

Evaluación experimental de la alteración de señales visuales en la percepción de escala en entornos arquitectónicos de realidad virtual

Francisca Virán Aguilera

Profesor Guía: Mauricio Loyola

Resumen

Esta investigación analizó el impacto de la alteración de las señales visuales en la percepción de escala en entornos virtuales. Para ello, se llevó a cabo un experimento para comparar la percepción de escala en un entorno real y uno virtual, el cual se modeló de diferentes maneras y se visualizó utilizando un dispositivo de realidad virtual. Los resultados obtenidos sugieren que la imagen monoscópica posee un mayor nivel de precisión en las estimaciones, mientras que en las imágenes estereoscópicas cuanto mayor es la disponibilidad de señales visuales, menor es el nivel de precisión. Finalmente, la investigación es un aporte para lograr, en un futuro, simulaciones más precisas y confiables para el desarrollo de la visualización arquitectónica.

Palabras clave: Realidad virtual, Visualización de entornos arquitectónicos, Percepción de escala.

1. Introducción

1.1 Justificación

Una de las utilidades y ventajas de la realidad virtual en el campo de la arquitectura es brindar a los usuarios una experiencia con nuevas perspectivas y visiones del espacio arquitectónico con el objetivo de simular y representar, en la medida de lo posible, la realidad espacial en la que vivimos.

Sin embargo, surge el cuestionamiento de la exactitud espacial que presenta nuestra percepción como seres humanos en un entorno virtual. Varios autores han señalado que existen ciertas inexactitudes en la percepción de espacio en un entorno virtual, siendo muy reiterado que la dimensiones espaciales tienden a ser percibidas de forma más pequeña (Interrante et al. 2008; Jones et al. 2011; Loomis y Knapp 2003; Messing y Durgin 2005; Murgia y Sharkey 2009; Renner et al. 2013 a, b).

Las razones detrás de estas inexactitudes no son del todo claras. Algunas teorías apuntan a errores técnicos, como limitaciones de los equipos o errores de software. Otras teorías apuntan a factores humanos o factores que están fuera de nuestro control. Sin embargo, los factores de diseño respecto

al espacio son menos considerados en estas inexactitudes.

Es por esto que en esta investigación examinamos cómo inciden las características de diseño de un entorno virtual en la precisión de la percepción del espacio. Esto es de suma importancia, ya que el resultado de esta investigación es incidente e invaluable para la arquitectura, especialmente para el proceso de diseño arquitectónico, puesto que la realidad virtual ha incrementado su uso en este campo permitiendo mejorar los diseños realizados y visualizar de una forma mucho más exacta y rápida el resultado final de una casa, edificio o estructura a construir. Es por ello, que los profesionales del área deben ver el mundo desde el punto de vista del usuario objetivo con la certeza de que el proyecto que muestren mediante esta tecnología sea una representación del diseño espacial lo más fidedigna posible.

1.2 Pregunta de Investigación

¿Cómo afecta la alteración de las señales visuales del espacio, tales como las texturas, colores y mobiliario en la percepción espacial de escala arquitectónica en realidad virtual?

1.3 Objetivos de investigación

- **Objetivo General**

Evaluar el impacto de la alteración de señales visuales, tales como las texturas, colores y mobiliario, en la percepción de escala, por medio de tecnologías de realidad virtual.

- **Objetivos Específicos**

Diseñar entornos de realidad virtual que permitan la variación de señales visuales, tales como texturas, colores y mobiliario.

Registrar la percepción de escala de manera cuantitativa y cualitativa, respecto a la escala dentro del caso de estudio.

Analizar los resultados y alteraciones que presenta la percepción de escala al modificar señales visuales, tales como las texturas, colores y mobiliario.

2. Antecedentes

2.1 La experiencia espacial

Según Arnheim (1971), el espacio existe sólo cuando es generado por la relación entre dos objetos, en este caso, el elemento arquitectónico y la experiencia del individuo. Esto significa que, para que el proceso de percepción ocurra, deben necesariamente interactuar dos elementos: el individuo y el entorno.

Según Mañana (2003), la percepción humana se basa en la experimentación de algo en relación con lo que hemos percibido anteriormente, es decir, la percepción del espacio está netamente ligado a nuestras experiencias y sensaciones previas como ser humano, por lo que la percepción sería única y singular para cada individuo, independientemente si el entorno es el mismo, ya que el proceso perceptivo, según este último autor, depende de nuestras experiencias anteriores como seres humanos, lo cual es de suma relevancia puesto que el haber habitado y/o experimentado el espacio real con anterioridad podría incidir en la percepción misma con realidad virtual.

2.2 Percepción de escala

Respecto a la percepción de escala en sí, Letelier (2007) y González (1985) coinciden en el

entendimiento de escala. Este último mantiene que en el espacio en que se mueve el usuario, el número no dice nada, pero sí es significativo el tamaño en relación con las formas que lo rodean. La escala sería una referencia a la percepción de una experiencia que se recuerda, y para esta investigación en particular, la experiencia en el espacio físico es prácticamente simultánea a la experiencia en el espacio virtual, lo que en definitiva repercute en la relación dimensional que se establece entre el edificio y el individuo.

2.3 Percepción de escala dado un entorno virtual

Hasta hoy, es incierto el grado de inexactitud y subestimación que existe a la hora de estimar distancias, proporciones y/o escala con tecnologías de realidad virtual HMD. Una extensa investigación hecha por Renner et al. (2013), centrada en las distancias egocéntricas del usuarios, es decir, la distancia subjetivamente percibida de un observador humano a un objeto, afirma que las dimensiones estimadas con HMD son el 73% aproximadamente, de las dimensiones reales en el modelo.

Si bien no hay una explicación clara en la literatura para estas distorsiones, existen teorías (Creem-Regehr et al. 2005; Knapp y Loomis, 2004) que señalan errores ligados a la tecnología (hardware y/o software), como el campo de visión restringido o las limitaciones físicas de los cascos y/o gafas que impiden el movimiento completo de la cabeza por parte de los usuarios. Por otro lado, también se ha considerado los factores, atributos y experiencias humanas, tales como la edad, la altura, o el género, como posibles causas para estas distorsiones (Murgia y Sharkey, 2009).

No obstante, todos estos factores antes mencionados no pueden considerarse como las principales causas de las distorsiones, ya que algunos de los resultados son contradictorios y/o poco concluyentes. Al parecer, estos factores son secundarios en las distorsiones perceptuales de distancias, por lo que la principal causa para este problema es aún incierto.

No obstante, diversas investigaciones afirman que la mayoría de las señales de profundidad y escala están

relacionados con el tamaño, como el tamaño relativo, el tamaño familiar, la perspectiva lineal (Tai, 2012). Se puede afirmar que existen elementos del espacio fundamentales que inciden en la percepción de la escala y la proporcionalidad del espacio.

Respaldando la investigación hecha por Imamoglu (1973), otras investigaciones han demostrado que las manipulaciones de elementos discretos de un espacio, en este caso, mobiliario de uso frecuente, pueden afectar a la percepción que un individuo tiene de ese espacio (Kaye y Murray, 1982). También se ha demostrado que la relación entre la percepción del espacio interior y el mobiliario es mucho más compleja de lo que se pensaba anteriormente (Von Castell et al. 2014). Si bien, varios autores comparten la idea general de que existe un efecto del mobiliario sobre las dimensiones espaciales percibidas del espacio interior, a rasgos generales, la literatura muestra la inexactitud en la estimación de dimensiones en entornos virtuales, ya que es un tema que no se ha tratado en profundidad (Loyola, 2018).

3. Métodos

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la percepción de escala de un espacio determinado mediante distintos escenarios de RV. Para ello, el desarrollo metodológico de esta investigación se determina en base a una investigación descriptiva de tipo cuasiexperimental. Para esto, se diseñó un experimento que permite comparar con precisión las alteraciones en la percepción de escala arquitectónica, según los diferentes escenarios visuales representados con tecnología de RV. La técnica de recolección de datos se compone por un enfoque mixto, es decir, tanto cuantitativo como cualitativo, basado en un cuestionario enfocado en la estimación de distancias egocéntricas y exocéntricas. El proceso investigativo se compone sistemáticamente en 3 fases:



Figura 1. Fases del proceso de investigación. Fuente: *Elaboración Propia*

Para esto, la experimentación consistió en la aplicación de 4 escenarios, 3 de inmersión de realidad virtual y 1 real. El primer escenario consistió en la captación del espacio, mediante una cámara 360°, visualizado con los lentes de RV. El segundo y tercer escenario consistieron en una inmersión tipo videojuego, la distinción entre ambos es la cantidad de señales visuales; para el segundo escenario se contempló el espacio con señales visuales disminuidas (disposición de mobiliarios y variación de texturas y colores), por otro lado, el tercero fue una réplica exacta del espacio real, es decir, contempla todos los elementos de este (mobiliarios, distribución, iluminación, texturas etc). El último escenario es el espacio real (control), de esta forma existirá un punto de comparación entre los distintos tipos de RV y la realidad en la que vivimos.

3.1 Caso de estudio: Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Hall Biblioteca

El experimento se llevó a cabo en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, ubicada en Av. Portugal 84, Santiago, Región Metropolitana. Dentro de la facultad, el caso de estudio se sitúa en el hall ubicado en las afueras de la biblioteca entre el bloque C y D de la universidad (figura 2). La elección del caso de estudio se debe a la conveniencia de este, puesto que los equipos utilizados en esta investigación se encontraban en la facultad y no podían ser trasladados. Además, dentro de la facultad, el hall es uno de los lugares más utilizados por los estudiantes y posee una geometría conveniente para evaluar lo necesario en esta investigación.



Figura 2: Fotografía del hall de la biblioteca FAU. Fuente: Elaboración propia

3.2 Modelado de escenarios

Para el modelado de esta investigación se utilizó un computador de características Intel Core i7-8550 1.8Ghz, 20 Gb de RAM, tarjeta gráfica Nvidia GeForce MX 130. Las fotos 360° fueron tomadas con una cámara 4K Samsung Gear 360 con trípode. La exportación de las imágenes desde Unreal Engine 4, se realizó en otro computador, de características Intel Core i9-9900 K, 32GB de ram, tarjeta gráfica Nvidia GeForce RTX 3070 (8GB), puesto que el mencionado anteriormente no rendía lo suficiente para la calidad de foto deseada. Finalmente, la visualización de las fotografías 360° (Escenario F, 1 y 2) fue mediante los lentes de realidad virtual Oculus Quest 2.

3.2.1 Escenario 0 (Rapport)

En primera instancia se preparó un escenario de rapport inicial (figura 3), el cual tenía como objetivo que los participantes tuviesen una primera visualización de un entorno 360, de esta forma se familiarizaron tanto con el equipo como con la inmersión virtual. El escenario fue obtenido de la página web Poly Haven.



Figura 3: Imagen 360 del escenario de prueba (rapport). Fuente: Sergej Majboroda, Poly Haven.

3.2.2 Escenario F (Foto 360°)

Para el escenario F, se dispuso una foto 360° monoscópica del caso de estudio, la cual fue visualizada en las gafas de realidad virtual (Oculus Quest 2). La fotografía fue tomada con una cámara 360 con trípode y con la altura de la vista del

espectador, ubicada estratégicamente en el centro de la habitación, como se muestra en la figura 4.



Figura 4: Fotografía 360° del hall de la biblioteca FAU. Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Escenario 1 y 2

- Modelado:

Para la generación de los modelos del caso de estudio se efectuó un levantamiento in-situ, con el cual se realizó un modelo base que, posteriormente, se aprovechó para los escenarios 1 y 2. El modelo base se ejecutó mediante el software Rhinoceros 7 (figura 5).

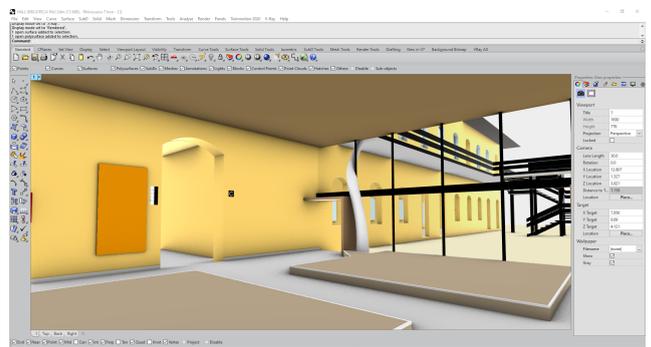


Figura 5: Proceso de modelado con Rhinoceros 7. Fuente: Elaboración propia

- Montaje de escena:

Los escenarios luego de su modelado fueron exportados en formato datasmith, hacia el motor gráfico Unreal Engine 4.26.2 (figura 6), en donde se montó un escena virtual brindando iluminación, texturas, mobiliario y los elementos visuales necesarios para replicar el caso de estudio (Escenario 2). Para el escenario 1 (figura 7), se utilizó el mismo archivo de exportación traído desde Rhinoceros 7, sin embargo esta escena estaba carente de mobiliario, texturas y elementos visuales familiares al caso de estudio, en comparación al escenario 2 (figura 8).



Figura 6: Proceso de montaje con Unreal Engine 4.

Fuente: Elaboración propia

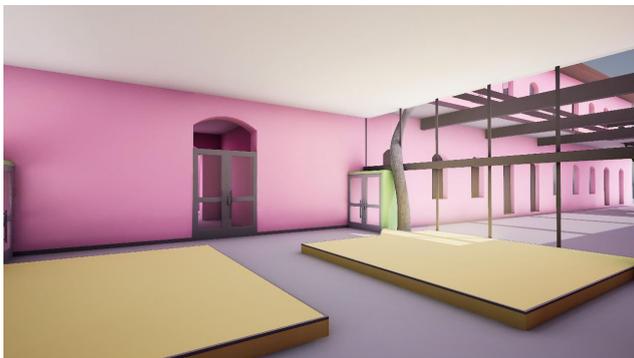


Figura 7: Resultado final del proceso de montaje del escenario 1. Fuente: Elaboración propia



Figura 8: Resultado final del proceso de montaje del escenario 2. Fuente: Elaboración propia

- Exportación y visualización con gafas RV:

Una vez montada la escena, comenzó el proceso de exportación de los distintos escenarios. Se exportó como fotografía estereoscópica, y el avatar estaba ubicado en el centro de la habitación, exactamente en el mismo punto donde fue tomada la fotografía con cámara 360.

a) Escenario 1: Modelo con alteración de texturas y colores, además de la disminución de mobiliarios y señales visuales (figura 9).



Figura 9: Imagen 360 del escenario 1, exportada desde Unreal Engine 4. Fuente: Elaboración propia

b) Escenario 2: Modelo en formato réplica con señales visuales completas (figura 10).



Figura 10: Imagen 360 del escenario 2, exportada desde Unreal Engine 4. Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Escenario C: Control - Espacio físico

Se genera un escenario de control, el cual consiste en el espacio físico real del caso de estudio (figura 11).



Figura 11: Fotografía del hall de la biblioteca FAU. Fuente: Elaboración propia

3.3 Muestra

La muestra se seleccionó homogéneamente, esta se compuso de 30 participantes sin experiencia previa en RV, esto con la finalidad de evitar predisposiciones a la hora de observar el espacio. Todos los participantes eran estudiantes de la facultad, las edades oscilaban entre los 18-22 años, a la mayoría se les dijo que participarían en una investigación con realidad virtual al pasar por las cercanías del hall, otros mostraron interés voluntario al observar el experimento y otros asistieron en consciencia del experimento. Adicionalmente, los participantes debían estar familiarizados con el caso de estudio y tener relación con las estimaciones de distancia (arquitectos y estudiantes de arquitectura), esto para evitar en la mayor medida posible subestimaciones y sobreestimaciones en las distancias solicitadas.

3.4. Instrumentos de evaluación

En esta investigación se optó por la valoración verbal directa como instrumento de evaluación cuantitativa, es decir, el participante estimó las distancias en una unidad familiar y conocida (metros), esto en base a los protocolos de estimación estudiados por Loomis y Knapp (2003). Para cada escenario, los participantes fueron sometidos a un cuestionario, en el cual, se les solicitó estimar cuantitativamente las dimensiones exocéntricas (longitud y anchura total de la habitación u objeto) y egocéntricas (distancia entre la persona y objetos a su alrededor) del escenario en cuestión. Los objetos variaban en cada escenario para evitar pre estimaciones al cambiar de escenario. Adicionalmente se les solicitó responder preguntas de tipo cualitativas respecto a su experiencia en el entorno virtual.

El cuestionario se dividió en dos etapas, la primera etapa era cuantitativa y las preguntas variaron según el escenario en el que estaba inmerso el participante.

Etapa 1

- Escenario F (Foto 360)

1. ¿Cuánto mide el alto y el ancho del ventanal exterior?
2. ¿Cuánto mide el alto y el ancho de la máquina de bebidas?
3. ¿Qué distancia hay entre las plataformas bajo usted?

- Escenario 1

1. ¿Qué distancia hay entre usted y la pared a su izquierda?
2. ¿Cuánto mide el alto y ancho de la puerta a su izquierda?
3. ¿Cuál es el alto y largo del artefacto de calefacción izquierdo?

- Escenario 2

1. ¿Cuál es el ancho y largo total del espacio?
2. ¿Cuál es el largo y ancho de la mesa frente a usted?
3. ¿Qué distancia hay entre usted y el basurero junto a la puerta?

- Escenario C (Espacio físico real)

1. ¿Cuál es el alto y ancho del panel de madera?
2. ¿Qué distancia hay entre usted y la pared frente a usted?
3. ¿Cuánto mide el alto y ancho de la máquina de café?

La segunda etapa era de características cualitativas y era respondida posterior a la etapa 1 del Escenario F, 1 y 2, el Escenario C, por el contrario, debía ser respondido al final de la experiencia, es decir, posterior a la etapa 2.

Etapa 2

1. En una escala de 1 a 7, siendo 1 poco parecido y 7 muy parecido, ¿Qué tan parecido cree que es la experiencia de RV a la realidad?
2. ¿En qué aspectos considera que la experiencia si es parecida a la realidad?
3. ¿En qué aspectos considera que la experiencia no es parecida a la realidad?
4. ¿Qué diferencias de percepción espacial o sensaciones físicas puede usted percibir entre la virtualidad y la realidad?
5. En términos de dimensiones, ¿Usted considera que la percepción del espacio en la virtualidad se

siente más grande, más pequeño o igual que la realidad?

3.5 Procedimiento experimental

La experimentación se realizó en el mismo caso de estudio, es decir en el hall a las afueras de la biblioteca de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile. El experimento se llevó a cabo en 3 días (11, 15 y 17 de noviembre), esto debido a que los aforos dentro de la universidad son reducidos y por lo tanto no había mucho flujo de gente.

Se dispuso de un espacio ventilado y con aforo máximo según el protocolo COVID-19 convenido con la prevenciónista de riesgos de la Facultad (anexo), además de disponer de mascarillas, alcohol gel, y paños desinfectantes para la limpieza de los artefactos luego de cada participante.

En primera instancia, se realizó una presentación rápida a cada uno de los participantes, tanto de la investigadora como del experimento en sí. Una vez hecha la introducción, se realizó un screening previo a la experimentación, en el cual se les preguntó si tenían algún síntoma de COVID o bien, si habían sido contacto estrecho con algún caso positivo en los últimos 14 días y si habían utilizado con anterioridad equipos de realidad virtual. Una vez respondidas estas preguntas se procedió a dar una explicación general del experimento, expresando que este consistía en 4 escenarios, 3 virtuales y 1 real, correspondientes al caso de estudio. Luego de esto, se les entregó el consentimiento informado (anexo), el cual debían completar y firmar para proceder con la experimentación. Antes de iniciar, se anotó el nombre del participante y se le asignó la secuencia de visualización correspondiente, además se le explicó el modo de uso de los joystick y los botones que debía usar. Una vez hecho esto, se configuró un computador para proyectar lo que el participante visualizaba, con el objetivo de guiarlo de manera más fácil durante la experiencia. Para asegurar la consistencia, los avatares de todos los participantes se colocaron en el mismo lugar en el cual se les solicitó posicionarse en la vida real (figura 12). Posteriormente se procedió a colocar los lentes de

realidad virtual al participante y una vez correctamente posicionados tanto él como los lentes en su cabeza, se comenzó con la experimentación.



Figura 12: Fotografía durante la experimentación. Fuente: *Elaboración propia*

Inicialmente se le solicitó al participante que visualizara el escenario 0 (rapport) y respondiera las siguientes preguntas, de esta forma se familiarizó con el equipo y con la inmersión virtual. Además se le indicó que no debían caminar pero si se les permitió rotar la cabeza y el torso de manera libre.

1. ¿Se sienten cómodos?
 - Si “procede a la siguiente pregunta”
 - No “preguntar que le genera incomodidad”
2. ¿Se te mueven o te te quedan sueltos?
 - Si “revisar que esté bien colocado los lentes”
 - No “procede a la siguiente pregunta”
3. ¿Puedes ver bien? ¿Se enfoca bien?
 - Si “procede a la siguiente pregunta”
 - No “Mover lentes hacia arriba y abajo”
4. ¿Crees poder partir con el experimento?
 - Si “procede la experimentación”
 - No “verificar la comodidad del participante”



Figura 13: Fotografía durante la experimentación. Fuente: Elaboración propia

Luego de ser visualizado el escenario 0, el participante cambió de escenario (Escenario F, 1 o 2) según la secuencia asignada anteriormente y conforme el escenario en el que estaba inmerso, se le solicitó estimar una amplia gama de distancias (exocéntricas y egocéntricas), las cuales eran anotadas inmediatamente por la investigadora (figura 13). Una vez visualizados todos los escenarios virtuales y sin quitarse los lentes, el participante debió volver al Escenario 2 y contestar preguntas de carácter cualitativo correspondientes a su experiencia virtual, las respuestas fueron también anotadas inmediatamente (figura 14).



Figura 14: Fotografía durante la experimentación. Fuente: Elaboración propia

Por último el participante debió quitarse los lentes de realidad virtual y responder las preguntas asignadas al caso de control (Escenario C), de tal forma de establecer una comparativa en sus estimaciones de distancia tanto virtuales como reales. Finalmente, el participante comentó cómo se sintió y cómo fue su experiencia, luego de eso, se desinfectaron los aparatos, según el protocolo COVID-19, y se

procedió a repetir el proceso con otro participante hasta completar la muestra.

3.6. Procedimiento de análisis

Una vez recopilados los datos de investigación, se inició el procedimiento de análisis. Como primera aproximación, los datos fueron revisados, ordenados y organizados en una planilla excel (anexo), lo que permitió identificar códigos y conceptos claves para la investigación.

3.6.1 Codificación abierta

- Precodificación

Después de haber ordenado los datos, en esta etapa se analizaron directamente los datos, sin caracterizaciones o codificaciones previas, de esta forma se hizo un barrido general por las respuestas y conceptos mencionados por los participantes. Esto permitió identificar conceptos y datos de interés para la investigación.

3.6.2 Codificación axial

A partir de la codificación abierta se realiza la codificación axial. Ésta consistió en la búsqueda activa y sistemática de la relación que guardaban los códigos y las categorías entre sí. El tipo de relación que guardaban unos con otros resultó de la comparación constante entre códigos y categorías, es decir, por el contraste de las semejanzas y de las diferencias existentes.

Dicho lo anterior, se establecieron las siguientes categorías de codificación. (a) Errores según el género del participante; (b) Errores según la secuencia asignada ;(c) Errores por persona en comparación con la realidad

3.6.3 Análisis estadístico

En esta etapa se realizó una recopilación e interpretación de datos para descubrir patrones y tendencias por parte de los participantes. Para ello se elaboraron gráficos que representan visualmente la tendencia de la muestra. Los gráficos utilizados en esta investigación fueron: gráficos de dispersión de puntos e histogramas. Para ambos se establecieron dos variables, en las cuales se analizó la simetría, dispersión y posición de los datos dispuestos en el gráfico y de esta forma generar una correlación entre ambas variables.

4. Resultados

Las respuestas de los participantes fueron analizadas y expresadas tanto como errores absolutos como errores normalizados. Los errores absolutos (Δ) se definen como la discrepancia absoluta entre las distancias estimadas (d') y verdaderas (d), expresadas en metros:

$$\Delta = |d' - d|$$

Por otro lado, los errores normalizados (ε) se definen como la diferencia de distancias estimadas (d') y verdaderas (d), sobre la distancia verdadera (d):

$$\varepsilon = \frac{d' - d}{d}$$

El error normalizado, a su vez, se interpreta como la proporción de subestimación o sobreestimación de distancia en comparación con la distancia real. Para ser claros, en esta investigación, un ε más cercano a 0 indica una estimación más precisa, mientras que un valor negativo (-) expresa subestimación y un valor positivo (+) muestra sobreestimación. Si bien, el error absoluto es útil para entender la magnitud de los errores cometidos por los participantes, el error normalizado permite la comparación entre casos y evita factores distorsionadores, como la magnitud misma del error, los cuales pueden entorpecer la interpretación de los resultados de esta investigación. Un resumen de los resultados se muestra en la Tabla 1.

4.1 Estimación de distancias en entornos virtuales

Escenario F

- Estimación de distancias exocéntricas

En la figura 15 se puede apreciar que para la estimación de distancias exocéntricas en el escenario F, los resultados tienden a una notoria sobreestimación en el alto, mientras que el ancho tiene un resultado mucho más disgregado. Si bien el error normalizado medio (+0.097) indica una sobreestimación para este escenario, el gráfico (figura 15) muestra que la nube de puntos es más dispersa en comparación a los demás escenarios, esto significa que el rango de distancias estimado por los

participantes es muy amplio y que estos resultados podrían no ser muy confiables, ya que no se aprecia una tendencia clara para este escenario.

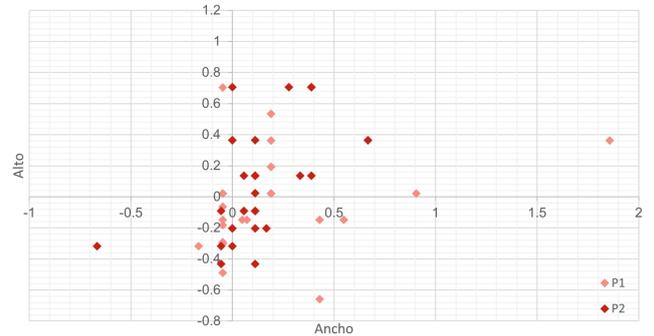


Figura 15: Error normalizado en distancias exocéntricas para el escenario F. Fuente: Elaboración propia

- Estimación de distancias egocéntricas

La figura 16 muestra que la curva de tendencia se inclina hacia la izquierda, lo que indica que gran parte de los participantes subestimó las distancias solicitadas. Sin embargo el gráfico revela una curva más abierta que los otros escenarios, lo que indica que, al igual que en las distancias exocéntricas, la muestra es muy dispersa y los resultados poseen baja predictibilidad. El error normalizado medio es de -0.058, lo que implica una subestimación por parte de los participantes, afirmando lo anterior.

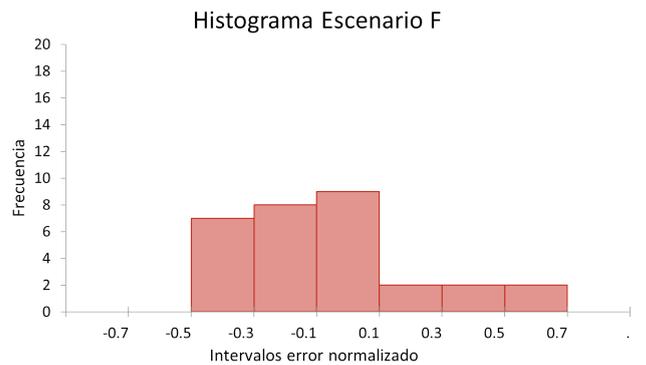


Figura 16: Histograma del error normalizado en distancias egocéntricas para el escenario F. Fuente: Elaboración propia

Escenario 1

- Estimación de distancias exocéntricas

La figura 17 muestra que para las distancias exocéntricas de este escenario, la nube de puntos tiene una tendencia visual hacia el centro tanto en el

alto como en el ancho/largo, esto quiere decir que en este caso hubo un menor margen de error y por lo tanto un mayor nivel de precisión en las distancias solicitadas. El error normalizado medio fue de -0.038 , indicando que existe una propensión a la subestimación.

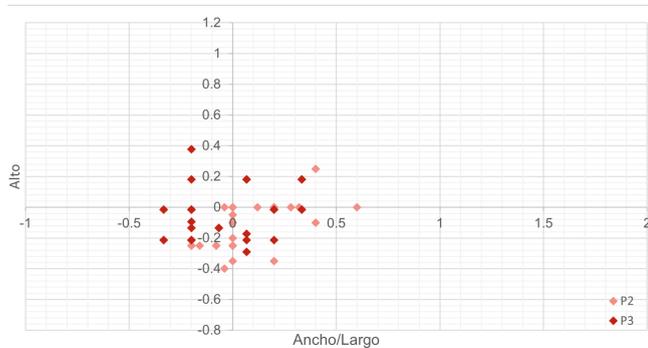


Figura 17: Error normalizado en distancias exocéntricas para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia

- Estimación de distancias egocéntricas

La curva de tendencia observada en la figura 18, muestra una inclinación hacia la izquierda, es decir las estimaciones tienden a la subestimación. Por otro lado, la curva se aprecia más cerrada que el escenario anterior, esto quiere decir que, los resultados son menos dispersos y de esta forma más predecibles y confiables. Además, la simetría de la curva es similar al caso de control (escenario C), dando a entender que las estimaciones de este escenario tienen un margen de error similar a las estimaciones hechas en la realidad, por lo tanto un mayor nivel de precisión. El error normalizado medio es de -0.201 , respaldando lo anterior.

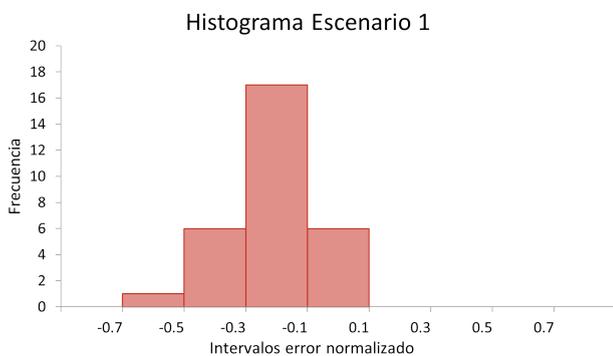


Figura 18: Histograma del error normalizado en distancias egocéntricas para el escenario 1. Fuente: Elaboración propia

Escenario 2

- Estimación de distancias exocéntricas

En la figura 19 se puede apreciar que para la estimación de distancias exocéntricas la nube de puntos tiene una inclinación hacia el cuadrante inferior derecho, esto indica que tanto el ancho como el largo fueron, en su mayoría, subestimados por los participantes. Sin embargo se aprecian algunos casos particulares que, en mayor medida, subestimaron las distancias en la pregunta 1 y sobreestimaron en la pregunta 2. Pese a esto, el error normalizado medio para esta estimación es de -0.114 , apoyando lo mencionado anteriormente.

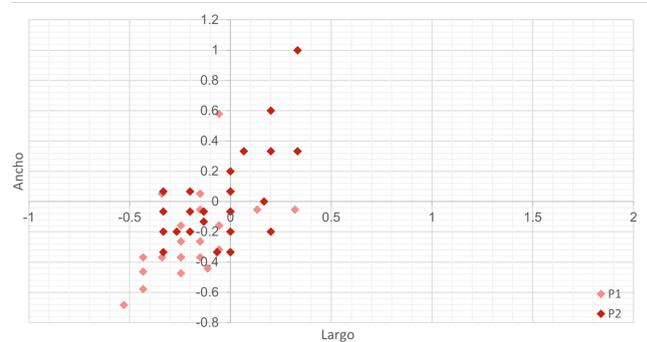


Figura 19: Error normalizado en distancias exocéntricas para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia

- Estimación de distancias egocéntricas

Por otro lado, la figura 20 muestra una curva notoriamente inclinada hacia la izquierda, esto quiere decir que los participantes subestimaron en casi su totalidad las distancias egocéntricas solicitadas, con un error normalizado medio de -0.288 . La curva se muestra en su mayoría cerrada y simétrica, lo que indica que los resultados son predecibles, poco dispersos y tienen una tendencia clara hacia la subestimación.

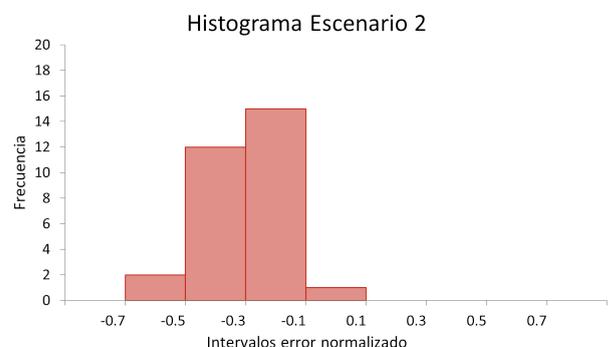


Figura 20: Histograma del error normalizado en distancias egocéntricas para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia

4.2 Estimación de distancias en entorno físico (control)

Escenario C

- Estimación de distancias exocéntricas

La figura 21 señala que la nube de puntos tiene una notoria tendencia y concentración en el centro, en comparación a los escenarios virtuales, esto quiere decir que en la realidad los participantes tienen un menor margen de error en la estimación de distancias y por ende una mejor precisión. El error normalizado medio fue de -0.043, indicando que existe una leve inclinación hacia la subestimación.

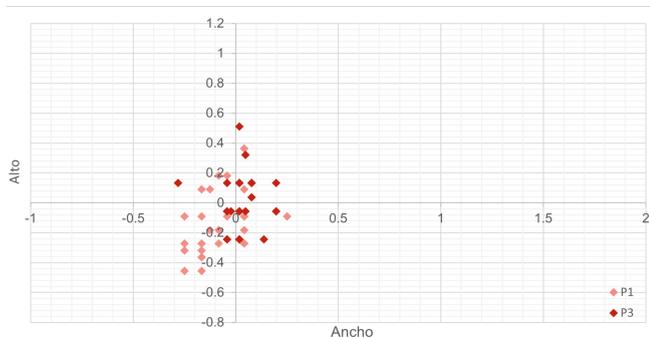


Figura 21: Error normalizado en distancias exocéntricas para el escenario C. Fuente: Elaboración propia

- Estimación de distancias egocéntricas

Por otra parte, la figura 22 revela que para la estimación de distancias egocéntricas en el escenario

C, la curva se inclina a la izquierda del 0, esto quiere decir que los participantes tendieron a subestimar las distancias solicitadas. En comparación con la estimación de las distancias exocéntricas, las egocéntricas fueron subestimadas en un nivel mucho mayor, teniendo un error normalizado medio de -0.251.

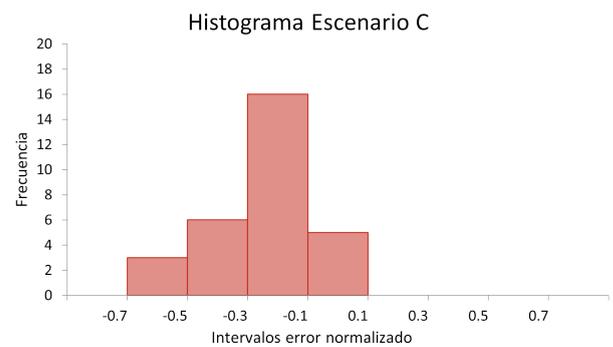


Figura 22: Histograma del error normalizado en distancias egocéntricas para el escenario C. Fuente: Elaboración propia

4.3 Percepción cualitativa del entorno virtual

Respecto a la percepción cualitativa de los participantes inmersos en el escenario 2, la figura 23 muestra que un 63.3% calificó su experiencia sobre nota 6, demostrando que el espacio virtual tiene un parecido considerable a la realidad.

		Escenario F	Escenario 1	Escenario 2	Escenario C
Distancias exocéntricas	Media error normalizado	0.10	-0.04	-0.11	-0.04
	Media error absoluto	0.31	-0.06	-1.07	-0.07
Distancias egocéntricas	Media error normalizado	-0.06	-0.20	-0.29	-0.25
	Media error absoluto	-0.11	-0.96	-1.47	-1.42
Total	Media error normalizado	0.07	-0.07	-0.15	-0.08
	Media error normalizado	0.22	-0.24	-1.15	-0.34

Tabla 1: Error medio normalizado y error medio absoluto para las dimensiones exocéntricas y egocéntricas por escenario. Fuente: Elaboración propia

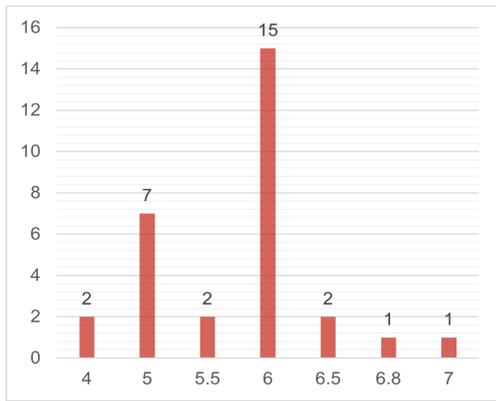


Figura 23: Calificación de los participantes comparando la realidad con la virtualidad. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los aspectos específicos del espacio que los participantes notaron estando inmersos, los conceptos más mencionados fueron: colores, mobiliario, texturas e iluminación. En cuanto a estos dos últimos la opinión fue dividida, puesto que un 53.3% afirmó que estos aspectos no eran parecidos a la realidad, mientras que un 56.6% afirmó lo contrario (Figura 24). Por otro lado, los conceptos de mobiliario y colores fueron frecuentemente mencionados en los aspectos que si eran parecidos a la realidad.

Otros conceptos también nombrados fueron: posición de objetos, proporciones, dimensiones y fondos. Los tres primeros haciendo referencia a los aspectos positivos y el último fue mencionado con frecuencia en los aspectos menos parecidos a la realidad.

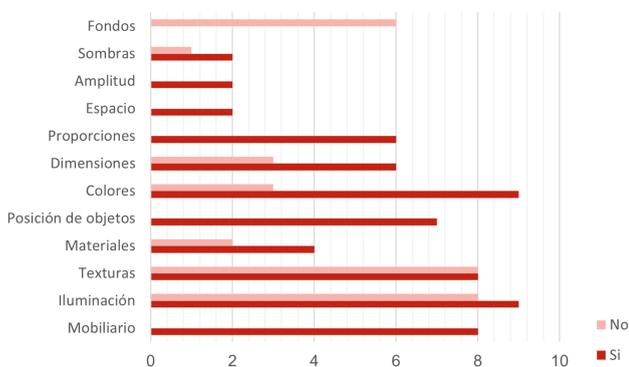


Figura 24: Frecuencia de los aspectos mencionados por los participantes. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, respecto al tamaño en que fue percibido el espacio virtual, un 43% reveló que sintió igual el

entorno virtual, mientras que un 37% afirmó que lo sintió más pequeño y un 20% lo percibió más grande.

4.4 Cruces de información

Adicionalmente a la observación por escenario realizada anteriormente, se efectuó un análisis cruzado de la información obtenida durante la experimentación, según los siguientes criterios.

- Errores según el género del participante

En primera instancia, se evaluó si existía una relación entre la estimación del participante y su género, sin embargo no se observaron diferencias observables y/o concluyentes de este análisis, puesto que la muestra de esta investigación no era pareja, ya que de un total de 30 participantes, 20 eran mujeres, es decir un 66,6%.

- Errores según la secuencia asignada

Por otro lado, se efectuó un análisis relacionado a la secuencia asignada a cada participante, este consistió en evaluar si la secuencia asignada era influyente en la estimación de distancias en cada escenario. Sin embargo, esta variable fue descartada ya que el orden de visualización de los entornos virtuales no tenía una relación significativa con el nivel de error de los participantes.

- Errores por persona en comparación con la realidad

Parte de esta investigación fue analizar los errores individualmente por participante, comparando sus estimaciones en la realidad (Escenario C) versus sus estimaciones en los distintos entornos virtuales (Escenario F, 1 y 2). Los resultados obtenidos de este análisis arrojaron que, sorprendentemente, quienes poseían una estimación más precisa en la realidad no coinciden con quienes tenían una mejor estimación en la virtualidad, a excepción de 3 participantes (P1, P19, P28), los cuales tenían una estimación precisa tanto en la virtualidad como en la realidad, tal como lo muestra la tabla 2.

Escenario F	Escenario 1	Escenario 2	Escenario C
P12	P1	P1	P1
P17	P2	P3	P2
P19	P4	P8	P4
P21	P6	P9	P5
P27	P10	P12	P6
P29	P12	P14	P7
P30	P13	P15	P10
	P15	P18	P16
	P17	P21	P19
	P19	P23	P25
	P23	P28	P28
	P28		
	P29		

Tabla 2: Participantes con menos errores por escenario.

Fuente: Elaboración propia

5. Discusión

En ámbitos generales y según los resultados obtenidos, los entornos virtuales tendieron a la subestimación, en otras palabras, el espacio se percibió más pequeño que la realidad. Esto no es sorprendente, puesto que la literatura revisada anteriormente respalda la idea de que la virtualidad se percibe más pequeña que el mundo real.

En un análisis más profundo, los resultados de este experimento sugieren que tanto la disponibilidad de señales visuales, como el tipo de imagen visualizada en los lentes de realidad virtual, podrían explicar las inexactitudes en la estimación de escala arquitectónica. En primera instancia, los errores absolutos de los participantes parecen indicar que el grado de error depende del tipo de imagen visualizada, es decir, si la imagen es monoscópica o estereoscópica, esta teoría nace a partir de que el escenario 1 y 2, tuvieron un menor porcentaje de error dentro de los escenarios virtuales. Es importante destacar que estos escenarios se visualizaron mediante una fotografía estereoscópica, mientras que el escenario F fue visualizado por medio de una fotografía monoscópica. Este resultado puede ser muy relevante, puesto que podría ser el hincapié para una investigación relacionada a la

incidencia del tipo de imagen 360 en la estimación de escala o bien en la percepción misma del entorno virtual.

Por otro lado, los errores absolutos de los participantes también sugieren que el grado de estos depende de la cantidad de señales visuales dispuestas en el escenario, es decir, entre más señales visuales y parecido con la realidad tenga el escenario, más impreciso es el resultado de la estimación. Esto nace a partir de que dentro de los escenarios virtuales, el escenario 1 fue el más preciso, comparándolo con los resultados en el escenario de control, recordemos que, este escenario carecía de señales visuales similares a la realidad. Una explicación lógica para este suceso podría ser el fenómeno conocido como “uncanny valley” (o en español, valle inquietante). Este fenómeno dibuja una función donde se relaciona el parecido de varios objetos con un humano, y el sentimiento que genera en quien lo ve. La teoría postula que esto nos genera tranquilidad sólo hasta que son demasiado parecidos, y ahí los sentimientos positivos se desvanecen y se genera una sensación de incomodidad y/o extrañeza. Para esta investigación en particular, este fenómeno explicaría las inexactitudes para los escenarios F y 2, donde las señales visuales dispuestas en el espacio virtual, tanto la disposición del mobiliario, las texturas y los objetos son una coincidentes a los dispuestos en la realidad, lo cual podría haber generado incomodidad en los participantes, afectando considerablemente su estimación de escala. Acotaciones de los participantes durante la experimentación podrían respaldar esta teoría, puesto que varios de ellos comentaban que en el escenario 2 en particular, si bien poseía una parecido considerable, les causaba una sensación de extrañeza la “perfección” del entorno, es decir, el escenario carecía de marcas y/o evidencias causadas naturalmente, como marcas debido al uso, manchas en el suelo y las paredes, marcas por el sol, sonidos del ambiente, personas en la habitación, etc.

Desde el punto de vista de la arquitectura, el hecho de que factores, tales como el tipo de imagen visualizada y/o el grado de realidad que posee el

modelo, posean un nivel de incidencia considerable en las estimaciones de distancias es sustancial, puesto que en nuestra área, al momento de presentar un proyecto arquitectónico mediante realidad virtual, estos factores deberán ser considerados en el proceso de diseño y posterior visualización, ya que son factores que, como ya sabemos, alteran la percepción de distancias y escala del lugar. Esto es sumamente relevante, puesto que en la medida que estos factores son considerados, lograremos como profesionales del área, proyectar al cliente un espacio lo más exacto y preciso como sea posible.

Si bien los resultados parecen ser sugerentes, se deben tener en cuenta los siguientes factores para evaluar de forma precavida las implicaciones de esta investigación.

En primer lugar, la muestra de este estudio tiene limitaciones de potencia estadística. Tanto su tamaño reducido ($N = 30$) como el hecho de que fuera una muestra por conveniencia (en lugar de una muestra aleatoria) ponen en duda su idoneidad para representar adecuadamente a la población normal.

En segundo lugar, los participantes estaban parados en una posición fija y no podían caminar (ni virtual ni físicamente) durante el experimento. Esta configuración estática es una forma menos familiar de explorar y visualizar una sala que caminar por ella, donde otros factores (por ejemplo, la velocidad del recorrido, la perspectiva dinámica, la cercanía al objeto en cuestión, etc.) también contribuyen a la percepción de escala. En consecuencia, los resultados de este estudio deben interpretarse únicamente para contextos estáticos y no pueden generalizarse a las aplicaciones de realidad virtual de circulación libre.

Teniendo en cuenta estos factores, los resultados de esta investigación podrían considerarse sugerentes para abordar este tema con mayor profundidad, abarcando temas como (a) la incidencia del tipo de imagen en la estimación de escala con realidad virtual; (b) utilizar modelos virtuales en los límites de la realidad, es decir, muy alejados y/o muy cercanos a esta; (c) la realización y un estudio similar a esta investigación con una muestra aleatoria más grande; (d) desarrollar un entorno virtual que permita a los

participantes interactuar tanto en el espacio como con los objetos a su alrededor.

6. Conclusiones

Los resultados de esta investigación, en su conjunto, sugirieron que no solo las señales visuales son incidentes en la percepción de escala, si no también el tipo de imagen visualizada y el grado de realidad que posee el entorno virtual.

Un menor margen de error pareciera indicar que los entornos virtuales visualizados a través de una imagen estereoscópica tienen un mayor grado de precisión en la estimación de distancias, tanto en las distancias exocéntricas como egocéntricas. Sin embargo, si hablamos de los entornos virtuales con señales visuales completas, los resultados arrojan que el grado de parecido con la realidad podría generar situaciones de incomodidad en los seres humanos, alterando directamente la estimación de distancias. Según los resultados de la experimentación, esta sensación de incomodidad afectaría en igual medida la percepción de las distancias exocéntricas y egocéntricas.

Es importante mencionar que debido a diversos factores antes mencionados, los resultados de esta investigación no son concluyentes y deben ser considerados de forma precavida, dando paso a futuras investigaciones que deberán tener en cuenta las dificultades y limitaciones aquí mencionadas.

A modo de conclusión, se espera que los resultados de esta investigación contribuyan a evidenciar la necesidad de seguir explorando sobre el modo de modelar y visualizar entornos de realidad virtual, factores que ya sabemos, inciden en la percepción de escala. De esta forma, la investigación es un aporte para, en un futuro, lograr simulaciones más precisas y confiables para el desarrollo de la visualización arquitectónica.

7. Agradecimientos

Agradezco a todos los estudiantes, quienes tuvieron la voluntad de participar en el experimento y de esta forma generar datos e información valiosa para la investigación.

Agradezco también a Alejandro Flores y a María Belén Faba por su incondicional ayuda en momentos difíciles. Le agradezco también a mi profesor guía, Mauricio Loyola, por su constante apoyo, el cual permitió llevar a cabo este trabajo de investigación.

Finalmente, agradecer a mi familia, pareja y amigos quienes me han apoyado tanto en el transcurso de este seminario como a lo largo de esta carrera.

8. Referencias

- Arnheim, R. (1971) "Pensamiento Visual", Ed. EUDEBA, Buenos Aires.
- Creem-Regehr, S. H., Willemsent, P., Goochl, A. A., & Thompson, W. B. (2005). The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual indoor environments. *Perception*, 34(2), 191–204. <https://doi.org/10.1068/p5144>
- Gonzalez G., S. (1985) La Escala, En Cuadernos de Arquitectura n° 10, ESCALA, Bogotá.
- Imamoglu, V. (1973) The effect of furniture density or the subjective evaluation of spaciousness and estimation of size of rooms. In: Küller R (ed) *Architectural psychology*. Hutchinson and Ross, inc., Dowdon, pp 314–352
- Interrante V, Ries B, Lindquist J, Kaeding M, Anderson L (2008) Elucidating factors that can facilitate veridical spatial perception in immersive virtual environments. *Presence* 17(2):176–198
- Jones JA, Swan II JE, Singh G, Ellis SR (2011) Peripheral visual information and its effect on distance judgments in virtual and augmented environments. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH symposium on applied perception in graphics and visualization*. ACM, pp 29–36
- Kaye, S. M., & Murray, M. A. (1982). Evaluation of an Architectural Space As a Function of Variations in Furniture Arrangement, Furniture Density, and Windows. *Human Factors*, 24(5), 609–618. <https://doi.org/10.1177/001872088202400511>.
- Knapp JM, Loomis JM (2004) Limited field of view of head-mounted displays is not the cause of distance underestimation in virtual environments. *Presence (Camb)* 13(5):572–577
- Letelier, S. (2007). ESCALA Y 'ESCALAJE' EN ARQUITECTURA. 526.
- Loomis JM, Knapp JM (2003) Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments. *Virtual Adaptive Environ* 11:21–46
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10055-017-0331-2>
- Mañana Borrazás, P. (2003). Arquitectura como percepción. *Arqueología de La Arquitectura*, 2, 177. <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2003.44>
- Messing R, Durgin FH (2005) Distance perception and the visual horizon in head-mounted displays. *ACM Trans Appl Percept (TAP)* 2(3):234–250
- Murgia, A., & Sharkey, P. M. (2009). Estimation of Distances in Virtual Environments Using Size Constancy. *International Journal of Virtual Reality*, 8(1), 67–74. <https://doi.org/10.20870/ijvr.2009.8.1.2714>
- Renner, R. S., Velichkovsky, B. M., Helmert, J. R., & Stelzer, R. H. (2013). Measuring interpupillary distance might not be enough. *Proceedings - SAP 2013: ACM Symposium on Applied Perception*, 130. <https://doi.org/10.1145/2492494.2501887>

Renner, R. S., Velichkovsky, B. M., & Helmert, J. R. (2013). The perception of egocentric distances in virtual environments - A review. *ACM Computing Surveys*, 46(2), 1-40.
<https://doi.org/10.1145/2543581.2543590>

Tai, N. C. (2012). Daylighting and its impact on depth perception in a daylit space. *Journal of Light and Visual Environment*, 36(1), 16-22.
<https://doi.org/10.2150/jlve.36.16>

Von Castell, C., Oberfeld, D., & Hecht, H. (2014). The effect of furnishing on perceived spatial dimensions and spaciousness of interior space. *PLoS ONE*, 9(11).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113267>

9. Anexo

https://drive.google.com/drive/folders/1_OV5JHpOZ1HILgiS-roKK0aUyTcoOLS?usp=sharing