

Percepción y desplazamiento en el espacio híbrido con realidad mixta

Perception and Displacement in Hybrid Spaces with Mixed Reality

Clementina Palomo Beltrán
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Tecamachalco del Instituto Politécnico Nacional
palomo.clementina@gmail.com

ARTÍCULO

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de la tecnología RM en la percepción del usuario dentro del espacio arquitectónico. Participaron 35 informantes. Se realizó una prueba real (croquis y plano arquitectónico) + CAVE + CAVE + espacio real, y una prueba real plano arquitectónico espacio real + MAGIC LEAP. La aplicación de la tecnología RM en el espacio arquitectónico impacta positivamente en la percepción del usuario de los conceptos de distancia, profundidad y permisividad de movimiento dentro del espacio virtual y físico que modifica la transición entre espacios arquitectónicos. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la eficiencia en función del tiempo empleado y el número de consultas realizadas. Sería necesario hacer adaptaciones de la RM en lo visual, auditivo y cinestésico y estudiar su efectividad en el espacio arquitectónico.

Palabras clave: percepción, espacio arquitectónico, realidad virtual, realidad mixta

Abstract

The objective of this article is to evaluate the impact of mixed reality technology on the user's perception of architectonic space. Thirty-five informants participated in a real test consisting of a croquis and architectonic blueprints + CAVE + CAVE + real space and a real test consisting of architectonic blueprints and real space + MAGIC LEAP. The application of mixed reality technology in architectonic space positively impacted the user's perceptions of the concepts of distance, depth and the permissiveness of movement within virtual and physical space, modifying the transi-

Fecha de recepción: 22 de enero de 2020
Fecha de aceptación: 22 de mayo de 2020

doi: 10.22201/fa.2007252Xp.2020.21.76680

tion between architectonic spaces. No statistically significant differences were found in terms of efficiency of time spent and number of consultations made. It would be necessary to make adaptations to existing mixed reality technology in visual, auditory and kinesthetic aspects and to study its effectiveness in architectonic space.

Keywords: *virtual reality, mixed reality, architectural space, perception*

Introducción

En la 46° edición del Foro Económico Mundial (Davos, Suiza, 2016) se alertó sobre los retos que implica el aumento de los intercambios tecnológicos y el efecto del uso de la tecnología en distintos ámbitos de la sociedad.¹ En concordancia, Koolhaas² proyectó que las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) tendrían un mayor impacto en las ciudades, de tal forma que aumentaría la presencia de lo digital en la vida cotidiana.

Uno de los principales efectos de las TIC es la creciente demanda por parte de los usuarios de espacios dotados de sistemas que faciliten una óptima comunicación; esto exige que las tecnologías se enfoquen en crear sistemas de comunicación en red más eficientes.³ En este contexto, la realidad virtual (RV) y la realidad aumentada (RA), creadas como un medio de entretenimiento, surgieron como alternativas para mejorar la comunicación, el aprendizaje y la investigación en distintas disciplinas y contextos.

La RV utiliza la tecnología informática para generar un entorno de simulación que fusiona información de múltiples fuentes, escenas visuales tridimensionales interactivas y sistema de simulación del comportamiento físico. Implica una inmersión verdadera o total, que produce la sensación de estar en otro lugar sin estarlo físicamente.⁴

Por su parte, la RA mejora la fusión entre el espacio virtual y el espacio físico y crea un entorno tridimensional virtual. Este modelo virtual es mapeado en el mundo real para que el usuario se encuentre en un entorno fusionado y obtenga una experiencia completamente nueva. Además, amplía la capacidad de capturar información más allá del rango de percepción humana del mundo real⁵ y proporciona información contextual al usuario según lo necesite, por ejemplo, resaltar señales de tránsito y proporcionar información de GPS mientras uno conduce.⁶

1 Consejo Empresarial de América Latina. Disponible en <http://ceal.co/algunas-conclusiones-foro-economico-mundial-davos-2016/> [consultado el 10 de octubre de 2019].

2 Rem Koolhaas, *Rem Koolhaas responde preguntas como parte de rem Kickstarter* (México: Archdaily, 2014). Disponible en <https://vimeo.com/108873334>

3 Rem Koolhaas, *Rem Koolhaas responde preguntas como parte de REM Kickstarter*.

4 Shiqian Ke, Feng Xiang, Zh iZhang y Ying Zuo, "A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin", *Procedia CIRP*, 83 (2019): 753-758.

5 Shiqian Ke et al., "A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin": 755.

6 Arturo Merino, *Realidad Mixta*. Disponible en http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2018/11/Mixed_Reality.pdf [consultado en 17 de septiembre de 2019].

En las últimas tres décadas, se han publicado numerosas experiencias exitosas del uso de la RV y la RA en el ámbito educativo de la ingeniería civil, diseño y arquitectura; se han identificado múltiples beneficios que proporciona la creación de ambientes inmersivos que permiten al usuario involucrarse en una situación como si fuera real.⁷ Concretamente, el uso de mundos virtuales en el campo de la educación en ingeniería civil, arquitectura, diseño e industria de la construcción, tanto en formación inicial como en educación continua, puede beneficiar a profesionales y estudiantes en términos de comprensión del espacio arquitectónico.⁸

Inicialmente, la implementación de la RV y la RA presentó algunas dificultades, como incomodidad y mala percepción de profundidad, pero se han desarrollado tecnologías portátiles que resuelven estos problemas.⁹

La realidad mixta (RM), también conocida como realidad híbrida, representa una evolución de estas tecnologías, pues supone su combinación en una misma experiencia. Fusiona el mundo real y el espacio virtual para crear un nuevo entorno visual, donde los objetos físicos y digitales coexisten e interactúan en tiempo real. Persigue integrar el mundo virtual y la realidad de forma armoniosa para formar un nuevo mundo virtual que incluya características de un entorno real para objetos virtuales;¹⁰ los objetos y las personas del mundo real interactúan dinámicamente.

- 7 Hung-Lin Chi, Shih-Chung Kang y Xiangyu Wang, "Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction", *Automation in Construction*, 33 (2013): 116-122. J. de la Fuente Prieto, E. Castaño y F. Labrador, "Augmented reality in architecture: Rebuilding archeological heritage", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42 (2017): 311. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations", *Journal of Engineering Technology*, 6 (1) (2018): 28-45. Peng Wang et al., "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (6) (2018): 1-18. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach", *Future Generation Computer Systems*, 91 (2019): 371-381.
- 8 Aydin Tabrizi y Paola Sanguinetti, "Literature Review of Augmented Reality Application in the Architecture, Engineering, and Construction Industry with Relation to Building Information", *Advanced Methodologies and Technologies in Engineering and Environmental Science*. igi Global, (2019): 61-73.
- 9 Seung Wan Hong, Davide Schaumann y Yehuda E. Kalay, "Human behavior simulation in architectural design projects: An observational study in an academic course", *Computers, Environment and Urban Systems*, 60 (2016): 1-11. David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models", *Computers in Human Behavior*, 31 (2014): 434-445. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals", *Computers in Human Behavior*, 55 (2016): 504-518. Ben Young, Ehab Ellobody y Thomas Hu, "3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 138 (2) (2011): 131-138. Pedro Akeem, Quang Tuan Le y Chan Sik Park, "Framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142 (2) (2015): 1-11. Lucinda Kerawalla et al., "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science", *Virtual Reality*, 10 (3-4) (2006): 163-174. Arezoo Shirazi y Amir Behzadan, "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 141 (3) (2014): 1-13.
- 10 Shiqian Ke et al., "A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin": 755.

mente, coexisten en mundos virtuales para producir nuevos entornos y formas de visualización mediante el uso de dispositivos tecnológicos.¹¹ En síntesis, tres rasgos caracterizan la RM: permite combinar ámbitos reales y virtuales, se puede registrar en tres dimensiones, y es una tecnología interactiva y en tiempo real.

La RM ha sido utilizada ampliamente en numerosos países en la industria del entretenimiento, salud, educación, ingeniería, arquitectura, seguridad y defensa, así como en la industria inmobiliaria.¹² Icasa et al.¹³ estiman que en México la RM tiene muchas posibilidades de introducirse rápidamente como una mega tendencia en ámbitos diversos: educación, medicina, entretenimiento, seguridad y defensa, comunicaciones, arte, arquitectura e ingeniería.

El uso de sistemas virtuales inmersivos tiene un impacto en la vida cotidiana, personal, familiar, académica y laboral, específicamente en la forma en como las personas interactúan y se interrelacionan social y profesionalmente.¹⁴ La mayoría de las personas tienen acceso a sistemas virtuales inmersivos, sobre todo con el uso de *smartphone*.¹⁵ En el ámbito profesional, se utilizan para diseñar, desarrollar, ejecutar, evaluar y presentar proyectos.¹⁶

En arquitectura existen múltiples posibilidades de aplicación de la RM para mejorar la experiencia del usuario y el desempeño profesional de arquitectos, ingenieros y diseñadores. Estas tecnologías han tenido resultados positivos en el desarrollo de proyectos de gestión, innovación e investigación en la industria y la educación.¹⁷ Aunque se han reportado problemas de confort y percepción por el uso de los dispositivos, estos se han resuelto con las tecnologías portátiles.¹⁸

En formación inicial y capacitación profesional en arquitectura, por ejemplo, estudiantes y arquitectos pueden percibir diferentes espacios

- 11 Peng Wang et al., "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training": 8. Arturo Merino, *Realidad Mixta*.
- 12 Valentina Nisi, Mara Dionisio, Mary Barreto y Nuno Nunes, "A Mixed Reality neighborhood tour: Understanding visitor experience and perceptions", *Entertainment Computing*, 27 (2018): 89-100.
- 13 J. Icasa et al., *Realidad Mixta* (México: División de Mecatrónica y Tecnologías de Información del ITESM, 2018).
- 14 J. Icasa et al., *Realidad Mixta*.
- 15 Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 34.
- 16 J. Icasa et al., *Realidad Mixta*.
- 17 Charles Woodward y Mika Hakkarainen, "Mobile mixed reality system for architectural and construction site visualization", en *Augmented Reality-Some Emerging Application Areas* (Londres: IntechOpen, 2011), 56. Frédéric Bosché, Mohamed Abdel-Wahab y Ludovico Carozza, "Towards a mixed reality system for construction trade training", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30 (2) (2015): 1-12.
- 18 Lucinda Kerawalla et al., "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science": 170. David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models: 440. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3b education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 510. Arezoo Shirazi y Amir Behzadan, "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum": 9.

arquitectónicos a través de un objeto 3D o 4D, en lugar de ver diseños impresos tradicionales.¹⁹ En el entorno virtual, las actividades interactivas, como mover, oprimir y agarrar, se pueden visualizar y experimentar en tiempo real.²⁰

En ese sentido, la RV, RA y la RM pueden ayudar significativamente a los estudiantes, diseñadores, arquitectos y usuarios a comprender los principios del diseño arquitectónico; sin embargo, es necesario evaluar estos sistemas mediante pruebas empíricas con usuarios, para aportar soluciones reales al proceso de producción.²¹ Entre las aplicaciones más importantes con respecto a la investigación de la RM, se encontró la capacitación y educación en seguridad en la industria de la construcción.²²

Rauschnabel et al.²³ estudiaron la percepción de los usuarios sobre el uso de gafas inteligentes de RA. Los resultados demostraron que las gafas inteligentes se perciben como tecnología, pero varían en su grado de moda; que la percepción de las gafas inteligentes determina los factores que explican la intención de adopción; que la mayoría de los consumidores perciben las gafas inteligentes como una combinación de moda y tecnología (*fashnology*); y que algunos consumidores las perciben exclusivamente como tecnología o moda.

De forma similar, Cha et al.²⁴ investigaron las percepciones afectivas y espaciales en ambientes virtuales inmersivos. Como resultado encontraron percepciones afectivas y espaciales distintivas en el entorno virtual, que reflejan variaciones en las condiciones experimentales, pero similares a las percepciones del mundo real.

Por su parte, Nisi et al.²⁵ diseñaron un proyecto de RM para mejorar la experiencia de los visitantes en el entorno físico y social del museo. A partir de las opiniones de los miembros de la comunidad y otra información contextual, ofrecieron una experiencia de entretenimiento que integra la RM en el espacio real. Los resultados mostraron que la percepción de los participantes se vio afectada positivamente por la experiencia, lo que fomentó la curiosidad e interés por explorar el entorno espacial y social del museo.

- 19 Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 33.
- 20 Chan Park et al., "Interactive building anatomy modeling for experiential building construction education", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142 (3) (2015): 1-9. Peng Wang et al., "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training": 12.
- 21 Charles Woodward y Mika Hakkarainen, "Mobile mixed reality system for architectural and construction site visualization": 70.
- 22 Chi, Hung-Lin, Shih-Chung Kang y Xiangyu Wang. "Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction", *Automation in Construction*, 33 (2013).
- 23 Philipp Rauschnabel et al., "Fashion or technology? A *fashnology* perspective on the perception and adoption of augmented reality smart glasses", *i-com*, 15 (2) (2016): 179-194.
- 24 Seung Cha, Choongwan Koo, Tae Wan Kim y Taehoon Hong, "Spatial perception of ceiling height and type variation in immersive virtual environments", *Building and Environment*, 163 (2019): 1-10.
- 25 Valentina Nisi et al., "A Mixed Reality neighborhood tour: Understanding visitor experience and perceptions": 95.

Los modelos arquitectónicos virtuales pueden ser útiles en la representación virtual de proyectos de arquitectura, diseños urbanos de construcción y estudios patrimoniales.²⁶ Bruder et al.²⁷ propusieron la exploración arquitectónica mediante la visualización con RM. El sistema propuesto incluía: caminata real a través de grandes modelos de edificios virtuales; respuesta visual del cuerpo del usuario; y visualización de objetos del mundo real en la vista virtual, basados en funciones de transferencia de color. Encontraron que, aunque tiene múltiples potenciales usos en el diseño arquitectónico, se requiere más investigación.

Yeom, Choi y Kang²⁸ compararon las respuestas fisiológicas y las sensaciones en un entorno de realidad virtual inmersiva (IVE) y en condiciones ambientales reales en el entorno interior. La investigación incluyó una serie de experimentos con 16 participantes en una cámara ambiental. Si bien la condición térmica ambiental se cambió gradualmente de 20 °C a 30 °C, se pidió a los participantes que informaran sus sensaciones térmicas generales. La temperatura de su piel también se midió continuamente para recopilar información de señales fisiológicas en tiempo real. Los resultados revelaron que las sensaciones térmicas fueron significativamente mayores en la condición IVE que en el entorno real.

Mouratidis y Hassan²⁹ evaluaron las percepciones ambientales y valoraciones afectivas de los usuarios inmersos en espacios arquitectónicos de estilos contemporáneos versus tradicionales. Los resultados sugieren que los estilos arquitectónicos contemporáneos, inspirados en la posmodernidad y caracterizados por la asimetría, la falta de ornamentación y la apariencia industrial, se evalúan de forma negativa, mientras que los estilos tradicionales, caracterizados por la simetría y la ornamentación, de manera positiva. Concluyeron que, debido a que este estudio se centró en los espacios, se necesita más investigación para obtener una mejor comprensión de cómo las características físicas de la arquitectura impactan en las percepciones y el bienestar emocional de los usuarios.

De manera similar, Naz et al.³⁰ realizaron un estudio utilizando una pantalla inmersiva proyectada de seis lados, con atributos de diseño equivalentes al brillo, color y textura, para evaluar en qué medida la res-

- 26 David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 442. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 36. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach": 375.
- 27 Gerd Bruder, Frank Steinicke, Dimitar Valkov y Klaus Hinrichs, "Augmented virtual studio for architectural exploration", en Richir Simon y Shirai Akihiko (eds.), *Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC 2010)* (Francia: Laval, 2010), 43-50.
- 28 Dongwoo Yeom, Joon-Ho Choi y Sin-Hwa Kang, "Investigation of the physiological differences in the immersive virtual reality environment and real indoor environment: Focused on skin temperature and thermal sensation", *Building and Environment*, 154 (2019): 44-54.
- 29 Kostas Mouratidis y Ramzi Hassan, "Contemporary versus traditional styles in architecture and public space: A virtual reality study with 360-degree videos", *Cities*, 97 (2020): 1-10
- 30 Asma Naz, Regis Kopper, Ryan McMahan y Mihai Nadin, "Emotional qualities of VR space", *2017 IEEE Virtual Reality (VR)* (2017): 3-11.

puesta emocional en un entorno simulado se ve afectada por los mismos parámetros que afectan a los entornos reales. Los resultados indicaron que los aspectos emocionales perceptibles de los espacios del mundo real podrían generarse con éxito a través de la simulación de atributos de diseño en el espacio virtual. La respuesta subjetiva al espacio virtual fue consistente con las respuestas correspondientes de la percepción emocional del color y el brillo del mundo real. Concluyeron que la investigación futura debería explorar elementos de diseño arquitectónico que potencialmente puedan evocar sentimientos de amplitud en un espacio pequeño y compartido, destinado a jóvenes profesionales. Asimismo, comentan que se debería analizar variables como la luz solar simulada y aberturas (ventanas) como elementos de diseño para determinar sus dimensiones afectivas. Finalmente, recomiendan la pantalla tipo CAVE inmersiva a escala humana, ya que puede funcionar como una herramienta de diseño arquitectónico que permite crear una variedad de espacios.

Por otro lado, Paes, Arantes e Irizarry³¹ analizaron la comprensión espacial a partir de una maqueta virtual de un sistema inmersivo. Se comparó la percepción espacial de los usuarios usando una estación de trabajo convencional versus una plataforma inmersiva. Los resultados indican una mejor percepción espacial general del modelo virtual cuando se utiliza el entorno inmersivo. El estudio concluye que el entorno inmersivo puede beneficiar las prácticas de diseño actuales al mejorar la comprensión de los profesionales de la disposición espacial del modelo virtual.

Riexinger et al.³² desarrollaron un proyecto para mejorar los procesos de planificación, producción y construcción con visualización in situ en RM. Se basaron en soluciones de visualización y prototipos de RM desarrolladas con el objetivo de proporcionar datos relevantes para diferentes partes interesadas, utilizando información basada en el modelado de información de construcción. Los resultados demostraron que las aplicaciones de la RM pueden aportar beneficios para el trabajo diario en fábricas y entornos de construcción. Con la ayuda de las herramientas de la RM, se pueden evitar errores, mejorar la calidad y optimizar el rendimiento general del trabajo.

Galán, García y Felip³³ proponen incorporar al usuario en el proceso de desarrollo conceptual del proyecto de construcción de viviendas

31 Daniel Paes, Eduardo Arantes y Javier Irizarry, "Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems", *Automation in Construction*, 84 (2017): 292-303.

32 Günther Riexinger, Andreas Kluth, Manuel Olbrich, Jan-Derrick Braun y Thomas Bauernhansl, "Mixed Reality for on-site self-instruction and self-inspection with Building Information Models", *Procedia CIRP*, 72 (2018): 1124-1129.

33 Julia Galán Serrano, Carlos García-García y Francisco Felip Miralles, "Experiencias inmersivas durante la fase conceptual del proyecto arquitectónico: la realidad virtual como herramienta para la participación del usuario en el proceso de co-creación", *EGE: Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, 10 (2018).

unifamiliares, con la utilización de la RM. Esto le permitiría al usuario vivir experiencias reales en el espacio que habitará antes de que sea construido, y a los diseñadores y arquitectos centrar la atención en el estudio personalizado de la iluminación natural y el diseño de los paramentos que actuarán como nexo entre el espacio interior y exterior de la vivienda.

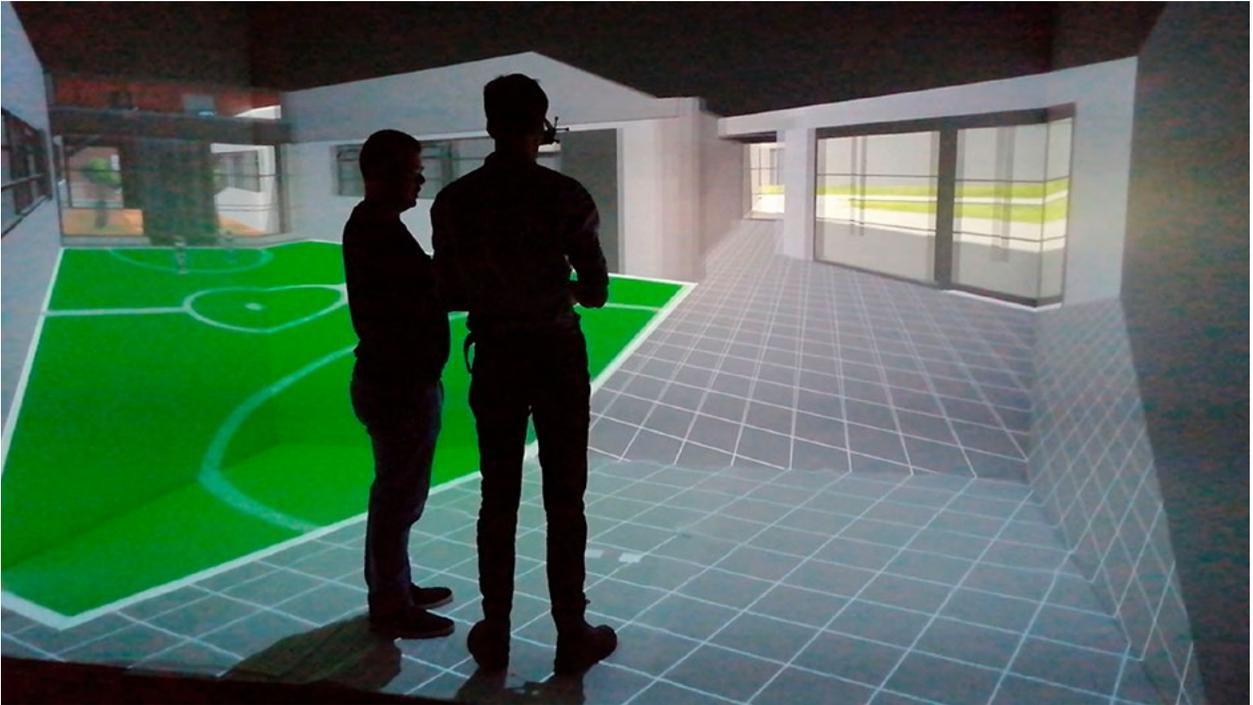
Aunque la RM ha sido ampliamente estudiada en la arquitectura, aún falta por estudiar el impacto en la percepción del espacio arquitectónico desde la óptica de la arquitectura, según lo sugiere una revisión sistemática de la literatura en bases de datos científicas. Los estudios del impacto de la RM en el espacio arquitectónico han hecho énfasis en el espacio físico o virtual.³⁴ También, los estudios están dirigidos a la formación de estudiantes y arquitectos en el uso de la RV en proyectos arquitectónicos.³⁵ Se ha relegado a un segundo plano el efecto de la RM sobre la percepción del usuario en el plano psicológico.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo analizar el impacto de la RM en la percepción del usuario dentro del espacio arquitectónico; busca aportar conocimientos a través del análisis espacial y funcional de espacios construidos con tecnología de RM que benefician al usuario y explicar de forma breve cómo se está modificando el proceso tradicional de diseño en su fase de configuración espacial.

Metodología

Este es un estudio cuasiexperimental basado en un enfoque mixto, que combina el análisis de datos cualitativos y cuantitativos.³⁶ Por un lado, se examinan las percepciones y significados producidos a partir de las

- 34 Gerd Bruder et al., "Augmented virtual studio for architectural exploration": 47. David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 442. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 511. Asma Naz et al., "Emotional qualities of VR space": 8. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 34. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach": 376. Kostas Mouratidis y Ramzi Hassan, "Contemporary versus traditional styles in architecture and public space: A virtual reality study with 360-degree videos": 8.
- 35 David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 442. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 36. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach": 375. Lucinda Kerawalla et al., "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science": 170. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 510. Arezoo Shirazi y Amir Behzadan, "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum": 9. Ben Young, Ehab Ellobody y Thomas Hu, "3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching": 135. Pedro Akeem, Quang Tuan Le y Chan Sik Park, "Framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality": 8. Seung Wan Hong, Davide Schaumann y Yehuda E. Kalay, "Human behavior simulation in architectural design projects: An observational study in an academic course": 6.
- 36 Roberto Hernández, Carlos Fernández y Pilar Baptista, *Metodología de la investigación* (México, DF: Editorial McGraw, 2014), 78.



experiencias de los participantes en recorridos de distintos espacios arquitectónicos. Por otro, se realizaron experimentos, cuyos datos fueron analizados usando técnicas estadísticas.

Autora: Clementina Palomo. Prueba piloto. CAVE + CAVE + espacio real. 2019. CERV, Brest, Francia.

Población y muestra

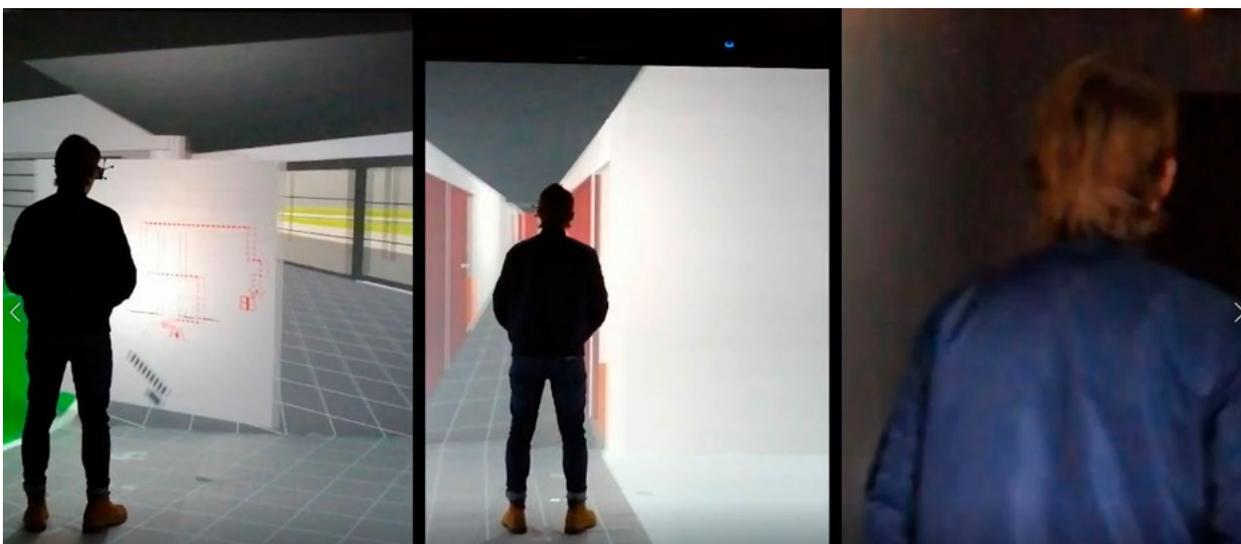
La población de estudio estuvo constituida por 35 informantes: 22 mujeres y 13 hombres, a quienes se le aplicó un cuestionario previo a la realización de los experimentos. De este grupo, se seleccionó una muestra de 15 participantes para la realización de las pruebas incluidas en los experimentos. Estos se distribuyeron en dos grupos: siete realizaron la prueba real (croquis y plano arquitectónico) + CAVE + CAVE + espacio real y ocho realizaron la prueba real plano arquitectónico espacio real + MAGIC LEAP.

Procedimientos

Previo a la realización de los experimentos, se realizó un estudio piloto con el propósito de, por un lado, describir cualitativamente las sensaciones experimentadas por un grupo de informantes durante el recorrido y, por el otro, conocer su opinión sobre el recorrido, los indicadores visuales manipulables y su adaptación a los dispositivos. 20 participantes realizaron, en la estación de RM, la prueba CAVE + CAVE + espacio real.

En estas pruebas se identificaron y evaluaron las siguientes variables cualitativas mediante una entrevista:

- El reconocimiento del recorrido.
- Las sensaciones experimentadas durante el recorrido (por ejemplo, mareo, estrés).



Autora: Clementina Palomo. Prueba CAVE + CAVE + espacio real. 2019. CERV, Brest, Francia.



Autora: Clementina Palomo. Prueba espacio real + MAGIC LEAP. 2019. CERV, Brest, Francia.

- Las sensaciones experimentadas en relación con los indicadores visuales manipulables.
- La transición visual fluida y pausada.
- La percepción en relación con el fotorealismo del modelo de 3D proyectado en el CAVE.
- La adaptación a los dispositivos usados.

El diseño de los experimentos incluidos en esta investigación se realizó con la colaboración con el Centro de Realidad Virtual de Brest (CERV) de la Escuela Nacional de Ingenieros de Brest (ENIB), y la Université de Bretagne Occidentale, Francia, dirigidos por el Dr. Ronan Querreq y la Dra. Edna Hernández González, respectivamente.



Autora: Clementina Palomo. Prueba espacio real + MAGIC LEAP. 2019. CERV, Brest, Francia.

La estación de RM es una instalación ubicada en el Centro de Realidad Virtual (Laboratorio CAVE). Consiste en una pantalla armada en cuatro piezas que forman un cubo abierto y sensores que siguen el movimiento de la cabeza de los participantes por medio del uso de lentes y un control de consola de videojuegos. La instalación se completa con el uso de los lentes MAGIC LEAP durante los recorridos en las pruebas espacio real + MAGIC LEAP. El laboratorio CAVE contiene una pantalla en forma de montea donde se proyectó el modelo tridimensional para la prueba CAVE + CAVE + espacio real. La programación para la prueba espacio real + MAGIC LEAP fue realizada por los ingenieros del CERV en el disco duro de los visores MAGIC LEAP. La prueba consistió en interactuar con un elemento bidimensional (plano arquitectónico) para ubicarse en el espacio y realizar de forma eficiente el recorrido solicitado.

Los 15 estudiantes participantes tenían entre 22 y 23 años, eran franceses y con residencia en Brest, Francia. Se analizó el desplazamiento (caminar y transitar de forma visual) de los sujetos mediante la inmersión al espacio virtual y la interacción con un objeto virtual bidimensional en un recorrido por un espacio de transición.

Los indicadores visuales manipulables acordados fueron: la intensidad de la luz y la temperatura, los objetos tridimensionales virtuales de interacción, y los objetos de referencia. Los indicadores cinestésicos medidos fueron: tiempo de desplazamiento, velocidad durante el desplazamiento, y distancias recorridas.

Se plantearon tres escenarios de experimentación: espacio físico (EF), espacio virtual (EV), y espacio híbrido (EH).

La prueba del espacio físico real de circulación dentro del CERV (espacio de transición) se realizó en el CAVE (CAVE + CAVE + espacio real) con el objetivo de evaluar el proceso cognitivo de reconocimiento del espacio, provocado durante la simulación de transición visual en el modelo tridimensional proyectado y, de forma simultánea, medir el tiempo, velocidad y distancia recorrida.

La prueba del espacio virtual transitado de forma virtual a través de la proyección del modelo tridimensional en el CAVE, llamada CAVE + CAVE + espacio real, se realizó dos veces, es decir, se estableció un recorrido que debía repetirse con la ayuda de un objeto dinámico (croquis/plano arquitectónico con el recorrido dibujado) y utilizando la RV como medio de entrenamiento visual. Se midió el tiempo, la velocidad y la distancia recorrida durante cada prueba y la cantidad de consultas del objeto dinámico para llegar a su punto destino.

El escenario híbrido es el espacio real en fusión con la RV. Se planteó el mismo recorrido que en los escenarios previamente descritos. Esta prueba se denominó espacio real + MAGIC LEAP. La inmersión a la RM se realizó por medio de lentes MAGIC LEAP y la intervención de un objeto dinámico de consulta (plano arquitectónico). Se realizó el recorrido del espacio de transición utilizando lentes MAGIC LEAP. También se midió el tiempo, la velocidad y la distancia recorrida, así como la cantidad de consultas del objeto interactivo.

Técnicas de recolección de datos y medición

Cuestionario: se aplicó de forma digital un cuestionario autoadministrado antes de los experimentos. El cuestionario se divide en tres secciones: la primera contiene preguntas relacionadas al conocimiento de la RV y RM; la segunda incluye preguntas abiertas que exploran la opinión sobre la utilización de la RM en las actividades cotidianas; y, finalmente, la tercera contiene preguntas sobre el perfil social de cada participante.

Cédula de registro: es una tarjeta que permite el registro del tiempo, la velocidad, la distancia, el número de consultas del croquis o plano arquitectónico, así como las condiciones del ambiente virtual y real durante las pruebas realizadas (CAVE + CAVE + espacio real y espacio real + MAGIC LEAP).

Hoja de registro de la descripción de la experiencia: se trata de una herramienta sin estructura predefinida que se les solicitó a los usuarios al final de la prueba, con el objetivo de sumar datos para interpretar la percepción del espacio con RM.

Documentación: de forma complementaria, se realizó una búsqueda sistemática de artículos científicos relacionados con el impacto de la RM en la percepción del usuario dentro del espacio arquitectónico en Google Scholar, Science Direct, SpringerLink, SciELO y Dialnet entre el 2015 y 2020.

Finalmente, para el análisis estadístico, se emplearon análisis descriptivos para determinar frecuencias, y la ANOVA, la Distancia Cuadrática Media (DSM) y la prueba de Bonferroni para determinar las diferencias entre los grupos y entre los momentos de los experimentos, con un nivel de confiabilidad del 95% ($p = 0.005$).

Resultados

Resultados de la prueba piloto

A continuación, se sintetizan los resultados de entrevista realizada posterior al recorrido del estudio piloto:

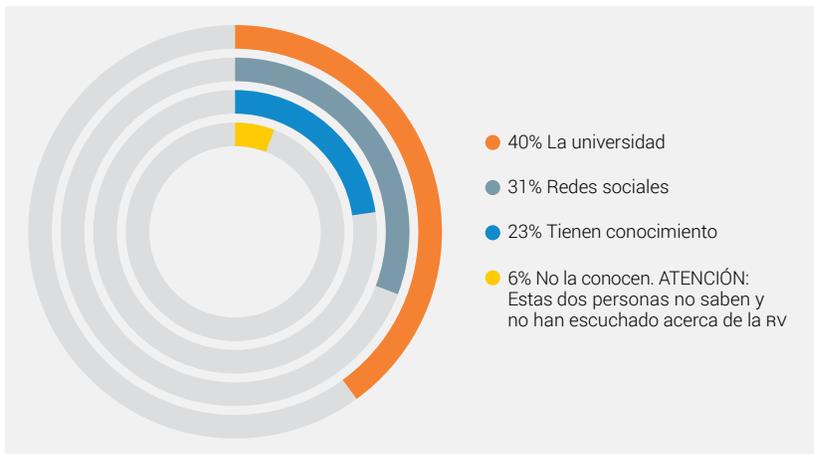
- Durante la transición visual fluida sintieron mareos.
- En la transición pausada sintieron dolores de cabeza.
- La mayoría se sintió cómodo con las dos formas de transitar.
- La intensidad de la luz en la proyección deslumbraba, lo cual les causó dolor de cabeza y mareos.
- La mayoría experimentó estrés asociado a la presión de transitar del punto A al B.
- Tener espectadores mientras realizaban el recorrido, el silencio dentro del CAVE y la sensación de permanecer en una sola posición les generó estrés.
- Para la mayoría fue complicado ubicarse en el espacio durante el recorrido virtual.

Resultados del cuestionario

Previa a la experimentación, se aplicó el cuestionario, cuyos resultados cuantitativos sobre la percepción de la tecnología de RV y RM se presentan a continuación.

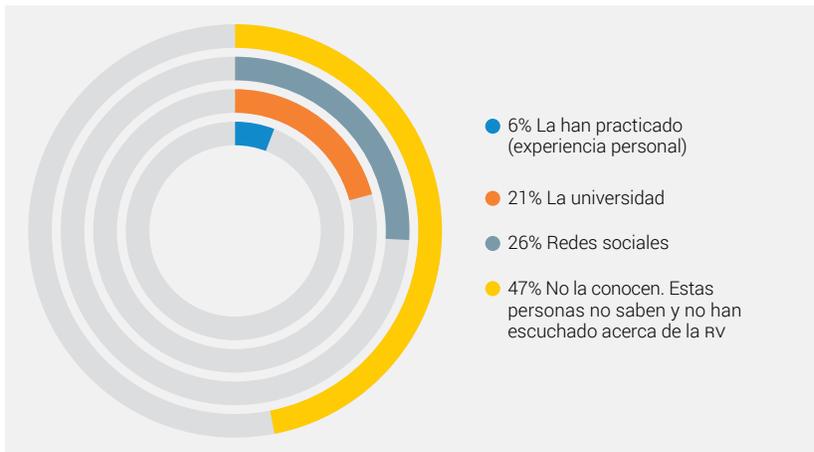
De acuerdo con los datos, el 23% tenía conocimiento sobre la RV y el 6% no conoce el concepto. El 31% conocen la RV por la universidad; el 40%, por las redes sociales.

En cuanto al conocimiento sobre la RM, los datos indican que el 6% ha tenido alguna experiencia de RM; el 21% tiene conocimiento por la universidad, el 26% lo ha visto en las redes sociales y el 47% no sabe sobre ella.

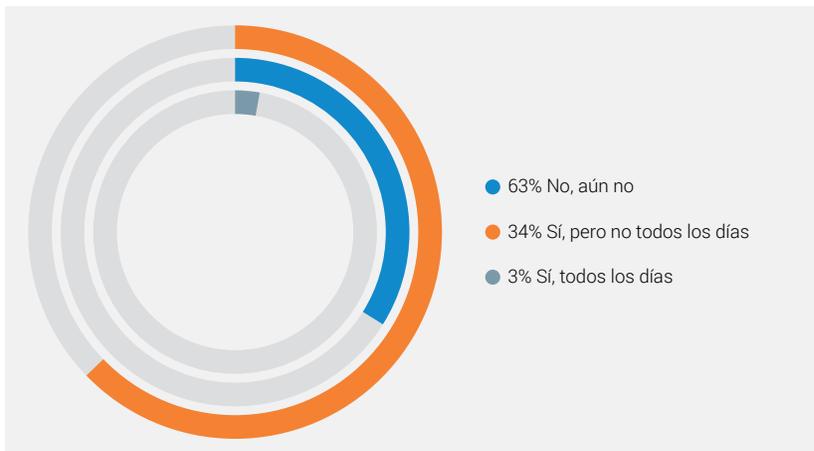


Conocimiento de la RV.

La opinión de los encuestados acerca de la presencia de la RV y RM en la vida cotidiana se muestra que el 34% opinan que aún no están presentes, mientras que el 63% considera que sí, pero no de forma permanente; el 3% considera que sí están presentes todos los días.

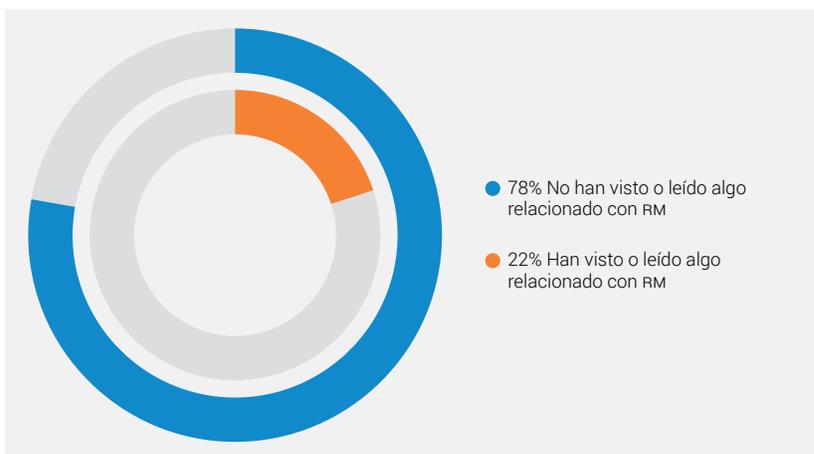


Conocimiento de la RM.



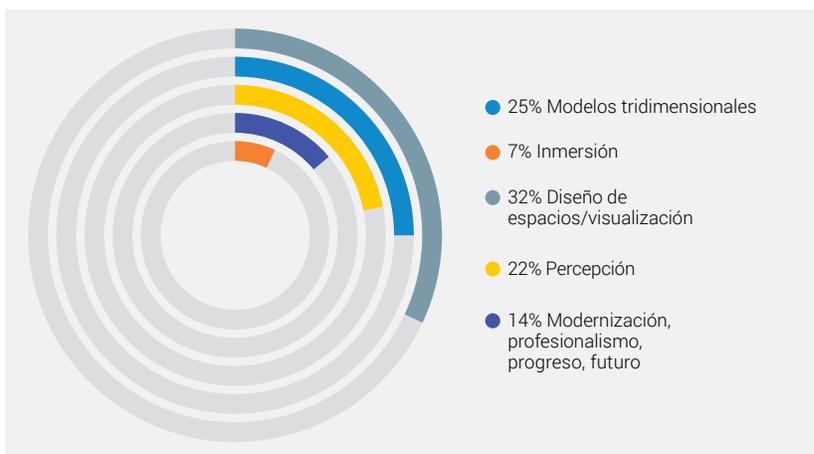
Presencia de la RV/RM en la vida cotidiana.

Sobre el conocimiento de la RV o la RM a través de medios impresos o visuales, los datos indican que el 22% han accedido a información sobre la RV o la RM; el otro 78% no han visto ni leído nada relacionado con estas tecnologías.



Conocimiento de la RM a través de medios impresos y/o visuales.

Por su parte, los términos empleados para referirse a la RV y la RM en la arquitectura son: modelos tridimensionales (25%), inmersión a la RV (7%), el diseño y la visualización (32%), la percepción del espacio (22%) y la modernización, profesionalismo y el futuro (14%).



Palabras que relacionan la RV/RM con la arquitectura.

Por otro lado, los participantes identificaron algunas ventajas del espacio arquitectónico con RV/RM: es fácil de usar, permite interactuar de forma simultánea con el espacio real, crea una representación muy cercana a la realidad, permite comprender el espacio y el funcionamiento de la ciudad o de otros espacios simulados, ver errores cuando diseñas un espacio, visualizar el futuro de un espacio y visualizar un espacio que está en otra parte del mundo, así como el entorno, y, finalmente, permite realizar un diagnóstico de un espacio sin acceder a él.

Asimismo, los participantes identificaron riesgos y defectos del uso de la RV/RM en el espacio arquitectónico: pérdida de emoción, sensibilidad y sorpresa ante los elementos reales; los espacios pueden hacerse

más impersonales por carecer de identidad o personalización; genera dependencia de la RV/RM, problemas de salud y dificultad para separarse del mundo virtual; produce pérdida del interés por lo tangible; supone la desnaturalización del espacio, el olvido del mundo real y la importancia del movimiento a través del espacio; implica la desconexión de la realidad y pérdida de conciencia; y, finalmente, el mundo virtual aún tiene errores en la noción de presencia y escala.

Resultados de las pruebas CAVE + CAVE + espacio real y espacio real + MAGIC LEAP

Como puede observarse en la última fila de la tabla 1, el tiempo promedio de la segunda prueba del CAVE + CAVE + espacio real disminuyó más de la mitad respecto de la primera, pasó 4.5 a dos minutos. Asimismo, se realizaron un total de 100 consultas del plano arquitectónico, un promedio de 14 en la prueba del CAVE + CAVE + espacio real.

Tanto en la prueba CAVE + CAVE + espacio real como en la prueba espacio real + MAGIC LEAP, los tiempos en las segundas pruebas disminuyeron más de la mitad (ver tabla 1), de 2.8 a 1.3 minutos promedio. En la prueba espacio real + MAGIC LEAP, se realizaron un total de 76 consultas del plano arquitectónico, un promedio de nueve en la prueba 1; esta se redujo considerablemente en la prueba 2, donde se realizaron 21 consultas, con un promedio de 2.6 consultas.

Prueba RV, CAVE + CAVE				Espacio real	Prueba RM. Espacio real + MAGIC LEAP			
Tiempo prueba 1	Consultas croquis/plano arquitectónico	Tiempo prueba 2	Consultas croquis/plano arquitectónico	Tiempo espacio real	Tiempo prueba 1	Consultas plano arquitectónico	Tiempo prueba 2	Consultas plano arquitectónico
5	18	2.18	2	1.28	3.31	5	1.55	8
5.22	10	1.54	3	1.34	3.02	14	1.45	4
3.2	10	3.08	0	2.27	3.51	7	1.46	1
2.57	14	1.55	1	1.26	2.53	3	1.23	0
3.47	7	2.2	3	1.35	3.26	3	1.26	0
5.13	15	4	8	1.49	1.56	12	1.27	2
7.05	26	1.54	0	1.31	3.48	20	1.22	6
					2.12	12	1.23	0
4.52	14.28	2	2.42	1.46	2.84	9.5	1.33	2.62

Tabla 1. Resultados de las pruebas.

Resultados obtenidos después de la inmersión

Las pruebas CAVE + CAVE + espacio real se realizaron sin iluminación natural, solo la del ambiente virtual artificial con temperatura de tres mil luxes, con una intensidad alta. Los elementos virtuales de paralaje considerados fueron los espacios de referencia como la cancha de robots, escaleras y jardines que colindan con los pasillos de conexión, sin sonido. El único objeto de interacción virtual fue el plano arquitectónico o croquis. La proximidad del usuario con los objetos virtuales fue cercana, representada a escala mediante un control de movimiento.

Cohérente con los resultados cuantitativos previos, los resultados de las segundas pruebas fueron mejores que la primera. Mejora la experiencia. En los siguientes testimonios, tomados literalmente de los informantes, se pueden apreciar las percepciones y sensaciones de los participantes después de la prueba CAVE + CAVE + espacio real:

- El inicio del experimento fue un poco confuso, estamos más centrados en cómo manipular el controlador que en el camino a seguir. Por lo tanto, la primera ruta permite aprender y la segunda ruta es más simple, ya que se ha experimentado el camino a seguir. La memoria también permite menos consulta del mapa. El último viaje es un poco inesperado, realmente no esperamos que la realidad virtual se reproduzca muy bien. Este viaje se basa principalmente en el instinto y la repetición.
- Efectos secundarios de la experiencia: dolor de cabeza (leve).
- Durante la primera prueba, se presentaron dificultades para pasar al punto B. La segunda fue más sencilla, mientras que en la tercera el recorrido fue fácil; no hubo necesidad de consultar el plano. La sensación fue familiar y realicé el recorrido con seguridad.
- Efectos secundarios de la experiencia: piernas temblorosas, problemas de visión y náuseas.
- Deslumbre de los textos.
- El uso del *joystick* da una sensación de mareo, que desapareció después de finalizar la actividad.
- Experimenté pérdida de orientación. En términos de sensación, es bastante extraño tener la impresión de avanzar sin caminar. Tuve la sensación de pérdida de equilibrio.

En cuanto a las condiciones en que se realizaron las pruebas espacio real + MAGIC LEAP, hubo iluminación natural, con una intensidad baja; se realizó después de las 17:30 horas, con un clima nublado. Los elementos de paralaje considerados fueron los elementos constructivos permanentes del edificio y los espacios de referencia colindantes al espacio de transición, como la cancha de robots, escaleras y jardines. Se incluyeron sonidos reales relacionados con el espacio. El único objeto de interacción virtual fue el plano arquitectónico. La proximidad del usuario con los objetos virtuales fue cercana.

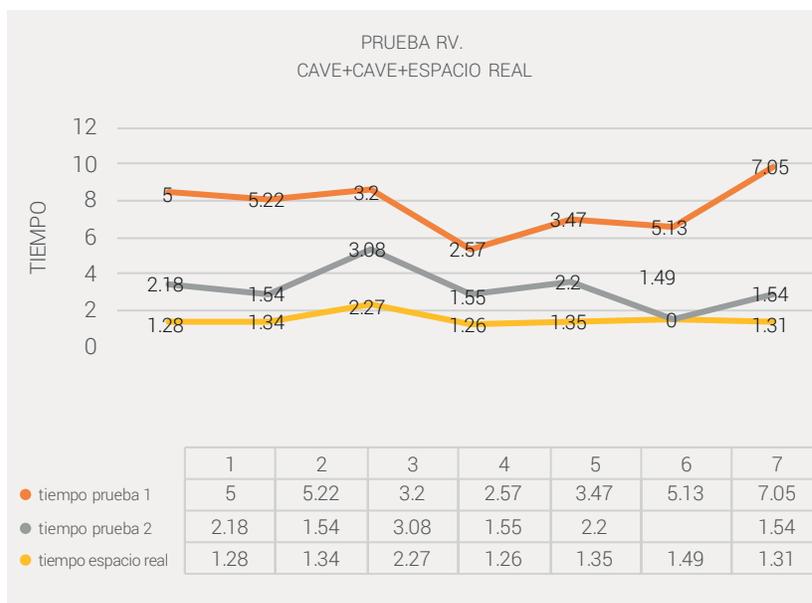
De forma similar, la segunda prueba del experimento espacio real + MAGIC LEAP mejoró la experiencia; fue percibida como más sencilla y menos traumática debido a lo aprendido de las primeras. Sin embargo, los usuarios refirieron problemas con el manejo de los dispositivos. Las sensaciones experimentadas después de las pruebas espacio real + MAGIC LEAP se describen a continuación:

- Esperaba enfrentarme a un mundo virtual a través de las gafas. Por ello, al principio no entendí que era necesario moverse realmente en el edificio. Durante la primera sesión, utilicé el plano durante todo el viaje. Para la segunda sesión, logré en parte no usarlo, ya que el viaje fue el mismo que el primero.

- Me sentí bien durante la experiencia, pero el plano me molestó un poco. Estaba incómodo por el casco, especialmente en la parte delantera, tal vez porque era demasiado grande.
- Tuve muy pocos problemas para visualizar a dónde tenía que ir porque era necesario cambiar rápidamente de dirección (era necesario visualizar a dónde ir sin que el plano se adaptara a nuestro viaje en tiempo real).
- Durante el ejercicio, en la prueba 1 estaba un poco confundido porque no conocía el lugar en absoluto. Es por eso que dejé el plano todo el tiempo. Fue una solución para mí, pues me permitió mantener mi orientación y no tomar malas direcciones. Por lo tanto, la segunda prueba fue más fácil, sin un plano, ya que la había memorizado en el primer intento.
- Disfruté descubriendo este equipo que seguramente será una versión de las máquinas que utilizaremos en el futuro cercano. Todavía encontré la experiencia básica, seguramente debido a la visión que tenemos a través de las nuevas tecnologías, como la realidad virtual, que creemos que son bastante avanzadas. La experiencia habría sido más impresionante con el establecimiento de una animación original dentro de las gafas. Desde el punto de vista práctico, la correa para el hombro conectada a las gafas es restrictiva.

Análisis comparativo

Se analizaron de forma comparativa la eficiencia en función del tiempo realizado durante la prueba CAVE + CAVE + espacio real. Los datos fueron registrados en minutos para los siete participantes. Se encontró un promedio de 4.52 minutos para la primera prueba. En cambio, en la prueba 2 se empleó en promedio menos de la mitad del tiempo de la primera (dos minutos). Por su parte, la prueba realizada en el espacio real fue en promedio de 1.5 minutos para los siete participantes.



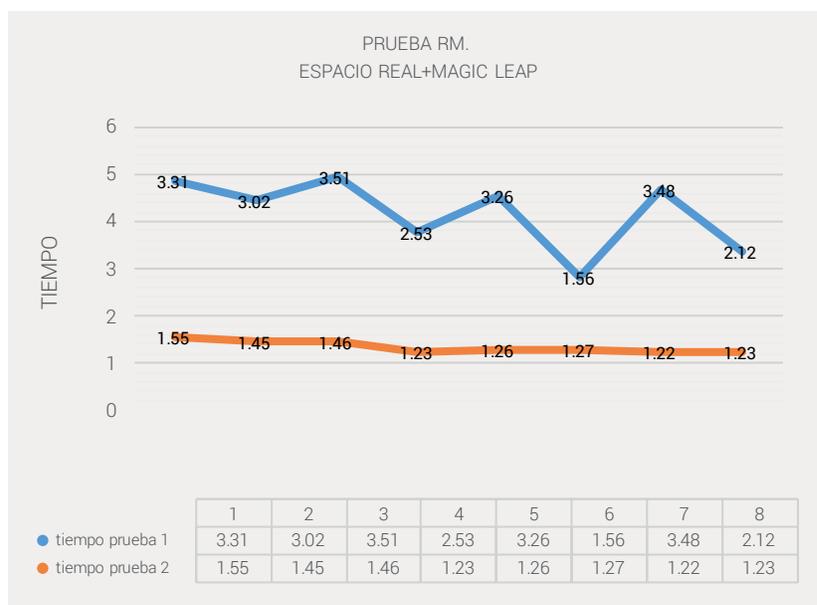
Comparativa de tiempos registrados durante la prueba CAVE + CAVE + espacio real.

Por otro lado, se contrastó la eficiencia en función del tiempo realizado durante la prueba espacio real + MAGIC LEAP. Los datos también se registraron en minutos para los ocho participantes. Se encontró un promedio de 2.85 minutos para la primera prueba. En cambio, en la prueba 2 se empleó en promedio 1.33 minutos, lo cual representa menos de la mitad del tiempo utilizado en la primera prueba.

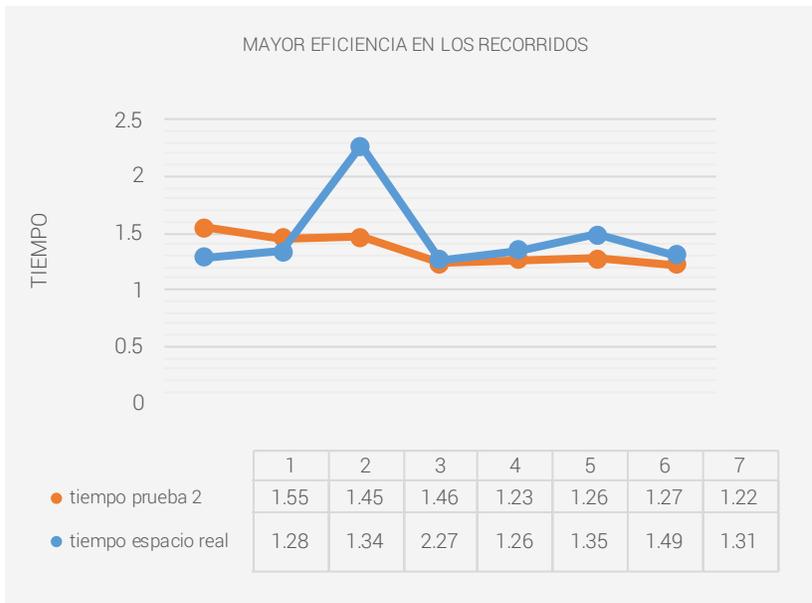
Se compararon los resultados de los tres experimentos en función del mejor tiempo empleado. Se encontró que las segundas pruebas, tanto en el RV CAVE + CAVE como en la que se empleó el MAGIC LEAP, fueron más eficientes. La eficiencia en el reconocimiento del espacio es mayor con los lentes que con las simulaciones dentro del CAVE; se considera que la experiencia con los visores resulta menos estresante. En la prueba de espacio real se encontró un promedio de 1.47 minutos. De manera similar, en la prueba 2, en la que se utilizó el MAGIC LEAP, se emplearon, en promedio, 1.35 minutos. Esto indica que el uso del MAGIC LEAP mejora el tiempo utilizado en la prueba de espacio real.

Asimismo, se compararon los tiempos invertidos durante la prueba CAVE, espacio real y con RM, para determinar cuál se realizó, en promedio, en menos tiempo. Como puede observarse, la prueba 2 espacio real + MAGIC LEAP resultó ser más eficiente, pues los tiempos empleados durante los recorridos son más cortos.

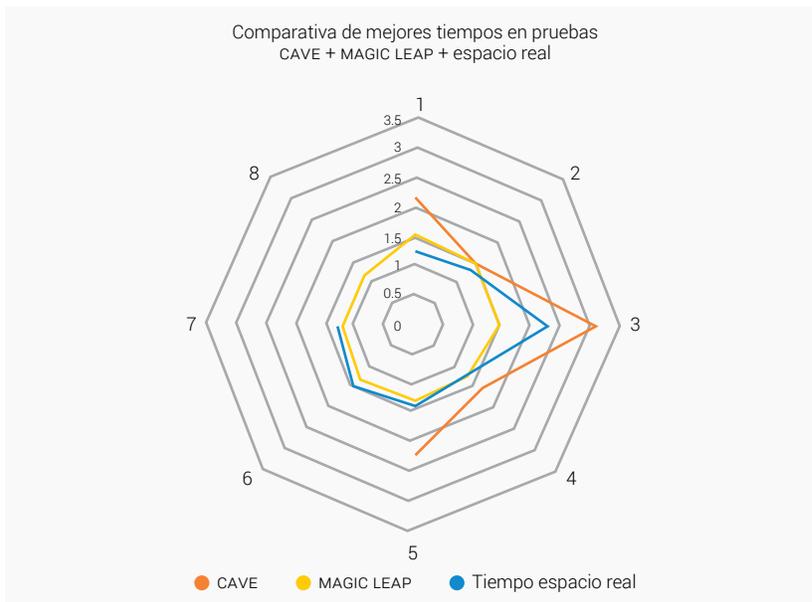
Por último, se compararon los tiempos promedio realizados en cada prueba experimental. Si consideramos que el límite de tiempo a mejorar es el tiempo promedio de la experiencia en el espacio real (1.47 minutos), la única prueba que supera ese tiempo después de un intento, sin consecuencias físicas negativas, es la prueba 2 espacio real + MAGIC LEAP. Por lo tanto, se puede afirmar que es la más eficiente.



Comparativa de tiempos registrados durante la prueba espacio real + MAGIC LEAP.



Comparativa de la eficiencia en recorridos espacio real y espacio real + MAGIC LEAP.



Comparativa de la eficiencia en los recorridos CAVE + CAVE + espacio real, espacio real + MAGIC LEAP.

Significación estadística

Se comparó la eficiencia en función del tiempo empleado durante las dos pruebas del experimento de RV CAVE + CAVE, las dos pruebas del experimento RM con MAGIC LEAP y la prueba del experimento en espacio real.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las cinco pruebas, pues el P valor es menor a 0.05. Se encontró que las segundas pruebas, tanto en el RV CAVE + CAVE como en la de RM que empleó el MAGIC LEAP, fueron más eficientes. Se puede observar que los promedios de tiempo mínimos se reportaron en la segunda prueba de la RV CAVE + CAVE (1.26 minutos) y la segunda prueba de la RM con MAGIC LEAP (1.22 minutos).

Por otro lado, se comparó la eficiencia en función del número de consultas realizadas durante las dos pruebas del experimento de RV CAVE + CAVE y las dos pruebas del experimento RM con MAGIC LEAP. También se empleó la prueba ANOVA, con un nivel de confiabilidad del 95% ($p = 0.005$). Se observan diferencias estadísticamente significativas en el número de consultas realizadas en las cuatro pruebas de los dos experimentos, pues el P valor es menor a 0.05. Similar al comportamiento de la variable tiempo empleado, se encontró que las segundas pruebas, tanto en el RV CAVE + CAVE como en la de RM que empleó el MAGIC LEAP, fueron las que menos consultas reportaron, con 2.4 y 2.6 consultas, respectivamente.

Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar el impacto de la RM en la percepción del usuario dentro del espacio arquitectónico. Al considerar los resultados del análisis cualitativo y cuantitativo, se puede afirmar que la aplicación de la tecnología RM en el espacio arquitectónico, caracterizada por producir estímulos sensoriales visuales, auditivos y cinestésicos, afecta positivamente la percepción del usuario de los conceptos distancia, profundidad y permisividad de movimiento dentro del espacio virtual y físico que modifica la transición entre espacios arquitectónicos, lo que hace más eficiente su transición cuando el ambiente digital sirve al usuario para dicha transición.

En relación con los resultados del cuestionario, se pueden sintetizar en los siguientes términos: la mayoría de los usuarios desconoce la tecnología de RM. En su mayoría, esta está relacionada con el modelado tridimensional, el diseño innovador y la visualización de proyectos futuros, lo cual coincide con Icasa et al.,³⁷ sin embargo, difiere notablemente de las aplicaciones reportadas en estudios previos.³⁸

Las sensaciones de confusión y desorientación que experimentaron los participantes durante la inmersión en el CAVE y con los visores MAGIC LEAP pueden haber estado relacionadas con que era su primera experiencia; no habían visualizado o concientizado la posibilidad de incluir la tecnología de RM en su realidad.

37 J. Icasa et al., *Realidad Mixta*.

38 Lucinda Kerawalla et al., "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science": 170. David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 440. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 510. Arezoo Shirazi y Amir Behzadan, "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum": 9. Ben Young, Ehab Ellobody y Thomas Hu, "3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching": 135. Pedro Akeem, Quang Tuan Le y Chan Sik Park, "Framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality": 8. Seung Wan Hong, Davide Schaumann y Yehuda E. Kalay, "Human behavior simulation in architectural design projects: An observational study in an academic course": 6. Peng Wang et al., "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training": 12. Shiqian Ke et al., "A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin": 755. Arturo Merino, *Realidad Mixta*.

El desarrollo de la habilidad de movimiento mediante un control durante la prueba CAVE + CAVE + espacio real provocó que los participantes experimentaran confusión al inicio del experimento; sin embargo, durante la segunda prueba, una vez desarrollada la habilidad, sintieron confianza a través del espacio real.

Otras sensaciones experimentadas fueron dolor de cabeza, piernas temblorosas, náuseas y pérdida de orientación. Esto pudo haberse debido a la incertidumbre que generaba la experiencia, la ausencia de sonidos para hacer conexión con el espacio virtual, el movimiento visual pausado y/o continuo y no corporal y la intensidad de la luz. Estos hallazgos coinciden con los resultados de Hermund, Klint y Bundgård,³⁹ quienes encontraron que el escenario de realidad virtual parece ser más cercano a la realidad que la experiencia del mismo espacio a través de planos y dibujos arquitectónicos tradicionales.

Los resultados relacionados con las emociones experimentadas bajo las condiciones en la prueba espacio real + MAGIC LEAP (portar visores, desconocimiento del espacio y solo como referencia un plano arquitectónico virtual) indican que hubo confusión en la ubicación, descontento con el objeto virtual, presión por no cometer errores, incomodidad debido al diseño de los visores y a la escasa sensación de disfrute del entorno. Los resultados son coincidentes con los hallazgos de un estudio previo de Kozhevnikov y Dhond,⁴⁰ quienes encontraron que el procesamiento visual-espacial es diferente en entornos inmersivos y no inmersivos. Los entornos inmersivos pueden requerir diferentes estrategias de codificación y transformación de imágenes que los otros entornos no inmersivos.

Se observó que, bajo las condiciones en las que se realizaron los experimentos, los participantes tenían que tomar recesos con el uso de lentes dentro del CAVE. A pesar de eso, al final de la prueba estaban muy estresados por la inmersión en una sola postura; aunque durante la prueba con los visores MAGIC LEAP también experimentaron incomodidad, la experiencia fue más soportable.

Se comparó la eficiencia en función del tiempo empleado durante las dos pruebas del experimento de RV CAVE + CAVE, las dos pruebas del experimento RM con MAGIC LEAP y la prueba del experimento en espacio real. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las cinco pruebas, pues el P valor es menor a 0.05. Se encontró que las segundas pruebas, tanto en el RV CAVE + CAVE como en la de RM que empleó el MAGIC LEAP, fueron más eficientes.

En relación con el número de veces que se consultó el objeto dinámico, los datos muestran, en el caso de la prueba espacio real + MAGIC LEAP, que durante la primera prueba la cantidad de consultas es mayor,

39 Anders Hermund, Lars Klint y Ture Slot Bundgård, "The Perception of Architectural Space in Reality, in Virtual Reality, and through Plan and Section Drawings: A case study of the perception of architectural atmosphere", *Computing for a Better Tomorrow* (2018): 735-744.

40 Maria Kozhevnikov y Rupali P. Dhond, "Understanding immersivity: image generation and transformation processes in 3D immersive environments", *Frontiers in Psychology*, 3 (2012): 284-290.

pues están en proceso de reconocimiento del espacio. En cambio, durante la segunda prueba, la cantidad de consultas es mucho más baja. Estos resultados indican también que la prueba de RM es más eficiente que la RV en términos de entrenamiento y reducción de tiempo en el trayecto. De manera paralela, Wang y Shnabel⁴¹ encontraron que los proyectos de investigación de vanguardia sobre teorías y aplicaciones dentro de la RM ya están cubriendo temas actuales en áreas como arquitectura, diseño, ingeniería civil y educación.

Los parámetros de eficiencia establecidos para cada prueba en un recorrido lineal de 101.5 metros fueron: cinco minutos a una velocidad media, siete minutos a una velocidad baja y 1.5 minutos a una velocidad rápida. La eficiencia de los participantes en realizar el recorrido en las segundas pruebas con las tecnologías CAVE y RM, respectivamente, fue mejor, ya que se redujo el tiempo de ejecución a la mitad. Para la prueba en el espacio real después del entrenamiento en el CAVE, se observó un comportamiento eficiente en el desempeño del recorrido, ya que en el 90% de los casos no se presentaron errores en la ejecución del recorrido asignado ni en el reconocimiento del espacio.

Considerando los resultados obtenidos, se infiere que existe un aprendizaje acelerado con el uso de la RV e interfaces como la RM. Esto podría indicar que la interacción visual es una actividad que moviliza y activa los sentidos, pero no se completa la experiencia si la realidad virtual no representa una experiencia sensible a todos los sentidos. La RM es una experiencia que permite la fusión de ambas realidades y utiliza la estimulación de los sentidos con la realidad física. Esto sugiere la posibilidad de que se convierta en una tecnología de uso cotidiano. Este hallazgo coincide con resultados de estudios previos sobre el uso de la RM en el ámbito educativo de la arquitectura, diseño e ingeniería civil.⁴²

Entonces, el impacto en la percepción del espacio con RM mejora cuando existe mayor estimulación de los sentidos y conexión con las condiciones físicas del espacio. En consecuencia, coincidiendo con

41 Xiangyu Wang y Marc Aurel Schnabel (eds.), *Mixed reality in architecture, design, and construction* (Países Bajos: Springer Science & Business Media, 2008), 68.

42 David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 442. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 511. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 36. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach": 375. Lucinda Kerawalla et al., "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science": 170. Arezoo Shirazi y Amir Behzadan, "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum": 9. Ben Young, Ehab Ellobody y Thomas Hu, "3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching": 135. Pedro Akeem, Quang Tuan Le y Chan Sik Park, "Framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality": 8. Seung Wan Hong, Davide Schaumann y Yehuda E. Kalay, "Human behavior simulation in architectural design projects: An observational study in an academic course": 6.

estudios previos,⁴³ puede ser considerada una tecnología o un artefacto útil con aplicaciones actuales y futuras en la comunicación, localización e interacción.

A pesar de que el concepto rotación mental, que no se consideró de inicio, es de suma importancia en la percepción del espacio con RM, durante la prueba CAVE + CAVE + espacio real, la rotación mental en la tecnología utilizada no está resuelta. Aunque los lentes están conectados con sensores de movimiento, no sustituyen las vistas en perspectiva de los objetos reales y explica por qué los participantes experimentan confusión en la orientación.

El uso de visores de RV en un recorrido largo o cotidiano puede ser considerado un obstáculo. Esto coincide con problemas reportados en estudios previos.⁴⁴ La tecnología va a evolucionar al simplificar las características físicas de los visores como herramienta que permite la inmersión. Esto implica que la tecnología de RM puede mejorar la comunicación y el uso del espacio híbrido, haciendo más cómoda la percepción del espacio y la transición a través de él. Esto coincide con los resultados de los estudios en los que se encontró aplicaciones exitosas de la RM en el ámbito de la arquitectura.⁴⁵

- 43 Gerd Bruder et al., "Augmented virtual studio for architectural exploration": 47. David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 442. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 512. Asma Naz et al., "Emotional qualities of VR space": 8. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 34. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach": 376. Kostas Mouratidis y Ramzi Hassan, "Contemporary versus traditional styles in architecture and public space: A virtual reality study with 360-degree videos": 8.
- 44 David Fonseca et al., "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models": 442. Saleh Kaji et al., "Augmented reality in smart cities: applications and limitations": 36. Mónica Sánchez-Sepulveda et al., "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach": 375. Lucinda Kerawalla et al., "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science": 170. David Fonseca et al., "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals": 510. Arezoo Shirazi y Amir Behzadan, "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum": 9. Ben Young, Ehab Ellobody y Thomas Hu, "3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching": 135. Pedro Akeem, Quang Tuan Le y Chan Sik Park, "Framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality": 8. Seung Wan Hong, Davide Schaumann y Yehuda E. Kalay, "Human behavior simulation in architectural design projects: An observational study in an academic course": 6.
- 45 Asma Naz et al., "Emotional qualities of VR space": 8. Paes, Arantes y Irizarry, Immersive environment, 298. Julia Galán Serrano, Carlos García-García y Francisco Felip Miralles, "Experiencias inmersivas durante la fase conceptual del proyecto arquitectónico: la realidad virtual como herramienta para la participación del usuario en el proceso de co-creación". Günther Riexinger et al., "Mixed Reality for on-site self-instruction and self-inspection with Building Information Models": 1126. Dongwoo Yeom et al., "Investigation of the physiological differences in the immersive virtual reality environment and real indoor environment: Focused on skin temperature and thermal sensation": 48. Kostas Mouratidis y Ramzi Hassan, "Contemporary versus traditional styles in architecture and public space: A virtual reality study with 360-degree videos": 8.

Conclusiones

Se puede concluir que la aplicación de la tecnología RM en el espacio arquitectónico, caracterizada por producir estímulos sensoriales visuales, auditivos y cinestésicos, impacta positivamente la percepción del usuario de los conceptos distancia, profundidad y permisividad de movimiento dentro del espacio virtual y físico que modifica la transición entre espacios arquitectónicos.

En relación con los conocimientos de los usuarios sobre la RM, la mayoría dijo desconocer esta tecnología. Esta está relacionada mayormente con el modelado tridimensional, el diseño innovador y la visualización de proyectos futuros.

Otras sensaciones experimentadas fueron dolor de cabeza, piernas temblorosas, náuseas y pérdida de orientación, lo cual puede estar relacionado con la incertidumbre que generaba la experiencia, la ausencia de sonidos para hacer conexión con el espacio virtual, el movimiento visual pausado y/o continuo y no corporal y la intensidad de la luz.

Los resultados relacionados con las emociones experimentadas bajo las condiciones en la prueba espacio real + MAGIC LEAP indican que sintieron confusión en la ubicación, descontento con el objeto virtual, presión por no cometer errores, incomodidad debido al diseño de los visores y a la escasa sensación de disfrute del entorno.

Al comparar la eficiencia en función del tiempo empleado durante las dos pruebas del experimento de RV CAVE + CAVE, las dos pruebas del experimento RM con MAGIC LEAP y la prueba del experimento en espacio real, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las cinco pruebas, siendo las segundas pruebas más eficientes.

En relación con el número de veces que se consultó el objeto dinámico, la cantidad de consultas fue mucho más baja en la segunda prueba. Estos resultados indican también que la prueba de RM es más eficiente que la RV en términos de entrenamiento y reducción de tiempo en el trayecto.

En futuros estudios habría que analizar cómo los diseñadores perciben el espacio virtual y cómo lo proyectan para generar ambientes virtuales óptimos para los usuarios, pues trascienden los propósitos de este estudio.

También, sería necesario estudiar la posibilidad de hacer adaptaciones de la RM en lo visual, auditivo y cinestésico. Asimismo, sería interesante investigar si los artefactos para inmersión, la capacidad de la red de transferencia de datos y la capacidad de cómputo serán factores que puedan afectar la aplicación de la tecnología RM.

Referencias

- AKEEM, Pedro, Quang Tuan Le y Chan Sik Park. "Framework for integrating safety into construction methods education through interactive virtual reality", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142 (2) (2015).
- BOSCHÉ, Frédéric, Mohamed Abdel-Wahab y Ludovico Carozza. "Towards a mixed reality system for construction trade training", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30 (2) (2015).
- BRUDER, Gerd, Frank Steinicke, Dimitar Valkov y Klaus Hinrichs. "Augmented virtual studio for architectural exploration", en Richir Simon y Shirai Akihiko (eds.) *Proceedings of Virtual Reality International Conference (vric 2010)*. Laval, France, 2010.
- CHA, Seung, Choongwan Koo, Tae Wan Kim y Taehoon Hong. "Spatial perception of ceiling height and type variation in immersive virtual environments", *Building and Environment*, 163 (2019).
- CHI, Hung-Lin, Shih-Chung Kang y Xiangyu Wang. "Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction", *Automation in Construction*, 33 (2013).
- CONSEJO Empresarial de América Latina. <http://ceal.co/algunas-conclusiones-foro-economico-mundial-davos-2016/>
- DE La Fuente Prieto, J., E. Castaño y F. Labrador. "Augmented reality in architecture: Rebuilding archeological heritage", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42 (2017).
- FONSECA, David, Nuria Martí, Ernesto Redondo, Isidro Navarro y Albert Sánchez. "Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models", *Computers in Human Behavior*, 31 (2014).
- FONSECA, David, Francesc Valls, Ernesto Redondo y Sergi Villagras. "Informal interactions in 3D education: Citizenship participation and assessment of virtual urban proposals", *Computers in Human Behavior*, 55 (2016).
- GALÁN Serrano, Julia, Carlos García-García y Francisco Felip Miralles. "Experiencias inmersivas durante la fase conceptual del proyecto arquitectónico: la realidad virtual como herramienta para la participación del usuario en el proceso de co-creación", *EGE: Revista de Expresión Gráfica en la Edificación*, 10 (2018).
- HERMUND, Anders, Lars Klint y Ture Slot Bundgård. "The Perception of Architectural Space in Reality, in Virtual Reality, and through Plan and Section Drawings: A case study of the perception of architectural atmosphere", *Computing for a Better Tomorrow*, 36 (2018).
- HERNÁNDEZ, Roberto, Carlos Fernández y Pilar Baptista. *Metodología de la investigación*. México, DF: Editorial McGraw. 2014.
- HONG, Seung Wan, Davide Schaumann y Yehuda E. Kalay. "Human behavior simulation in architectural design projects: An observational study in an academic course", *Computers, Environment and Urban Systems*, 60 (2016).
- ICASA, J., J. de la Cruz, M. Muñoz e I. Rudomín. *Realidad Mixta*. México: División de Mecatrónica y Tecnologías de Información del ITESM, 2018.
- KAJI, Saleh, Hoshang Kolivand, Ramin Madani, Majid Salehinia y Mino Shafaie. "Augmented reality in smart cities: applications and limitations", *Journal of Engineering Technology*, 6 (1) (2018).
- KE, Shiqian, Feng Xiang, Zh iZhang y Ying Zuo. "A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin", *Procedia CIRP*, 83 (2019).

- KERAWALLA, Lucinda, Rosemary Luckin, Simon Seljeflot y Adrian Woolard. "Making it real: exploring the potential of augmented reality for teaching primary school science", *Virtual Reality*, 10 (3-4) (2006).
- KOOLHAAS, Rem. *Rem Koolhaas responde preguntas como parte de rem Kickstarter*. México: Archdaily, 2014. <https://vimeo.com/108873334>.
- KOZHEVNIKOV, Maria y Rupali P. Dhond. "Understanding immersivity: image generation and transformation processes in 3D immersive environments", *Frontiers in Psychology*, 3 (2012).
- LI, Xiao, Wen Yi, Hung-Lin Chi, Xiangyu Wang y Albert Chan. "A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety", *Automation in Construction*, 86 (2018).
- MERINO, Arturo. *Realidad Mixta*. http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2018/11/Mixed_Reality.pdf
- MOURATIDIS, Kostas y Ramzi Hassan. "Contemporary versus traditional styles in architecture and public space: A virtual reality study with 360-degree videos", *Cities*, 97 (2020).
- NAZ, Asma, Regjs Kopper, Ryan McMahan y Mihai Nadin. "Emotional qualities of VR space", *2017 IEEE Virtual Reality (VR)* (2017).
- NISI, Valentina, Mara Dionisio, Mary Barreto y Nuno Nunes. "A Mixed Reality neighborhood tour: Understanding visitor experience and perceptions", *Entertainment Computing*, 27 (2018).
- PAES, Daniel, Eduardo Arantes y Javier Irizarry. "Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems", *Automation in Construction*, 84 (2017).
- PARK, Chan, Le Quang Tuan, Pedro Akeem y Chung Rok Lim. "Interactive building anatomy modeling for experiential building construction education", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 142 (3) (2015).
- RAUSCHNABEL, Philipp Daniel Hein, Jun He, Young Ro, Samir Rawashdeh y Bryan Krulikowsk. "Fashion or technology? A fashnology perspective on the perception and adoption of augmented reality smart glasses", *i-com*, 15 (2) (2016).
- RIEXINGER, Günther, Andreas Kluth, Manuel Olbrich, Jan-Derrick Braun y Thomas Bauernhansl. "Mixed Reality for on-site self-instruction and self-inspection with Building Information Models", *Procedia CIRP*, 72 (2018).
- SÁNCHEZ-SEPULVEDA, Mónica, David Fonseca, Jordi Franques y Ernesto Redondo. "Virtual interactive innovations applied for digital urban transformations. Mixed approach", *Future Generation Computer Systems*, 91 (2019).
- SHIRAZI, Arezoo, y Amir H. Behzadan. "Design and assessment of a mobile augmented reality-based information delivery tool for construction and civil engineering curriculum", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 141 (3) (2014).
- TABRIZI, Aydin, y Paola Sanguinetti. "Literature Review of Augmented Reality Application in the Architecture, Engineering, and Construction Industry with Relation to Building Information", *Advanced Methodologies and Technologies in Engineering and Environmental Science. igi Global*, 2019.
- WANG, Peng, Peng Wu, Jun Wang, Hung-Lin Chi y Xiangyu Wang. "A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training", *International journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (6) (2018).
- WANG, Xiangyu y Marc Aurel Schnabel (eds.) *Mixed reality in architecture, design, and construction*. Países Bajos: Springer Science & Business Media. 2008.

- WOODWARD, Charles y Mika Hakkarainen. "Mobile mixed reality system for architectural and construction site visualization", en *Augmented Reality-Some Emerging Application Areas*. Londres: IntechOpen. 2011.
- YEOM, Dongwoo, Joon-Ho Choi, y Sin-Hwa Kang. "Investigation of the physiological differences in the immersive virtual reality environment and real indoor environment: Focused on skin temperature and thermal sensation", *Building and Environment*, 154 (2019).
- YOUNG, Ben, Ehab Ellobody y Thomas WC Hu. "3D visualization of structures using finite-element analysis in teaching", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 138 (2) (2011).

Clementina Palomo Beltrán

palomo.clementina@gmail.com

Es docente en la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco del Instituto Politécnico Nacional y de la Facultad de Arquitectura La Salle, México. Doctorante en la sección de posgrado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco del Instituto Politécnico Nacional. Investigadora en temas de tecnología y diseño que impactan en la percepción de la arquitectura. Ha publicado los artículos: "Generación de energía a partir de métodos de propulsión humana, en vivienda urbana en la Ciudad de México" (2013) y "Realidades del quehacer arquitectónico. Arquitectura sustentable y conciencia ecológica sustentable" (2015).