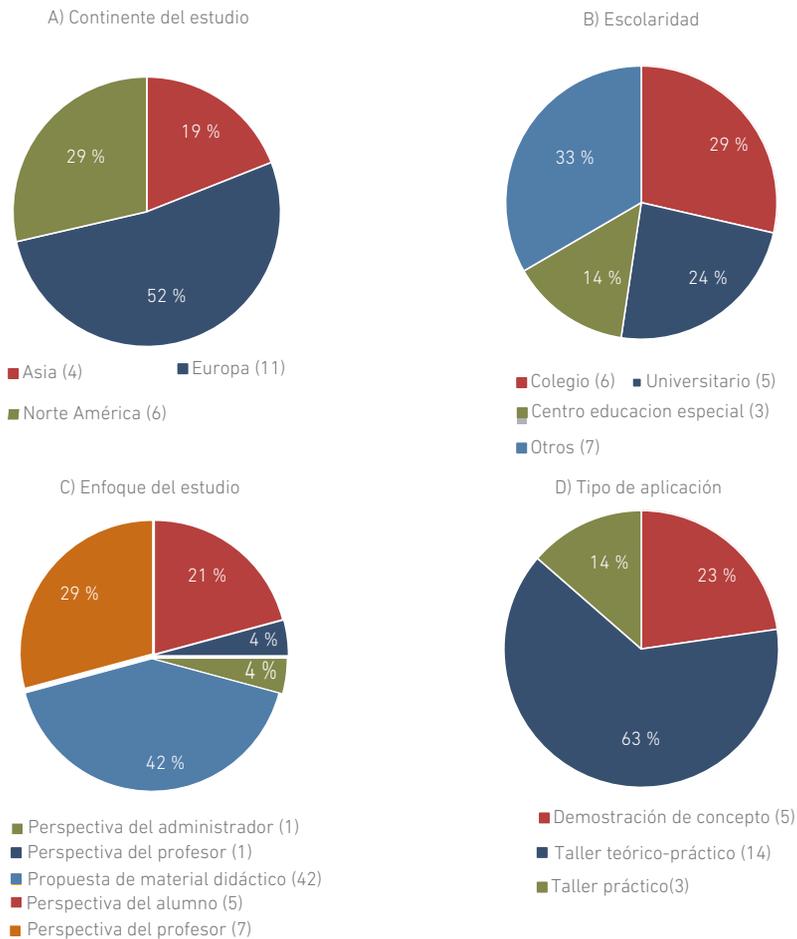
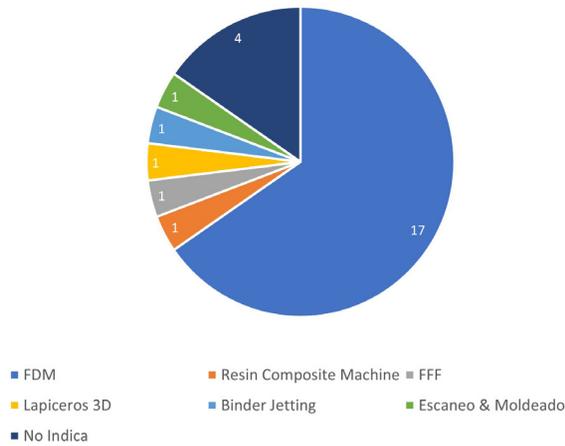


Figura 6
Caracterización inicial de artículos principales

En cuanto al análisis de las características técnicas, es interesante notar que en quince de los artículos se menciona el uso de tecnología de modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modelin-FDM) (VanderMolen & Fortuna, 2021; Koelemeijer & Winterbourne, 2021; Evelyn-Wright et al., 2020; Grumman & Carroll, 2019; Giraud, 2017; Hernández Sánchez, 2020; Singhal & Balaji, 2020; Gual-Orti, 2015; Götzelmann, 2018; Mcloughlin, 2016; Molins-Ruano, 2018; Buehler,2016; Clements, 2016; Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021; Bonnet de León, 2020). Tal selección se puede deber a diversos factores, como el bajo costo de los equipos e insumos, la accesibilidad, un menor requerimiento de conocimiento técnico, entre otros. Asimismo, se mencionan otras tecnologías de impresión 3D, como binder jetting (Clements, 2016), resine composite (Buehler,2016), FFF (Díaz-Navarro & Sánchez de La Parra-Pérez, 2021) y lapiceros 3D (Wu, 202). En el caso del trabajo de Bonnet de León (2020), también se mencionan las tecnologías de fabricación digital de escaneo 3D y moldeo.

Figura 7
Evaluación de la tecnología utilizada



Cabe resaltar que tres de las investigaciones se alinean con la educación inclusiva (Tabla 6), donde estudiantes regulares y personas con discapacidad visual moderada a severa puedan interactuar y cumplir los objetivos de aprendizaje al mismo ritmo. Tal es el caso de los trabajos de Singhal y Balaji (2020) y Grumman y Carroll (2019), quienes proponen el uso de maquetas para la explicación de

conceptos químicos, donde el planteamiento no solo da accesibilidad a los estudiantes con discapacidad visual, sino que ayuda a alumnos regulares por medio de una interacción multisensorial. La investigación de Evelyn-Wright et al. (2020) es un caso similar, donde las maquetas paleopatológicas también son herramientas que pueden utilizar alumnos regulares y con discapacidad visual.

Tabla 6

Artículos centrados en educación inclusiva

N.º	Autor	Título	Año	Materia
A2	Singhal, I., & Balaji, B. S.	Creating Atom Representations Using Open-Source, Stackable 3D Printed Interlocking Pieces with Tactile Features to Support Chemical Equation Writing for Sighted and Visually Impaired Students	2020	Química
A4	Grumman, A. S., & Carroll, F. A.	3D-Printing Electron Density Isosurface Models and High-Resolution Molecular Models Based on van der Waals Radii	2019	Química
A10	Evelyn-Wright, S., Dickinson, A., & Zakrzewski, S.	Getting to grips with 3D printed bones: Using 3D models as 'diagrams' to improve accessibility of palaeopathological data	2020	Osteoarqueología

Análisis del segundo grupo de artículos

En este segundo grupo analizamos la posible ampliación del uso de la impresión 3D en entornos distintos al educativo, pero que tienen potencial para ser aplicados en la enseñanza y presentan características innovadoras o distintivas no registradas en las publicaciones revisadas previamente. De los trece artículos revisados,³ se identificaron cuatro aplicaciones que, llevadas al ámbito educativo, pueden aportar a los pilares de la instrucción explícita.

³ Revisar anexos en el link digital.

Se observa que tres de ellos discuten la incorporación de procesos en los que interviene la impresión 3D, aunque el enfoque de su aplicación varía significativamente. El trabajo de Aflatoony (2021) presenta una metodología de diseño de prototipos de tecnología asistida y enfocada en usuarios con discapacidad visual que puede ser replicada para la creación de materiales didácticos. Tomando como base el marco de referencia CoDEA, desarrollado por los autores, se tiene el potencial de diseñar y fabricar materiales didácticos para las necesidades académicas específicas de estudiantes y profesores. Si bien este proceso no afecta directamente a la instrucción explícita, sí hay la capacidad de elaborar materiales específicos que sean empleados en la enseñanza, independientemente de demostraciones de concepto o talleres prácticos, y que impactan en los pilares.

Por otro lado, los trabajos de Nicot (2021) y Lounnas (2014) presentan procesos para facilitar la presentación de información de manera táctil. La propuesta de Nicot (2021) discute la utilización de modelos de ultrasonidos prenatales impresos en 3D para personas invidentes. Lo que sobresale de este trabajo es la transformación de la información que inicialmente no es directamente percibida por los sentidos, como es el caso de un bebe dentro de la madre, hacia una representación gráfica y luego táctil. Este proceso de conversión de la presentación de la información facilitaría la accesibilidad de los estudiantes a conceptos o fenómenos. Tal aplicación no solo simplificaría la presentación de información compleja en modelos que fomenten la discusión, sino también en talleres prácticos que fortalezcan el proceso de aprendizaje. Es importante mencionar la utilización de sensores (ecógrafos, escáneres, etcétera) que, en este caso, conviertan la data física en digital, para que luego sea convertida en un archivo que pueda ser impreso en 3D.

Por su parte, Lounnas (2021) presenta AsteriX-BVI, un servidor web que detecta gráficos 2D de moléculas de bajo peso y los convierte en archivos 3D imprimibles. La capacidad de generar modelos tridimensionales a partir de gráficos bidimensionales facilitaría la creación de materiales didácticos para diversos talleres teórico-prácticos. Sin embargo, la limitante para este tipo de trabajos es el desarrollo de un sistema inteligente que realice la conversión universal de imágenes a objetos tangibles.

Respecto al trabajo de Memeo (2021), se introduce TOMA3, un ratón de computadora táctil fabricado con impresión 3D para enseñar

gráficos tridimensionales a personas con discapacidad visual. A diferencia de las publicaciones anteriores, lo significativo de este estudio es la presentación de un producto que puede incorporarse al sector educación no solo para la enseñanza de geometría, sino también para la representación virtual de objetos que tengan formas simples. Esta clase de tecnologías asistidas son de gran utilidad en el aula para incrementar el interés del alumno por medio de actividades que lo animen a participar.

CONCLUSIONES

Luego de revisar la literatura, se comprueba que hay un limitado número de publicaciones sobre la aplicación de las tecnologías de fabricación digital en el proceso de aprendizaje de personas con discapacidad visual moderada a severa. Es más, la recopilación de literatura arrojó que el concepto de “fabricación digital” tiene una relación casi nula con la educación, encontrándose solo dos artículos sobre el tema. Sin embargo, al realizar la búsqueda de publicaciones sobre la base de las principales tecnologías de fabricación digital, se halló que la impresión 3D ha sido aplicada en el contexto educativo, abarcando estudiantes con o sin discapacidad visual moderada a severa. Esto sugiere que la impresión 3D se independiza de las tecnologías de fabricación digital como herramienta en la educación. Es necesario profundizar en las investigaciones para determinar el porqué de la preferencia por esta tecnología, pudiéndose evaluar la accesibilidad, el costo de implementación, la curva de aprendizaje, el impacto en el proceso educativo desde un enfoque pedagógico, entre otros factores.

El análisis de los artículos de impresión 3D relacionados con su aplicación en el ámbito educativo revela que un 71 % se centra en una perspectiva de producto o proceso, obviando el aspecto pedagógico. Si bien los artículos realizan experimentos para calcular el impacto de sus propuestas en el aula, enfocándose primordialmente en la capacidad de aprendizaje o desarrollo de una competencia en particular, no se evalúan desde una perspectiva formativa sobre la base de teorías o metodologías de enseñanza. Ello deja una brecha de investigación que permite validar los beneficios de la impresión 3D con sustento en tendencias pedagógicas.

Al profundizar la evaluación de las publicaciones, se observó que la impresión 3D se implementa en el aula a partir de dos modalidades:

en primera instancia, el 68 % de los artículos la describen como una herramienta para fabricar material didáctico; el otro 32 % explora su utilización en actividades guiadas. Es posible intuir que la impresión 3D es más utilizada como medio de fabricación de modelos didácticos, debido a que el profesor puede contar con soporte técnico para la elaboración e impresión de los diseños. En cambio, el manejo de impresoras 3D por parte de alumnos con discapacidad visual moderada a severa en el aula supone diversos retos, tales como el desarrollo de diseños imprimibles, el manejo de la interfaz de la impresora 3D, etcétera. Es necesario realizar una mayor investigación para ahondar en los distintos desafíos que puede suponer la implementación de esta clase de impresora.

Por otro lado, y desde una perspectiva técnica, el 77 % de las aplicaciones emplean tecnología de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), aunque también se han revisado casos en los que se mencionan otras tecnologías, como lapiceros 3D, escaneo y modelado, etcétera. Cabe preguntarse el porqué de esta preferencia, pudiéndose evaluar no solo aspectos de costos, sino también otros de mayor interés, como la curva de aprendizaje, el soporte técnico, el costo y el acceso a insumos y la utilidad en el entorno educativo.

La instrucción explícita ofrece una oportunidad para integrar a estudiantes con discapacidad en la educación regular, y la impresión 3D tiene potencial para ocupar un rol preponderante como facilitadora en la generación de materiales, actividades y/o procesos multisensoriales que pueden beneficiar transversalmente a estudiantes regulares y a personas con discapacidad visual moderada a severa. A partir de la evaluación realizada, se observó que el 77 % de las propuestas educativas se enfocaban en la realización de actividades teórico-prácticas y prácticas, adhiriéndose a los cinco pilares de la instrucción explícita.

Es importante resaltar que el 86 % de las investigaciones se centran en estudiantes con discapacidades, especialmente visuales, y solo el 14 % discuten realmente un enfoque inclusivo, donde alumnos con y sin discapacidad ejecutan juntos la misma actividad. En tal sentido, el aporte de la impresión 3D en la educación inclusiva requiere ser estudiado para comprender mejor los beneficios, retos y limitantes que esta tecnología representa.

Finalmente, a partir de la investigación se observa que no hay información suficiente para determinar el rol de la fabricación digital

en la educación inclusiva. Sin embargo, específicamente para la impresión 3D, se puede vislumbrar el potencial que esta tiene desde la perspectiva de la instrucción explícita. De momento, los trabajos que se han realizado son esfuerzos dispersos que evalúan el potencial de las propuestas desde una mirada innovadora, faltando introducir un mayor enfoque pedagógico.

REFERENCIAS

- Bonnet de León, A., Meier, C., & Saorin, J. L. (2020). Ceramic workshop adapted with 3D technologies to improve the self-esteem of people with disabilities. *Sustainability*, 12(21), 9063.
- Bouck, E. (2010). Technology and students with disabilities: does it solve all the problems? En *Current issues and trends in special education: research, technology, and teacher preparation* (pp. 91-104). Emerald Group Publishing.
- Brulé, E., & Bailly, G. (2021, mayo). "Beyond 3D printers": understanding long-term digital fabrication practices for the education of visually impaired or blind youth. CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21). <https://doi.org/10.1145/3411764.3445403>
- Buehler, E., Comrie, N., Hofmann, M., McDonald, S., & Hurst, A. (2016). Investigating the implications of 3D printing in special education. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 8(3). <https://doi.org/10.1145/2870640>
- Clements, D. L., Sato, S., & Fonseca, A. P. (2016). Cosmic sculpture: a new way to visualize the cosmic microwave background. *European Journal of Physics*, 38(1), 015601.
- D'Aveni, R. A. (2013, marzo). 3-D printing will change the world. *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2013/03/3-d-printing-will-change-the-world>
- De Couvreur, L., Detand, J., & Goossens, R. (2011). The role of flow experience in co-designing open-design assistive devices. *Include '11*.
- Díaz-Navarro, S., & Sánchez de La Parra-Pérez, S. (2021). Human evolution in your hands. Inclusive education with 3D-printed typological replicas. *Journal of Biological Education*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/00219266.2021.1909635>
- Eisenhardt, K. M. (1989, octubre). Building theories from case study research. *The Academy of Management Review*, 4, vol. 14, 532-550.
- Evelyn-Wright, S., Dickinson, A., & Zakrzewski, S. (2020). Getting to grips with 3D printed bones: using 3D models as "diagrams" to improve accessibility of palaeopathological data. *Papers from the Institute of Archaeology*, 29(1), 1-10.

- Fachinetti, T. A., & Carbone Carneiro, R. U. (2017). A tecnologia assistiva como facilitadora no processo de inclusão: das políticas públicas a literatura. *Revista on Line de Política e Gestão Educacional*, 21(esp3), 1588-1597. <https://doi.org/10.22633/rpge.v21.n.esp3.2017.10093>
- Ford, S., & Minshall, T. (2019). Where and how 3D printing is used in teaching and education. *Additive Manufacturing*, 25, 131-150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>
- Fraser, W. J., & Maguvhe, M. O. (2008). Teaching life sciences to blind and visually impaired learners. *Journal of Biological Education*, 42(2), 84-89.
- García Palacios, E. M., González Galbarte, J. C., & López Cerezo, J. A. (2001). *Ciencia, tecnología y sociedad: una aproximación conceptual*. OEA.
- Giraud, S., Brock, A. M., Macé, M. J. M., & Jouffrais, C. (2017). Map learning with a 3D printed interactive small-scale model: improvement of space and text memorization in visually impaired students. *Frontiers in Psychology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00930>
- Gordy, C. L., Sandefur, C. I., Lacara, T., Harris, F. R., & Ramírez, M. V. (2020). Building the lac operon: a guided-inquiry activity using 3D-printed models. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 21(1), 60. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v21i1.2091>
- Götzelmann, T. (2018). Autonomous selection and printing of 3D models for people who are blind. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 11(3). <https://doi.org/10.1145/3241066>
- Grumman, A. S., & Carroll, F. A. (2019). 3D-printing electron density isosurface models and high-resolution molecular models based on Van der Waals Radii. *Journal of Chemical Education*, 96(6), 1157-1164.
- Gual-Ortí, J., Puyuelo-Cazorla, M., & Lloveras-Macia, J. (2015). Improving tactile map usability through 3D printing techniques: an experiment with new tactile symbols. *Cartographic Journal*, 52(1), 51-57. <https://doi.org/10.1179/1743277413Y.0000000046>
- Hamidi, F. (2019). DIY Assistive technology prototyping platforms: an international perspective. *IEEE Pervasive Computing*, 18(4), 12-16. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2019.2947749>
- Hamidi, F., Baljko, M., Kunic, T., & Feraday, R. (2014). Do-it-yourself (DIY) assistive technology: a communication board case study. *International Conference on Computers for Handicapped Persons ICCHP 2014: Computers Helping People with Special Needs* (pp. 287-294). <http://www.makeymakey.com/forums>
- Hernández Sánchez, A., Torre Sánchez, C. E., Mejía Sánchez, J. M., & Córdova Moreno, L. G. (2020). Maquetas hápticas en 3D para niños con discapacidad visual. Un acercamiento a la ciudad histórica. *Bitácora Urbano Territorial*, 30(2), 47-60. <https://doi.org/10.15446/BITACORA.V30N2.81771>

- Hollier, S. (2017, April 2). Technology, education, and access: a “fair go” for people with disabilities. *Proceedings of the 14th Web for All Conference, W4A 2017*. <https://doi.org/10.1145/3058555.3058557>
- Hook, J., Verbaan, S., Durrant, A., Olivier, P., & Wright, P. (2014). A study of the challenges related to DIY assistive technology in the context of children with disabilities. *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques, DIS* (pp. 597-606). <https://doi.org/10.1145/2598510.2598530>
- Horowitz, S. S., & Schultz, P. H. (2014). Printing space: using 3D printing of digital terrain models in geosciences education and research. *Journal of Geoscience Education*, 62(1), 138-145. <https://doi.org/10.5408/13-031.1>
- Hughes, C. A., Morris, J. R., Therrien, W. J., & Benson, S. K. (2017). Explicit instruction: historical and contemporary contexts. *Learning Disabilities Research and Practice*, 32(3), 140-148. <https://doi.org/10.1111/lrdp.12142>
- Hurst, A., & Tobias, J. (2011). Empowering individuals with Do-it-yourself assistive technology. En Association for Computing Machinery (Ed.), *ASSETS'11/3th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*.
- Jain, T., Christy, B., Das, A. V., Bhaumik, D., & Satgunam, P. (2018). Fittle: a novel braille toy. *Optometry and Vision Science*, 95(9), 902-907. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001268>
- Jo, W., Jand, H. I., Harianto, R. A., So, J. H., Lee, H., Lee, H. J., & Moon, M.-W. (2016). Introduction of 3D printing technology in the classroom for visually impaired students. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 110(2), 115-121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/0145482X1611000205>
- Koelemeijer, P., & Winterbourne, J. (2021). 3D Printing the world: developing geophysical teaching materials and outreach packages. *Frontiers in Earth Science*, 9, 297.
- Kostakis, V., Niaros, V., & Giotitsas, C. (2015). Open-source 3D printing as a means of learning: an educational experiment in two high schools in Greece. *Telematics and Informatics*, 32, 118-128.
- Leria, L. A., Benítez, P., & Fraga, F. J. (2021). Assistive technology in large-scale assessments for students with visual impairments: a systematic review and recommendations based on the Brazilian reality. *Education and Information Technologies*, 26(3), 3543-3573. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10419-6>
- McLeskey, J., Barringer, M.-D., Billingsley, B., Brownell, M., Jackson, D., Kennedy, M., Lewis, T., Maheady, L., Rodriguez, J., Scheeler, M. C., Winn, J., & Ziegler, D. (2017). *High-leverage practices in special education*. Council for Exceptional Children & CEEDAR Center.
- Mcloughlin, L., Fryazinov, O., Moseley, M., Sanchez, M., Adzhiev, V., Comninos, P., & Pasko, A. (2016). Virtual sculpting and 3D printing for young people with disabilities. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 36(1), 22-28.

- Molins-Ruano, P., Gonzalez-Sacristan, C., & García-Saura, C. (2018). Phogo: a low cost, free and "maker" revisit to Logo. *Computers in Human Behaviour*, 80, 428-440. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.09.029>
- Monllor, J., & Soto-Simeone, A. (2020). The impact that exposure to digital fabrication technology has on student entrepreneurial intentions. *International Journal of Entrepreneurial Behaviour and Research*, 26(7), 1505-1523. <https://doi.org/10.1108/IJEER-04-2019-0201>
- Neira, E. A. S., Salinas, J., & Crosetti, B. de B. (2017). Emerging technologies (ETs) in education: a systematic review of the literature published between 2006 and 2016. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 12(5), 128-149. <https://doi.org/10.3991/ijet.v12i05.6939>
- Okerlund, J., & Wilson, D. (2019). DIY assistive technology for others: considering social impacts and opportunities to leverage HCI techniques. *ACM International Conference Proceeding Series* (pp. 152-155). <https://doi.org/10.1145/3311890.3311914>
- Parry-Hill, J., Shih, P. C., Mankoff, J., & Ashbrook, D. (2017). Understanding volunteer AT fabricators: opportunities and challenges in DIY-AT for others in e-NABLE. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2017-May* (pp. 6184-6194). <https://doi.org/10.1145/3025453.3026045>
- Qahmash, A. I. M. (2018). The potentials of using mobile technology in teaching individuals with learning disabilities: a review of special education technology literature. *TechTrends*, 62(6), 647-653. <https://doi.org/10.1007/s11528-018-0298-1>
- Ramírez, M. V., & Gordy, C. L. (2020). Stem Build: an online community to decrease barriers to implementation of inclusive tactile teaching tools. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 21(1), 05. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v21i1.1963>
- Riccomini, P. J., Morano, S., & Hughes, C. A. (2017). Big ideas in special education: specially designed instruction, high-leverage practices, explicit instruction, and intensive instruction. *Teaching Exceptional Children*, 50(1), 20-27. <https://doi.org/10.1177/0040059917724412>
- Rogers, W., & Johnson, N. (2018). Strategies to include students with severe/multiple disabilities within the general education classroom. *Physical Disabilities: Education and Related Services*, 37(2), 1-12. <https://doi.org/10.14434/pders.v37i2.24881>
- Santhakumar, R., Kaliyaperumal, K., & Louies, S. (2020). Scientometric profile of the University of Madras: the mother of South Indian universities. *Desidoc. Journal of Library & Information Technology*, 40(3), 185-191.
- Sec. 300.5 Assistive Technology Device, Pub. L. No. Pub. L. No. 108-446, 20 U. S. C. 1400 et seq (2004). <https://sites.ed.gov/ideal/regs/b/a/300.5>
- Shah, S. R. U., & Mahmood, K. (2017). *Review of Google Scholar, Web of Science, and Scopus search results: the case of inclusive education research*. Library Philosophy and Practice.

- Shaheen, N. L., & Lohnes Watulak, S. (2019). Bringing disability into the discussion: examining technology accessibility as an equity concern in the field of instructional technology. *Journal of Research on Technology in Education*, 51(2), 187-201. <https://doi.org/10.1080/15391523.2019.1566037>
- Singhal, I., & Balaji, B. S. (2020). Creating atom representations using open-source, stackable 3D printed interlocking pieces with tactile features to support chemical equation writing for sighted and visually impaired students. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 118-124. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00255>
- Smith, D. W., Lampley, S. A., Dolan, B., Williams, G., Schleppenbach, D., & Blair, M. (2020). Effect of 3D manipulatives on students with visual impairments who are learning chemistry constructs: a pilot study. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 114(5), 370-381. <https://doi.org/10.1177/0145482X20953266>
- Stangl, A., Kim, J., & Yeh, T. (2014). 3D printed tactile picture books for children with visual impairments: a design probe. *ACM International Conference Proceeding Series* (pp. 321-324). <https://doi.org/10.1145/2593968.2610482>
- Stauter, D. W., Prehn, J., Peters, M., Jeffries, L. M., Sylvester, L., Wang, H., & Dionne, C. (2019). Assistive technology for literacy in students with physical disabilities: a systematic review. *Journal of Special Education Technology*, 34(4), 284-292. <https://doi.org/10.1177/0162643419868259>
- VanderMolen, J., & Fortuna, J. (2021). 3D printing as a teaching tool for people who are blind and visually impaired. *The American Journal of Occupational Therapy*, 75, supplement 2, 7512505211p1-7512505211p1.
- Waltman, L., Van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629-635. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.07.002>
- Wedler, H. B., Cohen, S. R., Davis, R. L., Harrison, J. G., Siebert, M. R., Willenbring, D., Hamann, C. S., Shaw, J. T., & Tantillo, D. J. (2012). Applied computational chemistry for the blind and visually impaired. *Journal of Chemical Education*, 89(11), 1400-1404. <https://doi.org/10.1021/ed3000364>
- WHO (2021, 14 de octubre). *Blindness and vision impairment*. World Health Organization Newsroom-Fact Sheets. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
- Wu, C. F., Wu, H. P., Tu, Y. H., & Yeh, I. T. (2020). 3D pen tactile pictures generated by individuals with visual impairments. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 114(5), 382-392. <https://doi.org/10.1177/0145482X20954759>

