

Desarrollo de Herramientas de Educación Convivencial en el Siglo XXI: una propuesta desde las ideas de Paulo Freire y Ivan Illich

Building Convivial Educational Tools in the 21st Century: a Proposal based on the Ideas of Freire and Illich

Ana Jofre

email: jofrea@sunypoly.edu
SUNY Polytechnic, Utica. USA

Kristina Boylan

email: boylank@sunypoly.edu
SUNY Polytechnic, Utica. USA

Ibrahim Yucel

email: yuceli@sunypoly.edu
SUNY Polytechnic, Utica. USA

Abstract: Ivan Illich acuñó el término «herramientas para la convivencia» con el que alude a las herramientas que alientan la creatividad y expresión individuales y que pueden adaptarse a distintas necesidades y situaciones. Este trabajo describe el diseño de una herramienta interactiva y adaptable cuyas aplicaciones incluyen la educación y el juego, y lo contextualiza en relación con la obra de Illich. El Tablero Interactivo y Colaborativo para Educación (Collaborative Interactive Tabletop for Education – CITE), que se encuentra en fase de desarrollo en SUNY Polytechnic, permite al usuario manipular información digital mediante la manipulación de objetos de portátiles de sobremesa. Se cree que dichas interfaces, conocidas como Interfaces Tangibles para el Usuario (Tangible User Interfaces – TUI), presentan ventajas significativas sobre las interfaces de pantalla tradicionales. Por ejemplo, se ha demostrado que han aumentado considerablemente el comportamiento colaborativo entre los usuarios. Sin embargo, las TUI aún no han sido adoptadas a gran escala, tal vez porque los diseños más modernos requieren de algún tipo de hardware especializado. Nuestro enfoque apunta

a crear un sistema en su lugar, un conjunto de instrucciones verificadas en paquetes de software de licencia abierta para adaptar cualquier combinación estándar de hardware informático en un tablero interactivo personalizable.

Palabras clave: Diseño; Tecnología educacional; Educación inclusiva; Programa informático didáctico.

Abstract: Ivan Illich famously coined the term «tools for conviviality» in which he refers to tools that encourage individual creativity and expression, and that can be adapted to people's needs and situations. This paper describes the design of an interactive adaptable tool, whose applications include education and game play, and contextualizes it within Illich's framework. The Collaborative Interactive Tabletop for Education (CITE), currently being developed at SUNY Polytechnic, allows users to manipulate digital information through the manipulation of hand-held tabletop objects. Such interfaces, known as Tangible User Interfaces (TUI), are believed to have significant advantages over traditional screen-based interfaces. For example, they have been shown to measurably increase collaborative behavior among users. However, TUIs have not been widely adopted, perhaps because most current TUI designs require some kind of specialized hardware. Our approach is to instead create a system, a set of verified instructions along with open-license software packages, for adapting any combination of standard computer hardware into a highly customizable interactive tabletop.

Keywords: Design; Educational Technology; Inclusive Education; Educational Software.

Received: 07/05/2021

Accepted: 15/12/2021

1. Introducción

Este trabajo describe el desarrollo de los fundamentos teóricos del Tablero Interactivo y Colaborativo para Educación (Collaborative Interactive Tabletop for Education – CITE), que viene a ser una interfaz tangible que permite al usuario manipular información digital mediante la manipulación de objetos de portátiles de sobremesa. Está organizado de la manera siguiente: la parte 1 proporciona el marco teórico, que incluye teorías pedagógicas que informan nuestro diseño, las teorías de aprendizaje que informan nuestra evaluación del sistema y un repaso de otros trabajos realizados con interfaces tangibles para el usuario; la parte 2 describe el propio sistema, la fundamentación de nuestro diseño y nuestros planes de evaluación.

2. Marco Teórico

2.1. Teorías Pedagógicas que Informan Nuestro Diseño

El proyecto del Tablero Interactivo y Colaborativo para Educación (CITE) está motivado por la idea de «servicio de referencia con fines educativos», contribuyendo al desmontaje de escenarios en los que los humanos se ven forzados a adaptarse a dispositivos y procesos digitales, en lugar de hacer que sean los dispositivos y procesos los que se adapten a sus necesidades, deseos e impulsos creativos (Illich, 2000). También queremos crear una herramienta que aliente la convivencia, que, como explica Illich, «pueda ser usada fácilmente por cualquiera, con la frecuencia deseada, para el cumplimiento de una función definida por el usuario» (Illich, 2001).

La *necesidad* de dispositivos digitales y el aprendizaje por medios digitales es una traba común en el sector educativo, tanto en la educación convencional como fuera de los sistemas escolares institucionales. Se nos dice que los niños deben aprender a usar estos dispositivos (ya sean computadoras, tabletas, internet, herramientas de codificación u otras manifestaciones tangibles de tecnología de comunicación digital), o de lo contrario no podrán estar actualizados, adelantarse a los otros o ser exitosos. Identificamos las limitaciones de este modo de pensar, tanto conceptuales como tangibles, y ofrecemos sugerencias para usar un sistema digital con menos limitaciones.

2.1.1. *Conceptualización de la propuesta*

Las representaciones contemporáneas de la educación nos podrían llevar a creer que puede demostrarse o manifestarse competencia en cualquier área de conocimiento tan solo recurriendo a Google o a Wikipedia para encontrar la respuesta, y que, al trasladar esa respuesta con la certeza de los concursantes televisivos, ¡pum!, demostramos que somos personas cultivadas. Esta actitud dominante perpetúa la noción de que educarse consiste en adquirir la capacidad de regurgitar una respuesta sucinta, de que sólo hay una respuesta, de que esta respuesta se encuentra online y, por lo tanto, las herramientas digitales están para ayudarte a buscarla. En este modelo el individuo es juzgado o calificado en base a una respuesta «correcta», en lugar de por sus capacidades de interpretar o solucionar problemas, sin entrar a considerar el pensamiento crítico sobre el origen de determinada respuesta (Counsell et al., 2009; Tognoli & Chavez Gumaraes, 2019). Una de las consecuencias de este modo de pensar es que queda poco margen para el uso de muchas de nuestras herramientas digitales de formas más abiertas y singulares.

Como ya apuntaba Illich en 1983, el uso de dispositivos informáticos tiene el potencial de empobrecer la relación de las personas con el conocimiento, así como su relación con el paisaje físico. En su ensayo *El Silencio es un Bien Comunal* (Illich, 1983) observa que:

el acceso al micrófono determinaría qué voces se magnifican. El silencio ahora dejaba de ser un bien común, para convertirse en un recurso por el que compiten los altoparlantes. El propio idioma se ha transformado, pasando de ser algo local a ser un recurso nacional de comunicación. A medida que el confinamiento aumentaba la productividad nacional al negar a los individuos tener sus propias ovejas, así la invasión de los altoparlantes ha destruido ese silencio que hasta ahora permitía a cada hombre y mujer un espacio para su propia voz, igual a las otras. Ahora quien no tiene acceso a un altoparlante está silenciado.

Muchos modelos de dispositivos digitales y aprendizaje replican este problema. Las respuestas precocinadas y su testeo estandarizado y automatizado ocupan el lugar de otros modelos de consulta y discusión de los resultados.

Además, la presión de ser capaz de encontrar «la respuesta» en el mundo digital se puede acentuar en el caso de personas con problemas de visión o cognitivos y cuyos puntos fuertes se encuentren fuera de las métricas convencionales que miden la capacidad verbal y matemática¹. En otras palabras, ¿esa respuesta, o los componentes que cualquiera podría usar para formular una respuesta, está disponible en formatos accesibles? Muy a menudo los estudiantes con problemas visuales o cognitivos no logran obtener información digital de forma directa ni instantánea, sino que la reciben con distintas capas de interpretación. Pese a las normativas y recomendaciones existentes, los informes del sector de las páginas web indican que hasta el 70% de ellas son inaccesibles para personas con problemas visuales (Wetteman & White, 2019)

La tecnología existe para hacer más accesibles las interfaces visuales y digitales, como es el caso de los lectores de pantalla y los lectores Braille, pero estas interfaces deben estar diseñadas para funcionar con tecnologías asistenciales y pensando en sus usuarios (Henry, 2018). Dicho diseño también debería incluir elementos de democratización, como por ejemplo la capacidad de que el usuario pueda modificarlos, replantearlos y rediseñarlos, o usarlos como parte de un nuevo diseño (Feenberg, 2002, pp. 153-158).

Como indican Drick Boyd (2016) y Michael Glassman (2018) la educación basada en internet se ha limitado a emular el énfasis de las clases convencionales en la acumulación de conocimientos, la recurrencia acrítica a determinadas fuentes y la repetición, sobre la base de su supuesta escasez de recursos, llevando este modelo a extremos perjudiciales. Esto se evidencia en la caída de la ola de entusiasmo por los Cursos Abiertos Masivos Online (Massive Open Online Courses – MOOC) y por las voces que decían que la reproducción de contenidos grabados y la calificación automática de las tareas asignadas alcanzarían como herramienta de aprendizaje en un momento de escasez de recursos humanos y materiales (Glassman, 2018). Sin embargo, este no es el único resultado posible de las iniciativas con plataformas de educación digital. Como dicen Richard Kahn y Douglas Kellner (Kahn & Kellner, 2007), el aprendizaje se acentúa cuando se adopta un enfoque de «ambigüedad objetiva» que no sea demasiado tecnofílico pero tampoco tecnofóbico. Los malos diseños y los malos usos de la tecnología pueden solucionarse y es posible facilitar el acceso al aprendizaje mediante el diseño crítico, la implicación y la interacción real entre alumnos (Boyd, 2016; Glassman, 2018).

Como trataremos más adelante, las tecnologías asistenciales funcionales y bien mantenidas son de importancia vital a la hora de crear múltiples puntos de acceso al aprendizaje y a otras formas de crecimiento (Holmes, 2018). Sin embargo, deben ir acompañadas de «herramientas para la convivencia» (Bruno Jofre & Igelmo Zaldivar, 2012; Illich, 2001), por ejemplo, medios que hagan del aprendizaje un acto social, algo que tenga un valor intrínseco más allá de la realización de tareas y que incluso llegue a ser, como dedujo Illich en sus propias indagaciones posteriores, una herramienta transformativa para lograr objetivos educativos o políticos (Bruno Jofre & Igelmo Zaldivar, 2012). En este caso, tener la libertad de escoger con quién nos asociamos nos da una mayor libertad de participación sin tener que lidiar con ningún

¹ Esta observación se basa en informes anecdóticos de maestros y consejeros.

o con casi ningún traductor humano y/o tecnológico para tomar parte en procesos como la visualización y comunicación de datos.

2.1.2. Elementos Tangibles

Las invitaciones superficiales a «volverse digital» para mejorar el aprendizaje son ahistóricas, así como una forma de acentuar la exclusión. Diseñadores inclusivos como Kat Holmes han notado que cuando las computadoras, dispositivos portátiles, controladores, programas y juegos han sido diseñados por diseñadores que trabajan pensando en sus propias capacidades, hábitos y preferencias emerge un patrón de exclusión (Holmes, 2018, p. 50). Esto no solo replica la exclusión de personas con distintas capacidades, sino que cuando los dispositivos no admiten sugerencias de sus usuarios ni permiten una mínima variabilidad en su uso imponen una nueva rigidez de pensamiento y comportamiento (Holmes, 2018, pp. 100-101). En contraste, las tecnologías que admiten (o que pueden admitir) la adaptación o modificación por sus usuarios tienen un mayor potencial de minimizar el determinismo en su diseño y uso (Feenberg, 2002; Holmes, 2018).

Muchas interfaces digitales, así como los medios imperantes de visualización de datos, excluyen a personas con capacidades diferentes, por ejemplo, en sus formas de recepción y análisis de información visual. En demasiadas ocasiones sucede que las comunidades de discapacitados visuales se ven forzados a tener que esperar para recibir una interpretación precocinada de esos procesos de aprendizaje: texto alt., descripciones de imágenes y descripciones matemáticas del trabajo de otros. De este modo pierden la ocasión de involucrarse en el proceso de interpretación de la información (Braille Authority of North America, 2010). Además, muchas visualizaciones de datos excluyen interpretaciones de la relación entre los datos en términos no visuales.

Esta visión estrecha de la visualización de datos privilegia a aquellos que saben trabajar con conceptos abstractos proyectados visualmente en planos bidimensionales y replica la exclusión en base a la medida de la inteligencia que implican estas acciones, ya se reproduzcan en papel o en una pantalla. Dicha medida excluye la posibilidad de aprender mediante el movimiento y las relaciones espaciales, un tipo de inteligencia a menudo infravalorada pero muy necesaria. Pasada por alto por las mediciones convencionales de la capacidad verbal y matemática, la capacidad espacial también se relaciona con estas con menos frecuencia de lo que las primeras se relacionan entre sí, dando como resultado el que algunos de los alumnos más dotados sean catalogados como «poco prometedores» en base a sus resultados relativamente bajos en otras áreas (Wai et al., 2009). Aunque hay algunas historias «alentadoras» de alumnos infravalorados que llegaron a ganar Premios Nobel, presentar patentes y alcanzaron otros logros similares, muchos más alumnos llegan a asimilar que sus puntos fuertes están desconectados del mundo de los intercambios intelectuales y sociales, o se vuelven totalmente alienados respecto de la educación formal y de las profesiones que requieren un certificado educativo (Lakin & Wai, 2020). Esto resulta de especial interés, pues la inteligencia espacial no sólo puede jugar «un papel único en la asimilación y uso de conocimientos pre-existentes, sino también en el desarrollo de

nuevos conocimientos» (Kell et al., 2013, p. 2835). Crear entornos de aprendizaje adaptables que permitan a los estudiantes experimentar los datos en forma espacial y usar relaciones espaciales para expresar su interpretación de los mismos podría ser un modo de empoderar a los estudiantes con una mejor lectura espacial para que participen y colaboren más activamente en las discusiones y ejercicios que impliquen la representación matemática, verbal y visual bidimensional de datos.

CITE fue diseñada pensando especialmente en hacerla adaptable a las necesidades de grupos o individuos. CITE incluye un conjunto de objetos (tokens, marcadores, tablero, software, computadora), para una mayor facilidad de uso, pero entendido en forma más global es un conjunto de instrucciones a partir de las que los usuarios pueden decidir su propia forma de recolectar, asimilar, analizar, sintetizar y comunicar datos, usando esos objetos en procesos individuales y sociales. CITE ha sido diseñada con múltiples puntos de entrada (vista, sonido, posición) y múltiples formas de compartir contenidos (diagrama, sonido), invitando a los usuarios a implicarse en el proceso y modificar los objetos y sus usos, ampliando la lista de posibilidades y resultados.

2.1.3. Teoría del Aprendizaje y la Evaluación Educativa

CITE está pensada para fomentar un aprendizaje activo y crítico en varios contextos a través de una plataforma digital, entendida según la definición del lingüista, educador y teórico de los videojuegos James Paul Gee (Gee, 2007). Inspirado en parte por la llamada de Freire a entender el pensamiento crítico y la alfabetización como formas de «leer el mundo» y no sólo «leer las palabras» (Gee 2007, p. 43), Gee identifica los principios y diseños de aprendizaje inherentes a los juegos bien diseñados y aboga por su inclusión en las comunidades de estudio, trabajo y sociales. Gee hace especial hincapié en las formas en que los jugadores pueden explorar, identificarse con y contribuir en «grupos de afinidad» para compartir y ampliar su conocimiento a través de plataformas digitales, lo que muestra su potencial de uso como «herramientas de convivencia», como apuntaba Illich, distinta del modelo de electrónico de aislamiento y evaluaciones automáticas.

Por estos motivos nos hemos esforzado para integrar varias de las aportaciones de Gee, fruto de sus años de estudio, práctica educativa y juegos, en el diseño de CITE (2007, *passim* y «36 Principios de Aprendizaje», pp. 211-227). Esperamos que los estudiantes puedan verse asistidos por la capacidad del sistema CITE para promover el «Principio de la Inteligencia Material» (#21, ej. su almacenamiento de datos y la forma de representarlo para que los estudiantes se vean liberados para participar en actividades exploratorias e indagatorias). Asimismo, esperamos que los estudiantes que usen CITE:

- Participen en prácticas que demuestren el «Principio de Sondeo» (#15, ej. el aprendizaje sucede en ciclos de sondeo, planteando hipótesis, experimentando y reafirmandose o ajustándose en nuevas iteraciones);
- Demostrar la «Amplificación del Principio de Contribución» (#10, ej. obtener y comunicar muchos contenidos sobre la base inicial de poca información), y el «Principio de Descubrimiento» (#28, ej. que los juegos

y aplicaciones abiertas pueden comenzar y continuar sobre la base de una dosis mínima de información abstracta;

- Alcanzar logros significativos (#11) proporcionales a la propia contribución, esfuerzo y experiencia;
- Estar motivados para la práctica iterativa (#12) y para un aprendizaje más comprometido (#7);
- Participar en prácticas colaborativas (ej. Principios de «Dispersión» (#34) y «Grupo de Afinidad» (#35)), y reflexivas en torno a ellos mismos (Principios de «Autoconocimiento» (#9) y Conocimiento Cultural (#30-32))
- Demostrar la Transferencia (#29) de conocimientos entre ámbitos semi-óticos, etcétera.

Estas metas están alineadas con algunos de los conceptos y términos usados por Freire e Illich con relación al aprendizaje creativo que crea y fortalece a la comunidad. Estos elementos son parte fundamental del «Principio de Aprendizaje Activo y Crítico» (#1) de Gee, que está en consonancia con las visiones de Freire e Illich sobre el aprendizaje. Por lo tanto, queremos que los usuarios de CITE obtengan o aumenten su capacidad «activa» de trabajar con conceptos incrustados en su experiencia del uso del sistema. En otras palabras, el uso de CITE debería llevar a una mayor capacidad de encontrar significado en, dialogar sobre, representar y comunicar datos, con los estudiantes cambiando las tareas prescritas con parámetros estrictos (Keller, 2012a) por un diseño de visualización de datos más independiente y sofisticado (como los ejercicios más interpretativos proporcionados por Le 2013), así como por la experimentación y el juego.

Por ese motivo esperamos que el uso extendido de CITE permitirá a los estudiantes un progreso efectivo hacia formas genuinas de aprendizaje «crítico», de manera que puedan comparar experiencias y los conceptos que se enmarcan en ellas para aplicarlos en contextos variados. También inspirados por Freire e Illich, somos conscientes de que para continuar con el desarrollo y testeo de CITE será necesario formar comunidades de aprendizaje y relaciones sostenidas en el tiempo con usuarios que sean tanto alumnos como educadores para observar la formación de grupos de afinidad y el desarrollo de destrezas entre ellos, en especial si, como esperamos, algunos trabajan con su programación de código abierto y componentes adaptables para aplicar sus propios cambios.

También es fundamental para nuestros objetivos que CITE incorpore en forma genuina el Principio de Aprendizaje Multimodal (#20) desarrollado en Gee 2007, en sintonía con Holmes 2018 y otros que reclaman un diseño inclusivo y adaptable. Trabajos anteriores con TUI dan pie a una perspectiva alentadora en cuanto al aumento de las prácticas colaborativas así como a una mejora en el rendimiento en actividades de lectura espacial y solución de problemas (Kim & Maher, 2008; Skulmowski et al., 2016). Además, investigaciones recientes apuntan al potencial de los TUI de facilitar una mayor participación activa, comunicación y colaboración entre los usuarios con problemas de visión (Chibaudel et al., 2020). El diseño de CITE incorpora experiencias táctiles, movimiento y desplazamiento espacial y combinaciones de entradas y salidas auditivas, visuales y en Braille. Nuestro

testeo del dispositivo, que se esperaba fuera iterativo y colaborativo, se inspirará en metodologías similares para reafirmar y/o mejorar la implementación de estos principios.

2.1.4. Repaso de interfaces tangibles

Las Interfaces de Usuario Táctiles (TUI) suelen definirse como objetos físicos asibles en 3D mediante los que se puede interactuar con datos digitales. Los estudios sobre TUI y aplicaciones en el aprendizaje buscan aclarar qué elementos específicos del diseño de interfaces tangibles son buenos para el aprendizaje. Mientras muchos promotores del uso de TUI en entornos educativos asumen un modelo Piagetano del desarrollo de los niños por el cual estos se benefician mediante la experiencia táctil, estas alegaciones no han sido testadas extensivamente (Marshall, 2007). Sin embargo, a lo largo de más de una década de observación se ha acumulado la evidencia de que las interfaces tangibles aumentan la implicación del alumno en las tareas de aprendizaje, y que los resultados académicos mejoran en la medida en que aumenta la implicación. Los alumnos declaran disfrutar más al usar interfaces tangibles en su aprendizaje, en comparación con el uso de un mouse (Melcer et al., 2017; Xie et al., 2008).

Se ha demostrado que, usadas como herramientas de aprendizaje, las interfaces tangibles alientan actividades y comportamientos que aumentan el aprendizaje y la capacidad de resolver problemas. Un estudio temprano comparó las Interfaces Gráficas de Usuario (Graphical User Interfaces – GUI) con las TUI en un trabajo de diseño colaborativo, hallando que los grupos que usaban TUI realizaban múltiples acciones cognitivas en menos tiempo, hacían más hallazgos inesperados sobre las posibilidades del diseño espacial y exhibían más comportamientos relacionados con la solución de problemas (Kim & Maher, 2008). Un estudio de 2015 reafirmó estos hallazgos poniendo el foco en usuarios que encaraban tareas de diseño creativo, hallando específicamente que el uso de TUI reduce la carga cognitiva del usuario en comparación con el uso de GUI para una tarea equivalente (Chandrasekera & Yoon, 2015).

También hay evidencia significativa de que las TUI mejoran los resultados de aprendizaje. Un estudio de 2019 halló mejoras significativas en el rendimiento de los alumnos después de usar una interfaz tangible para aprender trigonometría (Urrutia et al., 2019). En clases universitarias con muchos alumnos el uso de contadores (dispositivos que miden la respuesta de la audiencia) ya es ubicuo como método para mejorar los resultados académicos y el factor clave que explica este éxito es la interacción física, que promueve el aprendizaje colaborativo activo y la participación (Blasco-Arcas et al., 2013) it is becoming increasingly necessary to have a thorough understanding of the underlying mechanisms of these advanced technologies and their consequences on student learning performance. In this study, our primary objective is to investigate the effect of clickers (i.e. audience response systems). Los investigadores también hallaron que un modelo anatómico 3D con TUI ganaba en la comparación con un modelo virtual del corazón a la hora de aliviar la carga cognitiva y alentar la retención de conocimientos, cognición y motivación de los alumnos (Skulmowski et. al., 2016).

Un estudio de 2011 que halló que los resultados en la solución de rompecabezas lógicos mejoraban al interactuar con una interfaz tangible en comparación con el trabajo en una pantalla táctil, teniendo en cuenta además que los participantes que usaban la interfaz tangible trabajaron con los puzzles de forma mucho más colaborativa que aquellos que usaban la multipantalla táctil (Schneider et al., 2011). Esto sugiere que la colaboración fue el factor clave que mejoró los resultados y que el uso de la interfaz tangible alentaba la colaboración.

Las TUI (interfaces tangibles de usuario) aumentan el comportamiento colaborativo en forma mensurable. Los estudios que usaban dispositivos de rastreo ocular hallaron que los participantes que trabajaban en grupos pequeños en la resolución de un problema experimentaban más momentos de atención visual conjunta cuando trabajaban con objetos móviles y asibles sobre un tablero que cuando lo hacían en una interfaz de pantalla (Schneider et al., 2016, 2015). Las interfaces tangibles han sido diseñadas específicamente para apoyar la colaboración en el mismo lugar en las actividades educativas (ver por ejemplo las Rutas Activas, que enseñan modelado bioquímico (Mehta et al., 2016)), y en actividades de investigación (por ejemplo para ayudar a los usuarios a navegar en la big data en colaboraciones genómicas (Konkel et al., 2019)). Una vez más, una de las ventajas más interesantes del uso de tangibles es que pueden utilizarse para diseñar colaboraciones inclusivas para personas con discapacidades visuales (Chibaudel et al., 2020).

3. El Tablero Colaborativo Interactivo para Educación (CITE)

3.1. Justificación del diseño

El Tablero Colaborativo Interactivo para Educación (CITE) permite a los usuarios crear e interactuar con visualizaciones de datos usando objetos de sobremesa. El diseño contempla la capacidad humana de aprender espacial y cinéticamente, y apunta a atraer a más estudiantes que de otra forma no se sentirían inclinados a participar. Nuestro objetivo específico son aquellos estudiantes que dudan de su propia aptitud natural para absorber o combinar información en visualizaciones de datos.

CITE está basado en DataBlocks [Bloques de datos] (Jofre et al., 2016; Jofre et al. 2015), lo que combina los beneficios de las interacciones tangibles con representaciones gráficas para crear un entorno de aprendizaje interactivo. En este sistema los usuarios crean consultas al ubicar objetos claramente demarcados (que pueden tomarse con una sola mano) sobre un tablero, y los resultados de la consulta aparecen en una pantalla situada a un extremo del tablero. Las visualizaciones que aparecen en la pantalla responden a la configuración de objetos sobre el tablero.

Los participantes en el proyecto CITE identificaron un inconveniente con el modelo de DataBlocks: si bien la interfaz de aprendizaje incorpora cinética y aprendizaje espacial en su proceso, en última instancia genera salidas de información principalmente visual. Por ello, una de nuestras metas al basarnos en DataBlocks fue incluir a los estudiantes con problemas visuales y así mejorar sus atributos cinéticos y espaciales. Durante las etapas de planificación incorporamos

principios de diseño inclusivo, para integrar más eficazmente el aprendizaje espacial y auditivo mediante textos mutuamente legibles (en Braille y letra impresa), y con formatos de salida mutuamente accesibles (visualización de datos con audio narración), para que aquellos que de otro modo se verían excluidos de las interfaces de aprendizaje visual pudieran participar al mismo nivel que los que no tienen problemas de visión (Braille Authority of North America, 2010; Chibaudel et al., 2020; Henry, 2018; Holmes, 2018). Además de las consideraciones de diseño inclusivo para discapacitados visuales, CITE presenta nuevas visualizaciones, un nuevo software fácil de usar y editar, y modelos digitales para los tokens.

CITE, como DataBlocks, está diseñado para ser un dispositivo educativo económico, accesible en escuelas y otros espacios de aprendizaje como las bibliotecas. Creemos que el principal impedimento hasta la fecha para la adopción extendida de interfaces tangibles para el usuario ha sido que la mayoría de diseños requieren algún tipo de hardware especializado (De Raffaele et al., 2018; Follmer et al., 2013; Klum et al., 2012; Langner et al., 2014; Mehta et al., 2016) TUI architectures have seen limited deployment in more complex and abstract domains. En su lugar, nuestro enfoque es crear un sistema, un conjunto de instrucciones verificadas junto a paquetes de software, para adaptar cualquier combinación standard de hardware informático y convertirla en un tablero interactivo tangible altamente personalizable.

Ponemos especial énfasis en alentar a nuestros usuarios para que adapten el sistema de manera que sirva mejor a sus necesidades. Aun cuando estos usuarios no sean programadores, creemos que el acto de construir el sistema y tal vez incluso crear sus propios tokens puede agregar significado y un toque de expresión personal a esta herramienta. El nivel de implicación puede aumentar cuando los estudiantes tienen permitido usar sus objetos de uso diario para interactuar con la información digital (Shaer & Hornecker, 2010; Xie et al., 2008). En este sistema la idea es que los usuarios participen de la creación de sus propias herramientas de aprendizaje, en consonancia con las ideas expresadas por Freire, Gee, e Illich, entre otros.

De acuerdo con el espíritu de adaptabilidad y accesibilidad económica, todo nuestro software es de licencia abierta. El software de licencia abierta garantiza su llegada a todos los usuarios a coste cero, y un modelo no propietario permite que los usuarios expertos modifiquen y mejoren el software de acuerdo con sus necesidades.

3.2. Descripción de nuestro sistema

El Tablero Colaborativo Interactivo para Educación (CITE) permite a los usuarios manipular las visualizaciones de datos en la pantalla mediante la manipulación de tokens físicos. Los tokens son seguidos por una cámara ubicada bajo un tablero transparente. La parte inferior de cada token está marcada con una marca de referencia diseñada especialmente para ser identificada por el software (de licencia abierta) reactIVision (Kaltenbrunner & Bencina, 2007), y la cámara situada bajo el tablero captura la imagen de las marcas de referencia a tiempo real. El software reactIVision traduce el ID de cada marca identificada y de sus coordenadas X e

Y, cuando se encuentren en el campo visual de la cámara. Esta información es interpretada y procesada por nuestro software, que construye las visualizaciones.

Para maximizar la accesibilidad y visibilidad del sistema se encuentra disponible en la web en <https://datablocks.org/>. Esta página contiene todos los recursos necesarios para armar CITE. Proporcionamos instrucciones sobre cómo construir un tablero transparente simple, junto a la lista de piezas necesarias con enlaces a sus proveedores. Hay enlaces a todas las descargas de software, y proporcionamos modelos 3d de tokens como archivos stl descargables que los usuarios pueden descargar e imprimir en 3d. También proporcionamos etiquetas de token para aquellos que no tengan acceso a una impresora 3d o que prefieran construir los tokens a mano o usar objetos existentes como tokens.

Nuestro sistema ofrece múltiples niveles de uso y funcionamiento. Los usuarios novatos pueden descargar el software, imprimir en 3d nuestros modelos de token (o colocar nuestras etiquetas en sus propios tokens) y seguir las instrucciones para usar el sistema como viene configurado. Los usuarios interesados en personalizar la interfaz pueden crear sus propios tokens, siguiendo nuestra guía. Los usuarios que busquen personalizar el contenido pueden añadir distintos conjuntos de datos al sistema y usar CITE para explorar otros datos. Por último, los usuarios expertos pueden modificar el propio software y adaptarlo a sus necesidades.

CITE usa dos paquetes de software en tándem, ambos de código abierto. Usamos software reactIVision (Kaltenbrunner et al., 2005; Kaltenbrunner & Bencina, 2007) para seguir los tokens, y usamos nuestro propio software para interpretarlos y visualizarlos. Nuestro software, escrito por Josh Rosenbaum, se encuentra disponible gratuitamente en Github (<https://github.com/joshrosenbaum-dev/cite/>), y nuestra licencia abierta autoriza a los usuarios a modificarlo y mejorarlo. El software está escrito en Python, que es un idioma de programación muy usado con el que muchos programadores no profesionales se sienten cómodos. Pueden encontrarse más datos sobre el software en nuestro apéndice.

En este prototipo inicial usamos datos del proyecto sin fines de lucro Gapminder (Rosling, 2008) en <https://www.gapminder.org/>, que aloja un repositorio de datos sobre la salud y riqueza de todas las naciones del mundo durante un lapso de más de 100 años. Los datos incluyen más de 400 indicadores socioeconómicos como el PIB per cápita, esperanza de vida, tasas de desempleo, consumo de energía y niveles educativos. Si bien esperamos incorporar conjuntos de datos en futuras versiones, y en principio los usuarios de nivel experto ya pueden incorporar sus propios datos, escogimos comenzar con los datos Gapminder por varios motivos. En primer lugar, respaldamos la visión y misión de Gapminder sobre la educación de los ciudadanos en el mundo, y pensamos que estos datos son de interés general. En segundo lugar los datos de Gapminder, así como sus herramientas de visualización, han sido usadas en escuelas para enseñar geografía (Keller, 2012b) y estadística (Le, 2013). Por último, los datos están bien organizados y son fácilmente accesibles.

Si bien nuestra visualización sigue el esquema de la tabla burbuja de Gapminder, la forma en que los usuarios interactúan con las visualizaciones es obra nuestra. Los usuarios controlan lo que se ve en la pantalla usando tokens de sobremesa. La tabla burbuja de Gapminder compara dos indicadores socioeconómicos en los ejes X y Y, con cada punto del gráfico representando un país, siendo el tamaño

del punto proporcional a la población del país. Mientras Gapminder te permite escoger los países a comparar desde un menú lateral, nosotros proporcionamos un conjunto de tokens que representan países, y colocar el token de un país en el tablero hace que el punto de datos de ese país aparezca en la pantalla. Siguiendo el modelo de Gapminder, el tamaño del punto de datos de un país es proporcional a su población. Contamos con otro conjunto de tokens que permiten al usuario seleccionar los indicadores socioeconómicos (en adelante llamados «indicadores») para que aparezcan en los ejes X y Y. Estos indicadores incluyen nivel de ingresos, esperanza de vida, emisiones de CO₂, mortalidad infantil, precios del combustible y densidad poblacional. Los tokens que aluden a indicadores tienen forma distinta de los de países para evitar confusión.

Por último, hay un tercer grupo de tokens que representan los ejes X y Y, cada uno de los cuales tiene una ranura diseñada para alojar un token de indicador. Para seleccionar qué aparece en los ejes X y Y usamos un sistema de restricciones. Para ubicar un indicador dado en el eje X el indicador elegido se coloca en la ranura del token correspondiente al eje X. Del mismo modo, puede colocarse un indicador distinto en la ranura del token correspondiente al eje Y. Los tokens de los ejes X y Y están diseñados para albergar un solo indicador en cada ranura. Un token de país no encaja en la ranura. La ilustración de la Figura 1 muestra cómo el token correspondiente al eje X encaja con un token de indicador para ubicar el indicador a lo largo del eje X. Tras el telón el código está midiendo la distancia entre la marca de referencia del eje X o Y, y las marcas de referencia de los indicadores. Si una marca de indicador aparece dentro del umbral de distancia de una marca de eje, dicho indicador aparecerá en ese eje. Los tokens están diseñados para que la única forma de superar el umbral de distancia sea encajando el indicador en la ranura del eje X o Y.

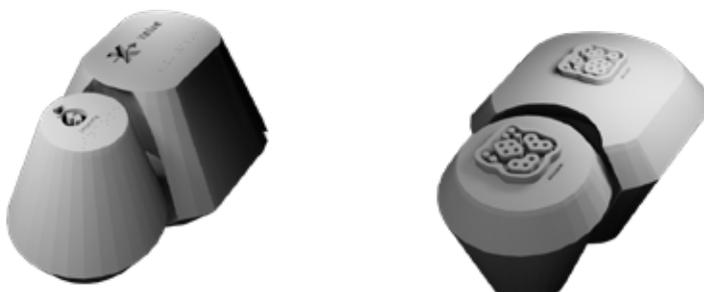


Figura 1: Ilustración de un token de indicador encajado en el token del eje X para mostrar el indicador en el eje. Izquierda: vista desde arriba. Derecha: vista desde abajo. Diseños 3-D por

Nick Lejeune

Nuestra página web pone a disposición archivos.stl, que los usuarios pueden descargar e imprimir directamente sin modificarlos. Estos tokens incluyen las marcas de referencia incrustadas en la parte inferior y las etiquetas grabadas en la parte superior. Para permitir la participación activa de usuarios con problemas de

visión, nuestras etiquetas incluyen iconos simbólicos con los nombres escritos en el alfabeto tradicional o en Braille (Braille Authority of North America, 2010; Chibaudel et al., 2020). También ofrecemos nuestro diseño de etiquetas en nuestra página web para los que no tengan acceso a una impresora 3D.

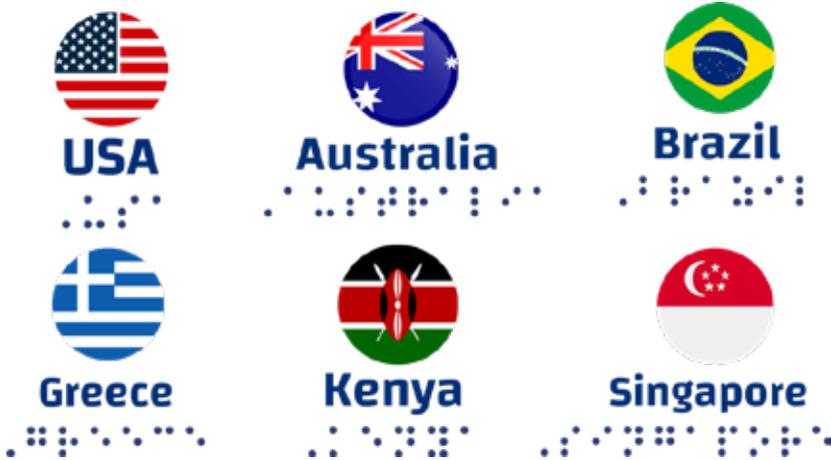


Figura 2: Etiquetas de tokens de países. Diseños por Kyle Frenette

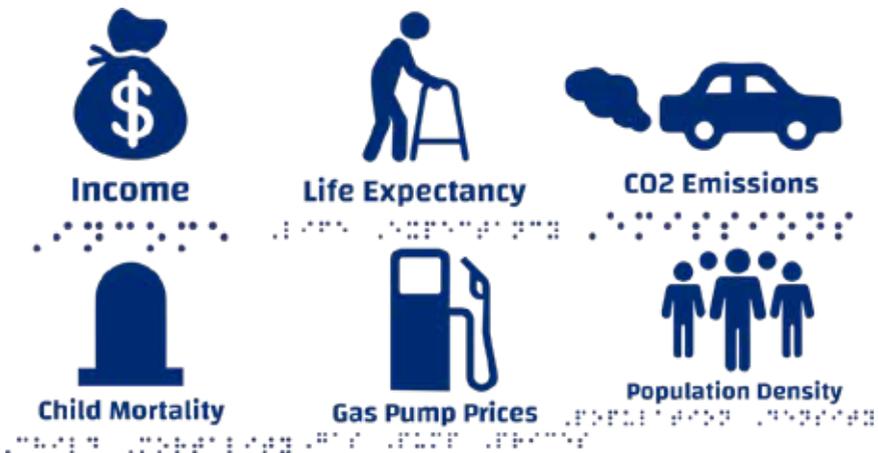


Figura 3: Etiquetas de tokens de indicadores. Diseños por Kyle Frenette.



Figura 4: Etiquetas de tokens de los ejes X y Y. Diseños por Kyle Frenette.

3.3. Plan de Evaluación

Lamentamos que la aparición del COVID-19 obligase a frenar la fase de testeo inicial en marzo de 2020. Una vez que podamos continuar la observación presencial del uso de objetos compartidos en un espacio observacional que emule un aula, esperamos probar y desarrollar en mayor medida los estudios observacionales de CITE con educadores y estudiantes en nuestro campus y en nuestra comunidad local. Los métodos explorados por académicos y profesionales arriba listados incluirán una lectura minuciosa de las observaciones, así como el análisis de las experiencias y opiniones de los usuarios, en una metodología similar a la usada en otros estudios TUI (Chibaudel et al., 2020; Kim & Maher, 2008; Schneider et al., 2011, 2016). Los elementos que usaremos para comenzar nuestro análisis del sistema pueden incluir el monitoreo de los movimientos del ojo, mano y componentes del dispositivo; medir y analizar el tiempo ocupado en tareas en comparación a interfaces no TUI, análisis conversacional de los procesos colaborativos; análisis de interpretaciones de datos generadas por los usuarios y la solicitud y análisis de las reflexiones y comentarios de los usuarios sobre la experiencia de aprendizaje, con la colaboración de estudiantes e instructores.

Tener tokens en Braille con indicadores auditivos de su posición e información que conviva con la representación visual y pueda conectarse a pantallas en Braille disponibles en el mercado debería ser un indicador de diseño inclusivo efectivo. En particular esperamos poder trabajar con el Centro para el Avance de los Ciegos y Discapacitados Visuales (Utica, NY), así como con la Comunidad del Instituto Politécnico SUNY y con programas de Salud Conductual y Psicología para desarrollar un testeo de usuarios con y para estas comunidades. De forma similar, esperamos trabajar con SUNY Poli y las universidades públicas para evaluar si y cómo el uso del sistema CITE brinda a los usuarios la ocasión de mejorar su percepción espacial, alivianar la carga cognitiva y facilitar la comunicación de conceptos espaciales, visuales y auditivos entre estudiantes con distintas capacidades y fortalezas.

Como se indicó más arriba, para evaluar el proyecto CITE deseamos colaborar con los usuarios para observar en qué medida el uso del sistema abre o mejora las oportunidades de involucrarse en un tipo de aprendizaje activo y crítico, como las descritas y exploradas por Gee (2007). Se solicitará a los usuarios la derivación colaborativa de soluciones a preguntas abiertas mientras observamos las interacciones entre sí, así como con la herramienta. Hemos diseñado la interfaz

para que sea interactiva y responsiva al usuario, permitiendo la exploración (#15) de contenidos previamente escritos como es el caso de los datos de Gapminder, en lugar de ser otro medio que espera que el usuario se maneje pasivamente, almacene y reproduzca datos sin preocuparse por el contexto (en efecto, la búsqueda de significado, además de desestabilizar estereotipos es consonante con la misión de Rosling [2008]). El testeo de usuarios y sus opiniones nos ayudarán a identificar y confirmar prácticas consistentes y activas de recopilación de información, interpretación y uso. El uso del sistema para participar en una exploración más abierta de los datos también debería demostrar principios de Descubrimiento (#28).

A continuación, diseñamos los tokens de control para que sean tangibles y de manera que su ubicación y la relación entre sí agregasen funcionalidad para el usuario. Esto aumenta la capacidad de ver datos de nuevas maneras, encontrar nuevas correlaciones en los conjuntos de data y comunicar estos hallazgos sin necesidad de comprender comandos sintácticos complejos. Así, la demostración constante del uso exitoso del sistema CITE debería servir para probar los principios de Gee de Amplificación del Aporte (#10) e Inteligencia Material (#21). La satisfacción con el uso entre estudiantes y educadores deberá demostrarse mediante los principios de Logros del Usuario (#11), transferencia de conocimientos (#29), motivación para repetir las Prácticas (#12) y Compromiso de Aprendizaje (#7), comunicación y colaboración en comunidades de aprendizaje (#30-32 y 34-35) en un espectro de habilidades (Multimodal/#20) y la reflexión sobre estos procesos (“Autoconocimiento [#9]). Esperamos observar y evaluar estas prácticas en el uso inicial del sistema CITE y desarrollar puzzles adecuados a distintos temas y edades y «juegos» de aventura de búsqueda de datos que permitan un uso más abierto de Gapminder y estudiar más profundamente si el sistema CITE en efecto incorpora las fortalezas identificadas por Gee.

4. Conclusiones y perspectivas de futuro

Este sistema se encuentra en desarrollo. Algunos componentes que se encuentran en proceso de desarrollo son (1) un método (un dial o control deslizante) para permitir a los usuarios la exploración interactiva de los datos en el tiempo (Gapminder guarda más de 100 años de datos), y (2) agregando componentes táctiles a los tokens para aumentar la interactividad de los usuarios no visuales o para los que tengan problemas de visión (por ejemplo, cada token puede vibrar en respuesta al movimiento del usuario).

El propio CITE ha sido y continuará siendo desarrollado colaborativamente, en correspondencia con las metas de educadores como Freire e Illich, así como de otros académicos y profesionales citados aquí. Como se describe más arriba, sus investigadores participantes beben de la teoría y práctica educativa y del diseño para diseñar el testeo inicial, desarrollar componentes y trabajar con los prototipos en y para distintas comunidades.

Creemos, también en línea con el pensamiento de Freire e Illich, que los futuros testeos del sistema no dependerán sólo del interés y colaboración de los estudiantes y comunidades, sino que una mayor participación con CITE desarrollará grados superiores de significado y complejidad, así como nuevas variantes y

variables. Estas relaciones implicarán un gran esfuerzo y un tiempo de desarrollo (y la disponibilidad general de vacunas contra el COVID-19, testeo comunitario y otros recursos sociales y sanitarios), pero serán cruciales para demostrar las capacidades de CITE para mejorar la visualización y comunicación de datos más allá de su modesto alcance inicial. Esperamos ver cómo los estudiantes vuelven a usar y desarrollan el sistema CITE como medio para explorar, indagar y desafiar la ubicación y acceso a nivel global y local, y seguir contándonos dentro de una comunidad de aprendizaje crítica, activa y colaborativa.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por una Beca SUNY a la Tecnología Educativa Innovadora (IITG), y fue hecho posible por nuestros compañeros de equipo: Josh Rosenbaum, quien bajo la supervisión de Michael Reale escribió nuestro software, Kyle Frenette, quien diseñó las etiquetas de nuestros tokens, y Nick LeJeune, quien creó nuestros diseños de token en 3D. Muchas gracias a Alexander Largaespada y Salvador G. Ordorica por la traducción del inglés al castellano.

6. Apéndices

Apéndice 1 – Información sobre nuestro software

CITE usa software ReactIVision como cliente TUIO, la librería Kivy para desarrollar nuestra interfaz de usuario, y Matplotlib para visualizar nuestra información. Nuestros datos provienen de Gapminder, y nuestra pantalla está inspirada por su herramienta de visualización.

Sigue una descripción de cada uno de los scripts del programa:

main.py - la clase CITEApp está instanciada para permitir a Kivy que acepte entradas de TUIO (marcas en la mesa reactIVision) y en el entorno Python la librería OSCPy asistirá en la conexión con el protocolo TUIO. Establecemos un objeto dispuesto de manera que sirva como nuestra ventana, albergando múltiples widgets Kivy, incluyendo el widget de textura del gráfico y el widget de control de eventos en el tablero. Una función de precarga genera el gráfico inicial (explicada en `preloader.py`). El widget de control de eventos en el tablero usa la gestión de entradas de Kivy para detectar cambios en el tablero y narrarlos (explicado en `table.py`).

preloader.py – la clase CITEPreloader se usa para cargar todos los conjuntos de datos para cada indicador y generan audio para cada marca (para su narración), retornando estos atributos a la clase principal CITEApp para facilitar el acceso a los datos desde las distintas clases (al devolver su propiedad “auto”). Kivy nos permite analizar los archivos JSON que almacenan la información sobre cada marca de referencia. Se genera un hash para cada archivo, y se guarda en un archivo cache para garantizar la integridad de los archivos JSON. Si los archivos JSON son editados (ej. si se añaden más indicadores y artefactos/países), el caché será regenerado con los hashes y se creará un nuevo conjunto de audios usando Google Text-to-Speech. Al final del proceso de carga creamos un conjunto

vacío para guardar nuestros objetos Marcadores (explicado en `marker.py`).

Usamos conjuntos de datos panda para almacenar los datos de cada indicador y este proceso de precarga es para acceder a los datos una sola vez en lugar de varias.

marker.py – la clase `Marca` define un objeto marcador y transforma el ID de referencia de `reactIVision` en algo con significado. Usando los datos precargados podemos asignar valores a variables vacías y seguir la posición, ángulo e ID de cada marcador con los datos táctiles TUIO interpretados por Kivy.

arduino.py – un archivo sin usar que da la posibilidad de encender los toques digitales y conectarlos a sus tableros Arduino; usa `pyserial`.

table.py – la clase `TableHandler` usa el entrelazado para crear procesos Daemon que funcionan en segundo plano en paralelo al programa para hacer tareas como narrar (usando los archivos de audio pre-generados) y redibujar el gráfico. Para narrar usamos la biblioteca de `playsound` para simplemente reproducir los archivos de audio en secuencias. Usando la gestión de entradas de Kivy podemos determinar qué hacer cuando un marcador se ubique sobre el tablero (reproducir audio y dibujar gráfico), cuando se retire del tablero (reproducir audio y dibujar gráfico), y se mueva (actualizar las posiciones X/Y y los ángulos del marcador, dibujar gráfico). Al dibujar el gráfico determinamos la ubicación de cada marcador, qué hay en el tablero, como indicadores, artefactos y cubos X e Y, calcular la distancia entre marcadores y determinar qué puntos situar en nuestro gráfico). Usamos conjuntos de datos panda para calcular un rango gráfico mínimo y máximo con los indicadores dados y luego dibujar el gráfico, contemplando los casos en que el gráfico no tenga suficientes marcas o indicadores para presentar su ausencia.

graphing.py – funciones usadas para generar una figura en el gráfico y situar los puntos en forma de gráfica de dispersión, con un estilo burbuja similar a `Gapminder` – usa `matplotlib`.

7. Referencias

- Blasco-Arcas, L., Buil, I., Hernández-Ortega, B., & Sese, F. J. (2013). Using clickers in class. The role of interactivity, active collaborative learning and engagement in learning performance. *Computers & Education*, 62, 102-110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.019>
- Boyd, D. (2016). What Would Paulo Freire Think of Blackboard (TM): Critical Pedagogy in an Age of Online Learning. *International Journal of Critical Pedagogy*, 7(1), 166-186.
- Braille Authority of North America. (2010). *Guidelines and Standards for Tactile Graphics*. <http://brailleauthority.org/tg/web-manual/>
- Bruno Jofre, R., & Igelmo Zaldivar, J. (2012). Ivan Illich's Late Critique of «Deschooling Society»: «I Was Largely Barking Up the Wrong Tree». *Educational Theory*, 62(5), 573-592.

- Chandrasekera, T., & Yoon, S.-Y. (2015). The Effect of Tangible User Interfaces on Cognitive Load in the Creative Design Process. *2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Media, Art, Social Science, Humanities and Design*, 6–8. doi: <https://doi.org/10.1109/ISMAR-MASHD.2015.18>
- Chibaudel, Q., Johal, W., Oriola, B., Macé, M. J.-M., Dillenbourg, P., Tartas, V., & Jouffrais, C. (2020). «If you've gone straight, now, you must turn left». Exploring the use of a tangible interface in a collaborative treasure hunt for people with visual impairments. *ASSETS'20*. doi: <https://doi.org/10.1145/3373625.3417020>
- Counsell, C., Arthur, ed. J., & Phillips, ed. R. (2009). Historical Knowledge and Historical Skills: A Distracting Dichotomy. In *Issues in History Teaching* (pp. 54-71). RoutledgeFalmer.
- De Raffaele, C., Smith, S., & Gemikonakli, O. (2018). An Active Tangible User Interface Framework for Teaching and Learning Artificial Intelligence. *23rd International Conference on Intelligent User Interfaces*, 535–546. <https://doi.org/10.1145/3172944.3172976>
- Feenberg, A. (2002). *Transforming Technology: A Critical Theory Revisited* (Revised edition). Oxford University Press. <https://www.sfu.ca/~andrewf/Trans%20Tech%20Chapt%206.pdf>
- Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A., & Ishii, H. (2013). inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints Through Shape and Object Actuation. *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 417-426. doi: <https://doi.org/10.1145/2501988.2502032>
- Gee, J. P. (2007). *What Video Games Have to Teach Us About Learning and Literacy* (2nd Ed.). Palgrave Macmillan.
- Glassman, M. (2018). DeMOOCing Society: Convivial Tools to Systems and Back Again in the Information Age. *Educational Philosophy and Theory*, 51(14), 1413-1422. doi: <https://doi.org/10.1080/00131857.2018.1539827>
- Henry, S. L. (2018, February 27). *Essential Components of Web Accessibility*. Web Accessibility Initiative. <https://www.w3.org/WAI/fundamentals/components/>
- Holmes, K. (2018). *Mismatch: How Inclusion Shapes Design*. The MIT Press.
- Illich, I. (2001). *Tools for Conviviality*. Marion Boyars.
- Jofre, A., Szigeti, S., Keller, S. T., Dong, L.-X., Czarnowski, D., Tomé, F., & Diamond, S. (2015). A Tangible User Interface for Interactive Data Visualization. *Proceedings of the 25th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 244-247. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2886444.2886484>
- Jofre, A., Szigeti, S., Tiefenbach-Keller, S., Dong, L.-X., & Diamond, S. (2016). Manipulating Tabletop Objects to Interactively Query a Database. *Proceedings of*

- the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 3695-3698. doi: <https://doi.org/10.1145/2851581.2890260>
- Kahn, R., & Kellner, D. (2007). Paulo Freire and Ivan Illich: Technology, Politics, and the Reconstruction of Education. *Policy Futures in Education*, 5(4), 431-448. doi: <https://doi.org/10.2304/ptie/2007.5.4.431>
- Kaltenbrunner, M., & Bencina, R. (2007). reacTIVision: A Computer-vision Framework for Table-based Tangible Interaction. *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, 69-74. <https://doi.org/10.1145/1226969.1226983>
- Kaltenbrunner, M., Bovermann, T., Bencina, R., & Costanza, E. (2005). TUIO: A protocol for table-top tangible user interfaces. *Proc. of the The 6th Int'l Workshop on Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation*, 1-5. https://www.researchgate.net/profile/Martin_Kaltenbrunner/publication/225075863_TUIO_A_Protocol_for_Table-Top_Tangible_User_Interfaces/links/55adfa4708ae98e661a4510d.pdf
- Kell, H. J., Lubinski, D., Benbow, C. P., & Steiger, J. H. (2013). Creativity and Technical Innovation: Spatial Ability's Unique Role. *Psychological Science*, 24(9), 1831-1836. <https://www.jstor.org/stable/23484685>
- Keller, K. H. (2012a). Gapminder: An AP Human Geography Lab Assignment. *The Geography Teacher*, 9(2), 60-63. doi: <https://doi.org/10.1080/19338341.2012.679893>
- Keller, K. H. (2012b). Gapminder: An AP Human Geography Lab Assignment. *The Geography Teacher*, 9(2), 60-63. doi: <https://doi.org/10.1080/19338341.2012.679893>
- Kim, M. J., & Maher, M. L. (2008). The impact of tangible user interfaces on spatial cognition during collaborative design. *Design Studies*, 29(3), 222-253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2007.12.006>
- Klum, S., Isenberg, P., Langner, R., Fekete, J.-D., & Dachsel, R. (2012). Stackables: Combining Tangibles for Faceted Browsing. *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 241-248. doi: <https://doi.org/10.1145/2254556.2254600>
- Konkel, M. K., Ullmer, B., Shaer, O., & Mazalek, A. (2019). Envisioning tangibles and display-rich interfaces for co-located and distributed genomics collaborations. *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Pervasive Displays*, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1145/3321335.3324953>
- Lakin, J., & Wai, J. (2020). Spatially gifted, academically inconvenienced: Spatially talented students experience less academic engagement and more behavioural issues than other talented students. *British Journal of Educational Psychology*, 90(4), 1015-1038. doi: <https://doi.org/10.1111/bjep.12343>

- Langner, R., Augsborg, A., & Dachsel, R. (2014). CubeQuery: Tangible Interface for Creating and Manipulating Database Queries. *Proceedings of the Ninth ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, 423-426. doi: <https://doi.org/10.1145/2669485.2669526>
- Le, D.-T. (2013). Bringing Data to Life into an Introductory Statistics Course with Gapminder. *Teaching Statistics*, 35(3), 114-122. doi: <https://doi.org/10.1111/test.12015>
- Marshall, P. (2007). Do Tangible Interfaces Enhance Learning? *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, 163-170. doi: <https://doi.org/10.1145/1226969.1227004>
- Mehta, M., Arif, A. S., Gupta, A., DeLong, S., Manshaei, R., Williams, G., Lalwani, M., Chandrasekharan, S., & Mazalek, A. (2016). Active Pathways: Using Active Tangibles and Interactive Tabletops for Collaborative Modeling in Systems Biology. *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, 129-138. doi: <https://doi.org/10.1145/2992154.2992176>
- Melcer, E. F., Hollis, V., & Isbister, K. (2017). Tangibles vs. Mouse in Educational Programming Games: Influences on Enjoyment and Self-Beliefs. *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 1901-1908. doi: <https://doi.org/10.1145/3027063.3053115>
- Schneider, B., Jermann, P., Zufferey, G., & Dillenbourg, P. (2011). *Benefits of a Tangible Interface for Collaborative Learning and Interaction*. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5654494>
- Schneider, B., Sharma, K., Cuendet, S., Zufferey, G., Dillenbourg, P., & Pea, A. D. (2015). 3D tangibles facilitate joint visual attention in dyads. *International Conference on Computer Supported Collaborative Learning (CSCL)*, 158-165. <http://blog.bertrandschneider.com/wp-content/uploads/2012/01/9.MC-0182-paper-edit1-LD.pdf>
- Schneider, B., Sharma, K., Cuendet, S., Zufferey, G., Dillenbourg, P., & Pea, R. (2016). Using Mobile Eye-Trackers to Unpack the Perceptual Benefits of a Tangible User Interface for Collaborative Learning. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 23(6), 39:1-39:23. doi: <https://doi.org/10.1145/3012009>
- Shaer, O., & Hornecker, E. (2010). Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.*, 3(1-2), 1-137. doi: <https://doi.org/10.1561/1100000026>
- Skulmowski, A., Pradel, S., Kuehnert, T., Brunnett, G., & Rey, G. D. (2016). Embodied learning using a tangible user interface: The effects of haptic perception and selective pointing on a spatial learning task. *Computers & Education*, 92-93, 64-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.10.011>

- Tognoli, N., & Chavez Gumaraes, J. A. (2019). Provenance as a Knowledge Organization Principle. *Knowledge Organization*, 46(7), 558-568. doi: <https://doi.org/DOI:10.5771/0943-7444-2019-7-558>
- Urrutia, F. Z., Loyola, C. C., & Marín, M. H. (2019). A Tangible User Interface to Facilitate Learning of Trigonometry. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 14(23), 152-164. doi: <https://www.learntechlib.org/p/217244/>
- Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial Ability for STEM Domains: Aligning Over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance. *Journal of Educational Psychology*, 101(4), 817-835. doi: <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Wetteman, R., & White, T. (2019). *The Internet is Unavailable* (Research Note No. T103; pp. 1-5). Nucleus Research. <https://accessibility.deque.com/nucleus-accessibility-research-2019>
- Xie, L., Antle, A. N., & Motamedi, N. (2008). Are Tangibles More Fun?: Comparing Children's Enjoyment and Engagement Using Physical, Graphical and Tangible User Interfaces. *Proceedings of the 2Nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, 191-198. doi: <https://doi.org/10.1145/1347390.1347433>