

## Evaluating spatial perception in architectural environments with virtual reality

Francisca Virán<sup>1</sup>, Mauricio Loyola<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Chile, Santiago, Chile  
francisca.viran@ug.uchile.cl

<sup>2</sup> Universidad de Chile, Santiago, Chile  
[mloyola@uchile.cl](mailto:mloyola@uchile.cl)

**Abstract.** This work compares empirically the dimensional perception of architectural spaces in virtual reality. Thirty volunteers estimated dimensions in virtual reality scenarios built with different 3D modeling methods and with 360 photography. The results show that dimensions are clearly underestimated in scenarios built with 3D modeling, which is consistent with the literature. However, the errors were significantly lower in the scenario built with 360 photography. The study suggests that using 360 photography for building virtual reality experiences could represent an interesting alternative to reduce perceptual dimensional distortions..

**Keywords:** Spatial perception, Virtual Reality, Architectural environments, 360 Photography

### 1 Introduction

En los últimos años, la masificación de equipos de realidad virtual (RV) de bajo costo ha gatillado un crecimiento explosivo de su uso en visualización y simulación de proyectos de arquitectura (Delgado et al. 2020). El principal atractivo radica en la sensación de presencia inmersiva que los equipos tipo *head-mounted displays* (HMD) ofrecen para generar una experiencia espacial más natural y completa de la que se puede obtener con medios tradicionales como planimetrías e imágenes 2D o 3D (Jerald, 2016).

Sin embargo, la literatura muestra que si bien las experiencias inmersivas son muy valiosas, no son completamente equivalentes a las experiencias físicas. Existen diferencias significativas en la percepción espacial entre entornos virtuales y físicos, siendo uno de los más evidentes la tendencia hacia la subestimación de dimensiones en los espacios virtuales. En otras palabras, en RV las personas tienden a percibir los espacios más pequeños de lo que

realmente son (El-Jamiy y Marsh, 2019; Renner et al, 2013). Esta es una distorsión que puede parecer poco relevante en videojuegos y aplicaciones de entretenimiento, pero que es muy importante en aplicaciones de arquitectura. Por ejemplo, la percepción de distancias absolutas y relativas está íntimamente relacionada a la noción de *escala*, uno de los conceptos más trascendentales en el diseño de espacios arquitectónicos.

Existen antecedentes que sugieren que los entornos 3D contruidos con bajo nivel de detalle y pistas visuales producen distorsiones mayores que los entornos modelados de modo realista (Madsen, 2022; Park et al, 2021; Loyola, 2018; Vaziri et al. 2017). Las pistas visuales (*visual cues*) son estímulos externos, percibidos a través de la vista, que nuestros cerebros interpretan y utilizan para proveer información sobre el entorno físico. Algunas pistas visuales son propias de los mecanismos físicos de percepción visual humana, como perspectiva y paralaje, pero otros son directamente modificables en el diseño del entorno RV, tales como el manejo de texturas o el uso de elementos referenciales de dimensión conocida. Así, se desprende que entornos de RV modelados con mejor calidad de pistas visuales de diseño deberían dar origen a percepciones espaciales más precisas. Este estudio aborda esta pregunta comparando empíricamente la percepción de dimensiones y distancias en entornos de RV contruidos con diferentes niveles de pistas visuales.

## 2 Métodos

La investigación tuvo un diseño cuasiexperimental. Treinta voluntarios sin experiencia previa con realidad virtual fueron expuestos de manera aleatoria a la visualización de tres entornos RV idénticos, pero modelados con diferente nivel de pistas visuales. El espacio de referencia fue el vestíbulo de una biblioteca universitaria; un espacio amplio, sin obstrucciones visuales y con variedad de texturas, colores, iluminación y elementos de mobiliario referenciales (Figura 1). El primer escenario (E1) correspondió a una réplica digital del espacio, con el mayor nivel de fotorrealismo posible de obtener con las herramientas de modelado 3D (Figura 2). El segundo escenario (E2) correspondió a una versión modificada con texturas simplificadas, colores planos, iluminación general y sin elementos de mobiliario (Figura 3). El tercer escenario (E3) consistió a una fotografía 360° del espacio (Figura 4, arriba). Se hipotetizó que la fotografía representaba el mejor medio disponible para la representación exacta del nivel de detalle visual del espacio físico. Adicionalmente, se consideró el espacio físico real como escenario de control (C). El orden de presentación de los escenarios fue aleatorizado entre los participantes.

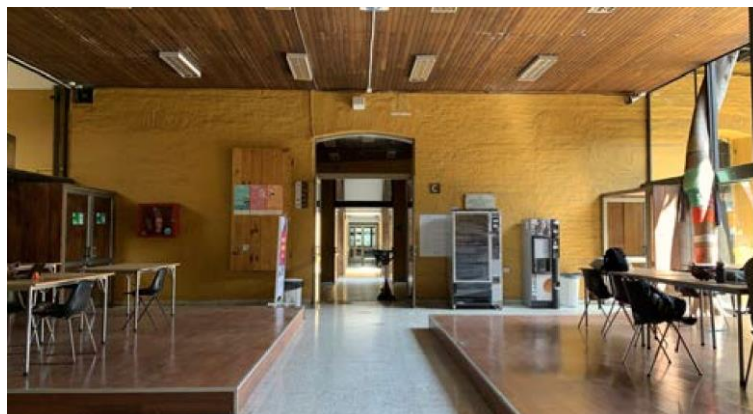


Figura 1. Espacio real (físico) y escenario control.



Figura 2. Escenario 1, réplica digital del espacio real.



Figura 3. Escenario 2, con alteración de pistas visuales.

Los escenarios digitales fueron modelados geoméricamente con Rhinoceros 7 y luego exportados en formato datasmith a Unreal Engine 4 donde se fueron postprocesados con texturas e iluminación HDR. Los modelos fueron exportados como fotografía estereoscópica (Figura 4, abajo). La fotografía 360° fue capturada con una cámara Samsung Gear 360 4K, en formato monoscópico. Se utilizó un equipo Intel Core i9-9900 K, 32 Gb RAM y tarjeta gráfica Nvidia GeForce RTX3070 para el desarrollo de los modelos. Para la visualización de los entornos RV se utilizó un equipo HMD Oculus Quest 2.



Figura 4. Fotografía 360° (arriba) y escenario fotorrealista (abajo)

Los participantes, luego de un *screening* previo para descartar experiencia previa con realidad virtual, antecedentes de mareos o síntomas de COVID-19 y de aceptar el consentimiento informado, fueron expuestos a un escenario de *rapport* para que se familiarizaran con el equipo HMD y con la sensación de inmersión (Figura 5).



Figura 5. Proceso experimental en terreno.

Para la evaluación de la percepción de dimensiones, se utilizó un cuestionario de estimación verbal de dimensiones con cuatro distancias exocéntricas (i.e. distancias entre dos puntos determinados) y una distancia egocéntrica (i.e. distancia entre la persona y un punto externo). Se utilizó un listado de dimensiones distinto para cada escenario, pero todos con el mismo nivel de dificultad. Algunas dimensiones eran referidas al recinto (ej. alto y largo del espacio, distancia del participante al muro) y otras a objetos (ej. alto y ancho de una pieza de mobiliario).

Las respuestas de los participantes fueron registradas directamente y luego expresadas como errores normalizados, es decir, la diferencia entre la distancia percibida y la distancia real, dividida en la distancia real. Este valor normalizado y adimensional permite tener valores comparables entre diferentes preguntas y realizar análisis estadísticos. Adicionalmente, se registraron sus comentarios espontáneos y sus impresiones generales sobre la experiencia y la percepción espacial con el equipo de RV.

### 3 Resultados

Los resultados muestran, en general, una tendencia a la subestimación de distancias exocéntrica en todos los entornos RV modelados en 3D, lo cual es consistente con la literatura (Figura 6).

En el escenario de control (C), correspondiente a la estimación de distancias en el espacio real, los errores normalizados de distancias exocéntricas variaron entre +0.031 y -0.130, con una desviación estándar (sd) entre 0.09 y 0.21, lo cual describe un grupo con habilidades moderadas promedio de estimación de distancias.

En los dos escenarios de modelos 3D los resultados fueron similares. En el escenario de réplica digital (E1), los errores normalizados de distancias exocéntricas variaron entre +0.009 y -0.235, con una desviación estándar entre 0.17 y 0.24. En el escenario de modelo alterado (E2), los errores normalizados de distancias exocéntricas variaron entre +0.064 y -0.135, con una desviación estándar entre 0.15 y 0.23. Ambos casos describen una tendencia hacia la subestimación de distancias. No se apreciaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos casos.

En el escenario de fotografía 360 (E3), en cambio, los resultados muestran un comportamiento totalmente diferente. Los errores normalizados de distancias exocéntricas variaron entre +0.057 y +0.207, con una desviación estándar entre 0.39 y 0.21, lo cual describe una tendencia hacia la sobreestimación de distancias. Este es un resultado relevante ya que representa un comportamiento significativamente diferente, incluso aparentemente opuesto, al de los entornos modelados en 3D.

En el análisis de estimaciones de distancias egocéntricas, se observa un fenómeno similar. En el escenario C, el error normalizado fue de -0.251 (sd=0.16); en el escenario E1, el error fue de -0.288 (sd=0.13); en el escenario E2, el error fue -0.201 (sd=0.15); y en el escenario E3, el error fue de -0.058 (sd=0.28). El error de subestimación en E3 es significativamente menor que en los otros casos, incluyendo el escenario control, sugiriendo una tendencia en dirección a la sobrestimación.

El análisis cruzado por participante refuerza esta diferencia entre entornos modelados 3D y fotografía 360. Los resultados muestran una correlación moderada entre los errores normalizados del caso control y los escenarios E1 y E2, con  $R=0.45$  y  $R=0.55$  para distancias egocéntricas y  $R=0.23$  y  $R=0.27$  para distancias exocéntricas. Sin embargo, los coeficientes son significativamente más débiles en la comparación con el E3:  $R=0,36$  para distancias egocéntricas y  $R=0.05$  para distancias exocéntricas.

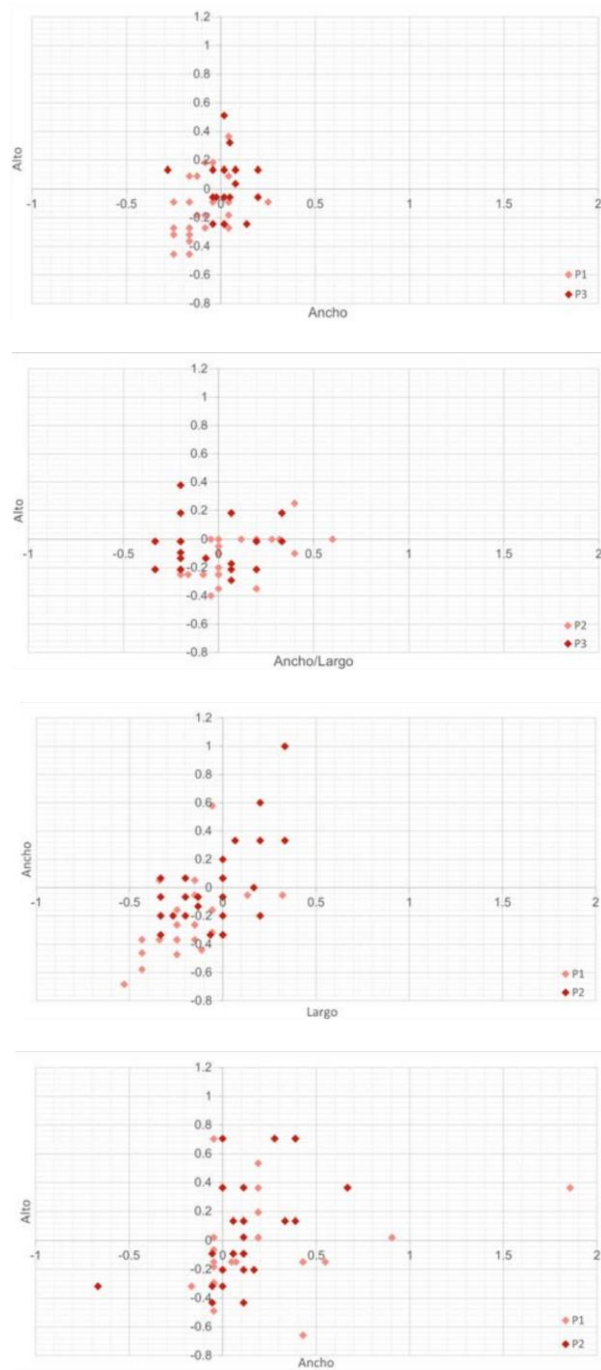


Figura 6. Error normalizado en distancias exocéntricas para los cuatro escenarios:  
De arriba abajo: Escenario control, E1, E2 y E3



En el análisis cualitativo de comentarios, se detecta que las distorsiones de percepción parecieron no ser detectadas por los participantes. Un 43% señaló que percibió el espacio virtual “del mismo tamaño” que el espacio real; un 37% afirmó que lo percibió “más pequeño” y un 20% lo percibió “mas grande”. No se observó ninguna relación entre las estimaciones efectivas de distancias y la percepción general.

## 4 Discusión

En general, los resultados generales confirman lo reportado en la literatura sobre la tendencia hacia la subestimación de distancias egocéntricas y exocéntricas en entornos de RV construidos con modelado 3D. Los resultados no permiten establecer un impacto significativo entre entornos modelados con más pistas visuales de texturas, colores y elementos de mobiliario referenciales.

El hallazgo más relevante de este trabajo, sin embargo, es la significativa diferencia que se observó entre los resultados de estimaciones en el escenario construido con fotografías 360° versus las estimaciones de los otros dos escenarios construidos con modelado 3D tradicional. No sólo los errores dimensiones fueron menores, sino que incluso fueron de tipo contrario (sobreestimación), tanto en distancias exocéntricas como egocéntricas. La mayor desviación estándar de los errores señala que existieron diferencias importantes entre participantes, lo que podría interpretarse como relacionado a factores humanos.

Un aspecto a considerar es que la fotografía 360° fue el único escenario monoscópico, lo que ciertamente podría ser un factor explicativo. La baja correlación entre el escenario control y el escenario de fotografía 360° también resulta llamativa, y refuerza la sospecha que esta técnica de construcción de escenarios RV pareciera generar experiencias espaciales substancialmente distinta a las gatilladas por entornos RV modelados en 3D tradicionalmente y a la propia realidad. En cualquier caso, se recomienda continuar esta senda de investigación con nuevos experimentos relacionados específicamente a la percepción espacial con fotografía 360°.

Como en todo (cuasi)experimento, hay limitaciones. En primer lugar, el método de observación de la percepción de escala es, por definición, indirecto e imperfecto. La percepción espacial es un proceso psicológico y personal que no puede ser observado directamente. La estimación de dimensiones es una técnica *proxy* ampliamente utilizada, pero sujeta a sesgos cognitivos. En otras palabras, la dimensión reportada podría ser lo que el participante *piensa* o *calcula* que debería medir algo, en lugar de lo que *percibe* espacialmente. En



este caso, además, los participantes conocían el lugar previamente, lo que también introduce una variable no controlada al ejercicio. Otras limitaciones están relacionadas al tamaño reducido de la muestra ( $N=30$ ) y al hecho que todos los escenarios de RV tenían una configuración estática, es decir, los participantes no podían desplazarse en el espacio virtual. Los resultados, por lo tanto, sólo pueden ser interpretados para experiencias de RV estáticas.

En último término, este trabajo abre una veta prometedora dentro del nicho de investigación sobre percepción de espacios arquitectónicos en RV. Esto es importante, porque el adecuado conocimiento de los mecanismos de percepción espacial, y por consiguiente, el dominio de técnicas de construcción de mejores entornos de RV, es crucial para que la tecnología pueda aplicarse en contextos donde se requieran experiencias espaciales precisas, predecibles y confiables.

**Agradecimientos.** Agradecemos a todo el equipo del Laboratorio VER (Virtual Environments Research) la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile por su valiosa asistencia en la realización de este estudio.

## References

- Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Demian, P., & Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101122.
- El-Jamiy, F., & Marsh, R. (2019). Distance estimation in virtual reality and augmented reality: A survey. In *2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)* (pp. 063-068). IEEE.
- Interrante, V., Ries, B., and Anderson, L., 2006. Distance perception in immersive virtual environments, revisited. In: *IEEE virtual reality conference (VR 2006)*. IEEE, 3–10
- Jerald, J. (2016). *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. ACM & Claypool Publishers.
- Loyola, M., 2018. The Influence of the Availability of Visual Cues on the Accurate Perception of Spatial Dimensions in Architectural Virtual Environments. *Virtual Reality*, 22 (3), 235–243
- Madsen, C. B. (2022). Influence of Texture Fidelity on Spatial Perception in Virtual Reality. In *17th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications-GRAPP* (pp. 244-251). SCITEPRESS Digital Library.
- Park, H., Faghihi, N., Dixit, M., Vaid, J., & McNamara, A. (2021). Judgments of object size and distance across different virtual reality environments: A preliminary study. *Applied Sciences*, 11(23), 11510.
- Renner, R.S., Velichkovsky, B.M., and Helmert, J.R.. (2013). The perception of egocentric distances in virtual environments - A review. *ACM Computing Surveys*, 46 (2), 1–40.
- Vaziri, K., Liu, P., Aseeri, S., & Interrante, V. (2017). Impact of visual and experiential realism on distance perception in VR using a custom video see-through system. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (pp. 1-8).