



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Métricas de Inmersión para Sistemas de Realidad Virtual

Matías Nicolás Selzer

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2021





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

TESIS DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Métricas de Inmersión para Sistemas de Realidad Virtual

Matías Nicolás Selzer

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2021

# Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ciencias de la Computación, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación durante el período comprendido entre el 01/04/2016 y el 27/01/2021, bajo la dirección de la Dra. Silvia Mabel Castro y el Dr. Martín Leonardo Larrea.

Matías Nicolás Selzer



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el .... / .... / ..... , mereciendo la calificación de ..... (.....)



# Resumen

La Realidad Virtual es una tecnología que sumerge a los usuarios en ambientes virtuales generados por computadora y que hoy en día se utiliza en diferentes áreas de aplicación como la educación, la medicina, la psicología, el entrenamiento y el entretenimiento, entre otras. Los avances tecnológicos de los últimos años han favorecido la creación de diversos dispositivos y sistemas de realidad virtual, cada uno con distintas características de hardware y de software, que proporcionan distintos grados de inmersión. Los usuarios se comunican con los sistemas de realidad virtual a través de sus sentidos, como la vista, el oído y el tacto y, cuanto mayor comunicación exista entre éstos y el sistema de realidad virtual, más inmersivo será el sistema. De esta forma, la inmersión es una característica objetiva del sistema de realidad virtual que dependerá tanto de las características de hardware como de las de software de dicho sistema.

Los sistemas de realidad virtual actuales buscan mejorar la inmersión tanto como sea posible; sin embargo, no existe una métrica que permita medir la inmersión de un dado sistema de realidad virtual en función de sus características.

En esta tesis se propone una metodología para la elaboración de dicha métrica de inmersión. Para esto se presenta no solo un análisis y una clasificación de todas aquellas variables que según la literatura influyen en la sensación de inmersión, sino también un experimento que manipula dichas variables para la generación de un conjunto de datos que podrá ser analizado estadísticamente. Para este experimento se diseñó y desarrolló un sistema de realidad virtual que manipula los valores de dichas variables para que el usuario pueda evaluar el grado de inmersión correspondiente. A partir de los datos del experimento se presenta un análisis estadístico de las variables y una metodología de análisis de regresión para hallar modelos de inmersión en función de las variables del sistema. Estos modelos nos presentan ecuaciones de inmersión en función de las variables y por lo tanto constituyen las métricas de inmersión. Estas métricas son luego puestas a prueba en sistemas de realidad virtual comerciales, demostrando su eficacia y utilidad.

Las métricas de inmersión son una herramienta de gran utilidad en el área de realidad virtual y tecnologías inmersivas, no solo para medir la inmersión de cualquier sistema de realidad virtual dado, sino también para analizar la relación y la importancia de cada una de las variables o características de estos sistemas.

# Abstract

Virtual Reality is a technology that immerses users into computer-generated virtual environments. Nowadays it is used in many different domains such as education, medicine, psychology, training, entertainment, among others. In recent years, technological advances have encouraged the creation of various virtual reality devices and systems, each with very different hardware and software features, and providing different immersion levels. Users communicate with the virtual reality systems through their senses, such as sight, hearing and touch, and the more communication there is between these senses and the virtual reality system, the more immersive the system is. Hence, immersion is an objective feature of the virtual reality system that relies on both, the hardware and software features of the system.

Current virtual reality systems aims to improve immersion as much as possible; however, there is no metric to measure the immersion level of a given virtual reality system based on its features.

This thesis proposes a methodology for the formulation of such immersion metric. To this end, not only an analysis and a classification of all those variables that according to the literature influence the feeling of immersion is presented, but also an experiment that manipulates these variables to generate a dataset that can be statistically analyzed. For this experiment, we designed and developed a virtual reality system that manipulates the values of these variables so that the user can evaluate the corresponding levels of immersion. From the data of the experiment, a statistical analysis of the variables and a regression analysis methodology are presented to find immersion models based on the variables of the system. These models provide us with immersion equations as a function of the variables and therefore constitute immersion metrics. These metrics are then tested in commercial virtual reality systems, proving their effectiveness and usefulness.

Immersion metrics are a very useful tool in the area of virtual reality and immersive technologies, not only to measure the immersion of any given virtual reality system, but also to analyze the relationship and importance of each of the variables or features of these systems.

# Índice general

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Introducción . . . . .	1
1.2.	Contexto y Motivación . . . . .	3
1.3.	Objetivos y Aportes de la Tesis . . . . .	4
1.4.	Estructura de la Tesis . . . . .	6
1.5.	Trabajos publicados . . . . .	8
1.5.1.	Trabajos en Evaluación / Revisión . . . . .	8
1.5.2.	Publicaciones en Revistas . . . . .	9
1.5.3.	Publicaciones en Congresos Nacionales . . . . .	9
2.	AMBIENTES VIRTUALES: PRESENCIA E INMERSIÓN	13
2.1.	Introducción . . . . .	13
2.2.	Origen de la Presencia: Telepresencia . . . . .	14
2.3.	¿Qué es la <i>Presencia</i> ? . . . . .	15
2.4.	Ilusión del Lugar e Ilusión de Plausibilidad . . . . .	20
2.5.	Inmersión . . . . .	21
2.6.	Realismo y Fidelidad . . . . .	22
2.7.	Coherencia . . . . .	23
2.8.	Otros términos relacionados con presencia . . . . .	24
2.8.1.	Participación y Compromiso ( <i>Involvement and Engage- ment</i> ) . . . . .	24
2.8.2.	Flujo . . . . .	25
2.8.3.	Absorción . . . . .	25

2.8.4.	Transporte . . . . .	26
2.9.	Conclusiones . . . . .	26
3.	<b>MÉTRICAS Y MEDICIONES</b>	<b>29</b>
3.1.	Introducción . . . . .	29
3.2.	Cuestionarios . . . . .	31
3.3.	Medidas Fisiológicas . . . . .	34
3.4.	Medidas de Comportamiento . . . . .	37
3.5.	Entrevistas . . . . .	38
3.6.	Medidas Comparativas . . . . .	38
3.6.1.	Comparación de Magnitud . . . . .	39
3.7.	Conclusiones . . . . .	40
4.	<b>MODELOS DE PRESENCIA E INMERSIÓN</b>	<b>41</b>
4.1.	Introducción . . . . .	41
4.2.	Modelos de Presencia . . . . .	43
4.2.1.	Análisis y Conclusiones . . . . .	47
4.3.	Modelos de Inmersión . . . . .	50
4.3.1.	Análisis y Conclusiones . . . . .	56
4.4.	Conclusiones . . . . .	57
5.	<b>VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA INMERSIÓN</b>	<b>59</b>
5.1.	Introducción . . . . .	59
5.2.	Características del Usuario . . . . .	60
5.3.	Características del Medio . . . . .	61
5.3.1.	Variables de Inmersión Visual . . . . .	74
Campo de Visión . . . . .	74	
Resolución de Pantalla . . . . .	76	
Estereopsis . . . . .	76	
Tasa de Refresco y Tiempo de Respuesta (Latencia) . . . . .	78	
Brillo, Contraste, Saturación y Definición . . . . .	79	
Nivel de Detalle . . . . .	79	
Colisiones . . . . .	80	
Iluminación . . . . .	81	

	Sombras Dinámicas . . . . .	81
	Representación del Cuerpo . . . . .	82
5.3.2.	Variables de Inmersión Auditiva . . . . .	83
	Sonido o No Sonido . . . . .	83
	Sonido Ambiente . . . . .	84
	Sonido Espacial 3D . . . . .	84
	Auriculares o Parlantes . . . . .	84
	Volumen . . . . .	85
	Otros . . . . .	85
5.3.3.	Inmersión Táctil . . . . .	86
	Ancho de Banda Sensorial . . . . .	87
	Fidelidad Sensorial y de Interacción . . . . .	87
	Seguimiento o <i>Tracking</i> del Cuerpo . . . . .	88
	Movilidad y Grados de Libertad . . . . .	88
	Naturalidad de los Controles . . . . .	89
	Tiempo de Respuesta <i>Tracking</i> (Latencia) . . . . .	89
	Navegación . . . . .	90
	Temperatura y Viento . . . . .	91
5.3.4.	Otras Variables . . . . .	91
	Olfato y Gusto . . . . .	92
	Tiempo Transcurrido . . . . .	92
	Presencia de Otros . . . . .	93
	Ambiente Emotivo . . . . .	93
	Riesgo Personal . . . . .	93
	Transporte Narrativo . . . . .	94
5.4.	Conclusiones . . . . .	94
<b>6.</b>	<b>EXPERIMENTO: GENERACIÓN DE DATOS</b>	<b>97</b>
6.1.	Introducción . . . . .	97
6.2.	Participantes . . . . .	99
6.3.	Hardware . . . . .	99
6.4.	Ambiente Virtual . . . . .	100
6.5.	Variables Independientes . . . . .	104

6.6.	Variables Dependientes . . . . .	124
6.7.	Procedimiento . . . . .	125
6.8.	Resultados . . . . .	129
6.9.	Discusión y Conclusiones . . . . .	129
7.	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	<b>133</b>
7.1.	Introducción . . . . .	133
7.2.	Variables de Inmersión Visual . . . . .	135
7.2.1.	Resolución de Pantalla . . . . .	135
7.2.2.	Campo de Visión (FOV) . . . . .	136
7.2.3.	Tasa de Refresco . . . . .	136
7.2.4.	Estereopsis . . . . .	137
7.2.5.	<i>Antialiasing</i> . . . . .	137
7.2.6.	Texturas . . . . .	139
7.2.7.	Iluminación . . . . .	139
7.2.8.	Saturación . . . . .	140
7.2.9.	Brillo . . . . .	140
7.2.10.	Contraste . . . . .	142
7.2.11.	Definición . . . . .	142
7.2.12.	Fuerza de las Sombras . . . . .	142
7.2.13.	Reflexiones . . . . .	144
7.2.14.	Detalle de los Modelos . . . . .	144
7.2.15.	Profundidad de Campo . . . . .	145
7.2.16.	Partículas . . . . .	145
7.3.	Variables de Inmersión Auditiva . . . . .	147
7.3.1.	Tipo de Salida de Audio . . . . .	147
7.3.2.	Sonido Ambiente . . . . .	148
7.3.3.	Reverberación . . . . .	148
7.3.4.	Sonido Espacial 3D . . . . .	149
7.4.	Variables de Inmersión Táctil . . . . .	151
7.5.	Variables de Inmersión Total . . . . .	152
7.6.	Presencia . . . . .	158
7.7.	Discusión y Conclusiones . . . . .	160

7.7.1.	Inmersión Visual . . . . .	161
7.7.2.	Inmersión Auditiva . . . . .	163
7.7.3.	Inmersión Táctil . . . . .	164
7.7.4.	Inmersión Total . . . . .	165
7.7.5.	Presencia . . . . .	167
7.7.6.	Inconvenientes y Trabajo Futuro . . . . .	168
<b>8.</b>	<b>OBTENIENDO UNA MÉTRICA DE INMERSIÓN</b>	<b>171</b>
8.1.	Introducción . . . . .	171
8.2.	Análisis de Regresión . . . . .	173
8.3.	Selección de Características (Variables) ( <i>Feature Selection</i> ) . . .	175
8.3.1.	Selección hacia adelante ( <i>Forward Selection</i> ) . . . . .	176
8.3.2.	Selección hacia atrás ( <i>Backward Selection</i> ) . . . . .	177
8.3.3.	Selección Escalonada ( <i>Stepwise Selection</i> ) . . . . .	177
8.4.	Métricas de <i>Performance</i> del Modelo . . . . .	177
8.5.	Validación del Modelo de Regresión . . . . .	179
8.5.1.	Conjunto de Validación . . . . .	180
8.5.2.	Validación Cruzada Dejando Uno Afuera ( <i>Leave One Out Cross Validation - LOOCV</i> ) . . . . .	180
8.5.3.	Validación Cruzada de K Iteraciones ( <i>K-Fold Cross Validation</i> ) . . . . .	181
8.6.	Generación de los Modelos de Inmersión . . . . .	182
8.6.1.	Etapa 1: Modelos Directos . . . . .	182
	Modelo Lineal Simple . . . . .	183
	Modelo Simple con Interacción . . . . .	184
	Modelo Completo sin Interacciones . . . . .	184
	Modelo Completo . . . . .	184
	Modelo Manual . . . . .	185
	Análisis . . . . .	185
8.6.2.	Etapa 2: Selección de Variables . . . . .	187
	Análisis . . . . .	189
8.6.3.	Etapa 3: Validación . . . . .	189
	Análisis . . . . .	191

8.7.	Selección Final . . . . .	194
8.8.	Métricas de Inmersión: Modelos Seleccionados y Ecuaciones . .	201
8.9.	Discusión y Conclusiones . . . . .	204
<b>9.</b>	<b>APLICANDO LA MÉTRICA DE INMERSIÓN</b>	<b>207</b>
9.1.	Introducción . . . . .	207
9.2.	La Mejor Inmersión . . . . .	208
9.2.1.	Fuerza Bruta y Combinaciones . . . . .	208
9.2.2.	Análisis de las Variables . . . . .	210
9.2.3.	Los Modelos en Funcionamiento . . . . .	213
9.2.4.	Análisis . . . . .	215
9.3.	Inmersión en Dispositivos Comerciales . . . . .	219
9.4.	Discusión y Conclusiones . . . . .	223
<b>10.</b>	<b>LA INMERSIÓN Y LOS SENTIDOS</b>	<b>225</b>
10.1.	Introducción . . . . .	225
10.2.	Análisis Estadístico y Modelo de Regresión . . . . .	227
10.3.	Discusión y Conclusiones . . . . .	231
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b>	<b>233</b>
11.1.	Introducción . . . . .	233
11.2.	Experimento y Generación de Datos . . . . .	235
11.3.	VARIABLES . . . . .	235
11.3.1.	VARIABLES RELEVANTES NO CONSIDERADAS . . . . .	236
11.3.2.	VARIABLES IRRELEVANTES CONSIDERADAS . . . . .	237
11.3.3.	Inmersión Táctil . . . . .	238
11.3.4.	Tiempo de Duración . . . . .	239
11.4.	Contribuciones . . . . .	239
11.5.	Trabajo Futuro . . . . .	242
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>268</b>



# 1

## Introducción

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos los artistas y científicos de todo el mundo han intentado reproducir escenarios realistas. La tecnología del siglo XX, como las cámaras de cine, ayudaron a impulsar este sueño, brindando la posibilidad de reproducir imágenes en movimiento y reproducciones convincentes de lugares reales e imaginarios. Hoy en día, la tecnología del siglo XXI apunta a proveer no solo experiencias visuales y auditivas, sino también experiencias sensorialmente más ricas.

Si bien el concepto de Realidad Virtual surgió hace varias décadas, el comienzo de los 90s marcó un inicio en el crecimiento del desarrollo del campo de la Realidad Virtual, volviéndose cada año más popular. Hoy en día escuchamos sobre Realidad Virtual en casi todos los medios; si bien las personas utilizan este término muy habitualmente, no siempre lo utilizan de manera correcta. Esto se debe en parte a que esta “nueva”, prometedora y fascinante tecnología captura el interés de las personas y la línea entre la computación gráfica tradicional y la Realidad Virtual se vuelve difusa.

Realidad Virtual (RV) y Ambientes Virtuales (AV) suelen utilizarse indistintamente en el área de computación. Estos términos son los más populares y utilizados, pero existen muchos otros como, por ejemplo, *Experiencia Sintética*, *Mundos Virtuales*, *Mundos Artificiales* o *Realidad Artificial*. Generalmente, todos estos términos hacen referencia al mismo concepto:

- “Gráficos interactivos en tiempo-real con modelos 3D, combinados con una tecnología que provea al usuario una inmersión en el modelo del mundo y de manipulación directa” [1].
- “La ilusión de participar en un ambiente sintético en lugar de la observación externa de dicho ambiente. La RV se basa en una dimensión 3D, visores estereoscópicos con seguimiento de la cabeza, seguimiento de las manos y del cuerpo y sonido binaural. La RV es una experiencia inmersiva y multi-sensorial” [2].
- “Simulaciones por computadora que usan gráficos 3D y dispositivos como el *DataGlove* para permitir a los usuarios interactuar con la simulación” [3].
- “La RV se refiere a ambientes inmersivos, interactivos, multi-sensoriales, centrados en el usuario y 3D, y la combinación de las tecnologías requeridas para construir dichos ambientes” [4].

Aunque existen algunas diferencias entre estas definiciones, esencialmente son equivalentes. Todas mencionan a la RV como una experiencia interactiva e inmersiva en un mundo simulado.

## 1.2. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

Los sistemas de RV son interfaces sofisticadas de interacción humano-computadora que hoy en día se utilizan para una gran variedad de aplicaciones tales como educación [5–8], medicina [9, 10] y entrenamiento [11–14]. Sin embargo, la aplicación más popular es el entretenimiento y los videojuegos [15–17]. Cada aplicación presenta distintos objetivos, lo que requiere distinto *hardware* y/o distintas implementaciones de *software*. Con el avance de la tecnología surgen, por ejemplo, dispositivos de RV cada vez más poderosos. Este avance tecnológico permite crear dispositivos con mejores pantallas con más resolución, mejores sistemas de seguimiento, mejores baterías, mejor sistema de sonido, etc. Sin embargo, ¿cómo determinamos, por ejemplo, si un dispositivo es mejor que otro? En otras palabras, dado un dominio de aplicación, ¿cómo podemos determinar qué dispositivo es más efectivo o qué factores de dicho dispositivo lo vuelven más efectivo?

Los sistemas de RV buscan que los usuarios se sientan inmersos en un mundo 3d de la forma “más real posible”, es decir, que sientan que verdaderamente se encuentran dentro del mundo virtual. Este concepto se define como *presencia* y muchos estudios en la literatura analizan la forma de maximizar esta presencia percibida por el usuario. A diferencia de la presencia, el concepto de *inmersión* describe qué tanto de nuestros sentidos están contemplados por el sistema de RV. Por ejemplo, un sistema que permita caminar de forma natural será más inmersivo que otro sistema que permita caminar con un *joystick*. Por lo tanto, la inmersión de un sistema se ve afectada tanto por las características de *hardware* del sistema, como por la implementación del *software*. Cada dispositivo diferente, entonces, proveerá distintos grados de inmersión.

En la literatura se presentan diversos estudios que relacionan distintos componentes de un sistema de RV con la presencia y la inmersión percibidas por el usuario. En dichos estudios se han descrito más de 20 variables que se supone inciden sobre la inmersión y la presencia. Sin embargo, es importante mencionar que en dichos estudios sólo se ha hallado la incidencia de una o dos variables simultáneamente sobre éstas. Hasta el momento, en ningún estudio se ha realizado un experimento exhaustivo para hallar la o las posibles relaciones que pueden existir entre todas las variables involucradas.

No solo resulta interesante considerar la relación y la interacción entre dichas variables. El análisis en cuanto a la incidencia de las variables en la inmersión también se puede utilizar para construir una métrica o un modelo que permita caracterizar o predecir el grado de inmersión de cualquier sistema de RV, siempre y cuando se provea el valor de dichas variables.

En este contexto, en esta tesis se aborda un análisis exhaustivo de dichas variables y el desarrollo de experimentos con el objetivo de contar con un conjunto de datos que permita realizar análisis estadísticos, para finalmente poder obtener una métrica de inmersión.

### 1.3. OBJETIVOS Y APORTES DE LA TESIS

El **objetivo general** de esta tesis es construir métrica/s de inmersión que, dado un sistema de RV, permita/n calcular el grado de inmersión en función de las variables del sistema. El contar con dicha métrica permitirá medir la inmersión de cualquier sistema de RV, ajustar el grado de inmersión de éstos y comparar la inmersión de distintos sistemas, entre otras alternativas.

Para alcanzar este objetivo, se desarrolló una metodología que permitió obtener esta métrica y los **objetivos particulares** que se plantearon se detallan a continuación:

- Exploración y análisis de todas aquellas variables que según la literatura influyen en la sensación de presencia e inmersión percibida por los usuarios que experimentan un sistema de RV.
- Diseño y desarrollo de un sistema de RV que utilice todas las variables analizadas, pudiendo manipular sus valores de tal forma que los usuarios puedan experimentar el sistema y evaluar el grado de inmersión acorde a dichas variables, para obtener los datos que permitan evaluar las propuestas a realizar. Este sistema deberá considerar cada una de las variables que influyen en la sensación de presencia e inmersión percibida por los usuarios y las distintas variaciones de las mismas (por ejemplo, distinta resolución de pantalla, distintos valores de *frames* por segundo, distintos tipos de presentación de sonido, etc.), y los usuarios podrán así evaluar el nivel de inmersión percibida en cada caso.
- Diseño y desarrollo de los experimentos necesarios para poder construir la/s métrica/s que se proponga/n para calcular el grado de inmersión en función de las variables del sistema.
- Aplicación de técnicas de validación de la métrica propuesta y realización de pruebas en casos de la vida real.

Sintetizando, los aportes de este trabajo de tesis son:

- Recopilación, análisis y clasificación de las variables de los sistemas de RV que inciden en la sensación de presencia e inmersión.
- Diseño y desarrollo de un sistema de RV que permite la creación dinámica de escenarios en los que se manipulan los valores de las variables analizadas, permitiendo al usuario puntuar el grado de inmersión de dicho sistema en función de dichos valores.
- Análisis estadísticos para evaluar las relaciones entre las distintas variables y la influencia de cada una de las variables respecto a la inmersión total del sistema.

- Análisis y generación de modelos de regresión a partir de los cuales se construyeron métricas de inmersión en función a las variables del experimento. Dichos modelos fueron apropiadamente construidos, seleccionados y validados.
- Utilización y prueba de las métricas de inmersión en un escenario real con visores de RV comerciales. Utilización de la métrica para poder hallar los valores de las variables que maximicen la inmersión.
- Discusión y análisis de todos los resultados intermedios.

#### 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis incluye los conceptos relevantes de manera que su lectura sea auto contenida. A continuación se describe su estructura: La presencia y la inmersión son dos conceptos fuertemente ligados a la RV, sin embargo, estos conceptos suelen confundirse entre sí. El capítulo 2 presenta las definiciones de estos conceptos así como también de otros conceptos relacionados.

Una vez que se decide qué concepto de inmersión se desea medir sobre un sistema de RV dado, se debe considerar cómo se va a medir. El capítulo 3 detalla todas las formas en que la inmersión puede medirse, analizando las ventajas y desventajas de cada métrica.

A lo largo de las últimas décadas han surgido distintos trabajos en la literatura que han tratado de generar modelos de inmersión o presencia que relacionen no solo un concepto con el otro, sino que también con algunas de las variables que componen el sistema. El capítulo 4 detalla estos trabajos.

La literatura también presenta diversos estudios que buscan hallar la relación entre distintas variables, tanto de *hardware* como de *software*, con respecto a la presencia y la inmersión. En el capítulo 5 se presentan estos trabajos y se realiza una clasificación de dichas variables, haciendo una clara distinción respecto a qué variables utilizaremos para los experimentos.

Como se mencionó previamente, se ha diseñado y desarrollado un sistema de RV que utiliza todas las variables seleccionadas, pudiendo manipular sus valores. De esta manera, se pueden crear distintos escenarios en función de dichas variables y los participantes pueden evaluarlos según el grado de inmersión percibido. En el capítulo 6 se describe el diseño y desarrollo de dicho sistema, describiendo además el proceso llevado a cabo por los participantes.

El conjunto de datos resultante del experimento puede analizarse para evaluar la relación entre las variables y la relación entre las variables respecto a la inmersión total. De esta manera, se puede tener una estimación de cuáles son las variables más relevantes. En el capítulo 7 se presenta el análisis estadístico realizado.

A partir de los datos del experimento se pueden obtener métricas de inmersión en función de las distintas variables. Existen distintas estrategias para hacer esto; en esta tesis hemos utilizado modelos de regresión. En el capítulo 8 se describen brevemente dichos modelos, así como también las distintas técnicas utilizadas para poder obtener más de una métrica de inmersión. De lo que surge del análisis y de la construcción de modelos, nos quedamos con las 3 mejores métricas obtenidas y analizamos las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Una vez obtenidas las métricas de inmersión en función de las variables del sistema, resulta muy interesante hallar qué valores deben tener dichas variables para que la inmersión sea máxima. El capítulo 9 presenta el procedimiento utilizado para estimar esto. Además, en dicho capítulo también se utilizan las métricas en un caso de la vida real, usando tres de los visores de RV comerciales más populares, con el objetivo de demostrar cómo pueden utilizarse nuestras métricas de inmersión en la vida real.

Las variables de un sistema de RV también pueden clasificarse según el sentido humano al que corresponden. La resolución de pantalla, por ejemplo, está relacionada con la vista o el modo de salida de audio está relacionado con el oído. El capítulo 10 detalla qué porcentaje representa cada sentido del ser humano en función de la capacidad sensorial, comparando dichos porcentajes con los distintos tipos de inmersión respecto a la inmersión total.

Finalmente, en el capítulo 11 se presenta una discusión y conclusiones respecto a todo el trabajo realizado durante el desarrollo de esta tesis y se especifican direcciones para el trabajo futuro.

## 1.5. TRABAJOS PUBLICADOS

A continuación, se detallan los trabajos publicados durante el desarrollo de la presente tesis.

### 1.5.1. TRABAJOS EN EVALUACIÓN / REVISIÓN

Selzer, M.N., Larrea, M.L., and Castro S.M. Analysis of Translation Gains in Virtual Reality: The Limits of Space Manipulation. International Journal of Computer Vision, Springer.

Enviado para su evaluación en Enero 2021.

David Kuťák, Matias Nicolás Selzer, Jan Byška, María Luján Ganuza, Ivan Barišić, Barbora Kozlíková, Haichao Miao. Vivern – A Virtual Environment for Multiscale Visualization and Modeling of DNA Nanostructures IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG).

Enviado para su evaluación en Noviembre 2020.

Matías Nicolás Selzer, María Luján Ganuza, and Silvia Mabel Castro. High Visual-Quality Scenes in Low-Cost Virtual Reality with Collisions and Irregular Surfaces. IEEE Journal of Computer Graphics and Applications.

Enviado para su evaluación en Octubre 2020.

### 1.5.2. PUBLICACIONES EN REVISTAS

María Virginia Sabando, Pavol Ulbrich, Matías Selzer, Jan Byška, Jan Mičan, Ignacio Ponzoni, Axel J. Soto, María Luján Ganuza, Barbora Kozlíková. ChemVA: Interactive Visual Analysis of Chemical Compound Similarity in Virtual Screening. IEEE VIS 2020 SciVis Papers, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG).

Selzer, M.N., Gazcón, N.F. and Larrea, M.L., 2019. Effects of virtual presence and learning outcome using low-end virtual reality systems. *Displays*, 59, pp.9-15.

Larrea M.L., Rodríguez Silva J.I., Selzer M.N., Urribarri D.K. (2019) White-Box Testing Framework for Object-Oriented Programming. An Approach Based on Message Sequence Specification and Aspect Oriented Programming. In: Pesado P., Aciti C. (eds) *Computer Science – CACIC 2018*. CACIC 2018. Communications in Computer and Information Science, vol 995. Springer, Cham.

Soulier, K. E., Selzer, M. N., Larrea, M. L. (2017). Estimating Illumination Direction for Augmented Reality in Real-Time by using Low-Cost Sensors. *Journal of Computer Science & Technology*, 17.

Selzer, M. N., Larrea, M. L. (2015). AnArU, a virtual reality framework for physical human interactions. In *Journal of Computer Science & Technology*; vol. 15, no. 2 (2015).

### 1.5.3. PUBLICACIONES EN CONGRESOS NACIONALES

Selzer, M.N., Ganuza, M.L., Urribarri, D.K., Larrea, M.L., Castro S.M. Simulation of High-Visual Quality Scenes in Low-Cost Virtual Reality. En *Actas del XXVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC) 2020*.

Matías N. Selzer, Dana K. Urribarri, Nicolás F. Gazcón, Martín L. Larrea, Claudia Sereno, Antonela Volonté, Aldana Mastrandrea, and Silvia M. Castro. ARPOT: an Augmented Reality Platform for Outdoor Teaching. En Actas del XXVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC) 2020.

Selzer, Matías Nicolás, Martín Leonardo Larrea, and Silvia Mabel Castro. Realidad Virtual: Maximizando Presencia, Inmersión y Usabilidad..<sup>En</sup> Actas del XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2020, Universidad Nacional de la Patagonia Austral). 2020.

Selzer, Matías Nicolás, Martín Leonardo Larrea, and Silvia Mabel Castro. "Presencia e Inmersión en Realidad Virtual: factores que maximizan la sensación de estar dentro del ambiente virtual..<sup>En</sup> Actas del XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2019, Universidad Nacional de San Juan). 2019.

Larrea, M. L., Selzer, M. N., Urribarri, D. K., Ganuza, M. L., and Castro, S. M. (2019, June). Verificación y validación de representaciones visuales y sus interacciones. En Actas del XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2019, Universidad Nacional de San Juan).

Selzer, M. N., Gazcón, N. F., Trippel Nagel, J. M., Larrea, M. L., Castro, S. M., and Bjerg, E. A. (2018). Tecnologías inmersivas aplicadas: realidad virtual y aumentada. En Actas del Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (Vol. 20) (WICC 2018).

Tripi, F. N., Selzer, M. N., Biondi, J. A., and Larrea, M. L. (2018). Virtual and Augmented Reality Therapy Framework for Phobia Treatment. En Actas del XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC), La Plata, 2018.

Selzer, M. N., Arriata, E., Segovia, L., Gascón, N. F., and Larrea, M. L. (2017, August). Modelos de interacción y aplicaciones en realidad virtual mediante dispositivos móviles. En Actas del XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2017, ITBA, Buenos Aires).

Selzer, Matias Nicolás. Interacción humano computadora mediante interfaces hápticas en RV..<sup>En</sup> Actas del Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología. Vol. 3. 2016.

Selzer, M. N., Gamboa M. F. , Biondi J. A., Escarza S. (2016). Braille Messages in a Haptic Wearable Device for Visually Impaired People. En Actas del Congreso Argentino de Sistemas Embebidos (CASE 2016).

**Premiado como una de las mejores publicaciones del CASE 2016.**

Soulier, K., Selzer, M. N., and Larrea, M. L. (2016). Real-Time Estimation of Illumination Direction for Augmented Reality with Low-Cost Sensors. En Actas del XXII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2016).

**Premiado como una de las mejores publicaciones del CACIC 2016.**

Selzer, M. N., Larrea, M. L. (2015). AnArU, a virtual reality framework for physical human interactions. En Actas del XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC), Junín, 2015.

**Premiado como una de las mejores publicaciones del CACIC 2015.**

Magario, B. E., Selzer, M. N., Larrea, M. L., Manresa Yee, C., and Más Sansó, R. (2013). Interacción Humano Computadora para personas con capacidad motriz disminuida mediante un dispositivo Wiimote. En Actas del XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.



# 2

## Ambientes Virtuales: Presencia e Inmersión

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Los términos *presencia* e *inmersión* son los más populares a la hora de definir qué tan bueno es un sistema de RV. En este sentido, se considera que un sistema de RV será mejor que otro si produce más presencia o inmersión. Estos conceptos suelen utilizarse indistintamente en la literatura. Otras veces se los confunde con conceptos similares a *realismo*. El presente capítulo detalla estos conceptos tan utilizados en la literatura referentes a RV como así también los conceptos fuertemente relacionados, enfatizando las diferencias entre ellos y aclarando cuál será la terminología adecuada que se utilizará en la presente tesis.

## 2.2. ORIGEN DE LA PRESENCIA: TELEPRESENCIA

El término *telepresencia* fue introducido por Marvin Minsky en 1989 y se refiere al fenómeno en el que un operador humano desarrolla la sensación de estar físicamente presente en una locación remota a través de la interacción con la interfaz de usuario del sistema [18]. Los teleoperadores son un tipo especial de RV que permiten al individuo operar en un ambiente distante. El usuario puede comandar una máquina con un diseño antropomórfico, que se mueve acorde a los movimientos del usuario y provee tanto realimentación auditiva como visual [19]. Dicha realimentación sensorial es suficiente para mantener la sensación de presencia del operador en el entorno de trabajo remoto [20]. El operador entonces percibe simultáneamente dos ambientes separados: el ambiente físico en donde actualmente se encuentra y el ambiente que está siendo presentado mediante la tecnología. El término *telepresencia* se utiliza cuando la experiencia virtual domina la experiencia del mundo real. Así, describe la sensación de estar en un ambiente generado por la tecnología, en lugar del ambiente físico que rodea al usuario [21].

El término *presencia* surge en un debate científico en 1992 respecto a la creación de una nueva revista titulada *Presence Teleoperators and Virtual Environments*. Aquí, Sheridan [22] se refiere a la presencia producida por un ambiente virtual (AV) como *presencia virtual*, en tanto que usa el término *telepresencia* solo para casos que involucren teleoperaciones [21]. Sin embargo, este término ya había sido introducido en la literatura computacional por Akin y sus colegas en 1983 [23], quienes definieron *telepresencia* como la condición que ocurre cuando, en el lugar de trabajo, los manipuladores tienen la destreza de permitir al operador realizar funciones humanamente normales. Desde entonces, la presencia ha sido definida de muchas formas por diversos investigadores, como una sensación similar al estar dentro del AV.

Hoy en día, la mayoría de los sistemas de RV no se utilizan para ser operados a distancia. En cambio, dichos sistemas generan ambientes virtuales en donde el usuario puede participar sin alterar el mundo real externo. Los participantes dejan de pensar que están interactuando con una computadora y comienzan a interactuar directamente con el AV.

### 2.3. ¿QUÉ ES LA *PRESENCIA*?

La literatura ha propuesto una gran cantidad de definiciones de presencia. Una de las primeras nociones de presencia en el contexto de RV proviene del psicólogo James Gibson, quien sostiene que la presencia puede pensarse como la experiencia del propio ambiente físico; se refiere no a nuestros alrededores en el mundo físico, sino a la percepción de esos alrededores como mediados tanto por procesos mentales automáticos como controlados [24]. La presencia es una sensación subjetiva generada por nuestra percepción del mundo real a través de nuestros órganos sensoriales y los procesos mentales que los gobiernan e integran [24].

Según Skarbez, la presencia tiene la ventaja de ser una métrica aplicable a cualquier AV [25] y se puede preguntar qué tan presente se encuentra un usuario para un dado AV A, y luego preguntar qué tan presente el usuario se encuentra en otro AV B. Si el usuario reporta más presencia en el AV A entonces existe alguna evidencia para poder comparar los AVs A y B, aunque representen escenarios y estén diseñados para propósitos completamente distintos. Skarbez también propone una clasificación en tres clases: *estar ahí*, *no-mediación* y *otras* [25]. Aquéllas pertenecientes a la clase *estar ahí* consideran la presencia como la sensación de estar en un ambiente, mientras que las pertenecientes a la *no-mediación* consideran la presencia como la falta de atención a la tecnología mediadora. Aquellas definiciones agrupadas como *otras* definen presencia como la experiencia de los objetos virtuales enfocados en el procesamiento perceptivo directo [26], la percepción de los objetos como si fuesen reales [27], la sensación de que el simulador es en realidad el simulado [28] o la sensación de sentirse real [29]. La clase *estar ahí*, a su vez, puede dividirse en dos subcategorías: *activa*, en donde la habilidad de actuar es considerada específicamente como parte de la definición y *pasiva*, en donde las acciones de los usuarios no se tienen en cuenta. La *no-mediación* también puede dividirse en dos subcategorías: *interna*, en donde el foco es sobre los propios pensamientos y *externa*, en donde el foco es en la tecnología.

Hendrix y Barfield propusieron que una medida subjetiva de presencia debería ser relevante, sensible, conveniente, no invasiva y confiable [30]. Meehan propone que una medición ideal de presencia debería ser confiable, es decir, producir resultados repetibles, tanto dentro como entre sujetos; válida, es decir que correlacione con la sensación subjetiva de presencia; sensible a multi-nivel y objetiva [31]. Podríamos agregar además que una medida de presencia debería ser generalizable para cualquier AV. Hasta el momento no existe ninguna medida de presencia que respete todos estos criterios.

Cuando Witmer y Singer [32] presentaron su cuestionario de presencia en el año 1998, la definieron como “la experiencia subjetiva de estar en un lugar o ambiente, incluso cuando uno esté físicamente situado en otro”.

En el año 2001, Biocca [33] define presencia como el estado fenomenal en el que un individuo se siente situado y activo en un ambiente y, especialmente en el caso de telepresencia, la clase de experiencia en la que el ambiente es mediado por la tecnología. Aquí, el usuario no solo debe estar “situado”, sino que también debe estar “activo”. Es importante notar que hasta ahora el término telepresencia es considerado como un término diferente del de presencia, ya que la presencia puede sentirse en el mundo real.

En 2003, Slater describe la presencia como una “respuesta” a la unión apropiada entre la percepción humana, el sistema motriz y la inmersión [34]. La presencia surge a medida de que la percepción/acción del usuario es apoyada por el sistema virtual. Es importante notar la novedosa concepción de presencia como una “respuesta”. De esta manera, la presencia puede surgir involuntariamente si se proveen los estímulos correctos en cuanto a la inmersión del sistema y a las características perceptivas/motrices del usuario individual.

Sas et al. [35] presentan otra definición de presencia. Ellos sostienen que uno se encuentra presente en otro mundo si los propios procesos cognitivos están orientados hacia ese mundo al grado de que se experimenta la sensación de “estar ahí” y la propia conciencia se encuentra sobre el estímulo del mundo mediado o imaginario. En este caso, a la sensación de “estar ahí” se le agrega el hecho de responder a los estímulos del mundo virtual, en lugar de a los del mundo real. Pareciera que esta definición asume que uno puede, en cualquier momento, estar presente en un ambiente u otro. Esto sugiere que la presencia es binaria.

Spagnolli y Gamberini mantuvieron el enfoque de presencia en cuanto a la ubicación [36]. Según estos autores, cuando una persona es calificada como “presente”, su ubicación es su característica más importante. Siguiendo esta idea, por ejemplo, las interacciones con humanos virtuales no provocarían presencia en el AV.

Wirth et al. definen *presencia espacial* como la experiencia subjetiva de estar en un ambiente mediado [37]. Esta definición también se ve limitada por el ambiente mediado. Para estos autores, la presencia tiene dos componentes: la sensación de estar físicamente situado en un ambiente (auto-ubicación) y la percepción de las posibilidades de actuar en dicho ambiente (acciones posibles).

Riva et al. definen presencia como la percepción no-mediada de transformar satisfactoriamente las intenciones en acciones en un mundo externo [38]. Aquí no hay distinciones entre mundos reales, virtuales o imaginarios; se puede estar presente en cualquiera de ellos mientras se puedan transformar las intenciones en acciones. Además, es una percepción intuitiva; nuevamente, es algo que “solo sucede” si el sistema se encuentra lo suficientemente en sintonía con las necesidades del usuario (o viceversa).

En 2005, Witmer y Singer rectificaron su definición de presencia como el estado psicológico de “estar ahí mediado por un ambiente que motiva nuestros sentidos, captura nuestra atención y fomenta nuestra participación activa” [39]. También definen *participación* como un estado psicológico experimentado como consecuencia de concentrar la propia energía mental y atención en un conjunto coherente de estímulos o actividades significativamente relacionadas.

Herrera et al. [40] definen presencia como la sensación consciente de uno mismo, tanto como un agente o como un experimentador, que caracteriza la experiencia misma de los ambientes naturales. Aquí también se refiere a los ambientes reales, virtuales o mediados y también se refiere tanto al estar como al actuar en un AV.

Wirth et al. redefinieron su definición de *presencia espacial* como una experiencia binaria, durante la cual la auto-ubicación percibida, y en la mayoría de los casos las posibles acciones percibidas, están conectadas a un ambiente espacial mediado, y las capacidades mentales están unidas por un ambiente mediado en lugar de uno real [41].

Slater y Usoh introdujeron la noción de *presencia* en un ambiente mediado como la creencia (o la supresión de no creer<sup>1</sup>) de que uno mismo está en un mundo distinto al que se encuentra el propio cuerpo [42]. Esta definición introduce nuevas ideas. Por un lado, podemos creer que no estamos en el ambiente mediado y, por el otro, que por algún proceso podemos superar esa creencia.

Lombard y Ditton propusieron que la *presencia* es la ilusión perceptiva de no-mediación [43]. Esta definición asume la existencia de un medio de comunicación que aparenta desaparecer, por lo que es explícita para telepresencia o presencia virtual y no para presencia en ambientes reales. Además, Lombard y Ditton definen presencia como binaria: para cualquier instancia durante el uso del medio, la presencia ocurre o no ocurre. Esto se relaciona con el concepto de presencia como una ilusión que existe o que está rota.

Waterworth et al. definen *presencia* como el enfoque psicológico hacia el procesamiento perceptivo directo. Específicamente indican que la presencia así definida puede sentirse en el mundo real, ya que el procesamiento perceptivo se compone de cosas que están presentes en el ambiente actual, ya sea real o virtual [26]. Dichos autores también proponen tres dimensiones de experiencia: atención (si se está procesando información perceptiblemente o conceptualmente), lugar (si la atención se enfoca en el mundo real o virtual), y sentido (si uno se encuentra consciente o inconsciente).

Stoffregen et al. definieron *presencia* como la percepción ilusoria (falsa) de que el simulador es el simulado [28]. Esto se asemeja al test de *presencia subjetiva* de Schloerb en donde a una persona se le pide elegir si está o no presente en un ambiente o interactuando con el ambiente remotamente, y su grado de presencia subjetiva es igual a la probabilidad de que la persona diga que está físicamente presente cuando de hecho está interactuando remotamente [44].

---

<sup>1</sup>*Suspension of dis-belief* en inglés, concepto recurrente en la literatura referida a presencia

Kwan Min Lee define *presencia* como un estado psicológico en donde los objetos virtuales son experimentados como objetos reales de forma sensorial o no sensorial [27]. Esta nueva definición se enfoca en los objetos del mundo virtual. Si uno experimenta estos objetos como reales entonces se está presente; si no, no se está presente. La parte de “sensorial o no sensorial” de la definición se refiere específicamente a situaciones en las que la presencia es producida por medios no inmersivos como leer un libro. Entonces, si la sensación de “estar ahí” no es lo más importante de la experiencia, esta definición resulta más adecuada para aplicaciones en donde, por ejemplo, las interacciones con humanos virtuales son más importantes que la sensación de estar en el lugar.

#### 2.4. ILUSIÓN DEL LUGAR E ILUSIÓN DE PLAUSIBILIDAD

Teniendo en cuenta la confusión que producen las distintas definiciones de presencia, Slater propuso una teoría en la que la presencia está construida por dos componentes ortogonales: Ilusión de Lugar (PI - *Place Illusion*) e Ilusión de Plausibilidad (Psi - *Plausibility Illusion*). PI se define como la ilusión de estar en un lugar a pesar de saber que en realidad no se está ahí y Psi como la ilusión de que lo que aparentemente está sucediendo, de verdad está sucediendo (aunque se sepa que no) [45]. De este modo, PI se corresponde con el concepto tradicional de presencia de estar ahí, mientras que Psi representa el concepto de creer en lo que se está viendo o experimentando. Por ejemplo, asumamos que nos encontramos en un teatro virtual. Aquí, la presencia se correspondería con la sensación de estar en un teatro. Si al girar la cabeza vemos al resto de los espectadores sentados a nuestro lado, esto refuerza la sensación de PI. Si los espectadores están callados y atentos a la obra, esto refuerza la sensación de Psi. Por el contrario, si al girar nuestra cabeza la imagen no cambia, esto rompería el PI. Si los espectadores en el teatro estuvieran bailando, gritando o jugando al tenis sobre los asientos, esto rompería el Psi.

Estas definiciones propuestas por Slater permiten definir con mayor claridad qué es la presencia. Por un lado, el término Ilusión del Lugar reemplaza los términos de presencia espacial/de lugar o telepresencia. Queda claro que este término se refiere específica y únicamente a la fuerte ilusión de estar en un lugar y no a otros significados que se suelen atribuir a la palabra *presencia*. Por otro lado, al introducir el término Ilusión de Plausibilidad y compararlo en importancia con la Ilusión del Lugar, Slater rectifica como importantes los conceptos de fidelidad y comportamiento.

## 2.5. INMERSIÓN

La inmersión es otro concepto importante en RV y es un término que ha generado mucha confusión respecto a su similitud con el concepto de presencia. Según Slater la inmersión se refiere a una característica objetiva de un AV [46]. Por el contrario Witmer y Singer la definen como un estado psicológico caracterizado por percibir a uno mismo como estar envuelto por, o incluido en, o interactuando con un ambiente que provee un flujo continuo de estímulos y experiencias [32]. Lombard se refiere a estos conceptos de inmersión como *inmersión perceptual* [47] e *inmersión psicológica* [48] respectivamente.

Se vio que la sensación de presencia es una medida subjetiva que dependerá de la sensación y experiencia personal de cada usuario. Por el contrario, la inmersión, pretende ser una medida objetiva del sistema de RV que esté fuertemente ligada a aquellos componentes tanto de *hardware* como de *software*. Un sistema que incluya sonido espacial, por ejemplo, debería generar más inmersión que otro sistema que no incluya ese tipo de sonido o que, incluso, no incluya ningún tipo de sonido. En este contexto, dos usuarios diferentes que experimenten utilizando exactamente el mismo sistema de RV, deberían percibir el mismo grado de inmersión.

Aunque estos conceptos estén relacionados, su uso intercambiable ha generado confusiones en la literatura. En este trabajo se seguirá la definición de inmersión de Slater, es decir, se considerará la inmersión como una **característica objetiva** de un sistema de RV. En el capítulo 4 se describirán en detalle aquellos modelos que definen una relación entre la inmersión y la presencia, y consideran que la primera es parte de la definición de la segunda.

## 2.6. REALISMO Y FIDELIDAD

Es importante notar que, al utilizar el término presencia como medida generalizable, no se tiene en cuenta el realismo del escenario virtual presentado. Sin embargo, en áreas como entrenamiento militar o quirúrgico, se puede requerir respetar la realidad lo mejor posible. Alexander et al. [49] describen *fidelidad* como el grado en el que el AV emula el mundo real e identifica varias subcategorías de fidelidad, incluyendo física (la simulación se ve, suena y se siente como el ambiente operacional), funcional (la simulación actúa como el equipamiento operacional en respuesta a las tareas ejecutadas por el aprendiz) y psicológica (la simulación replica los factores psicológicos experimentados en el ambiente real).

Stoffregen et al. [28] describen *fidelidad del estímulo* como el grado en el que los estímulos sensoriales producidos por el simulador son idénticos a los producidos por el sistema que se simula. La fidelidad del estímulo es entonces una característica objetiva de la simulación ya que depende solo de estímulos sensoriales y no de las percepciones de dichos estímulos. Esta definición es muy similar a la definición de inmersión que es una característica objetiva del simulador o AV.

Para este trabajo seguiremos la definición de Alexander que define a la fidelidad como el grado en el que el AV emula el mundo real. En este sentido, la fidelidad es entonces ortogonal a la inmersión ya que, por un lado, se puede lograr un alto grado de inmersión en un escenario no realista o ficticio, y por el otro, es posible lograr un alto grado de fidelidad en sistemas poco inmersivos.

## 2.7. COHERENCIA

En el mismo artículo en que define Ilusión del Lugar e Ilusión de Plausibilidad, Slater asegura que la inmersión provee los límites entre los que puede ocurrir la Ilusión del Lugar [45]. Es decir, la inmersión de un sistema condiciona la sensación de Ilusión del Lugar. Skarbez argumenta que debe existir un término paralelo a inmersión, que sea una característica objetiva de un escenario virtual y que dé lugar a la Ilusión de Plausibilidad. Por este motivo, Skarbez define *coherencia* como un conjunto de circunstancias razonables que pueden ser demostradas por el escenario sin introducir circunstancias no razonables, en donde *circunstancia razonable* es un estado del escenario virtual que es auto-evidente dado el conocimiento previo [50].

La coherencia puede pensarse como un término que engloba al realismo o fidelidad. Específicamente, la coherencia no asume que el AV deba representar el mundo real. En cambio, la coherencia depende de la consistencia interna lógica y del comportamiento de la experiencia virtual. Si por ejemplo un usuario va a experimentar un mundo virtual de fantasía, entonces el hecho de ver cualquier tipo de personaje volando por los aires podría ser un comportamiento coherente. Por otro lado, si el usuario va a experimentar un escenario realista, entonces ver el mismo comportamiento mencionado anteriormente reduciría la sensación de Ilusión de Plausibilidad.

La definición de coherencia provista por Skarbez menciona el conocimiento previo, pero ¿de quién? En la práctica, todos los AVs asumen algún conocimiento previo o experiencia por parte de los usuarios. Si éste es el caso, la coherencia no puede ser puramente objetiva.

Sin embargo, es de utilidad tratar la coherencia como si fuera objetiva. Un desarrollador no puede controlar el conocimiento previo de los usuarios pero sí puede controlar que los eventos mostrados en un AV sean internamente consistentes y puede minimizar el grado en el que la razonabilidad de éstos dependa de suposiciones hechas por el usuario. Así, las circunstancias objetivamente razonables (es decir, los estados auto-evidentes dado el conocimiento previo provisto en el contexto de la experiencia virtual) pueden ser maximizadas. En resumen, y de acuerdo con Skarbez et al. [25], podemos redefinir la coherencia como el conjunto de circunstancias objetivamente razonables que pueden ser demostradas por el escenario sin introducir circunstancias objetivamente no razonables.

## 2.8. OTROS TÉRMINOS RELACIONADOS CON PRESENCIA

Existen otros términos fuera de la literatura relacionada con RV que también se relacionan con la presencia. Algunos de estos términos se consideran relevantes y por lo tanto se detallarán brevemente a continuación.

### 2.8.1. PARTICIPACIÓN Y COMPROMISO (*INVOLVEMENT AND ENGAGEMENT*)

Estos términos suelen usarse indistintamente para referirse a algo similar a un estado de atención enfocada o de interés. Por ejemplo, Witmer y Singer definen *participación* como un estado psicológico experimentado como consecuencia de enfocar la propia energía y atención en un grupo coherente de estímulos o actividades y eventos significativamente relacionados. La participación depende del grado de significado que el individuo le da al estímulo, actividad o evento [32]. En [51] se define *participación* como el intenso compromiso cognitivo con el ambiente mediado que puede ser observado a través de procesos de evaluación, elaboración y exploraciones mentales, esto es, el procesamiento activo e intenso del mundo presentado a través del medio.

Al igual que Skarbez, no consideraremos la participación o el compromiso como componentes de presencia [25]. Como sucede con otros términos previamente mencionados, la presencia es lógicamente ortogonal a la participación. Esto se ilustra el siguiente ejemplo. Un usuario puede estar presente pero no involucrado (como en muchas situaciones de la vida cotidiana), puede estar involucrado pero no presente (por ejemplo al leer un libro) [34] o puede sentirse espacialmente presente en un AV diseñado para ser aburrido sin sentirse comprometido o cognitivamente involucrado [52].

### 2.8.2. FLUJO

El *flujo* se define como un estado óptimo de concentración o como el estado en el que los individuos están tan involucrados en una actividad que nada más parece importar [53]. Takatalo et al. encontraron conexiones entre presencia y flujo en AVs [54]. Brockmyer et al. afirman que el flujo, como involucra experimentar un estado alterado, puede generar un estado más profundo que la presencia en cuanto al compromiso con el medio [55]. En [56] presentan una revisión del estado del arte en cuanto a flujo en la Web, así como también una discusión respecto al flujo en mundos virtuales.

### 2.8.3. ABSORCIÓN

La *absorción* se describe como la habilidad de perderse en una tarea como ver una película, leer un libro, o experimentar una RV [57], o como la tendencia de estar completamente involucrado en una experiencia perceptiva, imaginativa o ideacional [58]. Brockmyer et al. argumenta que la absorción es incluso un estado de compromiso con el medio más profundo que el flujo o la presencia [55].

#### 2.8.4. TRANSPORTE

En un estado de *transporte* un lector pierde acceso a algunos hechos del mundo real para aceptar el mundo narrativo que el autor ha creado. Los lectores transportados pueden experimentar emociones y motivaciones fuertes, incluso cuando saben que los eventos de la historia no son reales [59]. La *transportabilidad* se refiere a la inherente habilidad de la persona para ser transportado por una narrativa.

#### 2.9. CONCLUSIONES

La presencia es un concepto central en el desarrollo y evaluación de AVs. En este capítulo se presentan las diversas definiciones de presencia existentes en la literatura y se muestra que ésta no es el único factor relevante para la evaluación de AVs ni tampoco es una medida universal de la efectividad de los mismos. La inmersión es también un concepto muy importante que, a diferencia de la presencia, depende de las características del sistema. Por lo tanto, representa una medida objetiva del sistema que puede servir para comparar varios sistemas entre sí y seleccionar el más inmersivo.

Incluso en aquellos sistemas de RV en los que la presencia y la inmersión suelen ser medidas efectivas, algunos de los otros términos discutidos en este capítulo pueden ser sumamente relevantes. En aplicaciones en las que los usuarios realicen algún tipo de tarea análoga a una llevada a cabo en la vida real dentro de un AV, la habilidad de inducir un estado de participación o flujo suele ser muy importante. Para aplicaciones cuyo objetivo sea entrenar sistemas del mundo real, la fidelidad suele ser muy importante. Para aplicaciones de entretenimiento que busquen la sensación de absorción, la coherencia suele ser más importante que la inmersión (o en otras palabras, la Ilusión de Plausibilidad suele ser más importante que la Ilusión del Lugar).

En lo referente a las definiciones, una de las más breves y más utilizada es “la sensación de estar ahí”. El poder definir la presencia como una “sensación” tiene algunos fundamentos teóricos. Schubert conceptualiza la presencia como una “sensación cognitiva” que es causada por procesos inconscientes, es inmediata y varía en intensidad [60].

Al igual que Skarbez en su análisis [25], en este trabajo tampoco estamos de acuerdo con la definición que requiere la ilusión de no-mediación. Spagnolli y Gamberini mostraron que los usuarios eran capaces de actuar simultáneamente en el AV y en el real [61]. El *book problem* [62] es una razón para dudar de esta definición de presencia. No existen estudios que demuestren que el lector se encuentre completamente presente en el ambiente presentado por el libro. Aunque el lector pueda reportar la sensación de presencia, siempre estará consciente del hecho de que en realidad está leyendo un libro.

Por otro lado, consideramos que la definición de presencia como binaria tampoco es correcta. En [60] y en [61] también se critica este aspecto. Dado que un usuario sentirá más presencia o menos presencia en el mundo virtual, con respecto al mundo real, tiene más sentido pensar la presencia como una función continua que aumenta o disminuye, pero no como un valor binario que está o no está presente.

En este trabajo de tesis adoptamos la definición de Schubert de *presencia (espacial)* como la sensación cognitiva de estar en un lugar. Esta sensación puede cambiar según la representación sensorial del lugar, las facilidades provistas al usuario, el escenario en el que el usuario se encuentra y la historia personal del usuario, su estado y sus hábitos. También utilizaremos las definiciones de Ilusión del Lugar (PI) e Ilusión de Plausibilidad (Psi) anteriormente mencionadas.

Este capítulo se ha enfocado principalmente en las definiciones teóricas de presencia y los conceptos directamente relacionados. También se explicita y justifica la definición adoptada. Una vez decidida qué definición de presencia o inmersión se desea adoptar para los experimentos, se debe considerar cómo se medirá dicha variable. Si bien en la literatura se presentan diversas alternativas de medición, tanto objetivas como subjetivas, hay una gran discusión respecto a la factibilidad de dichas mediciones. Estos tipos de mediciones son detallados en el capítulo siguiente.

# 3

## Métricas y Mediciones

### 3.1. INTRODUCCIÓN

El poder determinar qué tan presente se encuentra un usuario dentro de un AV es un problema de por sí difícil de resolver. La presencia es una sensación subjetiva provocada por percepciones sensoriales, lo que hace que su medición sea extremadamente difícil. El hallar la forma de medir la presencia ha sido la base para muchos cuestionarios post-experimentación y el realizar esta medición es en sí un proceso complejo.

La literatura presenta muchos trabajos enfocados en encontrar una manera confiable de medir la presencia. Aunque existen muchos cuestionarios y encuestas orientados a medir la presencia a través de factores causales y distintas variables, solo un pequeño número de ellos han sido reconocidos y se utilizan regularmente.

Un análisis relativamente reciente [52] señaló que la investigación sistemática de la presencia como fenómeno psicológico es bastante nueva en la literatura científica. Los trabajos completos de Biocca [63, 64] se encuentran entre los primeros esfuerzos científicos destinados a discutir características específicas del sentido de presencia. Recién en los últimos años, a partir del trabajo de Lee [27], se ha intentado ofrecer una explicación más exhaustiva de la presencia como fenómeno psicológico mediante la introducción de conceptos como presencia social (la medida en que otras entidades se presentan en los AV o “están ahí” desde el punto de vista del usuario) y autopresencia (la sensación de que el usuario puede percibirse a sí mismo como parte de la VE). En el 2004, Baren e Ijsselsteijn [65] presentaron una lista completa de los métodos de medición existentes, aunque hoy en día quedaron ya desactualizados.

Varios estudios han intentado medir la presencia en un entorno de laboratorio y en la literatura se pueden distinguir cuatro métodos principales (como ya lo señalaron Hein et al. [66]): cuestionarios, medidas fisiológicas, análisis del comportamiento del usuario y entrevistas. Los cuestionarios y las medidas fisiológicas son dos tipologías de medidas para la evaluación de la presencia que a menudo se utilizan juntas. Sin embargo, varios factores (por ejemplo, los numerosos cuestionarios utilizados para medir la presencia y la falta de un estándar para el análisis de datos fisiológicos) han dificultado la comparación entre diferentes estudios. En este capítulo, describimos el análisis de la literatura en cuanto a la medición de presencia e inmersión, en función de la clasificación presentada por Hein et al. Además, en la sección 3.6 presentamos un tipo adicional de mediciones denominado *Medidas Comparativas* en las que el participante indica el grado de presencia percibido al comparar el AV con alguna variable del mundo real.

### 3.2. CUESTIONARIOS

Las escalas de evaluación subjetiva se han utilizado extensivamente para evaluar la presencia en ambientes virtuales. Los cuestionarios son el método más utilizado para la investigación de presencia (ver Hein et al. [66]). Un diseño estándar empleado en los estudios que utilizan cuestionarios es hacer que el participante se involucre pasiva o activamente en un AV y luego pedirle al participante que responda una encuesta que evalúe su experiencia. Por lo general, las preguntas consisten en escalas ordinales (por ejemplo, [32, 67]). Algunos cuestionarios de presencia comparten similitudes: por ejemplo, utilizan una escala *Likert* que va del 1 al 7, como el cuestionario de presencia (PQ) [68], el cuestionario de presencia de Igroup (IPQ) [69], y el Cuestionario Slater-Usch-Steed (SUS) [70]. Como la recolección de información durante la exposición puede influenciar negativamente la experiencia de presencia, se recomienda realizar los cuestionarios inmediatamente luego de la exposición ([71]).

Los cuestionarios presentan varias ventajas en comparación con otros métodos para investigar la presencia. Son baratos, fáciles de administrar y son aplicables independientemente del AV utilizado. Los cuestionarios no requieren una preparación previa prolongada, como lo demandan otras metodologías, y no requieren instrumentos científicos especiales (como las medidas fisiológicas). Por otro lado, el número de cuestionarios que miden la presencia, la variedad de conceptos explorados por estos cuestionarios y la falta generalizada de una definición estándar de presencia como concepto psicológico pueden representar un problema en el uso de esta metodología. Además, los resultados de los estudios que utilizan diferentes cuestionarios pueden ser difíciles de comparar [72]. Finalmente, como todo cuestionario, siempre serán susceptibles al sesgo de la respuesta [73].

Witmer, Jerome and Singer [68] desarrollaron y validaron el *Presence Questionnaire* (PQ) que incluye 32 *items* medidos con una escala *Likert* de 7 valores y permite medir el nivel de presencia luego de utilizar un sistema de RV. Este cuestionario ha ganado un alto nivel de aceptación y ha sido utilizado en una gran cantidad de estudios ([74, 75]). El PQ tiene cuatro sub-escalas: a) involucramiento, b) fidelidad sensorial, c) adaptación/inmersión, y d) calidad de la interfaz; y es el cuestionario más utilizado para medir presencia. En [69] ya señalaron unos años después de su creación que el cuestionario PQ se usaba ampliamente en una variedad de áreas diferentes, incluidos estudios sobre presencia general, presencia social, simulaciones, narración de historias y juegos.

Otra escala reconocida es el *ITC-Sense of Presence Inventory* (ITC-SOPI). Este cuestionario se enfoca en la experiencia del usuario en el medio, sin considerar los parámetros objetivos del sistema ([67]). Ha sido traducido a varios idiomas y utilizando en estudios muy diversos.

Varios estudios prefirieron utilizar cuestionarios más simples (por ejemplo, Hoffman et al. [76]) y Bouchard et al. [77]), constituidos por un solo ítem que cuestionaba el sentido general de presencia. Algunos estudios utilizaron una combinación de cuestionarios basándose en otros cuestionarios como el PQ y el SUS [78, 79]. Lee et al. [80] emplearon un cuestionario específico (además del PQ) que tenía como objetivo evaluar la presencia social (*Social Presence Questionnaire* [81]). Sin embargo, los resultados de los dos cuestionarios no se compararon directamente.

Existen otros cuestionarios en la literatura que han llamado la atención respecto a que analizan características diferentes en relación a la presencia. Por ejemplo, el Cuestionario E2I se ha adoptado en estudios que enfatizan el papel que tiene el disfrute en la presencia [82]. Siguiendo el mismo razonamiento, Frommel et al. [83] exploraron el disfrute como una parte vital del AV, incluidos los elementos de disfrute en una versión modificada del cuestionario PQ. Asimismo, existen otros estudios que consideraron medidas más específicas de lo que se conoce como “presencia espacial” (MEC-SPQ; [84]). La “presencia espacial” se definió específicamente como la sensación de estar presente dentro del cuerpo físico, así como sentirse capaz de interactuar en la RV [27]. Sohre et al. [85] también utilizaron un cuestionario personalizado para evaluar la atención (y, específicamente, la presencia espacial). Witmer y Singer publicaron el *Immersive Tendencies Questionnaire (ITQ)* [32], que es una actualización del PQ. El ITQ se ha utilizado en combinación con el PQ en varios estudios [32, 79].

Varios cuestionarios contienen sub-escalas respecto a la participación y compromiso. Por ejemplo, el *Game Engagement Questionnaire (GEQ)* de Brockmeyer et al. está diseñado específicamente para medir el nivel de participación/compromiso en videojuegos [55], aunque también ha sido utilizado en AVs [86]. También existen cuestionarios relacionados al transporte y transportabilidad análogos a los cuestionarios de presencia [59, 87].

La mayoría de los cuestionarios presentados tiene como objetivo explorar el concepto de “presencia física” (PQ, SUS y IPQ); sin embargo, la forma en que se describe la presencia física varía. El cuestionario PQ enfatiza las características de “participación” e “inmersión” con referencia al entorno simulado, mientras que el SUS y el IPQ se centran en la sensación de “estar allí” (es decir, la sensación de que la RV experimentada puede ser parte de la realidad). El cuestionario MEC-SPQ analiza lo que se denomina “presencia espacial”, específicamente en el marco del Modelo de Presencia Espacial de Dos Niveles MEC [88]. Este último modelo teoriza una clara separación entre los conceptos de presencia, implicación y atención, y factores como implicación, auto-localización y posibilidad de realizar una acción real en el AV.

Otros cuestionarios son menos claros sobre el modelo teórico que siguen. Por ejemplo, el *Immersive Experience Questionnaire (IEQ)* no analiza directamente un modelo en su formulación teórica, sino que elabora de manera más general las teorías de la participación cognitiva, la absorción y el flujo [89].

En contraste, el cuestionario MPS establece claramente su punto de partida teórico como la teoría de Lee [27, 90], así como los tipos de presencia evaluados en su cuestionario (presencia física, social y autopresencia). El desarrollo del MPS es un esfuerzo reciente para construir una escala unitaria que permita medir varios aspectos de la presencia [90]. Este esfuerzo representa un paso hacia una medida de presencia estándar y ampliamente aceptada para varios tipos de AVs. La escala intenta evaluar los tres sentidos principales de presencia en entornos virtuales [27]: presencia física (como varias escalas informadas anteriormente, incluidas PQ y SUS), presencia social y autopresencia. Otra gran ventaja de la escala MPS es su claro punto de vista teórico [27], que ha sido validado por múltiples experimentos de acuerdo con pruebas realizadas utilizando teorías de prueba modernas (es decir, análisis factorial confirmatorio, como se describe en Brown [91]) y la teoría del ítem de la respuesta (como se describe en Embretson y Reise [92]).

### 3.3. MEDIDAS FISIOLÓGICAS

Ha habido numerosos intentos de utilizar medidas fisiológicas humanas como índices de presencia (por ejemplo, [93, 94]) y se han identificado varios tipos diferentes de medidas.

Algunas de las mediciones fisiológicas están relacionadas con la información del cerebro. Entre ellas, la electroencefalografía (EEG) es una de las más utilizadas en el campo de las ciencias cognitivas y ha encontrado un uso extenso en relación con el sentido de presencia (por ejemplo, en [95]).

Por otro lado, la presencia se ha investigado a menudo utilizando la técnica basada en EEG de potenciales relacionados con eventos (ERP; ver [72] y [95]). Los ERP representan la actividad cerebral generada como respuesta a un evento (una estimulación que puede ser, por ejemplo, visual o auditiva). Esta actividad generalmente se promedia en muchas muestras (ensayos), con el fin de reducir el ruido de la señal y obtener una estimación confiable de la actividad cerebral relacionada con la respuesta a la estimulación [96]. Generalmente, las medidas fisiológicas relacionadas con el cerebro requieren elementos de medición más costosos y menos adaptables en comparación con las medidas fisiológicas no cerebrales.

Otras mediciones fisiológicas están relacionadas con otras partes del cuerpo. Varios estudios han explorado el uso de la respuesta galvánica de la piel (GSR), también conocida como actividad electrodérmica (EDA) o conductancia de la piel, que mide cómo las variaciones eléctricas en la piel desencadenan el sudor, un fenómeno que permite la medición de la conductancia de la piel. El uso de esta técnica está bien documentado en la literatura sobre las emociones y la cognición humanas [97-99]. La conductancia de la piel se asocia, por ejemplo, con el estrés, la emoción, el compromiso y la frustración y la excitación, entre otros factores (ver, por ejemplo, [100]).

También se ha investigado la frecuencia cardíaca (FC) como posible correlación con la presencia. Los métodos más utilizados en la investigación psicofisiológica son la frecuencia cardíaca (FC) y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). La frecuencia cardíaca es el cálculo/estimación de los latidos cardíacos promedio por período de tiempo (generalmente 1 minuto). La VFC, en cambio, es la medida (en milisegundos) de los cambios (es decir, la variabilidad) entre latidos cardíacos sucesivos. Este período de tiempo se denomina intervalo R-R (intervalo entre latidos; [101]).

La metodología experimental generalmente preferida para los estudios de FC es la electrocardiografía (ECG o EKG). El ECG registra cambios en el potencial eléctrico asociados con los latidos del corazón [102]. Debido a su asequibilidad en comparación con el ECG, también se utiliza la FP (fotopletismografía) para medir el ritmo cardíaco. La FP puede detectar cambios en el volumen de sangre en el tejido microvascular y, a menudo, se mide con un oxímetro de pulso, que ilumina la piel y puede detectar cambios en la absorción de luz y, con eso, mide indirectamente el ritmo cardíaco.

Los sensores de frecuencia cardíaca son cada vez más baratos, especialmente los sensores FP. La FC generalmente se ve menos afectada por el movimiento que el EEG y la conductancia de la piel. Por otro lado, la FC ofrece menos posibilidades de análisis en comparación con el ECG, proporcionando solo el número de latidos por tiempo, pero sin proporcionar información sobre los componentes de los latidos. Sin embargo, el ECG es más caro, más difícil de operar y más invasivo que la FC.

La temperatura de la piel (TP) es una metodología experimental bastante simple en la que un sensor registra la temperatura del participante. Aunque el uso de la temperatura de la piel en la investigación psicológica se remonta a muchos años (ver [103]) y ha atraído la atención en la investigación de ciencias cognitivas debido a su simplicidad de uso [104], este método no ha sido utilizado en tantas aplicaciones como las otras metodologías mencionadas anteriormente.

La electromiografía (EMG) es una técnica para registrar la actividad eléctrica producida por los músculos esqueléticos. Su configuración es fácil y económica. Sin embargo, encuentra una aplicación limitada dentro del campo de la psicología cognitiva. Dado que la actividad muscular del sujeto está estrechamente relacionada con la señal EMG, se ha utilizado ampliamente en la medicina clínica y deportiva [105]. Sin embargo, debido a su conexión con la conducta del sujeto (movimientos musculares), en general se ha utilizado menos para estudiar fenómenos cognitivos (con la exclusión de la técnica bastante utilizada de la electromiografía facial; ver [106]). Su sólida conexión con las respuestas del comportamiento humano hace que esta técnica sea difícil de usar en muchos contextos de realidad virtual.

#### 3.4. MEDIDAS DE COMPORTAMIENTO

Un tercer enfoque para medir la presencia se relaciona con el comportamiento del participante. Se asume un mayor nivel de presencia cuando los participantes en un AV se comportan como si estuvieran en un entorno real. Algunos ejemplos de este fenómeno incluyen comportamientos de los usuarios relacionados con señales multisensoriales en conflicto que emanan de entornos tanto reales como simulados [107], balanceo postural [108] y respuestas a estímulos simulados [77].

Por lo general, las medidas de comportamiento requieren la introducción de funciones o tareas en el entorno para provocar respuestas de comportamiento. Para que el enfoque de comportamiento sea aplicable, el AV debe presentar características que se activen de forma voluntaria (como por ejemplo presionar un botón, como en el caso de la evaluación del desempeño; ver [109]), o respuestas involuntarias (como por ejemplo el movimiento en reacción a un objeto que se acerca; ver [110]). Sin embargo, estas tareas o eventos adicionales pueden ser perjudiciales para la medida de presencia ya que pueden no ser relevantes para el AV, pueden interrumpir la sensación de inmersión o pueden interactuar con el AV de formas incontroladas.

### 3.5. ENTREVISTAS

Hein et al. [66], en su revisión, informaron que solo se encontró un estudio que hizo uso de entrevistas sin usar un cuestionario. Sin embargo, incluso en ese caso, los factores de presencia de la entrevista compartían similitudes con los ítems típicos del Cuestionario de Presencia (PQ [32]). Por este motivo, la mayoría de los experimentos que analizan los efectos en la presencia, suelen complementar su estudio con entrevistas informales a los participantes, especialmente para obtener otro tipo de información sobre la experiencia que no se relacione directamente con la presencia, como lo es la comodidad de los usuarios, saber si comprendieron bien la tarea que debían realizar, analizar síntomas de cybersickness, etc.

### 3.6. MEDIDAS COMPARATIVAS

Se podría sugerir que el participante compare el ambiente virtual con el real para poder medir así la presencia. Debido a que es muy poco probable que alguien confunda el mundo real con el virtual, Schloerb ([111]) sugiere una degradación de la escena del mundo real para poder confundir el ambiente real y el virtual. Sin embargo, esto serviría para medir la habilidad de discriminación entre las dos imágenes, en lugar de evaluar la presencia ([18]).

Con la tecnología actual sería difícil que un participante confunda los dos mundos, y el nivel de degradación necesario podría ser utilizado para medir la presencia. Además, naturalmente los participantes son más sensibles a la degradación de ciertos estímulos (por ejemplo el campo de visión) con respecto a otros (por ejemplo el sonido). También sería muy complicado deteriorar aspectos de la escena real para que se asemeje a la escena virtual.

Una variable de este método es la de “romper la presencia” ([112]). Esta técnica se basa en la idea de que un participante que experimenta cualquier estímulo externo, lo creará proveniente ya sea del mundo virtual o del mundo real. Slater y Steed sugirieron que el participante cambia entre las dos interpretaciones a lo largo de la experiencia, y que una medida de presencia puede ser obtenida si se puede estimar el tiempo en que el participante interpreta un estímulo como proveniente del mundo virtual. Ellos proponen hacer esta estimación observando los “cortes”, es decir, aquellos momentos donde los participantes se dan cuenta que están en el mundo real. La mayor limitación de esta técnica es su simpleza: no tiene en cuenta toda la complejidad de la experiencia mediada. No tiene en cuenta, por ejemplo, las percepciones mixtas en las que los participantes simultáneamente mantienen y responden tanto a interpretaciones reales como virtuales, como hacen notar Spagnolli y Gamberini ([113, 114]).

#### 3.6.1. COMPARACIÓN DE MAGNITUD

Para poder evaluar presencia, se le puede pedir al participante comparar magnitudes en diferentes modos. La presión y la luminosidad se suelen utilizar como ejemplo. En este caso, el participante presiona un botón con la fuerza que cree que corresponde al nivel de luminosidad de una luz. Otra posibilidad es sonido y presencia; el participante eleva la amplitud de un sonido al nivel de presencia que siente en un ambiente virtual. Aunque este método tiene muchas dificultades metodológicas, se considera como una forma adecuada y una medición cualitativa de presencia ([115]). Una posible crítica de esta medición es que el participante va a estar desviando su atención entre la tarea virtual y la medición de presencia.

### 3.7. CONCLUSIONES

La presencia es la sensación de estar en el lugar que se presenta en un AV [116]. Se caracteriza por la ilusión de que los eventos virtuales son reales y es fundamental determinar el grado de presencia en esos entornos simulados [117]. La “ilusión” o “sensación” de presencia es muy subjetiva y no existe un método desarrollado y generalmente aceptado para su evaluación.

Los investigadores han utilizado medios marcadamente diferentes para medir el fenómeno, como cuestionarios muy diferentes y una variedad de respuestas fisiológicas. Sin embargo, respecto a los cuestionarios, muchas veces las preguntas no siempre son claras o sencillas de entender para un participante que no tiene conocimientos del tema. Esto se evidencia, por ejemplo, en las preguntas “¿En qué se parece su recuerdo del escenario a estar en lugares reales?” (SUS; [70]) o “¿Qué tan convincente fue tu sentido de los objetos moviéndose por el espacio?” (PQ; [32]).

Por el otro lado, en el estado actual de la investigación, ninguna medida fisiológica ha recopilado evidencia para ser considerada “suficientemente buena” como para utilizarse de manera confiable por sí sola, es decir, sin utilizar además mediciones subjetivas como cuestionarios o entrevistas. Si bien las medidas fisiológicas representan índices más objetivos del nivel de presencia experimentado por un participante, no hay consenso sobre qué medida es la mejor para usar. Además, muchas de estas medidas tienen limitaciones metodológicas (por ejemplo, requieren que el participante esté quieto, requieren un largo tiempo de preparación y son costosas) y, por lo tanto, no se pueden aplicar en todas las situaciones y en todos los AVs.

Una combinación de diferentes tipos de medidas (como por ejemplo cuestionarios, de comportamiento y fisiológicas) puede ser, en el estado actual, el mejor enfoque para evaluar adecuadamente la sensación de presencia en un AV.

# 4

## Modelos de Presencia e Inmersión

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Hasta el momento hemos presentado varias definiciones de presencia y de inmersión y también nos hemos referimos a la medición de la presencia en AVs, como así también a qué tan real o plausible se siente la experiencia en comparación con el mundo real.

La presencia constituye un elemento de diseño creativo esencial en todo sistema de RV. En la práctica, los diseñadores de un sistema de RV pueden tener como objetivo de diseño un tipo específico de presencia y diseñar para una dimensión específica de presencia o pueden querer contar con patrones que consideren dimensiones específicas de presencia como parte de la experiencia del usuario. Estos diseñadores también pueden considerar de suma importancia comparar el grado de presencia e inmersión de diversos sistemas. No solo es importante analizar cómo medir la presencia y la inmersión, sino también cómo éstas se componen.

En este capítulo se agrupan los trabajos relacionados que presentan las componentes que conforman la presencia y la inmersión. Algunos componentes son puramente teóricos y algunos otros están directamente basados en cuestionarios o factores que derivan de cuestionarios.

Generalmente, los componentes que integran la presencia suelen ser más subjetivos o abstractos que aquéllos que integran la inmersión. Esto se debe en parte a que, de acuerdo a las definiciones de presencia, ésta es una medida subjetiva que dependerá en gran medida de cada usuario particular. Por otro lado, la definición de inmersión se considera como una medida objetiva que depende de las características del sistema de RV y del AV. Sin embargo, existen estudios que definen a la presencia como una función de otras medidas subjetivas relacionadas. A continuación se presentan dichos modelos y métricas.

## 4.2. MODELOS DE PRESENCIA

En una de las primeras definiciones relacionadas a presencia y RV, Akin et al. definen telepresencia como la condición que ocurre cuando “en el lugar de trabajo, los manipuladores permiten que el operador realice funciones humanas normales. En la estación de control, el operador recibe la suficiente cantidad y calidad de realimentación sensorial para generar la sensación de presencia en el lugar de trabajo” [23]. Podríamos pensar entonces que estos autores diferencian dos factores de telepresencia: la habilidad de actuar en un ambiente remoto (relacionado a Psi) y la fidelidad sensorial entregada al usuario (relacionado a inmersión). Es importante notar que esta definición se refiere a telepresencia y no a presencia.

Heeter propone tres dimensiones de presencia: presencia personal subjetiva (la sensación de estar en un AV), presencia social (la sensación de que otros seres existen en el mundo y reaccionan al usuario) y presencia ambiental (la sensación de que el ambiente reconoce y reacciona al usuario) [118]. En esta definición, Heeter utiliza la palabra *presencia* como una medida general de realismo o de qué tan bueno es un AV. La presencia personal subjetiva se asemeja a la definición tradicional de presencia de “estar ahí”, mientras que la presencia social se asemeja a lo que vimos como Ilusión de Presencia Social, y presencia ambiental puede considerarse como un componente de la Ilusión de Plausibilidad antes vista.

Sheridan propone tres factores de presencia: el grado de información sensorial, control de la relación entre los sensores y el ambiente y la habilidad de modificar el ambiente físico [119]. Sheridan indica que la presencia suele depender de la tarea en cuestión y que las características de la experiencia deberían afectar medidas dependientes de la experiencia de usuario, como la presencia, la eficiencia de entrenamiento y el desempeño de la tarea, entre otros. En este caso, el grado de información sensorial está relacionado con el concepto de inmersión. Cuando autores como Sheridan sugieren que la presencia depende de la tarea particular que se está realizando, esto se encuentra relacionado al concepto de Psi, es decir, que el AV se comporte como uno esperaría que lo hiciera.

Held y Durlach especulan sobre el valor de la telepresencia, así como también sobre sus factores causales potenciales [120]. Sugieren que la telepresencia es más deseable en aquellas aplicaciones en las que la tarea sea de alto alcance, compleja e incierta, porque nuestro mejor sistema de propósito general somos justamente nosotros. Dichos autores también identifican algunos factores que contribuyen a la telepresencia, como factores sensoriales (resolución, campo de visión, consistencia de la información entre las modalidades, y displays), factores motores (soporte para movimiento de órganos sensoriales, alta correlación entre realimentación cinestésica y acciones sensadas por el ambiente remoto), identificación con el robot (similitud visual), familiaridad con el sistema, y la representación cognitiva de las interacciones del operador con el mundo.

Los conceptos de *llegada* y *salida* fueron identificados como dos factores de presencia en el cuestionario creado por Kim y Biocca [121]. La *llegada* es la sensación de estar ahí en el ambiente mediado (PI), y la *salida* es la sensación de no estar en el ambiente real. La presencia entonces surge de la combinación de ambas.

Draper et al. presentaron un modelo de recursos atencionales para telepresencia [122]. Este modelo indica que la telepresencia se incrementa en función de la suma de recursos atencionales dedicados a procesar estímulos del ambiente mediado y de recursos atencionales dedicados a superar distractores.

Durante el desarrollo de su famoso cuestionario de presencia, Witmer y Singer propusieron cuatro categorías de factores que afectan a la presencia: Control, Sensorial, Distracción y Realismo [32]. Sugieren que dichos factores afectan la inmersión psicológica (otra forma de decir presencia). Los factores de control incluyen la previsibilidad, la interactividad del ambiente y los controles de entrada. Los factores sensoriales incluyen la riqueza del ambiente, la cantidad y fidelidad de modalidades sensoriales y la consistencia de los estímulos multimodales. Los factores de distracción incluyen aislamiento del ambiente físico y sensación de la interfaz, y los factores de realismo se refieren al grado en el que la experiencia es significativa y coherente con las expectativas del mundo real. Cada pregunta de su cuestionario apunta a algún aspecto de alguno de dichos factores.

Bystrom et al. [123] propusieron el modelo de interacción en AVs de inmersión, presencia y desempeño. Los autores adoptan la definición de inmersión de Slater y la presencia se usa en el sentido de “estar ahí”. En resumen, este modelo afirma que la fidelidad sensorial (que resulta de un sistema suficientemente inmersivo) causa que un usuario dirija sus recursos atencionales al AV y que esta dirección de recursos atencionales permite que el usuario experimente presencia en el AV y realice la tarea dada. Además, también discute sobre la existencia de un ciclo de realimentación: más atención causa más presencia y más compromiso en la realización de las tareas, y el incremento de compromiso en las tareas causa que el usuario dirija más recursos atencionales. Esta idea está apoyada en trabajos más recientes (por ejemplo, en [25]). El modelo de Bystrom se basa en dos modelos de presencia propuestos por Slater et al. [109, 124] y por Barfield et al. [30, 125]. El modelo de Slater describe a la presencia como determinada no solo por aspectos de displays sino que también mediada por los tipos de información sensorial requeridos para realizar la tarea en cuestión y las diferencias individuales respecto a la preferencia de dicha información. El modelo de Barfield describe la presencia como dependiente del grado en el cual las transformaciones de los objetos en el AV son similares a las transformaciones de los objetos en el mundo real.

Schubert et al. [126] presentaron los resultados de análisis de factores en un experimento en el cual 246 participantes respondieron una encuesta de 75 elementos con preguntas tomadas de Carlin et al. [127], Ellis et al. [128], Slater et al. [117], Towell et al. [129], Witmer y Singer [32], Regenbrecht et al. [130] y algunas preguntas propias. Los autores encontraron 8 factores que en orden decreciente de importancia son presencia espacial, calidad de inmersión, participación, drama, sensación de la interfaz, exploración del AV, previsibilidad e interacción, y realismo. En un análisis de factores de segundo orden, el primer factor agrupó presencia espacial, calidad de inmersión, participación, drama y realismo; y el segundo factor agrupó sensación de la interfaz, exploración y previsibilidad, e interacción. En un análisis de factores de tercer orden, el primer factor agrupó presencia espacial, participación y realismo, el segundo factor agrupó sensación de la interfase, previsibilidad e interacción, y exploración, y el tercer factor agrupó drama y calidad de la inmersión [69, 126].

Ijsselsteijn et al. [18] revisaron la literatura sobre presencia para concluir en cuatro factores que contribuyen a la presencia y a la forma de medirla: el grado y la fidelidad de la información sensorial, la unión entre los sensores y los displays, los factores de contenido (un factor muy extenso que cubre la mayoría de aquello que es parte de un escenario virtual) y las características del usuario.

Lombard et al. [48] proponen una métrica de presencia basándose en su modelo teórico y en sus componentes. En la literatura, ellos identifican seis “dimensiones” de presencia: presencia como riqueza social, presencia como realismo (tanto social como perceptiva), presencia como transportación, presencia como inmersión, presencia como un actor social en un medio y presencia en donde el medio es el actor social. Dichos autores afirman que el elemento en común entre estos tipos de presencia es la ilusión perceptiva de no-mediación.

Sas y O’Hare [35] presentaron una “ecuación de presencia” en la que el 45 % de la presencia puede predecirse como:

$$0,37 \times \text{Disposición de suspender la no-creencia} + 0,29 \times \text{Imaginación Creativa / Absorción} \quad (4.1)$$

Luego presentaron una ecuación de presencia más general:

$$\begin{aligned} \text{Presencia} = & a \times (\text{Factores cognitivos generales}) \\ & + b \times (\text{Factores cognitivos específicos a la tarea}) \quad (4.2) \\ & + c \times (\text{Factores tecnológicos}) + d \times (\text{Contenido mediático}) \end{aligned}$$

Es importante notar que los factores cognitivos son el único término que depende completamente del participante, en tanto que los factores tecnológicos y el contenido mediático dependen completamente del AV específico, y los factores cognitivos específicos a la tarea dependen parcialmente del AV específico.

Witmer y Singer [39] revisaron su cuestionario de presencia con un análisis de factores. Identificaron cuatro factores: participación, fidelidad sensorial, adaptación/inmersión y calidad de la interfaz.

Chertoff et al. [131] presentaron un cuestionario desarrollado para medir “experiencias virtuales holísticas”. El desarrollo de este cuestionario se guió por cinco dimensiones de diseño experimental: afectivo (emoción), cognitivo (compromiso), sensorial (inmersión), activo (conexión personal) y relacional (social).

Kent Bye [132] propuso una teoría de presencia con una metáfora inspirada por los cuatro elementos de la filosofía natural: tierra (presencia encarnada), fuego (presencia activa), aire (presencia social y mental) y agua (presencia emocional).

En un trabajo reciente, Skarbez et al. [25] realizaron un análisis de los distintos modelos existentes y construyeron el suyo propio. Este modelo puede verse en la Figura 4.1 y se basa en la definición de presencia como la realidad percibida de una experiencia mediada o virtual. Su modelo es similar al de Heeter [118], con la presencia siendo una función de la Ilusión de Lugar, la Ilusión de Plausibilidad y la Ilusión de Presencia Social. Específicamente, ellos sugieren que la presencia surge de la inmersión del sistema, la coherencia del escenario, más allá de que la experiencia virtual ofrezca compañía al usuario, y las características individuales del usuario.

#### 4.2.1. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Resulta interesante notar que la mayoría de los modelos mencionados son muy similares entre sí. La concepción de Akin et al. [23] de telepresencia como la habilidad de actuar en un ambiente remoto sumada a la habilidad de mostrar información sensorial en el ambiente local es muy similar a la concepción de inmersión de Slater que se compone de acciones válidas efectivas y sensoriales [124]. Una acción sensorial válida es cualquier acción que un usuario puede realizar que cambie su percepción del ambiente virtual; una acción efectiva válida es una acción que un usuario realiza que cambia el estado del AV mismo. Dichos autores no consideran coherencia ya que explícitamente diferencian los ambientes virtuales de los reales.

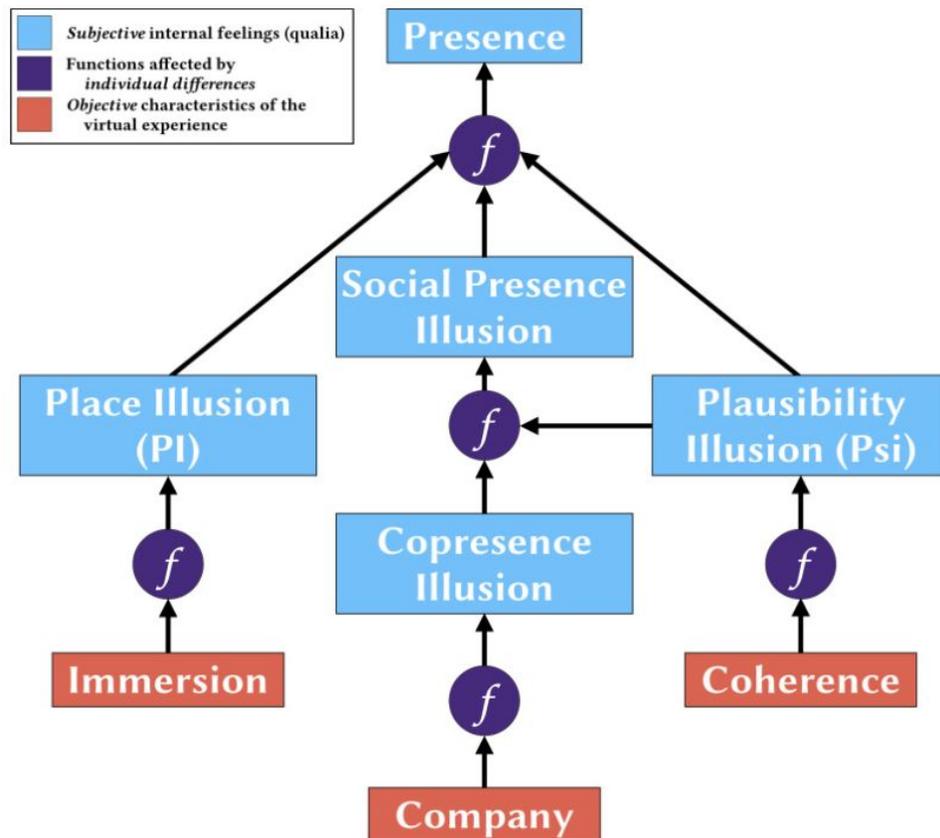


Figura 4.1: Modelo de Presencia de Skarbez et al. [25].

La presencia personal subjetiva de Heeter [118] se corresponde directamente con la Ilusión de Lugar, mientras que la presencia social es la Ilusión de Presencia Social. La presencia ambiental es similar a la Ilusión de Plausibilidad.

La concepción de presencia de Witmer y Singer [39] surge de factores de control, sensoriales, distractores y de realismo, que pueden reafirmarse como inmersión (control y sensorial) más coherencia (distracción y realismo).

El trabajo de Skarbez et al. [25] es uno de los análisis más recientes y un buen trabajo en cuanto a unificar aquellos conceptos de presencia e inmersión más populares en el área. En el modelo que presentan, la presencia está integrada por la PI, la Ilusión de Presencia Social y la Psi. Al incorporar la presencia social en su modelo, se sugiere que un AV con otros personajes o personas que nos hagan sentir en compañía de otros, aumenta la sensación total de presencia. La presencia social, así como también la Psi y la coherencia del escenario, son medidas muy subjetivas que requieren de distintos tipos de análisis para llegar a un consenso. Por este motivo, dichas medidas no serán analizadas durante esta tesis. Sin embargo, la PI, o en otras palabras la “sensación de estar ahí dentro del AV”, es el componente de presencia que depende directamente de la inmersión, es decir, de los distintos niveles de información sensorial que provee el sistema de RV y el AV.

Como se mencionó anteriormente, la presencia tiene una componente subjetiva que depende de cada usuario particular. Esto es, distintos usuarios que utilicen el mismo sistema de RV pueden experimentar distintos niveles de presencia. Sin embargo, esto no es así con la inmersión ya que sólo depende de las características del sistema de RV. Por este motivo en esta tesis seguiremos este modelo y nos centraremos en hallar aquellos componentes que influyen en el grado total de inmersión, obteniendo un modelo o una métrica que nos permita calcular dicho grado de inmersión. A continuación se detallan aquellos trabajos relacionados que buscan obtener un modelo o métrica de inmersión en función de las características de *hardware* y de *software*.

### 4.3. MODELOS DE INMERSIÓN

La literatura presenta una gran cantidad de trabajos en los que se analiza qué variables de *hardware* o de *software* influyen en la inmersión (o en la componente de presencia relacionada con la inmersión); sin embargo, la mayoría de éstos no presenta resultados concretos sobre el nivel de incidencia de dichas variables. En esta sección se detallan los trabajos más relevantes en los que los experimentos realizados presentan una correlación entre las variables analizadas y la presencia. Cabe aclarar que, aunque la mayoría de estos trabajos se refieran a la presencia, en realidad se están refiriendo al concepto que en esta tesis definimos como inmersión.

Una de las metodologías existentes utilizadas para hallar una medición representativa de la presencia es la propuesta por Snow en 1996 ([133]). Este trabajo presenta experimentos que proveen una medida de la presencia percibida en un AV, explorando los efectos de una serie de parámetros ambientales y construyendo modelos empíricos de estos efectos que relacionan la presencia percibida con la performance de usuario.

En ese trabajo se manipularon 11 variables independientes en una serie de tres experimentos. Dichas variables fueron la tasa de refresco, la resolución de pantalla, el campo de visión, el sonido, las texturas, el *tracking* de la cabeza, la estereopsis, el riesgo personal virtual, la cantidad de interacciones disponibles, la presencia de un segundo usuario y el detalle ambiental.

Los resultados obtenidos por Snow et al. ([133]) sugieren que el campo de visión (148 %), el sonido (83 %) y el *tracking* de la cabeza (61 %) fueron los factores que más influenciaron la presencia. La resolución de pantalla (23 %), el mapeo de texturas (17 %), la estereopsis (20 %) y la presencia de otro usuario (10 %), también influenciaron la presencia pero muy débilmente. Pequeños efectos fueron producidos por la tasa de refresco (14 %), el detalle ambiental y la cantidad de interacciones posibles. Todo este tipo de factores serán adecuadamente detallados en el capítulo 5. El trabajo de Snow es ampliado con más detalle en [134].

De este trabajo se concluye el siguiente modelo de presencia:

$$\begin{aligned} \textit{PresenciaPercibida} = & 0,52 \times \textit{CampoDeVisión} \\ & + 0,47 \times \textit{Sonido} \\ & + 0,40 \times \textit{TrackingDeLaCabeza} \\ & + 0,15 \times \textit{MapeoDeTexturas} \\ & + 0,15 \times \textit{MinutosTranscurridos} \\ & + 0,13 \times \textit{ResoluciónDePantalla} & (4.3) \\ & + 0,12 \times \textit{Estereopsis} \\ & - 0,08 \times (\textit{MinutosTranscurridos})^2 \\ & + 0,06 \times (\textit{TazaDeRefresco})^2 \\ & + 0,06 \times \textit{Sonido} * \textit{MapeoDeTexturas} \\ & + 0,09 \times \textit{Sonido} * \textit{TrackingDeLaCabeza} \end{aligned}$$

Los resultados indicaron que algunos parámetros afectaron la sensación subjetiva de presencia en el VE. El campo de visión, el sonido y el *tracking* de la cabeza mostraron los efectos más grandes. Se encontró una positiva pero débil relación entre la presencia percibida y la performance de las tareas realizadas.

Vale la pena mencionar que el trabajo de Snow fue realizado hace más de 20 años, cuando la tecnología era muy distinta a la actual, especialmente considerando los dispositivos de RV. Sin embargo, dicho trabajo establece la base para este tipo de análisis.

Balakrishnan y Sundar [135] realizaron experimentos para observar la relación entre la navegación y la presencia percibida. Específicamente testearon 4 variables independientes: el control del movimiento (la cantidad de grados de libertad), las restricciones ambientales (obstáculos virtuales), el posicionamiento (la posición del participante dentro del mundo virtual) y el transporte narrativo (brindarle al participante una historia narrativa en donde situarse). Los participantes navegaban por el mundo virtual mediante el uso de un *joystick*. Testearon todas las combinaciones entre las distintas variables y sus resultados sugieren una relación significativa entre el control del movimiento y la presencia. En cuando a las restricciones ambientales consideraron dos condiciones: los participantes colisionaban con los objetos virtuales o no lo hacían. Aunque su hipótesis suponía que las colisiones con objetos virtuales incrementarían la presencia, los resultados no demostraron resultados significativos. Los autores sugieren que el poder atravesar paredes virtuales no afectó a los participantes de la forma en que se esperaba, por lo que sugieren la realización de futuras pruebas para poder obtener una mejor estimación del efecto de esta variable.

Para lograr el efecto de posicionamiento dentro del mundo virtual, el participante disponía de un mapa virtual que indicaba su posición en todo momento. Esto influyó negativamente en la presencia. Los autores sugieren que esto se debe a que el mapa virtual pudo distraer a los participantes, así como también alejarlos de la realidad. Finalmente, el transporte narrativo también generó un efecto negativo en la presencia percibida. Los autores sugieren que esto puede deberse al hecho de que los participantes ya no navegaban libremente sino que se enfocaban en realizar la tarea pedida.

Gandy et al. ([136]) realizaron experimentos en los que los usuarios debían caminar sobre una tabla sobre un precipicio. Realizaron pruebas con tres niveles de tasa de refresco: 60, 30 y 15 FPS. No encontraron diferencias significativas en cuanto al nivel de presencia percibido entre dichos casos. Esto puede deberse a que el experimento generó mucha presencia para los tres niveles de tasa de refresco o a que la cantidad de participantes fue pequeña (20 participantes en total).

Aymerich et al. [137] realizaron un juego en el que los jugadores podían moverse utilizando un *joystick* o mediante seguimiento del cuerpo. El experimento medía la sensación emocional y la presencia. No encontraron diferencias significativas entre utilizar un *joystick* o utilizar el seguimiento del cuerpo, en cuanto a la sensación de presencia percibida.

Bystrom y Barfield [138] realizaron un estudio para analizar si la presencia percibida se veía afectada por la presencia de otros usuarios, el nivel de control del movimiento y el *tracking* de la cabeza. Los resultados indicaron que la presencia de otros usuarios no incrementó la presencia pero mejoró la calidad de la experiencia virtual. El nivel de control del movimiento tampoco afectó la sensación de presencia, pero los participantes prefirieron controlar tanto el movimiento como la navegación. Finalmente, el *tracking* de la cabeza tampoco afectó la sensación de presencia, pero contribuyó al realismo espacial.

Hendrix et al. [30] realizaron experimentos para evaluar cómo el sonido afecta a la presencia percibida. Sus resultados sugieren que la presencia se ve afectada por el sonido espacial, seguido por el sonido no espacial y finalmente por la ausencia de sonido.

Los experimentos realizados por McGloin et al. [139], Zanbaka et al. [140] y Williams [141] sugieren que el uso de controles más naturales incrementan la sensación de presencia percibida. Un dispositivo con forma de raqueta de tenis, por ejemplo, incrementa la presencia en un juego de tenis. El principal inconveniente de esto es que el dispositivo estará fuertemente relacionado con la tarea particular que se esté realizando. También es importante notar que si el usuario tiene la visión obstruida por el visor de RV, no podrá ver el control en su mano. Por este motivo, el aspecto de estos controles no es tan importante aunque sí lo es la sensación háptica que generen en el usuario.

Nordahl et al. [142] sugieren que el sonido de los pasos incrementa la sensación de presencia. Regenbrecht et al. [143] sugieren que la presencia de otros personajes virtuales incrementa el nivel de presencia percibido, especialmente si se puede interactuar con dichos personajes y si presentan animaciones adecuadas.

El experimento realizado por Welch et al. [144] sugiere que el realismo pictórico genera impacto en la presencia percibida pero en muy poca medida. Por el otro lado, también sugiere que el retraso (*lag, delay*) impacta negativamente en la presencia percibida. Los resultados no son claros en cuanto al nivel de interactividad y al tiempo de exposición.

Bracken et al. ([145] demostraron que un campo de visión mayor incrementa el nivel de presencia percibida. Además, sugieren que el uso de auriculares genera mayor presencia que el uso de parlantes externos. da Silva Hounsell et al. [146] sugieren que la estereopsis influye más en la presencia que el tener un campo de visión más grande. Seay et al. [147] realizaron experimentos para testear la influencia del campo de visión en la presencia. Utilizaron un campo de visión de 180° y 60°. Sus resultados sugieren que cuando mayor es el campo de visión, mayor es la presencia percibida.

Huong Q Dinh et al. [148] realizaron experimentos con varios niveles de fidelidad visual (poco y mucho detalle), estímulos táctiles (aire y calor), sonido ambiental y estímulos olfativos (olor a café). Sus resultados sugieren que cuanto mayor es la cantidad de estímulos sensoriales, mayor es la presencia percibida. Por el contrario, tener una fidelidad visual con mucho detalle no incrementa en ese caso la presencia.

Skalski et al. [149] realizaron un experimento para determinar el impacto que genera la resolución de la pantalla y el sonido en la presencia percibida. Sus resultados sugieren que la diferencia en la imagen no genera un efecto significativo en la presencia, pero sí lo hace el agregado de sonido espacial.

Baños et al. [150] realizaron un experimento para demostrar la influencia de la estereopsis en la presencia y en el humor. Sus resultados difieren de los trabajos previos al decir que la estereopsis no influye en la presencia. Aluden este resultado a que los escenarios virtuales utilizados en los trabajos previos eran neutrales, en cambio aquí utilizaban un escenario virtual pensado para activar emociones de relajación y alegría.

Takatalo et al. [151] realizaron experimentos para probar la influencia de distintos niveles de estereopsis en la presencia. Sus resultados sugieren que la estereopsis no debe utilizarse en todo momento con la mayor intensidad posible. Por otro lado, este efecto mejora en algunas escenas más que en otras.

En Poesch et al. [152], los participantes realizaron un recorrido virtual mediante dos modalidades: solo visuales sin sonido y visuales con sonido espacial. Los resultados del experimento sugieren que el sonido espacial produce una mayor sensación de presencia en los usuarios.

Baños et al. ([153]) testearon si la presencia puede mejorarse en ambientes menos inmersivos mediante el uso de contenido emocional. Dicho estudio compara la sensación de presencia en tres diferentes sistemas inmersivos: un HMD, una pantalla proyectada y un monitor de PC. Generaron dos ambientes virtuales: uno con contenido emocional y el otro no. Sus resultados sugieren que los sistemas que no presentan contenido emotivo dependen mayormente de la inmersión. Un monitor de PC logró casi la misma presencia que un HMD cuando se utilizó contenido emotivo.

Juan y Pérez [154] realizaron un estudio sobre acrofobia (fobia a las alturas) en el que compararon el nivel de ansiedad y de presencia producido por el uso del sistema CAVE y un HMD. Sus resultados sugieren una correlación positiva entre la ansiedad y el nivel de presencia. Además, sugieren que el sistema CAVE genera más presencia que el HMD. Sin embargo, el HMD utilizado poseía poca resolución y campo de visión, lo que puede haber afectado el experimento.

Kim et al. ([155]) realizaron un experimento para testear la presencia producida en un monitor de PC, una HMD y un sistema estilo CAVE. Este último es un sistema de proyección donde el usuario se encuentra dentro de una “habitación” formada por 4 pantallas de proyección. Demostraron que el sistema CAVE genera más presencia que el HMD, que a su vez genera más presencia que el monitor de PC. El problema es que el HMD utilizado tenía un campo de visión muy pequeño (de 40°).

Riva et al. ([156]) analizaron la relación entre presencia y emociones. Sus resultados confirman la eficacia de RV como un medio afectivo: la interacción con ambientes virtuales “ansiosos” o “relajantes” produjeron ansiedad y relajación. Su trabajo también sugiere que la presencia no está influenciada solo por el realismo gráfico del ambiente, la dimensión del display y otras características tecnológicas, sino que también lo está por las características del experimento, como las emocionales.

#### 4.3.1. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Varios de los trabajos mencionados hacen referencia al impacto que tiene el contenido emocional en la sensación de presencia. Por otro lado, varios de otros trabajos muestran diversos efectos en la sensación de presencia (o inmersión) en base a variables de *hardware* o *software*. Aunque varios de dichos trabajos se realizaron hace más de 10 o 20 años, sus resultados no deben subestimarse.

Respecto a aquellas variables que parecen tener un efecto en la inmersión se destaca el campo de visión, los HMDs suelen generar más inmersión que el uso de un monitor, especialmente considerando que los HMDs actuales proveen un campo de visión mucho mayor al de los de hace años. Esto pareciera razonable ya que cuando mayor es el campo de visión, uno se siente más inmerso en el AV debido a que se asemeja más a la forma en que vemos normalmente el mundo. Un campo de visión muy pequeño genera una sensación de visión túnel que se aleja de la realidad y reduce así la inmersión.

Otra de las variables que destaca es el uso del sonido, y en especial, el sonido espacial. La mayoría de los trabajos coinciden en que la inclusión de sonido influye positivamente en la presencia y en la inmersión. Esto es esperable ya que el ser humano utiliza mucho su sentido del oído. El sonido espacial, que permite al usuario detectar la posición de la fuente de sonido, tiene una gran influencia.

La estereopsis, o en otras palabras, la habilidad de poder ver en 3d, también ha demostrado ser otra variable que influye en la sensación de inmersión y de presencia percibidas. También es esperable que el usuario se sienta más inmerso en un AV en donde puede ver en 3d, como lo hace en el mundo real. Sin embargo, esta variable debe estar muy bien calibrada para no generar efectos no deseables como, por ejemplo, *cybersickness*.

Finalmente, el *tracking* es una variable muy estudiada que posibilita que el usuario se sienta inmerso en el mundo real ya que permite que sus movimientos sean correctamente mapeados a movimientos dentro del AV.

#### 4.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentaron distintos modelos tanto de presencia como de inmersión. Los modelos de presencia suelen estar compuestos por componentes primordialmente subjetivos y psicológicos, en comparación con los modelos de inmersión que suelen basarse específicamente en características de *hardware* y *software* del sistema de RV.

Aunque el análisis de presencia es un área de investigación muy interesante, en esta tesis nos enfocaremos en analizar todas aquellas variables que influyan en la inmersión del sistema. Las variables mencionadas en los modelos de este capítulo son algunas de las más relevantes que influyen en la inmersión y son las que esencialmente han sido tenidas en cuenta en la generación de los diversos modelos. Sin embargo, existen muchas variables más. En el siguiente capítulo clasificaremos y detallaremos todas las variables de *hardware* y de *software* que, según la literatura, influyen en la sensación de presencia e inmersión percibidas por el usuario.



# 5

## Variables que Influyen en la Inmersión

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Como mencionamos previamente, es sumamente importante analizar qué variables o elementos específicos contribuyen tanto a la presencia como a la inmersión. La literatura presenta un amplio trabajo relacionado en cuanto a descubrir las variables que pueden contribuir a una mayor sensación de presencia en RV. En general, existen dos categorías de variables para determinar la presencia del usuario: características del usuario y características del medio. Las características del usuario se refieren a características psicológicas y subjetivas que influyen en el grado de presencia percibido. Por el otro lado, las características del medio son las características tecnológicas del sistema.

En esta tesis, nos enfocaremos en las características del medio, ya que son aquellas características que influyen directamente en el concepto de inmersión. De todos modos, mencionaremos brevemente algunas de las características del usuario que se consideran más relevantes. Luego, se describirán todas aquellas variables de *hardware* y de *software* de un sistema de RV que, según la literatura, influyen en la sensación de presencia e inmersión percibidas.

## 5.2. CARACTERÍSTICAS DEL USUARIO

Si bien la tecnología utilizada influye considerablemente en el nivel de inmersión, el usuario individual también juega un rol activo con respecto a su interés y motivación en cuanto a la experiencia virtual presentada [157]. Existen diversas variables psicológicas que impactan en la presencia tales como la concentración, la experiencia previa en RV, la experiencia previa en la tarea requerida, las expectativas en cuanto a la experiencia y la susceptibilidad al *cybersickness*. Cada una de estas variables influyen en el grado en el que el usuario se involucra con cualquier tarea requerida en el ambiente virtual.

Algunos autores reportan que los usuarios necesitan estar dispuestos a “suspender la incredulidad”<sup>1</sup> para participar en un ambiente virtual y experimentar la sensación de presencia. En otras palabras, los usuarios deben permitirse el creer que efectivamente se encuentran dentro del AV y no deben estar constantemente pensando que la experiencia es algo falso. Esta voluntad parece estar relacionada con lo que se conoce como absorción (habilidad de “perderse en la tarea”) y disociación (interrupción de las funciones normalmente integradas de conciencia, memoria, identidad y percepción del ambiente), de acuerdo a lo definido por Murray, Fox y Pettifer [158]. Así, parece existir un compromiso entre el humano y la máquina en la experiencia de presencia, en el que el objetivo de la máquina es engañar los sentidos del humano mientras que dicho humano debe permitirse ser engañado para poder sentirse inmerso en el ambiente virtual.

---

<sup>1</sup>*suspend disbelief* en inglés.

Según Witmer y Singer [32], la involucración (o participación activa) es un estado psicológico que resulta de concentrar la energía y atención en un grupo coherente de estímulos y actividades significativamente relacionados. El nivel de involucración logrado depende del grado de importancia y el significado dado por los usuarios individuales al evento. También está influenciado por el nivel de interés que el usuario es capaz de direccionar hacia el ambiente virtual. La habilidad del participante y la voluntad de concentrarse en la tarea puede incrementar la sensación de presencia ya que requiere que el individuo no solo se concentre en la tarea y en el ambiente virtual sino que también ignore las distracciones externas [32].

Debido al rango de variables que influyen al usuario, una experiencia de RV es fundamentalmente personal. Es una experiencia que se vuelve inexplicablemente atada a los aspectos personales del usuario y a cómo éstos construyen una explicación de su experiencia. Incluso utilizando exactamente la misma tecnología, es improbable que dos personas experimenten idénticos niveles de presencia. Por otro lado, existen características de los sistemas de RV que serán constantes para todos los usuarios. Estas características del medio influyen directamente en la sensación objetiva de inmersión y, por lo tanto, también influirán en la sensación final de presencia.

### 5.3. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO

Las características tecnológicas juegan un rol sumamente importante en la experiencia de presencia. Aunque la investigación sobre las causas de la presencia continúa avanzando, se han identificado una considerable cantidad de variables. La mayoría de los estudios realizados ha tratado de manipular las características del sistema para incrementar la inmersión del usuario en el sistema de RV y, por ende, incrementar la sensación de estar presente en el mundo virtual [159]. Vimos que, entre los temas investigados se encuentran por ejemplo la latencia de respuesta [128], los sistemas de audio [160], la estereopsis [161], el *tracking* de la cabeza [125] y el campo de visión [162], entre muchos otros.

Existe una clara distinción respecto a variables relacionadas al *software* y variables relacionadas al *hardware*. Las variables de *hardware* son todas aquellas relacionadas con el sistema de *hardware* de RV que se va a utilizar. Estas variables están acotadas por el límite tecnológico del sistema y no podrán ser mejoradas a partir del *software*. Algunas de estas variables sí podrían configurarse desde el *software* pero por ejemplo, si una pantalla tiene una resolución determinada y una tasa de refresco máxima, nada se podrá hacer desde el *software* para incrementar dicha resolución o tasa de refresco. Sí se podrán simular resoluciones menores o, por ejemplo, agregar latencia.





















Hoy en día existen muchos visores de RV con precios accesibles y de buena calidad y precisión. Dichos visores suelen venir con sistemas de seguimiento del usuario, permitiendo así lograr experiencias más interactivas y mejorar la inmersión y la presencia.

Entre los visores más populares hoy en día encontramos el Oculus Rift S<sup>2</sup>, un visor que se conecta a la PC, y su versión portátil, el Oculus Quest<sup>3</sup>. Ambos visores poseen distintas características de *hardware*, como por ejemplo el campo de visión, la resolución de la pantalla, el nivel de procesamiento, etc., que permitirán generar una experiencia distinta y por ende, producirán en el usuario distintos niveles de inmersión.

Las variables de *software*, por otro lado, se refieren a todas aquellas características del escenario virtual que pueden manipularse desde el *software* e inciden en la inmersión. Algunos ejemplos incluyen en realismo del escenario 3D, la latencia, el color, etc.

Es importante mencionar que la mayoría de los estudios que han analizado estas variables, se han enfocado en su influencia en la presencia y no específicamente en la inmersión. Sin embargo, como vimos en el capítulo 4, la inmersión es el componente de la presencia que depende directamente de todas aquellas variables del sistema. Por este motivo, durante el presente capítulo, aunque se mencione que dichas variables influyen en la presencia, se debe tener en cuenta que inciden directamente en la componente de inmersión del sistema.

La definición de inmersión también la relaciona con el grado de estimulación sensorial provisto por el sistema de RV. En otras palabras, se generará un mayor grado de inmersión si el sistema de RV provee al usuario una estimulación mayor, para cada uno de los sentidos. En este contexto podemos hablar de “inmersión visual” si tenemos en cuenta solo aquellas variables que se refieren a características de la vista, “inmersión auditiva”, etc. A continuación describimos y detallamos cada una de las variables que se analizan en la literatura, categorizándolas en función al sentido con el que se relacionan (ver tabla 5.1).

---

<sup>2</sup><https://www.oculus.com/rift-s>

<sup>3</sup><https://www.oculus.com/quest/>

### 5.3.1. VARIABLES DE INMERSIÓN VISUAL

En esta sección se detallan todas aquellas variables que se relacionan con el sentido de la vista. Entre ellas se encuentran las variables tanto de *hardware* como de *software* relacionadas con las características de la pantalla y que influyen en lo que el usuario ve. En el capítulo 6 se detallan las variables utilizadas en el experimento de esta tesis, y se incluyen imágenes que comparativas para una mejor comprensión de cada variable.

#### CAMPO DE VISIÓN

El campo de visión es importante ya que un gran campo de visión provee señales de visión más grandes y creíbles. Además, al restringir la visión del mundo real, habrá menos distracciones. En otras palabras, los dispositivos que aíslan al usuario del ambiente físico pueden facilitar la inmersión e incrementar la presencia.

El campo de visión de un sistema de RV se debería asemejar al campo de visión en la vida real. El humano tiene un campo de visión de 180° con los ojos quietos y hasta 270° al rotarlos hacia los lados. La tecnología actual no ha logrado aún representar el campo de visión a la perfección pero existen dispositivos que presentan un campo de visión de 110° (Oculus Rift) y hasta 210° (StarVR<sup>4</sup>). En la figura 5.1 se puede apreciar la diferencia entre dos imágenes vistas con campos de visión muy distintos. Se puede apreciar aquí la pérdida de información al usar un campo de visión pequeño.

Son muchos los estudios que han buscado la relación entre el campo de visión y la presencia, y los experimentos realizados son muy diversos y comparan a su vez otras variables. Entre los más recientes se encuentran [146, 155, 209, 211, 217–219]. La tabla 5.1 muestra trabajos relacionados adicionales.

---

<sup>4</sup><https://www.starvr.com/>



**Figura 5.1:** Ejemplo de un campo de visión reducido de 45° (arriba) y un campo de visión amplio de 120° (abajo). Videojuego *Project Cars 2* [225].

La mayoría de dichos trabajos sugieren una correlación positiva entre el campo de visión y la presencia, en donde el mayor campo de visión logrado por el sistema de RV siempre será mejor. Incluso en los primeros experimentos relacionados con RV ya se buscaba analizar y mejorar el campo de visión. Los visores de RV actuales, aunque se acercan mucho, todavía no proveen un campo de visión igual al del humano. Por este motivo resulta interesante analizar esta variable y cómo afecta a la inmersión visual.

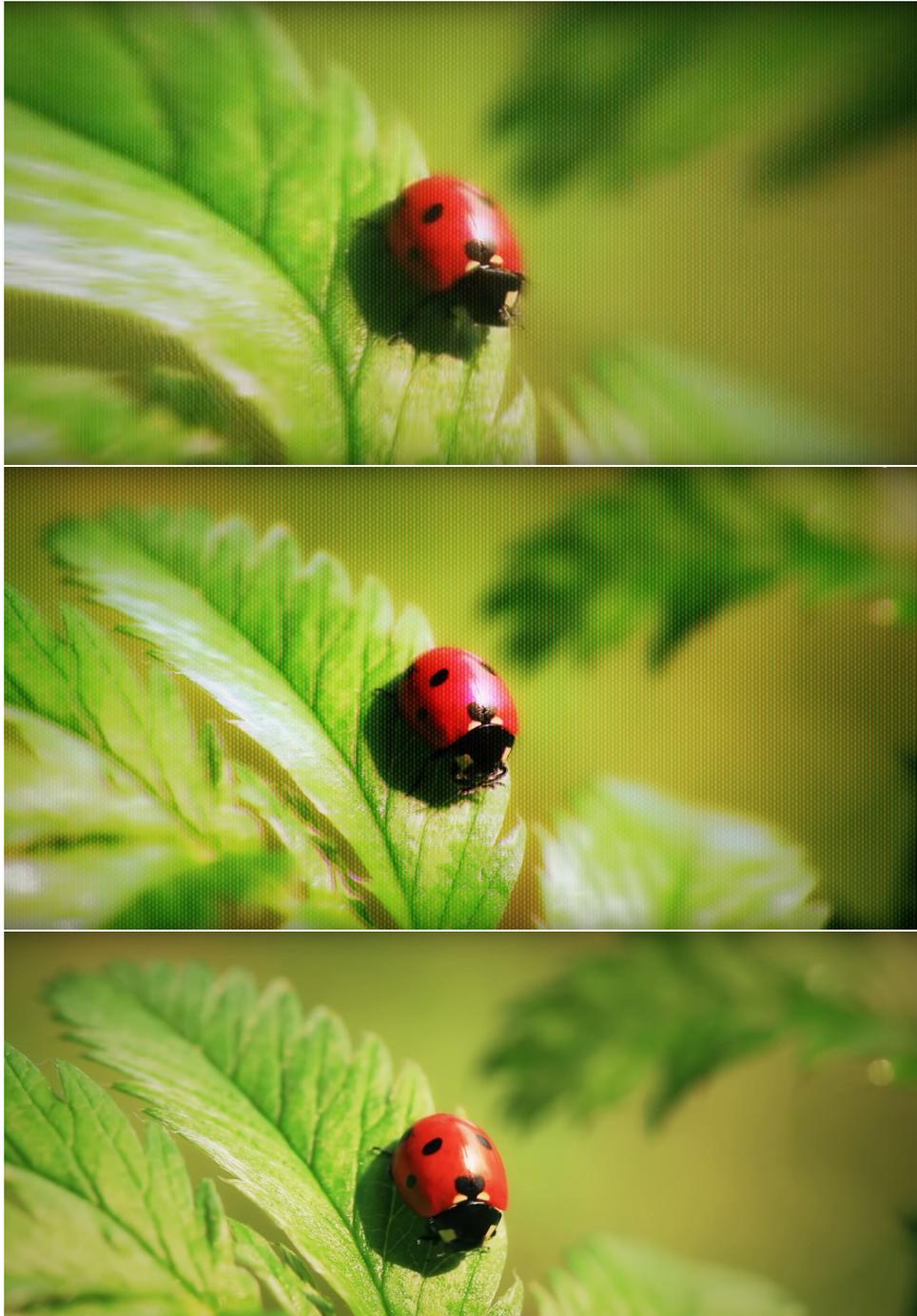
## RESOLUCIÓN DE PANTALLA

La resolución de pantalla también juega un rol fundamental a la hora de incrementar la sensación de presencia e inmersión en sistemas de RV. Como los visores de RV están muy cerca del ojo, el usuario puede detectar los píxeles de la pantalla si la resolución de la misma es baja (ver figura 5.2). Afortunadamente, la tecnología ha avanzado mucho en la producción de los distintos tipos de pantallas y hoy en día existen visores con alta resolución de pantalla. El Oculus Rift, por ejemplo, tiene actualmente una resolución de  $2560 \times 1440$  píxeles. Como una mayor resolución de pantalla se asemeja más a la forma en que ver los humanos, muchos estudios también sugieren que una mayor resolución de pantalla genera una mayor sensación de presencia [149, 155, 207–209, 217–219, 223].

## ESTEREOPSIS

Los seres humanos capturan una imagen con cada ojo y estas imágenes capturadas se fusionan en el cerebro para contribuir a generar la sensación de profundidad. Por este motivo, las pantallas y visores que nos provean esta sensación de profundidad, o estereopsis, nos presentarán una imagen más parecida a la del mundo real y por lo tanto sentiremos más presencia e inmersión.

Los visores de realidad virtual que se montan en la cabeza tienen la ventaja de poder mostrar una imagen para cada ojo, de tal forma de generar el efecto de estereopsis. Cuando se utilizan pantallas con tecnología 3D, como por ejemplo con gafas anaglíficas, sí presentarán estereopsis ya que dichas gafas se encargan de presentar la imagen correspondiente a cada ojo.



**Figura 5.2:** Ejemplo de la misma imagen en tres resoluciones distintas [226]. De arriba hacia abajo las imágenes incrementan su resolución. En la imagen superior pueden notarse los píxeles individuales y esto se distingue cada vez menos a medida que la resolución aumenta.

Varios autores han encontrado una relación positiva entre la sensación de profundidad y la presencia. De hecho, el uso de señales estereoscópicas se ha descrito como de suma importancia para mejorar la presencia [125, 161, 227]. La mayoría de los estudios sugiere que los usuarios experimentan más presencia cuando el sistema de RV provee estereopsis [146, 151, 155, 208, 209, 212, 213, 216, 218, 219, 223]. Esto es en parte esperable, ya que estos sistemas se asemejarían más a lo que el usuario experimenta en el mundo real.

#### TASA DE REFRESCO Y TIEMPO DE RESPUESTA (LATENCIA)

La tasa de refresco o frecuencia de actualización <sup>5</sup> es una medida en Hz de *hardware* y representa la cantidad de imágenes que dicho *hardware* puede mostrar por segundo. Los estudios sugieren que frecuencias de actualización pequeñas (menores a 15Hz) pueden generar mucho malestar.

El tiempo de respuesta del sistema es el tiempo que transcurre entre las acciones del usuario y los efectos percibidos de dichas acciones en el ambiente [228]. Varios estudios sugieren que dicha latencia degrada la sensación de presencia [120, 128, 229]. Se sugiere que la latencia no sea mayor a 0.1s [230].

Según Durlach y Mavor [230], los visores deben mostrar más de 8 imágenes por segundo para ofrecer una ilusión de movimiento continuo, aunque se ha mostrado que la presencia decrece abruptamente por debajo de 15 imágenes por segundo [231].

Un estudio más reciente, sugiere que la latencia reduce considerablemente la presencia percibida [232].

---

<sup>5</sup> *Refresh Rate* en inglés

## BRILLO, CONTRASTE, SATURACIÓN Y DEFINICIÓN

Mediante *software*, se puede ajustar el brillo, el contraste, la saturación y la definición de la imagen final del sistema de RV presentada al usuario. Si bien en Mazuryk and Gervautz [185] se sugiere que un brillo de pantalla muy alto puede provocar sensación de *cybersickness*, existen muy pocos estudios que analizan la influencia de estas variables en la sensación de presencia e inmersión. Sin embargo, dados los resultados incipientes que se muestran, resulta interesante analizar la influencia de dichas variables.

## NIVEL DE DETALLE

El nivel de detalle de una escena virtual puede influir en la presencia [32, 229]. El nivel de detalle está relacionado con la cantidad de polígonos de los objetos de la escena y, cuanto mayor sea el nivel de detalle de estos objetos mayor será el realismo que la escena pueda representar, incrementando así la inmersión y la presencia del sistema de RV. En la figura 6.14 pueden verse el mismo arbusto con tres niveles de detalle distintos. Podemos imaginar cómo se vería un ambiente lleno de modelos 3d cuantos con distintos niveles de detalle. Un ambiente en donde los modelos tengan más nivel de detalle se verá más real que uno en donde los modelos tienen poco nivel de detalle.

Aunque es natural pensar que una visualización lo más realista posible está directamente relacionada con el grado de presencia percibido, algunos estudios sugieren que no es necesario mostrar una imagen fotorrealista para generar altos niveles de presencia [233]. Es más, estos estudios sugieren que el usuario puede sentirse presente en un AV de bajo realismo, con pocos polígonos y con iluminación ambiente. Por ejemplo, los experimentos llevados a cabo por Volkman et al. [234] sugieren que la cantidad de polígonos no impacta en la sensación de presencia percibida.



**Figura 5.3:** Mismo arbusto con cuatro niveles de detalle distinto en función de los triángulos del modelo 3D [235]. La cantidad de triángulos va decreciendo de izquierda a derecha.

Estas variables han sido muy estudiadas, especialmente en los comienzos de la RV [133, 144, 148, 163, 170, 185, 195, 196]. A pesar de todo, no se ha llegado a un consenso de si un mayor realismo o fidelidad gráfica influye positivamente o no en la presencia e inmersión; por esto resulta interesante analizar en detalle la influencia de dicha variable.

## COLISIONES

Si bien no es una variable relacionada puramente con el sentido de la vista, el manejo de colisiones en el AV provee al usuario una sensación de fidelidad relacionada con Psi. Cuando el usuario navega a través del AV es lógico que sólo pueda transitar por las zonas en donde físicamente podría hacerlo y no que atraviese objetos virtuales como, por ejemplo, paredes o muebles. Esto mismo sucede cuando el usuario interactúa con los objetos virtuales. Si estos objetos colisionan apropiadamente entre sí y con los demás objetos, esto influirá positivamente en la sensación de presencia percibida [135].

## ILUMINACIÓN

Como se mencionó anteriormente, la estereopsis influye positivamente en la presencia debido a que nos ayuda a ver en 3D dentro del AV. La iluminación y el sombreado de objetos son otras características de un AV que ayudan con esta percepción 3D del ambiente. En los comienzos de la RV y de la computación gráfica, la inclusión de varias luces y de distintos tipos de luces era computacionalmente muy costoso. Hoy en día, es común que los videojuegos y otras experiencias virtuales incluyan luces de distintos tipos, e incluso luces dinámicas que, junto con el sombreado realista de objetos, sumergen al usuario en el mundo virtual.

Distintos estudios analizan la influencia de la iluminación con luces y sombreado en la presencia [170, 185, 196, 208]. Sin embargo, no existen estudios que determinen qué tan alta es esa influencia. Como la incorporación de luces involucra un gran costo computacional, resulta interesante analizar cuándo es necesario incorporarlas.

## SOMBRAS DINÁMICAS

Un concepto muy relacionado con iluminación es la incorporación de sombras dinámicas. Si existen luces en el AV, a medida que los objetos se mueven dentro de éste, generarán sombras que deberán representarse adecuadamente. La literatura discute la influencia de sombras dinámicas en la presencia [185, 208]. La fuerza con la que las sombras son proyectadas, es decir sombras más claras o más oscuras, suele utilizarse mucho en videojuegos y otras experiencias inmersivas.

## REPRESENTACIÓN DEL CUERPO

La representación del cuerpo del usuario en el ambiente virtual es importante para la sensación de presencia [42]. La experiencia de presencia dependerá de la concordancia entre el ambiente virtual y nuestras expectativas culturales. Slater y Usoh [42] enfatizan el cuerpo y la forma en que es percibido y representado en el ambiente virtual. El cuerpo funciona como una interacción, comunicación e identificación en el sistema. Así, para que el sistema de RV funcione mejor, es necesario ofrecer información propioceptiva que ofrezca un modelo mental de nuestro cuerpo y extremidades [236].

La mayoría de los sistemas de RV modernos sólo realizan seguimiento de la cabeza del usuario y de sus manos. Esto último es importante ya que permite más interacciones con el escenario virtual. Sin embargo, si no se realiza un seguimiento completo de todo el cuerpo del usuario será difícil mostrar una representación virtual del mismo.

La mayoría de los videojuegos, por ejemplo, representan al jugador como una cámara flotando en el espacio. Cuando el jugador mira su cuerpo no verá nada. Una posible solución es situar un avatar 3D en la posición del usuario pero de manera estática, es decir, que no se mueva. Esto incrementa la sensación de inmersión ya que el usuario verá su cuerpo, pero al mismo tiempo la reducirá si el cuerpo no se mueve acorde a los movimientos del usuario.

Los videojuegos y aplicaciones que hacen seguimiento de las manos suelen incluir además, modelos de manos y brazos que se mueven acorde a los movimientos del usuario. Esto genera mucha inmersión si el tamaño, la posición y los movimientos de las manos virtuales son precisos. Sin embargo, es difícil hacer que estas manos virtuales estén unidas al un cuerpo virtual que corresponda a los movimientos del cuerpo del usuario.

Existen trabajos en la literatura que utilizan sistemas de seguimiento especial para poder hacer seguimiento de más partes del cuerpo del usuario, como por ejemplo el torso o los pies [42, 174, 223]. Incluso hay estudios que realizan seguimiento de todo el cuerpo del usuario. Estos estudios sugieren que si el usuario tiene una representación 3D en el mundo virtual, cuyos movimientos sean acordes a los del usuario, mayor será el grado de inmersión percibido.

### 5.3.2. VARIABLES DE INMERSIÓN AUDITIVA

Los seres humanos utilizamos el sonido y nuestro sentido del audio para comunicarnos con el mundo que nos rodea. Esto constituye una parte muy importante de nuestra percepción del mundo. Por esto, es esperable que la inclusión de audio en los sistemas de RV sea fundamental. Esta sección describe aquellas características del audio que, según estudios realizados en la literatura, influyen en la sensación de presencia e inmersión.

#### SONIDO O NO SONIDO

La forma más fácil de analizar si la inclusión de sonido influye en la sensación de presencia es comparar la presencia cuando se utiliza sonido contra la ausencia del mismo. Muchos estudios en la literatura analizan esto [21, 30, 119, 133, 148, 152, 166, 182, 184, 205, 213] y todos están de acuerdo en que la inclusión de sonido influye positivamente en la presencia e inmersión percibidas por el usuario. Sin embargo, no hay estudios que analicen específicamente el nivel de influencia.

## SONIDO AMBIENTE

Existen distintas maneras de incorporar sonido a un AV. Cuando no es necesario que el sonido provenga de una fuente particular, se utiliza sonido puramente 2d o sonido ambiente. Por ejemplo, si el AV corresponde a una playa, se escuchará un sonido ambiente de viento y olas, pero este sonido no provendrá de ningún punto particular. Existen estudios que analizan la influencia de este tipo de sonido en la presencia [135, 148]. Otros, comparan y combinan este tipo de sonido con el sonido espacial 3D.

## SONIDO ESPACIAL 3D

El sonido espacial se produce al generar distintas señales de sonido para el oído izquierdo y para el oído derecho. De esta forma, se simula un origen particular en el espacio 3D alrededor del usuario. Existen muchas técnicas de implementación de sonido espacial 3D. Para una mayor descripción de las mismas se recomienda ver [237].

Existen estudios en la literatura que analizan la influencia del sonido espacial en la sensación de presencia [30, 135, 148, 149, 152, 215, 221, 222, 224]. La mayoría está de acuerdo en que el sonido espacial influye positivamente, en gran medida, en la presencia. Esto se debe a que permite reproducir sonidos de una forma muy similar a la vida real. Sin embargo, todavía se requieren estudios más rigurosos para determinar el grado de influencia del sonido espacial, especialmente teniendo en cuenta las distintas técnicas que existen.

## AURICULARES O PARLANTES

Para que el sonido espacial 3D funcione adecuadamente, se debe asegurar que cada señal de sonido llegue a cada oído del usuario, sin interferencias ni sonidos externos. La mejor forma de asegurar esto es mediante el uso de auriculares, ya que así se asegura que cada señal llega exclusivamente a cada oído.

Por otro lado, el sonido espacial 3D también puede reproducirse utilizando parlantes estéreo. Sin embargo, sólo se pueden representar un posicionamiento del sonido transversal a la posición de los parlantes. Es decir que sólo se puede simular el sonido como si proviniera de algún punto que se encuentre posicionado en la línea imaginaria que conecta los 2 parlantes.

Existen estudios que analizan la influencia en la presencia de estos tipos de sonido. La mayoría sugiere que se obtiene un mejor resultado mediante la utilización de auriculares [145, 224]. Sin embargo, aún no se ha encontrado el grado de influencia de la utilización de auriculares o parlantes.

## VOLUMEN

El volumen o intensidad del sonido es una variable que se asume puede influir en la sensación de presencia. Existen estudios que tratan de determinar la mejor intensidad de sonido para mejorar la sensación de presencia [148]. Un sonido con un volumen más elevado puede generar una sensación emotiva más impactante en el usuario pero por otro lado, puede resultar poco realista. Todavía no existe ningún consenso al respecto.

## OTROS

Existen algunos estudios sobre otras variables de sonido no tan influyentes pero que vale la pena mencionar e investigar. El eco, por ejemplo, ayuda a generar una imagen mental del AV en donde el usuario se encuentra. Aquí, el sonido se ve modificado por las propiedades físicas de la habitación. Se asume que esto genera mayor presencia [135].

Otra de las variables estudiadas, y que suele utilizarse mucho en videojuegos, es incluir el sonido de pasos del usuario a medida que éste navega por el mundo virtual. Algunos autores sugieren que incorporar el sonido de los pasos del usuario incrementa la sensación de presencia [238]. Se sugiere que esto genera una sensación más realista de estar caminando por un AV, incrementando así la sensación de presencia [142].

### 5.3.3. INMERSIÓN TÁCTIL

Vimos que la presencia se puede incrementar, por ejemplo, si el participante percibe su propio movimiento dentro del AV [32] o también cuando el sujeto tiene más capacidad de cambiar el ambiente en el que se encuentra. Se ha reportado que la presencia es mayor en usuarios que tienen control sobre sus acciones en RV, que en observadores pasivos [239]. En este contexto la inmersión táctil se refiere a todos aquellos elementos virtuales con los que el usuario puede interactuar. Más específicamente, se refiere a aquellas formas que existen para que el usuario pueda interactuar.

La inmersión táctil también contempla la respuesta que da el sistema al usuario. Hoy en día existen dispositivos hápticos que aplican una fuerza sobre el usuario para que éste tenga la sensación de estar tocando los objetos virtuales. Estos dispositivos suelen ser complejos y costosos, pero existen muchos estudios relacionados. Finalmente, la inmersión táctil también hace referencia al seguimiento o *tracking* del usuario.

## ANCHO DE BANDA SENSORIAL

El ancho de banda sensorial hace referencia a la cantidad de interacciones y estímulos percibidos por el usuario. Los usuarios pueden percibir la RV mediante todos los sentidos; depende del *hardware* brindar estímulos sensoriales acordes. Existen estudios que investigaron, a grandes rasgos, la influencia de una mayor cantidad de estímulos sensoriales en la presencia [21, 42, 119, 133, 170, 173, 174, 177, 184, 185]. La mayoría está de acuerdo en que cuanto más estímulos brinde el sistema de RV, mayor presencia e inmersión serán percibidos. En este sentido, por ejemplo, un sistema que provea visualizaciones y audio será más inmersivo que uno que solo provea visualizaciones. Por otro lado, un sistema que haga *tracking* de todo el cuerpo del usuario será más inmersivo que otro sistema que solo haga *tracking* de la rotación de la cabeza. Obviamente estamos asumiendo que este *tracking* se refleja en el sistema de RV.

## FIDELIDAD SENSORIAL Y DE INTERACCIÓN

En el capítulo 2 se habló sobre los conceptos de realismo y fidelidad. Vimos que la fidelidad, en este caso, hace referencia a qué tan real o natural nos parece el *tracking* de nuestro cuerpo y las interacciones que realizamos con el sistema de RV. Los estudios en esta área sugieren que un sistema con más fidelidad sensorial y de interacción producirá más presencia debido a que se asemeja más a lo que los usuarios experimentan en la vida real [42, 170, 174, 175, 185]. Desafortunadamente no existen estudios actuales que consideren distintas variables que integran la fidelidad sensorial y de interacción, y analicen específicamente su efecto en la presencia e inmersión percibidas. Por este motivo, resulta sumamente interesante considerar también estas variables, como se verá en el capítulo 6.

## SEGUIMIENTO O *TRACKING* DEL CUERPO

Si un sistema de RV realiza *tracking* de todo el cuerpo del usuario, este último podría ver una representación virtual completa de su cuerpo, con la cual interactuar. Sin embargo, realizar seguimiento de todo el cuerpo es un proceso costoso y engorroso ya que requiere disponer de una cantidad mayor de sensores sobre el cuerpo del usuario.

La mayoría de los sistemas de RV comerciales, realizan *tracking* sólo de la cabeza y de las manos del usuario. Con eso, se pueden realizar algunas estimaciones sobre el resto del cuerpo, lo cual ha demostrado ser suficiente para la mayoría de los videojuegos de RV.

Existen trabajos que investigan los efectos de los distintos tipos de *tracking* en la presencia e inmersión percibidas [119, 120, 133, 138, 183, 184, 194, 204, 208, 209]. La mayoría de estos trabajos sugiere que cuanto más partes del cuerpo del usuario estén representadas en el mundo virtual, mayor será el grado de inmersión percibido. Sin embargo, esto no debe implicar que se le pongan al usuario una gran cantidad de sensores, ya que esto volvería muy incómoda la experiencia y reduciría la inmersión.

Siempre se debe tener en cuenta el objetivo o la tarea que se desea realizar. Por ejemplo, un simulador de fútbol requerirá un sistema de *tracking* de alta fidelidad de los pies del usuario. En cambio, un simulador de alguien que cocina por ejemplo, lo requerirá en las manos.

## MOVILIDAD Y GRADOS DE LIBERTAD

La movilidad y los grados de libertad se refiere a qué tanto de los movimientos del usuario son detectados por el sistema. Hoy en día, los sistemas de RV comerciales proveen hasta 6 grados de libertad (mejor conocido como 6-DoF por sus siglas en inglés) para el *tracking* de las manos y la cabeza del usuario, lo que indica que el usuario puede trasladar y rotar su cabeza y sus manos en cualquier dirección y dichos movimientos serán capturados por el sistema de RV.

Algunos estudios sugieren que la inclusión de más grados de libertad induce mayor presencia e inmersión [135, 138, 186]. Sin embargo, debe considerarse la tarea particular que se espera realizar con la aplicación particular que se esté utilizando.

#### NATURALIDAD DE LOS CONTROLES

Para poder interactuar en un AV, se han desarrollado distintos tipos de controles a lo largo de los años. Dado que el usuario interactúa a través de estos controles, la forma física de los mismos es importante. Si por ejemplo el usuario está jugando a un juego de tenis, será una experiencia más inmersiva si el control que está utilizando tiene forma de raqueta de tenis; más aún, si esta raqueta de tenis tiene una representación acorde en el AV.

Los sistemas de RV comerciales utilizan controles que calzan en las manos de una manera muy cómoda, de forma tal que el usuario se pueda olvidar que está utilizando controles. La naturalidad de los controles también se refiere a que los controles no resulten incómodos o engorrosos, de modo tal que el usuario pueda tener una mejor experiencia virtual. Existen estudios que sugieren que controles más naturales mejoran la sensación de presencia e inmersión percibidas [139–141]. Para un mayor detalle sobre los distintos tipos de controles se recomienda ver [237].

#### TIEMPO DE RESPUESTA *TRACKING* (LATENCIA)

El tiempo de respuesta, al igual que sucede con la inmersión visual, también es importante cuando hablamos del *tracking* y la respuesta del sistema hacia el usuario. Si por ejemplo, el usuario mueve la mano y la representación virtual de la mano se mueve 2 segundos más tarde, esto será poco realista y reducirá la inmersión.

Hay estudios que evalúan los efectos del tiempo de respuesta [171]. La mayoría sugiere que cuanto mayor sea el tiempo de respuesta más se reducirá la inmersión percibida por los usuarios.

## NAVEGACIÓN

La última de las variables relacionadas con la inmersión táctil se relaciona con la posibilidad de navegar o caminar dentro el mundo virtual. Existen muchas técnicas de navegación para sistemas de RV. Un usuario podría navegar utilizando cualquier tipo de control o *joystick*, inclinando la cabeza o caminando en el lugar. Otro tipo de técnicas incluyen la teletransportación, en donde mediante el uso de un control el usuario selecciona a dónde quiere moverse dentro del AV y es teletransportado a esa posición. Por otro lado, si se dispone de suficiente espacio físico en la habitación y de un sistema de *tracking* de posición acorde, el usuario podría caminar dentro del AV de la misma manera que lo hace en la vida real. Hoy en día, la mayoría de los sistemas de RV comerciales utilizan esta técnica pero igualmente, el usuario queda restringido a los límites de su espacio físico. Por este motivo esta última técnica suele combinarse con alguna de las anteriores. Para una descripción más detallada de las técnicas de navegación existentes se recomienda leer [237].

Algunos estudios analizan la interacción de los diferentes tipos de técnicas respecto a la presencia e inmersión percibidas [42, 174]. Se sugiere que las interacciones más naturales contribuirán más positivamente a la sensación de presencia. Sin embargo, no existen estudios recientes que analicen las diferencias entre las técnicas más novedosas que permite la tecnología actual.

## TEMPERATURA Y VIENTO

Existen otros tipos de interacciones táctiles o hápticas que han sido brevemente investigadas pero que vale la pena mencionar. Algunos trabajos han analizado la aplicación de efectos de calor o viento sobre el usuario mientras experimenta la RV [148, 222]. Dichos trabajos sugieren que la incorporación de señales hápticas de viento o temperatura puede incrementar la presencia siempre y cuando la sensación producida se corresponda con lo que el usuario está experimentando dentro del AV.

Aunque este tipo de sensaciones añade inmersión a la experiencia, resulta muy difícil y costoso para los sistemas de RV comerciales adicionar el *hardware* necesario para incorporarlos. Por este motivo, el uso de estas señales hápticas no ha sido explorado en gran medida y se mantiene como un área desafiante de investigación.

### 5.3.4. OTRAS VARIABLES

Más allá de los sentidos de la vista, el oído y el tacto, los otros sentidos más comúnmente conocidos son el gusto y el olfato, y se ha estudiado como influyen en la sensación de presencia e inmersión. En la literatura también se han investigado otras variables, además de las enumeradas, que también influyen en esta sensación. Esta sección describe brevemente dichas variables.

## OLFATO Y GUSTO

Han existido muchos prototipos de dispositivos de Interacción Humano-Computadora que han tratado de simular distintas fragancias o sabores. El principal inconveniente de estos dispositivos es que suelen ser incómodos para el usuario. Por otro lado, para producir un aroma o sabor particular se debe utilizar una fragancia específica de dicho aroma. Es decir, no existe (o por el momento no se ha hallado) algo parecido a aromas primarios de los cuales puedan construirse el resto de los aromas. Esto es algo que también hace poco práctico a este tipo de dispositivos. En [237] se detallan estos dispositivos.

Algunos estudios han analizado si la influencia de distintos aromas influyen en la sensación de presencia e inmersión percibidos. Por ejemplo, Azevedo et al. [222] han utilizado fragancia a bosque y Dinh et al. [148] utilizaron aroma a café. Estos estudios sugieren que la incorporación de aromas incrementa la sensación de presencia, pero deben realizarse más estudios.

## TIEMPO TRANSCURRIDO

Cuando los usuarios experimentan una experiencia de RV, se encuentran dentro de dicha experiencia por un tiempo determinado. La experiencia puede durar desde minutos hasta horas. Algunos estudios sugieren que cuanto más tiempo el usuario se encuentre dentro del mundo virtual, mayor será el grado de presencia percibido [42, 117, 120, 167, 168, 171, 173, 174].

## PRESENCIA DE OTROS

Existe mucho interés en la presencia generada por la existencia de actores virtuales en sistemas de RV [21, 240]. La diferenciación y experiencia de uno mismo puede ser mejorada si otras personas existen en el mundo virtual y parecen reconocer la existencia del participante [240]. Esta sensación compone un término denominado presencia social y se basa en que si otras personas están en el mundo virtual entonces es más probable que dicho mundo exista [229]. Algunos trabajos sugieren que la presencia de otros personajes virtuales incrementa la sensación de presencia [133, 138].

## AMBIENTE EMOTIVO

Un concepto relacionado puramente con presencia, y no con inmersión, es el ambiente emotivo. Esto se refiere a que la generación de situaciones emotivas dentro del AV producirá una mayor sensación de presencia [153]. Existen muchas formas de despertar emociones en los usuarios y esto ya depende de cada usuario particular.

## RIESGO PERSONAL

El riesgo personal es otra variable que se relaciona con la sensación de presencia y con el ambiente emotivo. Algunos estudios sugieren que la sensación de peligro incrementa en gran medida la sensación de presencia percibida [42, 133, 174]. Esto está altamente relacionado con el ambiente emotivo ya que el peligro es considerado como una de las emociones primordiales del ser humano.

## TRANSPORTE NARRATIVO

El transporte narrativo sugiere sumergir al usuario en una narración de la misma forma que lo hace un libro o una película. De este modo, el usuario se encuentra completamente compenetrado en la experiencia virtual, lo que incrementa la sensación de presencia percibida [135, 209].

### 5.4. CONCLUSIONES

En el presente capítulo se describen las variables que, según la literatura, inciden en la sensación de presencia e inmersión. El conocer las variables integradas en la presencia y en la inmersión nos permite reflexionar sobre el espacio de diseño de la RV y constituye un punto de partida para contar con un marco que considere todas sus componentes, desglosadas con fines de análisis. Las características del usuario son variables que dependen de cada usuario y afectarán la sensación de presencia en cierta medida. Por otro lado, las características del medio hacen referencia a aquellas variables del sistema de RV que incidirán en la sensación de inmersión. Esto sugiere entonces que la inmersión producida por un sistema de RV dado será la misma para todos los usuarios que experimenten dicho sistema. Esto no sería el caso para la sensación de presencia.

En cuanto a las características del medio, las hemos clasificado según el sentido al que corresponden. Las variables más influyentes se corresponden con el sentido de la vista e integran la inmersión visual. El humano percibe gran parte del mundo con la vista y el 50 % del cerebro se dedica al procesamiento visual. Esto lo hace el sentido más importante en todas las culturas y justifica que se haya dedicado un gran esfuerzo en tratar de simular mundos virtuales que puedan ser percibidos por el sentido de la vista.

En este capítulo se han recopilado y sintetizado las posibles variables relacionadas a la sensación de inmersión. Es importante mencionar que si bien existen otros estudios que consideran otras variables, cada una de éstas es equivalente a alguna de las mencionadas en este capítulo. Las variables “nivel de detalle del ambiente”, “calidad del ambiente” o “realismo del ambiente”, por ejemplo, se refieren esencialmente a lo mismo, es decir, a que el ambiente se vea lo más real posible.

Si bien los estudios en los que se analizan algunas de las variables mencionadas en este capítulo fueron realizados hace más de 10 ó 20 años y los sistemas de RV comerciales utilizan, en lo posible, la tecnología más moderna disponible, no es claro si esto necesariamente redundaría en sistemas más inmersivos. Si bien la tecnología ha avanzado mucho en los últimos años y se asume que generalmente la tecnología más moderna permite sistemas de RV más inmersivos, el poder determinar si esto es cierto depende de cuánto se comprenda en lo referido no sólo a cuáles son las variables que determinan distintos grados de inmersión sino también en qué medida ocurre esto. El estudio y el análisis comparativo de las variables de *hardware* y de *software* es un tema de investigación actual, interesante, iterativo y desafiante.

Esto justifica ampliamente el estudio comparativo de todas estas variables para comprender su influencia en la sensación de inmersión, así como también permitir como poder comparar sistemas de RV que consideren distintas variables, las interacciones entre las mismas considerando además sus distintos rangos de valores. En el siguiente capítulo describimos el experimento realizado y las variables que fueron consideradas en éste.



# 6

## Experimento: Generación de Datos

### 6.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 5 se presenta cómo se recopilaron y sintetizaron las variables tanto de *hardware* como de *software* que, según la literatura, inciden directamente en la sensación de inmersión percibida. Sin embargo, hasta hoy en día no se han analizado ni se han comparado simultáneamente todas las variables entre sí, ni se ha desarrollado una métrica de la sensación de inmersión percibida que las incluya a todas, integrándolas con sus respectivos niveles de incidencia.

Con la finalidad de alcanzar este objetivo, se diseñó un experimento en el que los participantes deben realizar una determinada tarea dentro de un AV y reportar su sensación de inmersión percibida. Dicho AV se detalla en la sección 6.4 pero su composición visual, auditiva y táctil dependerá del valor que tomen las variables independientes en cada prueba. Es decir, cada vez que se ejecuta una nueva prueba, las variables independientes tomarán un nuevo valor, modificando el AV por completo (ver sección 6.7).

En este experimento, los participantes no solo reportarán el grado de inmersión percibido sino que también se evalúan por separado la inmersión visual, auditiva y táctil. Esto nos brindará información sobre la relación entre los distintos tipos de inmersión particulares y la inmersión total. Finalmente, también se evalúa el grado de presencia percibido. Estas variables son las variables dependientes del experimento y se describen en detalle en la sección 6.6.

Existen diversas alternativas de cómo llevar a cabo el experimento en función de considerar los participantes y las pruebas realizadas [241]. Por un lado, el experimento puede realizarse con muchos participantes. La cantidad de participantes en este caso debe ser representativa en función de la población objetivo que se desea generalizar y de la cantidad de condiciones de tratamiento del experimento. Por el otro lado, el experimento puede realizarse con un solo participante. En este caso, los resultados serán generalizables sólo al tipo de participante que realizó el experimento. En ambos casos, el experimento brinda información válida sobre la relación entre las distintas variables, que podrá utilizarse para hallar una métrica en función de los datos.

Debido a las condiciones de aislamiento social relacionadas con el COVID-19, en este trabajo se optó por realizar los experimentos enfocados en un solo usuario. El resultado de este experimento no solo brindará información sobre la importancia de las variables y sus relaciones, sino que es parte de una nueva metodología para el desarrollo de una métrica que considera todas las variables que se considere importante tener en cuenta para establecer una métrica flexible, en función de los datos. Además, esta metodología constituye la base para utilizarse con múltiples usuarios.

Finalmente, los resultados de este experimento constituyen un *dataset* con una cantidad de muestras igual a la cantidad de pruebas del experimento. Cada muestra constituye una relación entre las variables independientes y dependientes, para un posterior análisis. Esto se detalla en la sección 6.8.

## 6.2. PARTICIPANTES

Como se mencionó anteriormente, el presente experimento fue realizado por un solo participante. Este tipo de experimentos es mejor conocido por su nombre en inglés como *single-subject design* y suele utilizarse en campos como psicología, educación y comportamiento humano. Suele utilizarse también para evaluar el efecto de una variedad de intervenciones en investigación aplicada. El presente experimento fue realizado por un participante de 30 años de edad y género autopercibido masculino. El participante reside en Bahía Blanca, Argentina, y tiene alta experiencia jugando videojuegos y utilizando sistemas de RV.

## 6.3. HARDWARE

El experimento se realizó utilizando una computadora de escritorio con una CPU i5-7500 3.40GHz, con 16GB de RAM, y una placa de video GeForce GTX 1060 6GB GPU. No se produjo ninguna degradación de rendimiento que haya podido comprometer el experimento. El estímulo visual y las interacciones se llevaron a cabo mediante el uso del sistema Oculus Rift CV1<sup>1</sup>. El campo de visión binocular del sistema es de 110° aproximadamente. Su pantalla tiene una tasa de refresco de 60 Hz y una resolución de 2160 × 1200 para ambos ojos. La orientación y posición de la cabeza son registradas por el giroscopio y acelerómetro incorporados del sistema. Las cámaras ópticas del sistema fueron utilizados para hacer el seguimiento del participante. El sistema también dispone de un mecanismo para ajustar la disparidad visual del participante. Finalmente, los auriculares incorporados del sistema fueron utilizados para presentar el audio.

---

<sup>1</sup><https://www.oculus.com/rift>

#### 6.4. AMBIENTE VIRTUAL

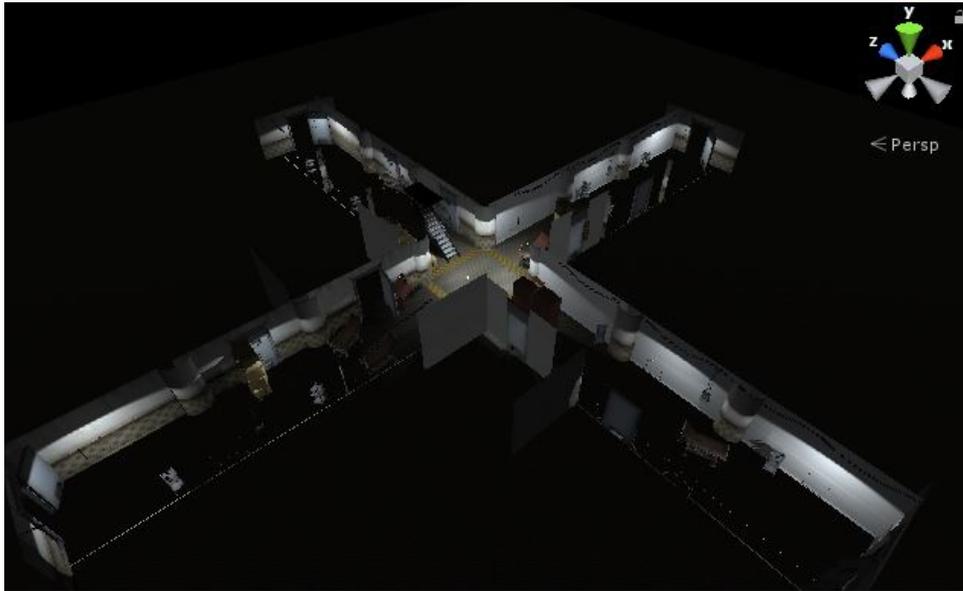
Según Makransky et al. [242], para poder obtener una medición lo más precisa posible, el participante debe mantenerse entretenido y motivado durante toda la experiencia. Si el participante se aburre y comienza a divagar, esto puede influir negativamente en la precisión de los resultados. Por este motivo se diseñó un juego para mantener motivado al participante durante el tiempo que dure la prueba.

En este juego el participante debe sobrevivir a un ataque zombie durante un tiempo determinado. Para poder mantener al usuario motivado en todo momento, la dificultad del escenario varía en función del tiempo de juego restante. Eso es, la frecuencia con la que aparecen nuevos enemigos y su velocidad se incrementa a medida que transcurre el tiempo.

El participante se encuentra en el cruce entre dos pasillos y los zombies aparecerán desde cada uno de los 4 extremos y avanzarán hacia el participante (ver figura 6.1). El usuario sólo podrá caminar por una zona (virtual) delimitada de  $3m \times 3m$ . Si los enemigos llegan a una determinada cercanía del participante, la partida finaliza.

Como uno de los objetivos del experimento requiere que el usuario camine por el AV, este último se diseñó de tal forma que impida que el usuario se quede simplemente parado en el centro. Para esto, se colocaron distintos obstáculos que obstruyen la visión entre el participante y los enemigos. De esta forma, el participante debe estar en constante movimiento para poder disparar a los enemigos.

El usuario tendrá una pistola en cada mano para disparar a los zombies. Las balas son ilimitadas. En uno de los laterales de ambas pistolas puede verse el tiempo restante y en el otro, el modo de caminar (ver figura 6.2).



**Figura 6.1:** Vista aérea superior del ambiente virtual. El usuario se encuentra en el centro. Los enemigos surgen de los 4 extremos y caminan hacia el centro.

Respecto al audio, además del sonido ambiente de fondo (ver sección 6.5), en el escenario virtual se pueden escuchar diferentes sonidos. Por un lado, cuando el participante dispara, se genera un sonido de disparo proveniente del arma que haya disparado. Además, los enemigos emiten tres sonidos distintos: un sonido cuando aparecen en el escenario, un sonido diferente cuando están cerca del participante y lo quieren atacar, y un sonido diferente cuando mueren.

El desarrollo del sistema fue realizado en Unity3d<sup>2</sup>. Para manejar las interacciones del sistema Oculus Rift se utilizó la librería VRTK<sup>3</sup>. Esto último proveyó distintas estrategias para interactuar con los controles como por ejemplo al disparar, al interactuar con el menú a la hora de completar datos utilizando los controles como punteros y al manipular propiedades del visor, como por ejemplo la estereopsis, entre otras funcionalidades.

---

<sup>2</sup><https://unity.com/>

<sup>3</sup><https://vrtoolkit.readme.io/>



**Figura 6.2:** El lateral derecho de cada arma muestra el tiempo restante de juego (arriba) y el izquierdo, el modo de caminar (abajo).



**Figura 6.3:** Comparación del escenario con pocos polígonos y sin texturas contra el mismo escenario con muchos polígonos y también sin texturas. El resto de las variables se mantiene constante.

La ambientación del escenario es un hospital abandonado construido en base a distintos recursos: objetos del hospital<sup>4</sup>, muebles<sup>5</sup>, cajas de cartón<sup>6</sup>, pistolas<sup>7</sup>, zombie de alta resolución<sup>8</sup> y zombie con pocos polígonos<sup>9</sup>. Entre otras cosas, también se utilizaron las librerías **Action Themes Pack 1**<sup>10</sup> para la música de fondo, **Simple LUT Adjuster**<sup>11</sup> para manipular el brillo, contraste, saturación y definición de la imagen final y **Final Vignette**<sup>12</sup> para simular el efecto de un menor campo de visión.

<sup>4</sup><https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/hospital-horror-pack-44045>

<sup>5</sup><https://assetstore.unity.com/packages/3d/props/furniture/low-poly-bed-room-furniture-pbr-133977>

<sup>6</sup><https://assetstore.unity.com/packages/3d/props/pbr-cardboard-box-110635>

<sup>7</sup><https://assetstore.unity.com/packages/3d/sci-fi-gun-30826>

<sup>8</sup><https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/humanoids/zombie-30232>

<sup>9</sup><https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/cartoon-zombie-sample-17622>

<sup>10</sup><https://assetstore.unity.com/packages/audio/music/orchestral/action-themes-pack-1-17750>

<sup>11</sup><https://assetstore.unity.com/packages/vfx/shaders/fullscreen-camera-effects/simple-lut-adjuster-51762>

<sup>12</sup><https://assetstore.unity.com/packages/vfx/shaders/fullscreen-camera-effects/final-vignette-118884>

## 6.5. VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes son aquellas establecidas por el sistema en cada prueba y no dependen de otras variables. En el capítulo 5 se realizó una presentación exhaustiva de todas aquellas variables que según la literatura influyen en la sensación de presencia e inmersión percibidas.

En el presente experimento no se consideraron las variables que dependían de *hardware* no disponible. Por ejemplo, varios estudios sugieren la importancia de que el usuario posea un cuerpo virtual (un avatar). Dicho avatar debería moverse acorde a los movimientos del usuario de tal forma que el usuario sienta que ese cuerpo virtual le pertenece. Esto incluye tanto el manipular objetos con las manos así como también el caminar por el espacio. Debido a que la mayoría de los sistemas de RV comerciales no disponen de sensores para detectar los pies del usuario, consideramos no implementar esta funcionalidad. En resumen, en este experimento no se analizaron las distintas formas de representar al usuario con un avatar virtual.

La resolución de la pantalla es un factor muy estudiado en la literatura. Se estima que si el usuario puede ver los píxeles de la pantalla, esto reduce la inmersión. Sin embargo, resulta interesante estudiar qué tanto influyen las distintas resoluciones. Al igual que algunos de los trabajos mencionados en el capítulo 5 respecto a la resolución de pantalla, en el presente experimento las distintas resoluciones de pantalla utilizadas son virtuales, es decir, como el usuario siempre utiliza el mismo visor, la resolución física de la pantalla del visor nunca cambia; ésta se cambia por *software*. Se generan así “píxeles virtuales” para simular resoluciones más chicas a la del visor. Resoluciones mayores a la resolución física de la pantalla del visor no se podrán generar. Se puede apreciar un ejemplo de esto en la figura 6.4.

Respecto a variables como la saturación final de la imagen, el brillo, el contraste y la definición, su influencia en la inmersión no ha sido muy estudiada en la literatura. Sin embargo, debido a que es fácil incorporar dichas variables y resulta interesante estudiar sus influencias, decidimos incorporarlas al experimento.



**Figura 6.4:** Tres ejemplos con distintas resoluciones de pantalla, esto es, 216x120 píxeles (arriba), 1080x600 píxeles (centro) y 2160x1200 píxeles (abajo). Se debe tener en cuenta que la diferencia en resolución es mucho más notoria cuando se está utilizando un visor de RV.

En cuanto al audio, se incorporó una variable que incluye música de fondo en el AV. La música de fondo seleccionada es del estilo “película de acción” y resulta interesante investigar si esto influye o no en la inmersión. Por otro lado, respecto al sonido espacial 3D, se utilizaron sonidos espaciales que dependen de la posición y dirección de la fuente de sonido. De esta forma, el usuario puede percibir aproximadamente de dónde provienen los sonidos.

En cuanto a los distintos modos de caminar, en el modo de caminar con el *joystick*, en primera instancia se había considerado un modo en el que se deshabilitaba el seguimiento de posición para que el usuario sólo pudiese moverse exclusivamente con el *joystick*. Debido a que esto ocasionaba *cybersickness* ya que los movimientos sutiles del usuario no eran reflejados, se decidió entonces excluir esta opción. De la misma forma, en un principio también se había considerado una opción para que el usuario solo pueda caminar con un joystick y rotar con el otro, es decir, no rotaría con los movimientos de la cabeza. Luego de realizar algunas pruebas informales en las que esto ocasionó *cybersickness*, se optó por descartar esta opción. La técnica de *Real Walking*, en donde el usuario camina normalmente por el espacio físico, no pudo considerarse para este experimento debido a que no se disponía del suficiente espacio físico.

Como se detalla más adelante, la duración de cada prueba es entre 2 minutos y 20 minutos. Sin embargo, existen varios casos en los que el jugador perdió la partida antes de los 2 minutos, reflejando un valor de tiempo final menor. Como es de esperar, en estos casos utilizamos para el análisis el tiempo total del usuario antes de perder la partida (ver sección 6.7).

En base a todas las variables y trabajos analizados en el capítulo 5, a continuación se listan aquellas variables que fueron consideradas para el experimento. Todas las capturas mostradas en el presente capítulo corresponden a la aplicación en ejecución, exactamente como se le muestran al usuario.

#### Información del Participante:

- Género Auto-Percibido: hombre, mujer, otro.
- Edad

- Ubicación Geográfica: continente, país, ciudad, latitud, longitud.
- Experiencia Previa en RV: ninguna, poca (lo he usado algunas veces), media (lo uso cada tanto), mucha (lo uso muy seguido), completa (lo uso casi todos los días).
- Salida de Audio: auriculares (normales, inalámbricos o incorporados al visor de RV), parlantes (monitor de PC, TV, otros), sin sonido.
- Espacio Físico Disponible: tengo un espacio físico mayor a 3m x 3m para moverme o no.

#### Variables de la Prueba:

- Tiempo de Duración: entre 120 y 1200 segundos (entre 2 y 20 minutos).
- Partida ganada o perdida: indicación sobre si el usuario ganó o perdió la partida (ver sección 6.7).
- Cantidad de enemigos destruidos.

#### Configuración Visual:

- Resolución de Pantalla:  $maxDisplayRes \times escala$ , donde  $escala = [0,1; 1]$ . Por ejemplo, para el Oculus Rift CV1, su resolución es 2160x1200. Utilizando una  $escala = 0,5$ , la resolución final será de 1080 x 600. Para este mismo visor, la resolución mínima sería entonces de 216x120 píxeles. Ver figura 6.4.
- Campo de Visión (FOV):  $maxFOV \times escala$ , donde  $escala = [0,3; 1]$ , o en otras palabras, entre un 30 % y un 100 % del total máximo permitido por el visor. Se optó un FOV mínimo de 30 % porque pruebas informales previas determinaron que un FOV menor ocluía demasiado la visión e imposibilitaba el correcto uso del sistema. Ver figura 6.5.
- *Frame Rate (FPS)*: de 8 a 60 FPS. En este caso, 60 FPS es lo máximo soportado por el visor y algunas pruebas informales determinaron que reducir los FPS por debajo de 8 podría causar un gran nivel de *cybersickness*.

- Estereopsis (visión 3D): activada o desactivada. Si está desactivada, el usuario verá exactamente lo mismo en cada ojo y se le dificultará detectar la profundidad de los objetos. Si está activada, el usuario verá con cada ojo la imagen correspondiente que genere el efecto de profundidad y visión 3D.
- *Antialiasing (MSAA)*: activado o desactivado. Se consideraron dos formas diferentes de *aliasing*, en el *rendering* de primitivas (bordes irregulares, es decir dentados, en las primitivas de las mallas que modelan los objetos) y en el de texturas (patrones *moiré* en las texturas). Cuando el *antialiasing* se activa se aplican respectivamente las técnicas de supermuestreo y de *mipmapping*.
- Texturas: sin texturas (colores planos) o con texturas realistas (representativas, es decir que por ejemplo una caja tenga textura de caja). Ver figura 6.6.
- Iluminación: luz ambiente sin sombreado, o luces puntuales con sombreado realista. El escenario utilizado en este experimento contiene 16 luces puntuales que generan sombreado realista en los objetos y sombras. En este modo dichas luces se activan o desactivan. Ver figura 6.7.
- Saturación: valor de  $[-1;1]$ . El valor -1 corresponde con nada de saturación, es decir, una imagen en blanco y negro. El valor de 1 corresponde con una imagen muy saturada. Ver figura 6.8.
- Brillo: valor de  $[-0.8;0.8]$ . Valores inferiores a -0.8 generan escenas muy oscuras en donde es casi imposible ver y valores superiores a 0.8 generan escenas muy iluminadas donde también es casi imposible ver y puede resultar perjudicial para la vista. Ver figura 6.9.
- Contraste: valor de  $[-0.8;0.8]$ . Valores menores a -0.8 y mayores a 0.8 generan imágenes en donde es difícil ver bien. Ver figura 6.10.
- Definición (*sharpness*): valor de  $[0;1]$ . Un valor de 1 corresponde a una imagen muy nítida, es decir, en la que se distinguen muy claramente los bordes de los objetos y las diferencias entre ellos. Ver figura 6.11.

- Sombras: fuerza de la sombra en un rango  $[0;1]$ . Una sombra más fuerte se refiere a una sombra más oscura, como si fuese generada por una luz más potente. El valor de 1 corresponde con la sombra más fuerte. Ver figura 6.12.
- Reflexiones (coeficiente especular de los materiales): activado o desactivado. Ver figura 6.13.
- Detalle de los Modelos 3D: poca cantidad de polígonos, o alta cantidad de polígonos. Esto tiene en cuenta tanto el escenario, como los enemigos y las armas del jugador (ver sección 6.4 y las figuras 6.14 y 6.15).
- Profundidad de Campo (*Depth-of-Field*): activado o desactivado. La profundidad de campo genera un efecto de desenfoque en aquellos elementos de la escena que se encuentran a determinada distancia de la cámara, mejorando así la sensación de profundidad y lejanía de los objetos. Ver figura 6.16.
- Partículas: activado o desactivado. El escenario contiene sistemas de partículas que simulan ser fuego y humo. Ver figura 6.17.

#### Audio:

- Sonido Ambiente: activado o desactivado.
- Reverberación (eco): activado o desactivado. Al estar activado, los sonidos de los enemigos y de los disparos producen eco dentro del escenario virtual.



**Figura 6.5:** Tres ejemplos con distinto valor de Campo de Visión (FOV) aplicado. FOV = 30 % (arriba), FOV = 65 % (centro) y FOV = 100 % (abajo). Se debe tener en cuenta que este efecto es mucho más notorio cuando se está utilizando el visor.



**Figura 6.6:** Escenario con texturas (arriba) y sin texturas (abajo). En el modo con texturas, éstas son representativas de cada objeto. En el modo sin texturas, se utiliza un color sólido al azar.



**Figura 6.7:** Escenario con luces puntuales, sombreado realista y sombras (arriba) y escenario sólo con luz ambiente (abajo).



**Figura 6.8:** Tres ejemplos con distinto valor de saturación aplicado. Saturación = -1 (arriba), saturación = 0 (centro) y saturación = 1 (abajo).



**Figura 6.9:** Tres ejemplos con distinto valor de brillo aplicado. Brillo = -0.8 (arriba), brillo = 0 (centro) y brillo = 0.8 (abajo).



**Figura 6.10:** Tres ejemplos con distinto valor de contraste aplicado. Contraste = -0.8 (arriba), contraste = 0 (centro) y contraste = 0.8 (abajo).



**Figura 6.11:** Tres ejemplos con distinto valor de definición aplicado. Definición = 0 (arriba), definición = 0.5 (centro) y definición = 1 (abajo).



**Figura 6.12:** Tres ejemplos con distinto valor de fuerza de sombras aplicado. Fuerza de sombras = 0 (arriba), fuerza de sombras = 0.5 (centro) y fuerza de sombras = 1 (abajo). El efecto es más notorio, por ejemplo, al ver la sombra producida por la escalera.



**Figura 6.13:** Escenario sin reflexiones (arriba) y escenario con reflexiones (abajo). Este efecto es más notorio, por ejemplo, en el material del mueble.



**Figura 6.14:** Comparación del ambiente con pocos polígonos (arriba, aproximadamente 905 mil polígonos y 1.3 millones de vértices) respecto al ambiente con muchos polígonos (abajo, aproximadamente 37 mil polígonos y 52 mil vértices). El efecto es más notorio en los objetos del escenario como las sillas, las paredes y la escalera.



**Figura 6.15:** Comparación de enemigo zombie con pocos polígonos (izquierda, aproximadamente 1700 polígonos) respecto al enemigo zombie con muchos polígonos (derecha, aproximadamente 4800 polígonos). Cuando hay muchos zombies en la escena al mismo tiempo, esta diferencia de cantidad de polígonos se vuelve más notoria. El resto de las variables se mantiene constante.



**Figura 6.16:** Campo de profundidad desactivado (arriba) y activado (abajo). Abajo se puede notar un fuerte desenfoque en los objetos lejanos.



**Figura 6.17:** Sistemas de partículas desactivado (arriba) y activado (abajo). Al utilizar el visor de RV, la distancia entre las partículas y la cámara es mucho más notoria.

- Sonido Espacial 3D: activado o desactivado. Cuando está desactivado, el usuario escucha los sonidos, pero no se puede distinguir la posición de la fuente de sonido. En este escenario particular, el usuario no podrá distinguir de dónde provienen los enemigos.

Interacciones y Seguimiento: El usuario deberá navegar a través del AV para poder realizar su tarea. Para esto dispondrá de distintas técnicas de navegación. Es importante mencionar también que el usuario se encuentra acotado dentro de la zona central del escenario delimitada por las bandas amarillas y negras (ver figura 6.14). Esta zona corresponde a una zona de 3m x 3m.

- Caminata Real (*Real Walking*): caminar como en la vida real. Esta opción no fue considerada para el experimento con un solo usuario debido a que no se contaba con el espacio físico suficiente.
- Teletransportación: el usuario apunta a dónde desea transportarse y al presionar un botón del control se traslada a dicha posición.
- *Joystick*: el usuario se mueve utilizando la palanca del *joystick*.
- Caminar en el Lugar (*Walking-in-Place - WIP*): el usuario avanzará en el AV mientras "camina en el lugar" en el mundo real, es decir, ejecutando la acción de caminar pero sin desplazarse de su posición.

## 6.6. VARIABLES DEPENDIENTES

Las variables dependientes son aquéllas que se busca investigar y cuyo valor dependerá de las variables independientes. Estas variables se miden con un cuestionario al finalizar cada prueba, en una escala del 1 al 100. Al igual que el cuestionario de Bouchard [77], cada variable se mide con una pregunta específica. Estas preguntas se basan en los cuestionarios analizados en el capítulo 3 pero no se está utilizando directamente ninguno de ellos. Es importante mencionar que antes de comenzar la prueba, se le explicó al usuario a qué hace referencia cada uno de estos conceptos y se le aclaró cualquier duda que éste pudiera tener respecto a las preguntas.

Para el presente experimento se definieron las siguientes 5 variables dependientes:

- **Inmersión Visual:** hace referencia a qué tanto de la visión del usuario es comprendida por la visualización del mundo virtual. En otras palabras se puede pensar como en qué medida se asemeja lo que el usuario está viendo en el mundo virtual respecto a cómo lo vería en el mundo real. Se mide con la pregunta “¿Qué tanto sentiste que VEÍAS de la misma forma en que VES en la vida real?”.
- **Inmersión Auditiva:** hace referencia a qué tanto la audición del usuario es comprendida por el audio presentado en el mundo virtual. En otras palabras se puede pensar como qué tanto se asemeja lo que el usuario está escuchando en el mundo virtual respecto a cómo lo escucharía en el mundo real. Se mide con la pregunta “¿Qué tanto sentiste que ESCUCHABAS de la misma forma en que ESCUCHAS en la vida real?”.

- Inmersión Táctil: hace referencia a qué tanto del sentido del tacto y la forma de caminar del usuario son comprendidos por el sistema de RV. Sin embargo, como en este experimento el usuario no debe manipular objetos, esta medición sólo corresponderá a la forma de caminar. En otras palabras se puede pensar en cuánto se asemeja la forma de caminar del usuario en el mundo virtual respecto a cómo sería en el mundo real. Se mide con la pregunta “¿Qué tanto sentiste que TOCABAS y CAMINABAS de la misma forma en que TOCÁS y CAMINÁS en la vida real?”
- Inmersión Total: hace referencia a qué tanto todos los sentidos del usuario están abarcados por el sistema de RV. En otras palabras se puede pensar como qué tanto los sentidos del usuario perciben el mundo virtual como lo harían con el mundo real. Se mide con la pregunta “¿Qué tanto sentiste que todos tus sentidos se comportaban de la misma forma en que se comportan en la vida real?”
- Presencia: hace referencia a qué tanto el usuario sintió como si verdaderamente se encontraba dentro del mundo virtual. Se mide con la pregunta “¿Qué tanto sentiste como si verdaderamente te encontrabas ahí, dentro del mundo virtual?”. Es importante tener en cuenta que aquí nos centramos en la definición de PI (*Place Illusion*) y no en la de Psi (*Plausibility Illusion*), especificadas y detalladas en el capítulo 2.

## 6.7. PROCEDIMIENTO

En el menú principal de la aplicación de RV, es decir el juego, el usuario tiene la opción de acceder a un pequeño *tutorial* en el que se detalla qué es lo que debe hacer durante el juego y el objetivo general del experimento. Antes de comenzar el juego, el usuario debe completar sus datos personales, así puede jugar varias partidas seguidas sin necesidad de volver a completarlo (ver sección 6.5).

**Cada vez que comienza una partida nueva, se establecen aleatoriamente las características de la escena. Para esto, cada una de las variables independientes se calcula aleatoriamente y dicho valor representará el comportamiento de dicha variable.** Para las variables numéricas se calculará un valor aleatorio dentro del rango establecido y para las variables categóricas se calculará un valor numérico entero que corresponderá a cada una de las categorías. La estereopsis, por ejemplo, tomará aleatoriamente el valor 0 ó 1, donde 0 corresponde al modo sin estereopsis y 1 al modo con estereopsis; para la fuerza de la sombra se calculará un valor decimal aleatorio entre 0.0 y 1.0. Cuando comienza una nueva partida, se calculan todas estos valores para las variables independientes. Así, se genera el escenario virtual en función de dichas variables y sus valores calculados.

El modo de caminar también se define aleatoriamente al inicio de cada partida. Al comienzo de la partida, el participante dispondrá de 10 segundos sin enemigos para familiarizarse con el modo de caminar.

El tiempo de duración de la partida también es algo que se define al inicio de la prueba, calculándose aleatoriamente entre 120 segundos (2 minutos) y 1200 segundos (20 minutos) por prueba. El usuario podrá ver en todo momento el tiempo que le queda para finalizar la partida. Es importante mencionar que el jugador puede perder antes de alcanzar el tiempo establecido. Como se desea finalmente considerar el tiempo que el usuario se encontró dentro del mundo virtual, en caso de perder, se considerará el tiempo transcurrido desde que comenzó la partida. Si se pierde la partida antes de los 120 segundos, se considerará el tiempo transcurrido, que será menor a 120 segundos. En caso de alcanzar el tiempo objetivo, ése será el tiempo considerado.

La partida finaliza ya sea cuando el participante sobrevive durante el tiempo determinado o cuando pierde. El participante pierde cuando un enemigo se acerca lo suficiente. Al finalizar la partida los enemigos que estén todavía en la escena desaparecerán y dejarán de aparecer nuevos.

Siguiente los principios propuesto por Slater et al. [107], es importante realizar las mediciones lo antes posible luego de la experiencia. Una pantalla aparecerá flotando en frente del usuario, en donde este último deberá responder preguntas relacionadas con las variables dependientes del experimento, esto es, inmersión visual, inmersión auditiva, inmersión táctil, inmersión total y presencia (ver figura 6.18).

Para cada una de éstas, el usuario dispondrá de un *slider* en donde podrá asignar un valor de entre 1 y 100 siendo 1, por ejemplo, nada inmersivo y 100 totalmente inmersivo. Se optó por utilizar un *slider* en lugar de un *pad* numérico debido a que el *slider* provee una mejor visualización del valor seleccionado dentro del rango. Además, para este experimento, la precisión no es tan relevante, es decir, no importa mucho si el usuario selecciona por ejemplo un 52 o un 53.

Una vez respondidas las 5 preguntas respecto a las variables dependientes, el usuario podrá guardar los datos o podrá elegir no hacerlo. Esto último se agregó para considerar los casos en los que se produzca algún problema técnico, o de otra índole, que interfiera con el experimento. Así, no se considerarán dichos datos y es como si la partida nunca hubiese ocurrido.

Finalmente, es importante mencionar que el participante descansó al menos 5 minutos entre cada prueba y que en ningún momento se presentaron síntomas de *cybersickness*.



**Figura 6.18:** Menú que se muestra cuando el participante termina la partida (arriba). Menú con *slider* donde el participante selecciona un valor para su respuesta (abajo).

## 6.8. RESULTADOS

Todos los datos del experimento fueron volcados en un *dataset* para su futuro análisis. Los datos recolectados durante cada partida constituyen una *muestra* en el *dataset*, donde cada fila representa cada muestra y cada columna representa cada variable. Para este experimento el participante realizó 401 pruebas satisfactorias, generando 401 filas en el *dataset*. En la tabla 6.1 se muestran las primeras 30 muestras del *dataset* apreciándose las variables involucradas y sus valores. Aquí, los valores de las variables categóricas ya fueron establecidos con el nombre correspondiente. Por ejemplo en la variable *estereopsis*, “Activado” para el valor 1 y “Desactivado” para el valor 0.

## 6.9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los sistemas de RV buscan maximizar la inmersión, pero el grado en el que cada una de las variables del sistema afectan la inmersión ha sido y sigue siendo un tema de discusión e investigación desde los comienzos de la RV. El presente capítulo detalla el diseño y desarrollo del experimento llevado a cabo que conduce a la obtención de una métrica de inmersión a partir de los datos. El objetivo del este experimento es el de obtener un conjunto de datos que permitan evaluar la relación entre las distintas variables que influyen en la sensación de inmersión y generar, a partir de éstas, una métrica que permita calcular o predecir el grado de inmersión de un sistema de RV dado, en función de dichas variables.

Aunque en este caso el experimento solo pudo realizarse con un solo usuario, está demostrado que un estudio del tipo *single-subject design* también puede aportar datos relevantes. El desarrollo del sistema utilizado para este experimento está pensado para poder realizar experimentos con muchos participantes sin ninguna modificación extra. En el trabajo futuro sin duda se considera realizar esto en cuanto sea posible.



Se realizaron entrevistas informales con el participante tras finalizar las pruebas para conocer cualquier comentario que éste tuviera sobre el experimento. El participante mencionó que siempre se vio motivado durante la experiencia. El nivel de dificultad incremental en función del tiempo hace posible que el usuario no se aburra ni pierda interés de la experiencia.

El participante mencionó también que una de las condiciones en la que sintió menos presencia era cuando los FPS (*Frame Rate*) eran muy bajos. Esto generaba una sensación poco natural y hasta llegaba a ocasionar síntomas de *cybersickness*. En el siguiente capítulo se analiza entonces la relación entre la variable FPS y la presencia percibida por el usuario.

Otro comentario interesante del participante se relaciona con la presencia percibida cuando perdía la partida. En estos casos, un zombie se acerca al jugador hasta el punto de “comerlo”. El participante reportó que esto ocasionó algunos sustos y que sintió un nivel más elevado de presencia en estos casos. Este dato resulta interesante ya que la literatura relacionada con presencia ha reportado que ésta es mayor cuando se estimulan las emociones. Aunque esto escapa de la inmersión y del trabajo principal de esta tesis, resultará interesante analizar la presencia percibida por el usuario en aquellos casos en los que haya perdido la partida. Esta relación también se analizará en el capítulo siguiente.

Finalmente, el participante comentó que se sintió mucho más inmerso en las pruebas en las que utilizaba auriculares. Esto sugiere que, al menos en este caso, el sonido es muy importante para generar inmersión, cosa que concuerda con lo presente en la literatura. Resultará muy interesante analizar qué ocurre entonces en aquellos casos en los que el participante utilizó auriculares y compararlo con los casos en los que no los utilizó.

Los siguientes capítulos presentan los análisis estadísticos que se realizaron para evaluar la relación entre las distintas variables, así como también los análisis de regresión que se utilizaron para hallar una métrica (o un modelo de regresión) que relacione las distintas variables. El capítulo siguiente presenta los análisis y evaluaciones que se llevaron a cabo a partir de los datos obtenidos del experimento.



# 7

## Análisis Estadístico

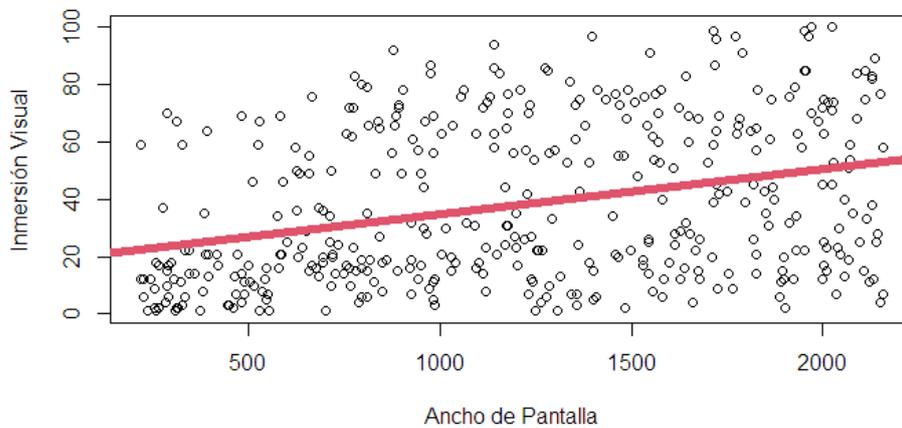
### 7.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este trabajo es el de hallar una métrica de inmersión en función de las variables del sistema. Como primer paso se determinaron dichas variables y se diseñó e implementó un experimento, detallado en el capítulo 6, cuyo resultado fue la generación de un *dataset* de 401 muestras. Estos datos permitirán determinar si existen diferencias entre determinadas variables y el grado de incidencia de dichas variables en la inmersión total. Por ejemplo, en el caso de la estereopsis, podemos analizar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre aplicar estereopsis o no, respecto a la inmersión visual. Este proceso puede aplicarse para todas las variables que se deseen analizar.

En el presente capítulo, se describen los análisis estadísticos realizados sobre las variables del experimento. Para analizar si existen diferencias estadísticamente significativas en las variables categóricas, se utilizó el test de ANOVA o el test de Kruskal-Wallis en función de la distribución de los datos. Las distribuciones normales o gaussianas deben ser analizadas con ANOVA, mientras que las no normales (o no gaussianas) deben analizarse utilizando el test de Kruskal-Wallis. En aquellos casos en los que se hallen diferencias significativas en variables categóricas de más de 2 factores, se utilizó el test de Dunn con corrección Bonferroni para determinar entre qué factores se produce la diferencia significativa. Para determinar las diferencias estadísticamente significativas, se consideró un intervalo del 95 % ( $p < 0,05$ ).

En el caso de los análisis de correlación, se utilizó la correlación de Pearson para evaluar la relación lineal entre dos variables continuas. En caso de evaluarse la relación lineal entre variables ordinales, se utilizó la correlación de Spearman. El valor del “tamaño del efecto” (*effect size* en inglés) de una correlación varía el coeficiente de correlación  $r \in [-1, 1]$ . Si  $r = -1$ , se produce una correlación perfectamente negativa, y si  $r = 1$  una correlación perfectamente positiva. Es importante mencionar que si por ejemplo  $r = 0$  esto representa que la correlación no es lineal, pero puede producirse otro tipo de correlación. Según Cohen [243], el efecto es bajo si el valor absoluto de  $r$  varía alrededor de 0.1, es medio si el valor absoluto de  $r$  varía alrededor de 0.3 y es grande si el valor absoluto de  $r$  varía alrededor de 0.5 o es mayor. Utilizamos esta convención para determinar el grado de correlación entre las variables del experimento.

A continuación se detallan los análisis estadísticos realizados para cada tipo de inmersión, es decir, la inmersión visual, auditiva y táctil. Luego, se analiza la relación entre todas las variables del experimento y la inmersión total, así como también con la presencia. El presente capítulo culmina con la sección 7.7, en la que se presenta el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones, y se proponen líneas a considerar para el trabajo futuro.



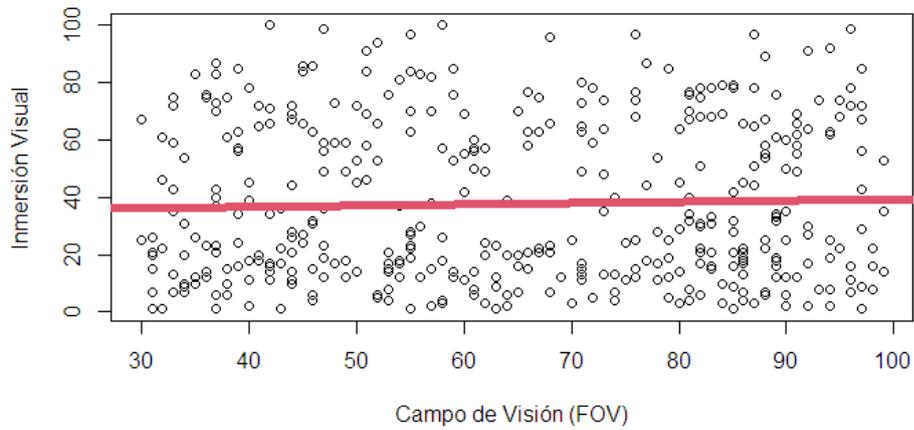
**Figura 7.1:** Relación entre el ancho de pantalla y la inmersión visual ( $r(401) = 0,33, p < 0,01$ ).

## 7.2. VARIABLES DE INMERSIÓN VISUAL

### 7.2.1. RESOLUCIÓN DE PANTALLA

La resolución de pantalla se compone de un ancho de pantalla y un alto de pantalla. Sin embargo, estas dos medidas están directamente relacionadas, es decir, siempre se incrementan proporcionalmente. Por este motivo, no tiene sentido analizar qué sucede con cada una de ellas, sino que simplemente se analiza cualquiera de las dos. En este caso utilizamos el ancho de pantalla, pero se encontrarían los mismos resultados si se utilizara el alto. Cabe recordar que en el presente experimento las distintas resoluciones de pantalla utilizadas son virtuales, es decir, como el usuario siempre utiliza el mismo visor, la resolución física de la pantalla del visor nunca cambia; ésta se cambia por *software*.

La figura 7.1 muestra la relación entre el ancho de pantalla y la inmersión visual. Se halló una correlación media positiva entre las variables ( $r(401) = 0,33, p < 0,01$ ).



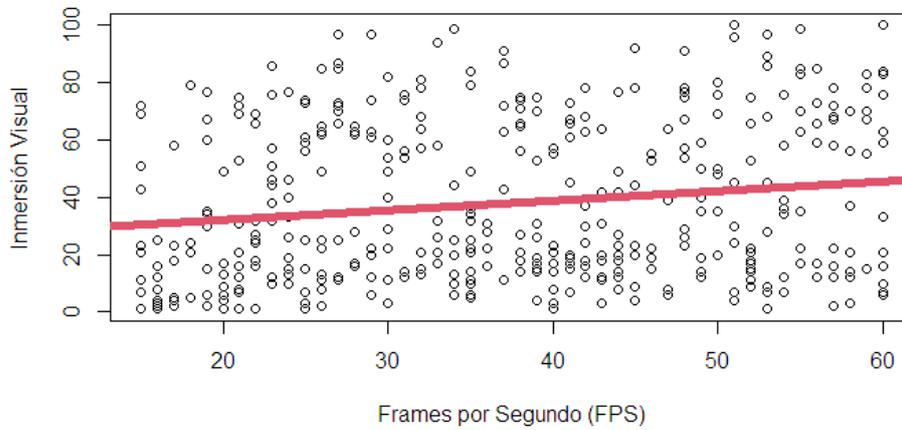
**Figura 7.2:** Relación entre el campo de visión y la inmersión visual ( $r(401) = 0,033, p = 0,5$ ).

#### 7.2.2. CAMPO DE VISIÓN (FOV)

La figura 7.2 muestra la relación entre el campo de visión y la inmersión visual. En este caso, se halló una correlación casi nula entre las variables ( $r(401) = 0,033, p = 0,5$ ).

#### 7.2.3. TASA DE REFRESCO

Como se mencionó en el capítulo 6, para controlar la tasa de refresco se manipuló el valor de los *frames por segundo* (FPS). La relación entre los frames por segundo y la inmersión visual se puede apreciar en la figura 7.3. Se halló una correlación baja entre las variables ( $r(401) = 0,164, p < 0,01$ ).



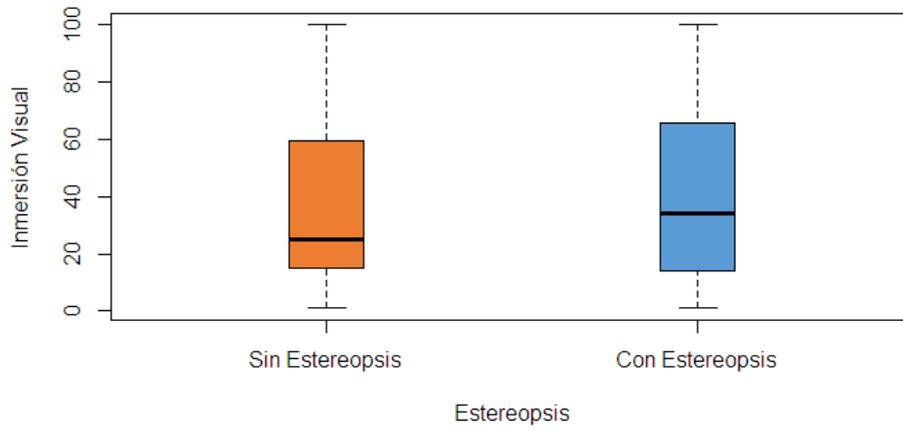
**Figura 7.3:** Relación entre el los FPS y la inmersión visual ( $r(401) = 0,164$ ,  $p < 0,01$ ).

#### 7.2.4. ESTEREOPSIS

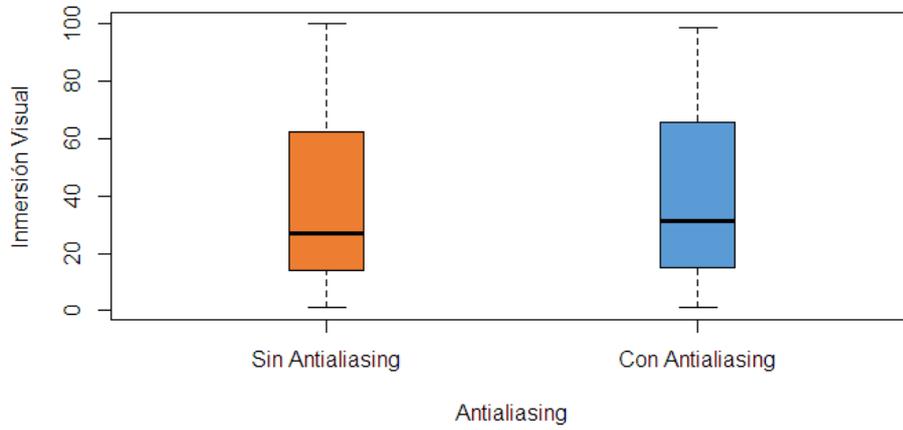
La relación entre la estereopsis y la inmersión visual puede apreciarse en la figura 7.4. En este caso, no existe una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual cuando la estereopsis está activada o desactivada ( $\chi^2 = 1,863$ ,  $p = 0,172$ ).

#### 7.2.5. ANTIALIASING

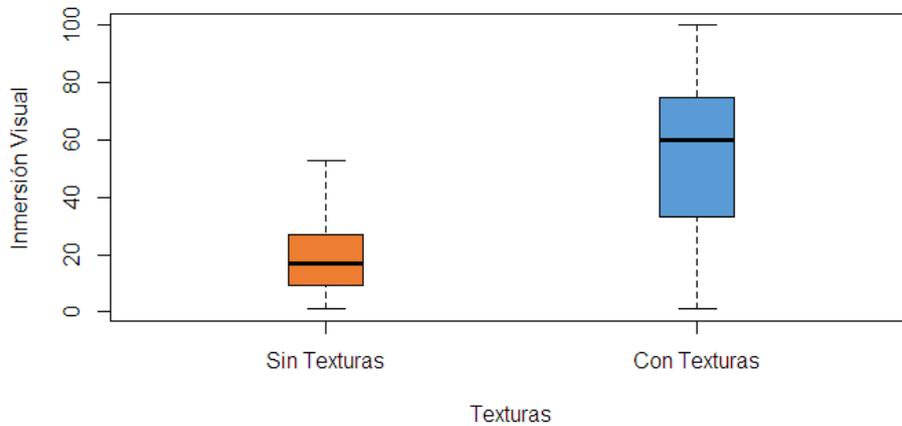
La relación entre el *antialiasing* y la inmersión visual puede apreciarse en la figura 7.5. No se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual cuando el *antialiasing* está activado o desactivado ( $\chi^2 = 0,475$ ,  $p = 0,49$ ).



**Figura 7.4:** Relación entre la estereopsis y la inmersión visual ( $\chi^2 = 1,863$ ,  $p = 0,172$ ).



**Figura 7.5:** Relación entre el *antialiasing* y la inmersión visual ( $\chi^2 = 0,475$ ,  $p = 0,49$ ).



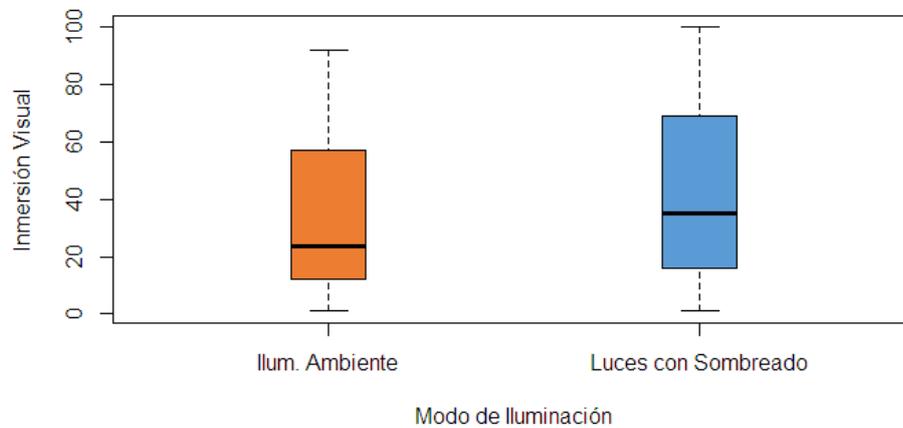
**Figura 7.6:** Relación entre las texturas y la inmersión visual ( $\chi^2 = 133,38$ ,  $p < 0,1$ ).

#### 7.2.6. TEXTURAS

La figura 7.6 muestra la relación entre la aplicación de texturas y la inmersión visual. En este caso sí se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual cuando las texturas están activadas respecto a cuando están desactivadas ( $\chi^2 = 133,38$ ,  $p < 0,1$ ).

#### 7.2.7. ILUMINACIÓN

Como se detalló en el capítulo 6 la variable *iluminación* tiene 2 modos: iluminación ambiente y luces con sombreado. La relación entre el modo de iluminación y la inmersión visual puede verse en la figura 7.7. En este caso también se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual entre los distintos modos de iluminación ( $\chi^2 = 8,118$ ,  $p < 0,1$ ).



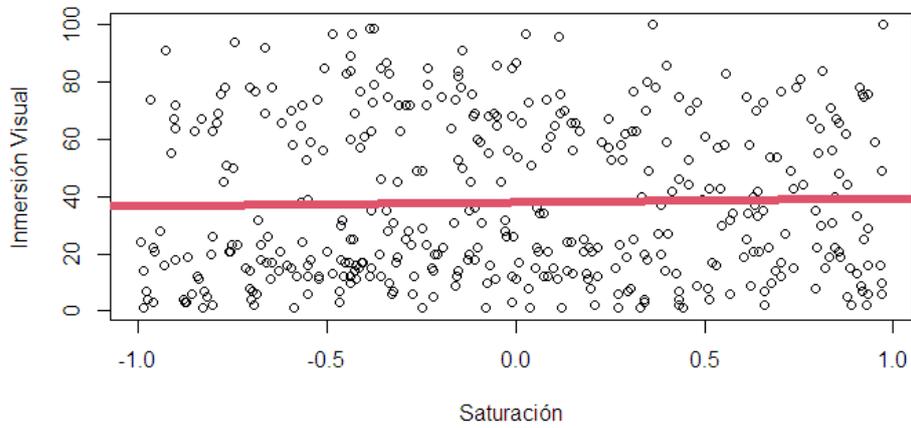
**Figura 7.7:** Relación entre el modo de iluminación y la inmersión visual ( $\chi^2 = 8,118$ ,  $p < 0,1$ ).

#### 7.2.8. SATURACIÓN

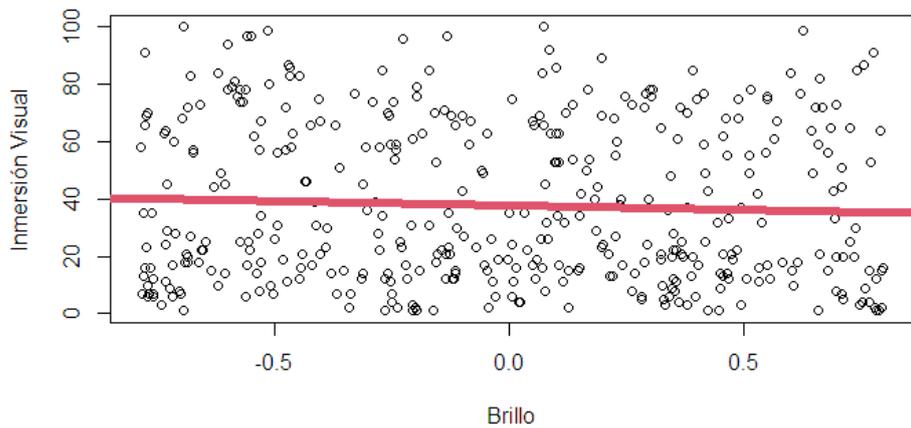
La relación entre la saturación y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.8. Se halló una correlación muy baja o casi nula entre las variables ( $r(401) = 0,026$ ,  $p = 0,596$ ).

#### 7.2.9. BRILLO

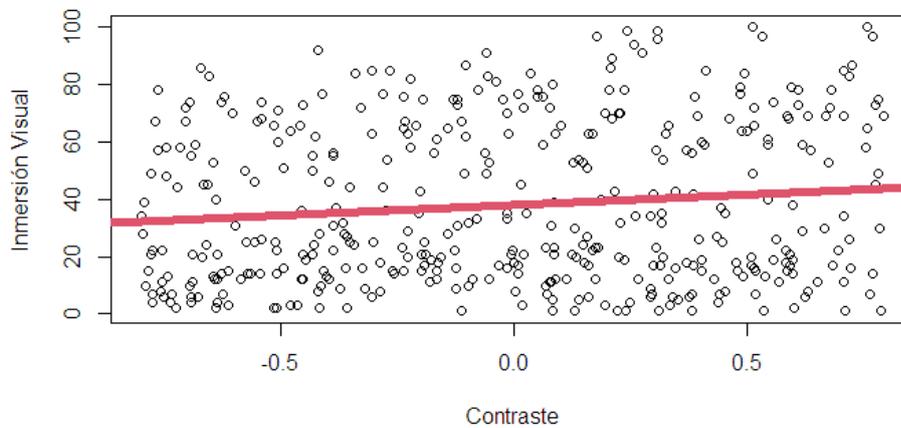
La relación entre el brillo y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.9. Se halló una correlación muy baja (negativa en este caso) o casi nula entre las variables ( $r(401) = -0,05$ ,  $p = 0,316$ ).



**Figura 7.8:** Relación entre la saturación y la inmersión visual ( $r_{(401)} = 0,026$ ,  $p = 0,596$ ).



**Figura 7.9:** Relación entre el brillo y la inmersión visual ( $r_{(401)} = -0,05$ ,  $p = 0,316$ ).



**Figura 7.10:** Relación entre el contraste y la inmersión visual ( $r(401) = 0,116$ ,  $p = 0,02$ ).

#### 7.2.10. CONTRASTE

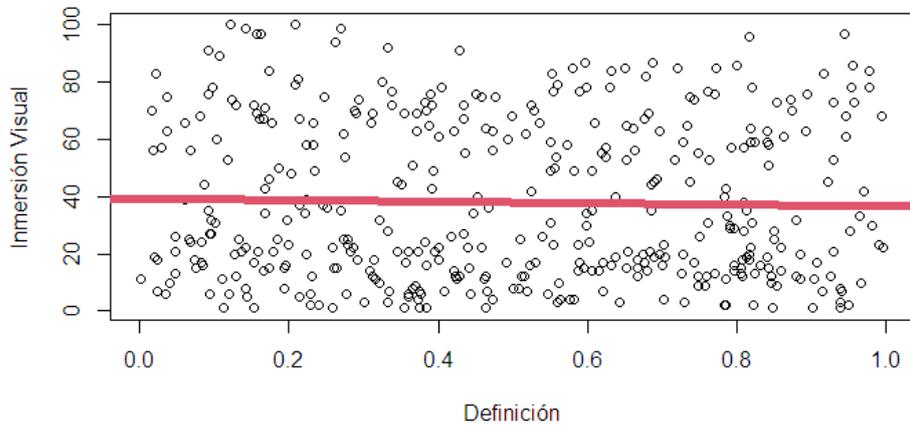
La relación entre el contraste y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.10. Se halló una correlación baja entre las variables ( $r(401) = 0,116$ ,  $p = 0,02$ ).

#### 7.2.11. DEFINICIÓN

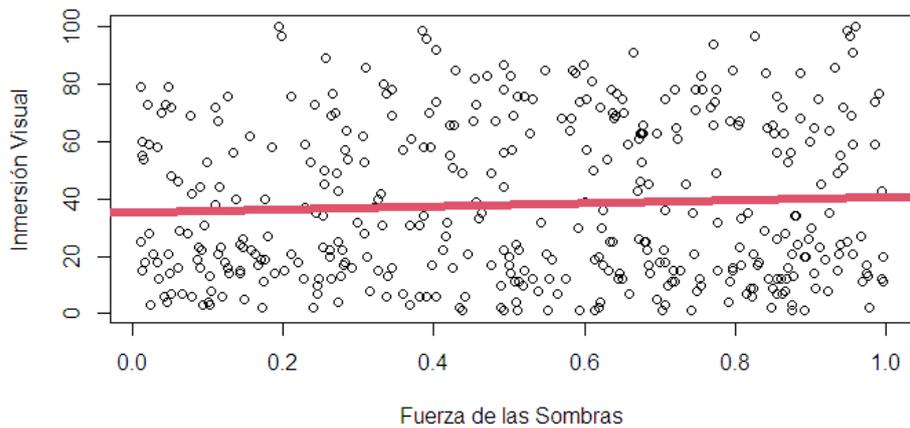
La relación entre la definición y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.11. Se halló una correlación muy baja o casi nula entre las variables ( $r(401) = -0,025$ ,  $p = 0,617$ ).

#### 7.2.12. FUERZA DE LAS SOMBRAS

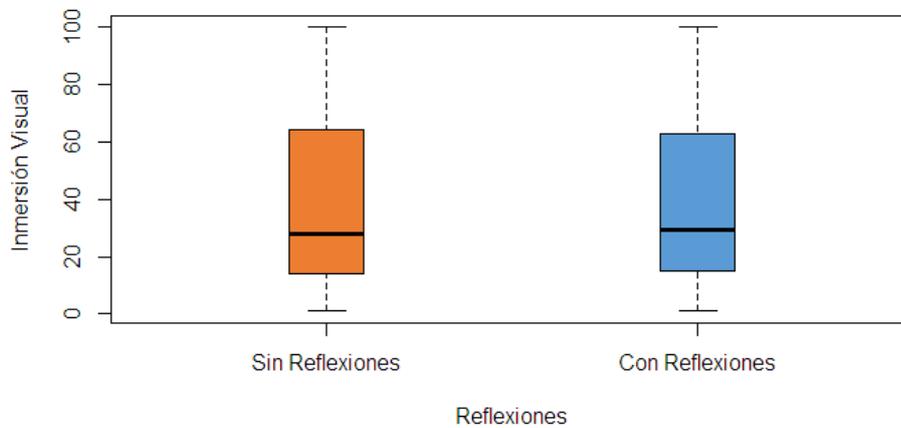
La relación entre la fuerza de las sombras y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.12. Se halló una correlación muy baja o casi nula entre las variables ( $r(401) = 0,057$ ,  $p = 0,254$ ).



**Figura 7.11:** Relación entre la definición y la inmersión visual ( $r_{(401)} = -0,025$ ,  $p = 0,617$ ).



**Figura 7.12:** Relación entre la fuerza de las sombras y la inmersión visual ( $r_{(401)} = 0,057$ ,  $p = 0,254$ ).



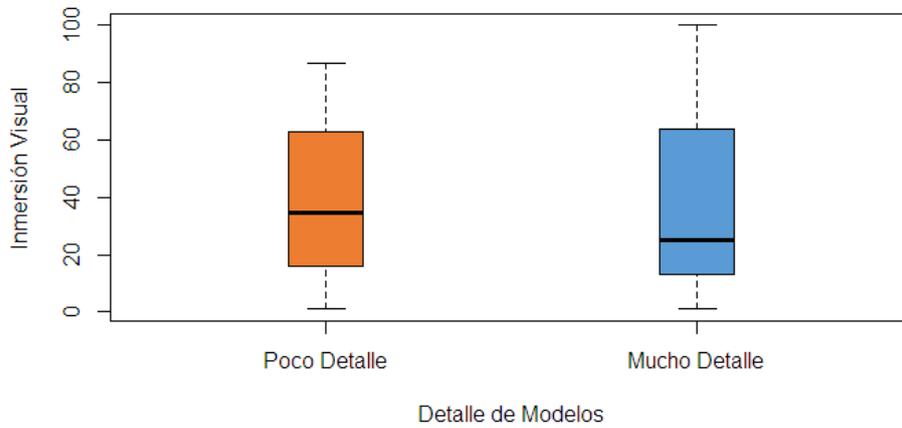
**Figura 7.13:** Relación entre la aplicación de reflexiones y la inmersión visual ( $\chi^2 = 0,001$ ,  $p = 0,968$ ).

#### 7.2.13. REFLEXIONES

La relación entre la aplicación de reflexiones y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.13. No se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual cuando las reflexiones están activadas o desactivadas ( $\chi^2 = 0,001$ ,  $p = 0,968$ ).

#### 7.2.14. DETALLE DE LOS MODELOS

La relación entre el detalle de los modelos y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.14. No se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual respecto al detalle de los modelos ( $\chi^2 = 0,662$ ,  $p = 0,415$ ).



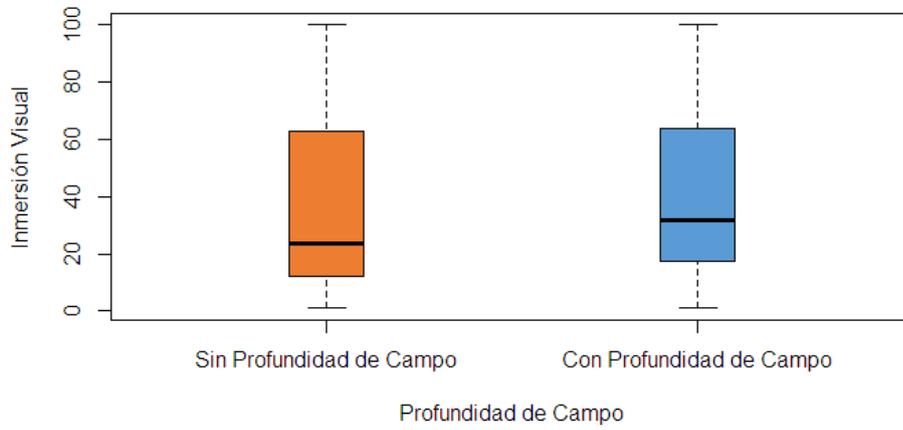
**Figura 7.14:** Relación entre el detalle de los modelos y la inmersión visual ( $\chi^2 = 0,662, p = 0,415$ ).

#### 7.2.15. PROFUNDIDAD DE CAMPO

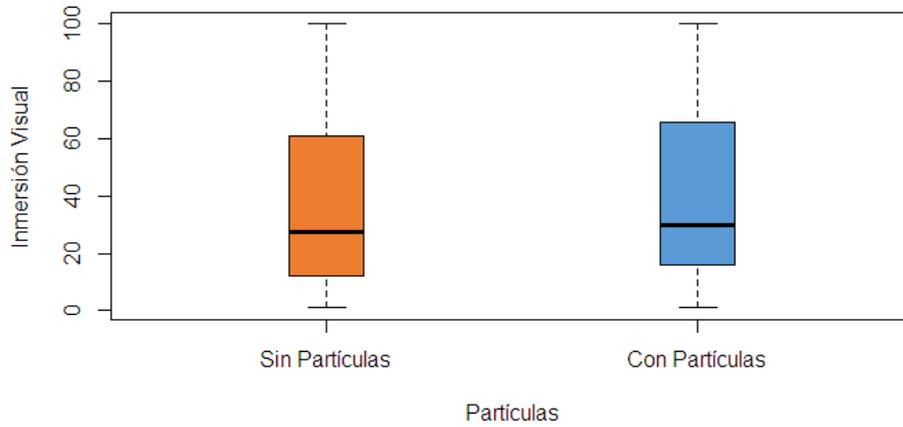
La relación entre la profundidad de campo y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.15. Se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual respecto la profundidad de campo ( $\chi^2 = 5,029, p = 0,024$ ).

#### 7.2.16. PARTÍCULAS

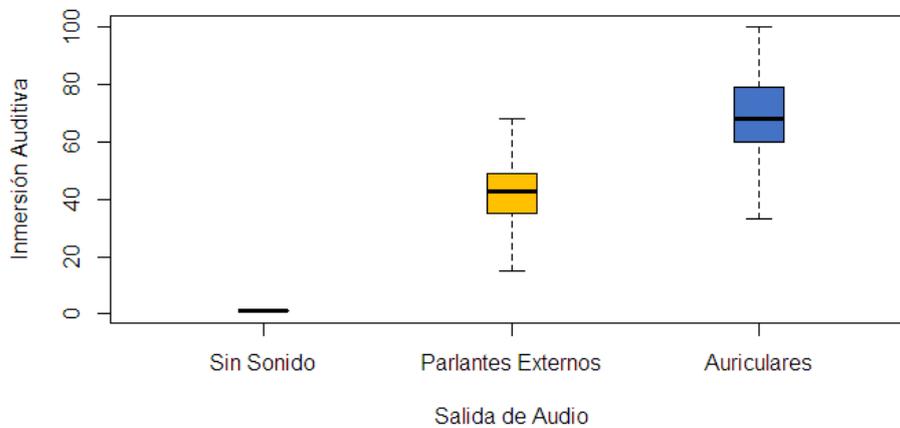
La relación entre la aplicación de partículas y la inmersión visual se puede ver en la figura 7.16. No se halló una diferencia estadísticamente significativa en la inmersión visual respecto la profundidad de campo ( $\chi^2 = 2,860, p = 0,090$ ).



**Figura 7.15:** Relación entre la profundidad de campo y la inmersión visual ( $\chi^2 = 5,029$ ,  $p = 0,024$ ).



**Figura 7.16:** Relación entre la aplicación de partículas y la inmersión visual ( $\chi^2 = 2,860$ ,  $p = 0,090$ ).

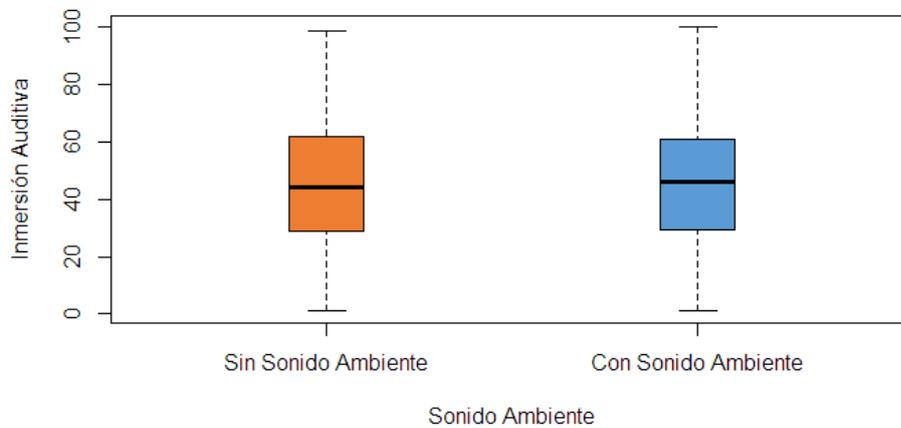


**Figura 7.17:** Relación entre la salida de audio y la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 298,576$ ,  $p < 0,01$ ).

### 7.3. VARIABLES DE INMERSIÓN AUDITIVA

#### 7.3.1. TIPO DE SALIDA DE AUDIO

Durante el experimento el participante experimentó la salida de audio de 3 maneras diferentes: utilizando auriculares, utilizando parlantes o altavoces y sin utilizar ningún tipo de sonido alguno. La influencia de estos tipos de salida de audio en la inmersión auditiva puede verse en la figura 7.17. Los resultados del análisis estadístico revelaron una diferencia estadísticamente significativa entre los tipos de salida de audio ( $\chi^2 = 298,576$ ,  $p < 0,01$ ). El análisis posterior revela que la diferencia se produce entre todos los grupos, es decir, cada grupo es estadísticamente diferente de los demás.



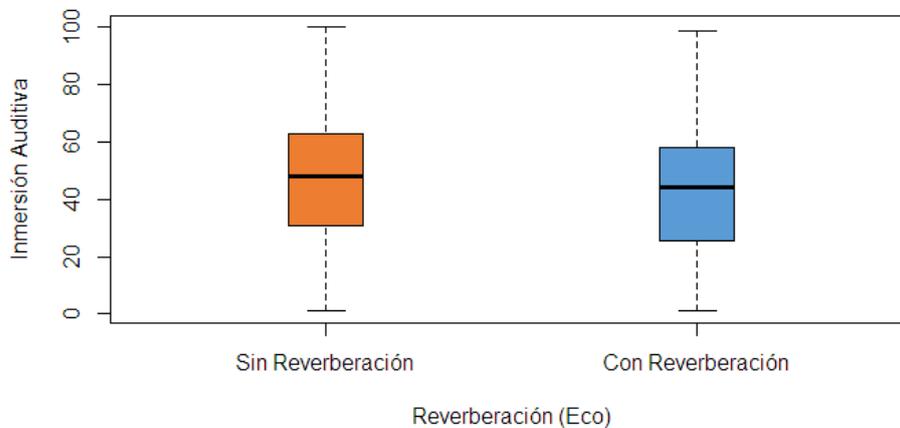
**Figura 7.18:** Relación entre el sonido ambiente y la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 0,193$ ,  $p = 0,659$ ).

### 7.3.2. SONIDO AMBIENTE

La relación entre el sonido ambiente y la inmersión auditiva puede verse en la figura 7.18. No se halló una diferencia estadísticamente significativa entre utilizar sonido ambiente o no en la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 0,193$ ,  $p = 0,659$ ).

### 7.3.3. REVERBERACIÓN

La relación entre la reverberación y la inmersión auditiva puede verse en la figura 7.19. No se halló una diferencia estadísticamente significativa entre utilizar reverberación o no en la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 3,177$ ,  $p = 0,074$ ).

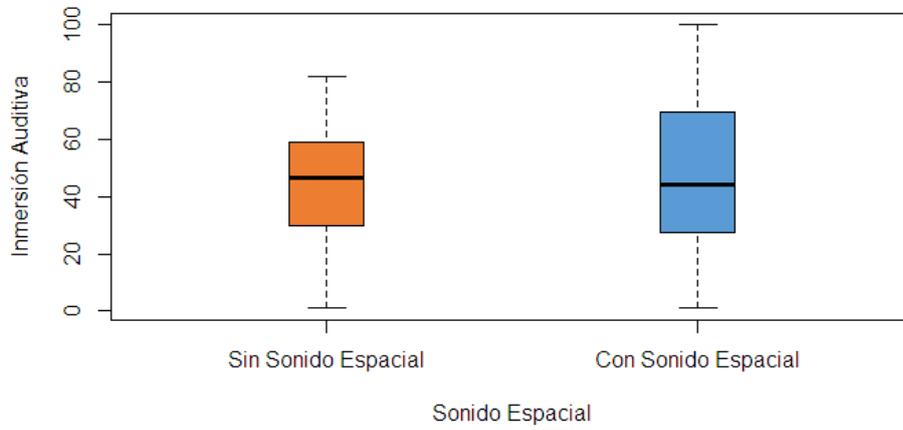


**Figura 7.19:** Relación entre la reverberación y la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 3,177$ ,  $p = 0,074$ ).

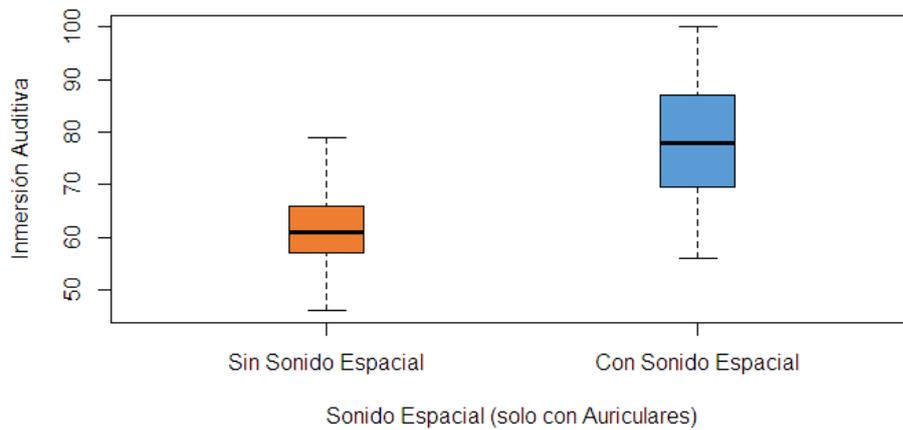
#### 7.3.4. SONIDO ESPACIAL 3D

La relación entre el sonido espacial y la inmersión auditiva puede verse en la figura 7.20. No se halló una diferencia estadísticamente significativa entre utilizar sonido espacial o no en la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 0,739$ ,  $p = 0,39$ ). Sin embargo, es importante recalcar que el sonido espacial 3D sólo es completamente detectable en los casos en los que el participante se encuentra utilizando auriculares. Esto es, si no hay sonido tiene sentido que no exista diferencia entre utilizar sonido espacial y no utilizarlo; y, cuando se utilizan parlantes externos, se puede llegar a percibir un cambio en el sonido pero éste no será correcto ya que no se tiene en cuenta la posición de los parlantes respecto al usuario cuando, por ejemplo, éste gira.

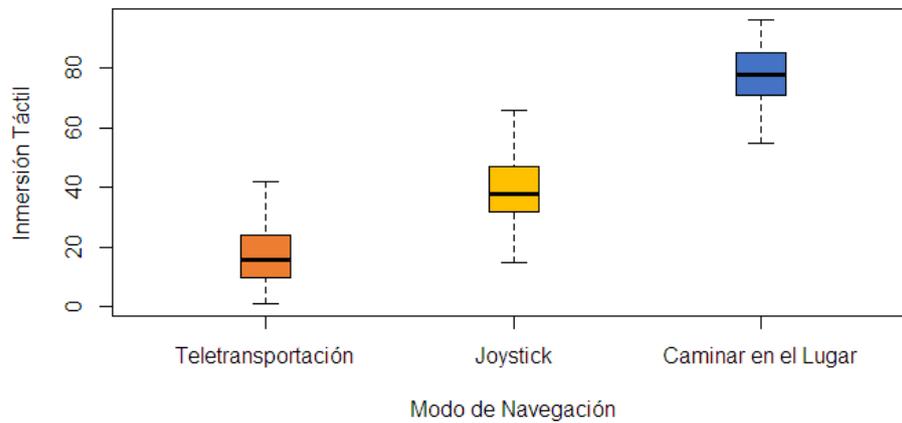
Por este motivo, resulta también interesante el análisis del sonido espacial 3D sólo en aquellos casos en los que se utilizaron auriculares. Esto puede verse en la figura 7.21. En este caso sí se halló una diferencia estadísticamente significativa en la utilización de sonido espacial 3d respecto a la inmersión visual ( $\chi^2 = 50,302$ ,  $p < 0,01$ ).



**Figura 7.20:** Relación entre el sonido espacial y la inmersión auditiva ( $\chi^2 = 0,739$ ,  $p = 0,39$ ).



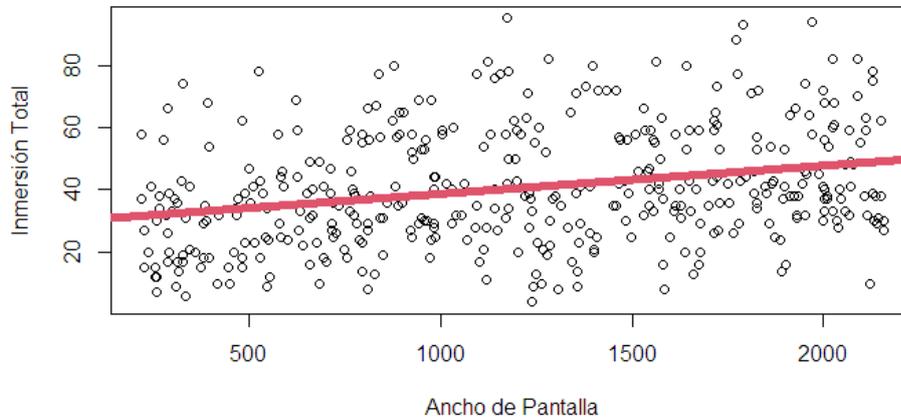
**Figura 7.21:** Relación entre el sonido espacial y la inmersión auditiva sólo cuando se utilizan auriculares ( $\chi^2 = 50,302$ ,  $p < 0,01$ ).



**Figura 7.22:** Relación entre los distintos modos de navegación y la inmersión táctil ( $\chi^2 = 294,77$ ,  $p < 0,01$ ).

#### 7.4. VARIABLES DE INMERSIÓN TÁCTIL

Como se mencionó anteriormente, para este experimento la componente de inmersión táctil que se evaluó es la relacionada con la navegación. Se evaluaron 3 tipos distintos de navegación: teletransportación, utilizando *joystick* y caminar en el lugar. Los resultados del análisis estadístico revelaron que efectivamente existe una diferencia estadísticamente significativa entre los modos de navegación ( $\chi^2 = 294,77$ ,  $p < 0,01$ ), lo que puede apreciarse claramente en la figura 7.22. El análisis posterior revela que la diferencia se produce entre todos los grupos, es decir, cada grupo es estadísticamente diferente de los demás.

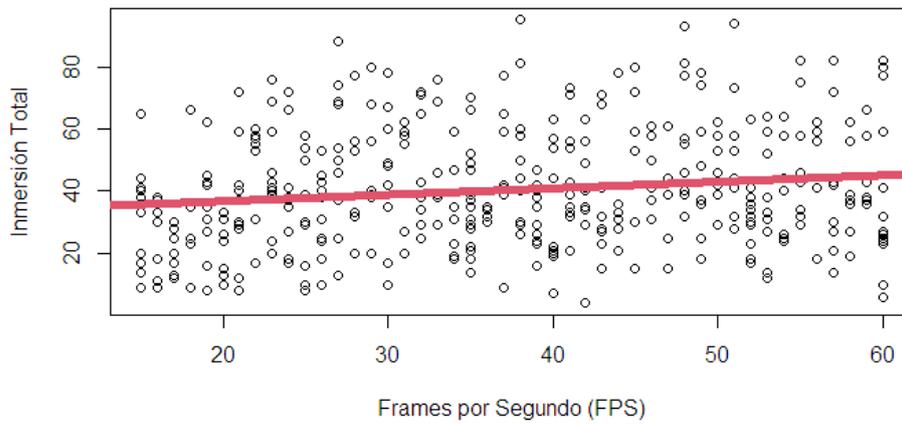


**Figura 7.23:** Relación entre el ancho de pantalla y la inmersión total ( $r(401) = 0,276, p < 0,01$ ).

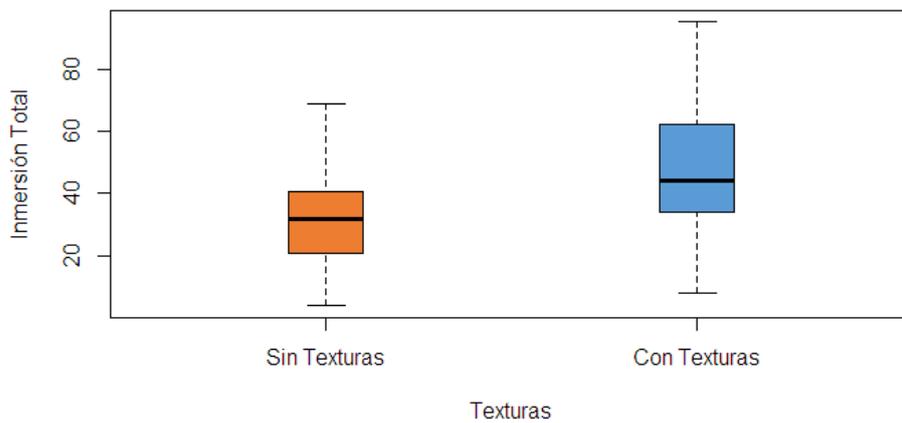
## 7.5. VARIABLES DE INMERSIÓN TOTAL

La inmersión total es una variable que depende de las variables independientes del experimento. De la misma forma en que se analizó con cada tipo de inmersión particular, en el presente análisis se evaluará cuáles de las variables dependientes que influyen en la inmersión total.

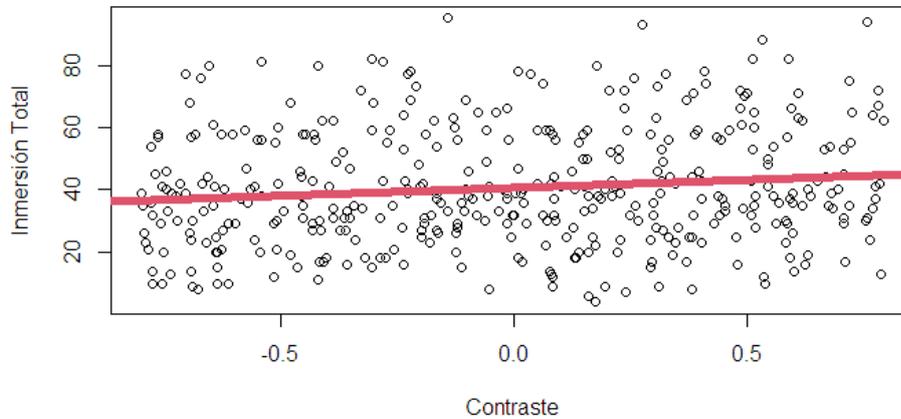
Teniendo en cuenta aquellas variables relacionadas con la inmersión visual, en lo que respecta a la inmersión total se halló una correlación media con el ancho de pantalla ( $r(401) = 0,276, p < 0,01$ ) (ver figura 7.23), una correlación baja con los *frames por segundo* ( $r(401) = 0,148, p < 0,01$ ) (ver figura 7.24), una diferencia significativa entre utilizar texturas y no utilizarlas ( $\chi^2 = 65,017, p < 0,01$ ) (ver figura 7.25) y finalmente una correlación baja con el contraste ( $r(401) = 0,125, p = 0,012$ ) (ver figura 7.26).



**Figura 7.24:** Relación entre los *frames* por segundo y la inmersión total ( $r_{(401)} = 0,148$ ,  $p < 0,01$ ).



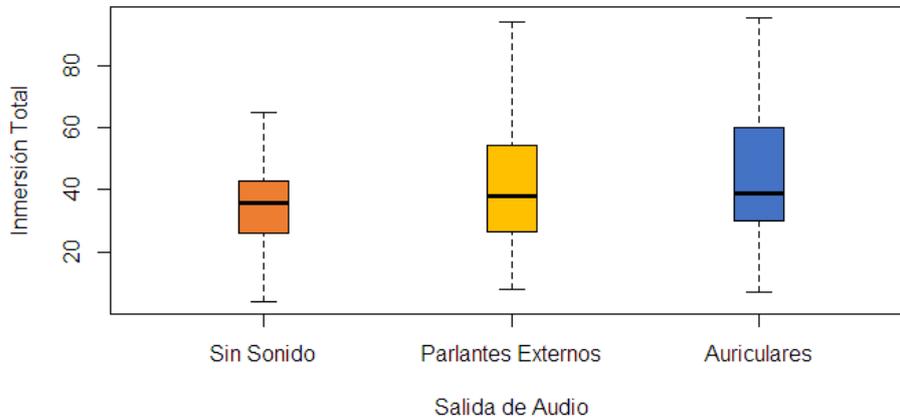
**Figura 7.25:** Relación entre las texturas y la inmersión total ( $\chi^2 = 65,017$ ,  $p < 0,01$ ).



**Figura 7.26:** Relación entre el contraste y la inmersión total ( $r_{(401)} = 0,125$ ,  $p = 0,012$ ).

Por el contrario, considerando la inmersión total, no se halló correlación con respecto al campo de visión ( $r_{(401)} = 0,001$ ,  $p = 0,99$ ), no se halló diferencia significativa entre habilitar o no habilitar la estereopsis ( $\chi^2 = 2,083$ ,  $p = 0,148$ ), entre habilitar o no habilitar el antialiasing ( $\chi^2 = 0,131$ ,  $p = 0,716$ ) y entre utilizar luces con sombreado respecto a utilizar luz ambiente ( $\chi^2 = 2,812$ ,  $p = 0,093$ ). No se halló correlación respecto a la saturación ( $r_{(401)} = -0,003$ ,  $p = 0,95$ ), al brillo ( $r_{(401)} = 0,056$ ,  $p = 0,257$ ), a la definición ( $r_{(401)} = 0,001$ ,  $p = 0,099$ ) ni a la fuerza de las sombras ( $r_{(401)} = 0,082$ ,  $p = 0,989$ ). Tampoco se halló diferencia significativa con respecto a habilitar o no habilitar reflexiones ( $\chi^2 = 0,174$ ,  $p = 0,676$ ), a utilizar modelos con poco o alto detalle ( $\chi^2 = 0,516$ ,  $p = 0,472$ ), a habilitar o no habilitar la profundidad de campo ( $\chi^2 = 2,951$ ,  $p = 0,085$ ) y finalmente a habilitar o no habilitar las partículas ( $\chi^2 = 1,112$ ,  $p = 0,291$ ).

Respecto a las variables de audio, se halló una diferencia estadísticamente significativa entre los distintos modos de salida de audio ( $\chi^2 = 8,222$ ,  $p = 0,02$ ). El test de Dunn sugiere que esta diferencia se encuentra entre el grupo sin sonido y el grupo con auriculares. Esto puede apreciarse en la figura 7.27.

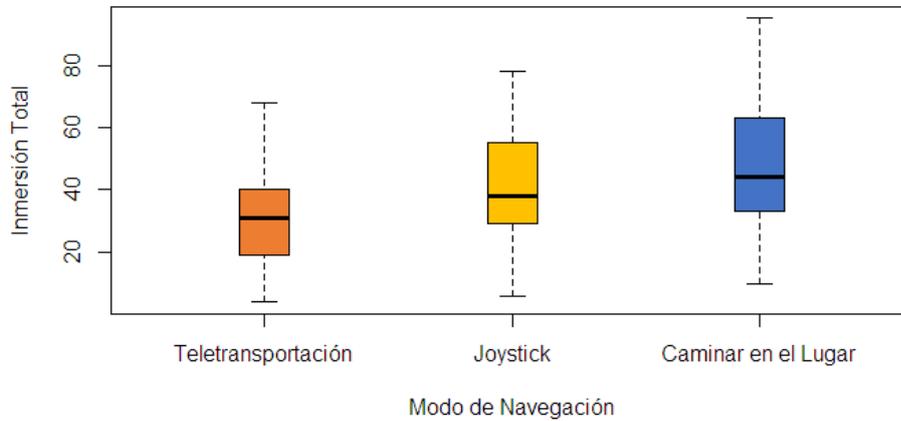


**Figura 7.27:** Relación entre la salida de audio y la inmersión total ( $\chi^2 = 8,222$ ,  $p = 0,02$ ).

No se halló una diferencia significativa respecto al sonido ambiente ( $\chi^2 = 0,075$ ,  $p = 0,783$ ), ni respecto a la reverberación ( $\chi^2 = 2,208$ ,  $p = 0,1973$ ), ni tampoco respecto al sonido espacial 3D, incluso cuando se considera solo la utilización de auriculares ( $\chi^2 = 0,160$ ,  $p = 0,688$ ).

En cuanto a la relación con la inmersión táctil, se halló una diferencia estadísticamente significativa entre los modos de navegación ( $\chi^2 = 28,074$ ,  $p < 0,01$ ). Esto puede verse en la figura 7.28. El análisis posterior con el test de Dunn reveló que la diferencia se produce entre todos los grupos entre sí.

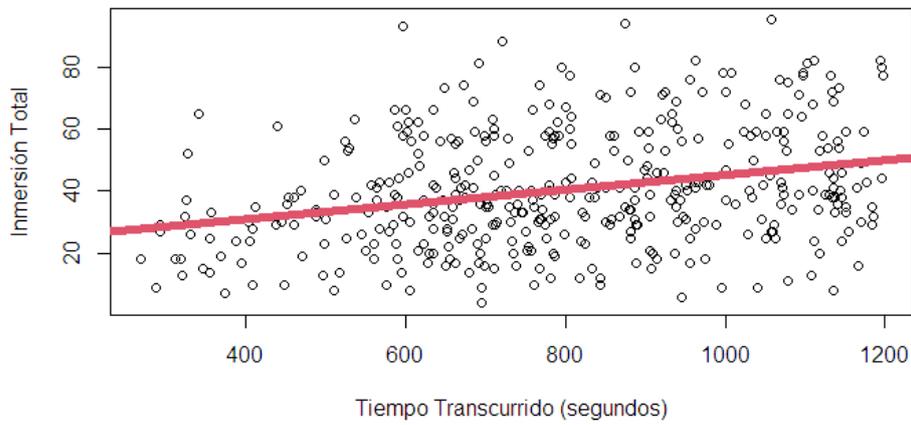
En el capítulo 6 se mencionó que además de las variables relacionadas directamente con la inmersión, el experimento incluyó otras variables; éstas son la duración total de la partida, la cantidad de enemigos eliminados y si el participante ganó o perdió la partida. Resulta interesante analizar la relación entre estas variables y la inmersión.



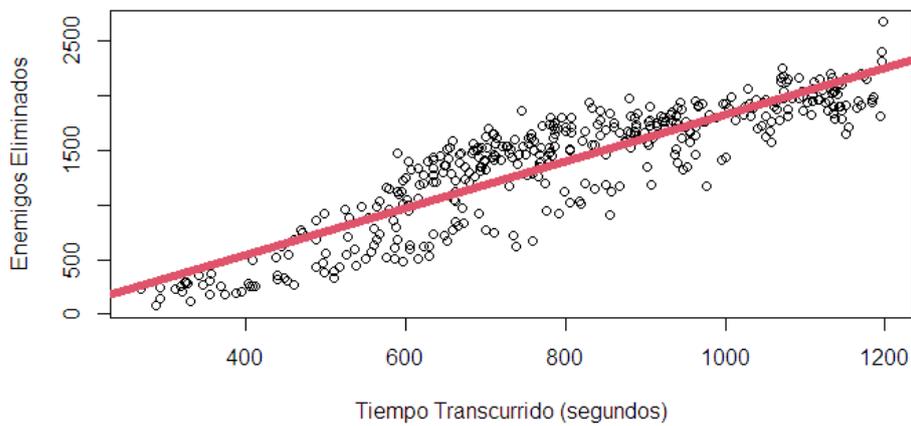
**Figura 7.28:** Relación entre el modo de navegación y la inmersión total ( $\chi^2 = 28,074, p < 0,01$ ).

Como se detalló en el capítulo 5, algunos estudios sugieren que el tiempo transcurrido dentro del AV influye en la sensación de presencia percibida, más específicamente, cuanto más tiempo más presente uno se siente. Nuestros resultados apoyan esto ya que se halló una correlación media entre el tiempo transcurrido y la inmersión total ( $r(401) = 0,284, p < 0,01$ ). Esto puede verse en la figura 7.29.

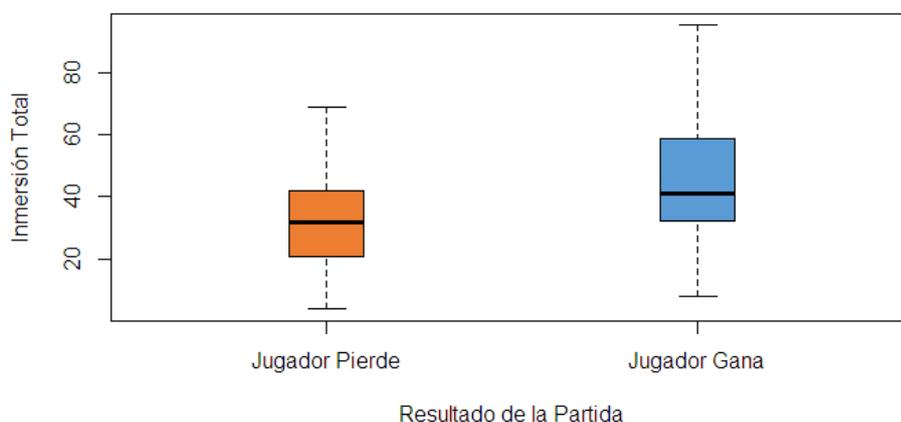
En cuanto a los enemigos eliminados, también se encontró una correlación entre la inmersión total y la cantidad de enemigos eliminados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que hay una gran correlación entre el tiempo transcurrido y la cantidad de enemigos, es decir, cuanto más tiempo dura la partida más enemigos aparecerán (ver figura 7.30). Por este motivo, la relación entre la cantidad de enemigos eliminados y la inmersión total no presenta un significado útil. Además, la cantidad de enemigos eliminados no es una variable que pueda establecerse al principio de la partida.



**Figura 7.29:** Relación entre el tiempo transcurrido y la inmersión total ( $r_{(401)} = 0,284$ ,  $p < 0,01$ ).



**Figura 7.30:** Relación entre el tiempo transcurrido y la cantidad de enemigos eliminados. Esta relación es esperable ya que cuanto más tiempo dura la partida más enemigos aparecen.

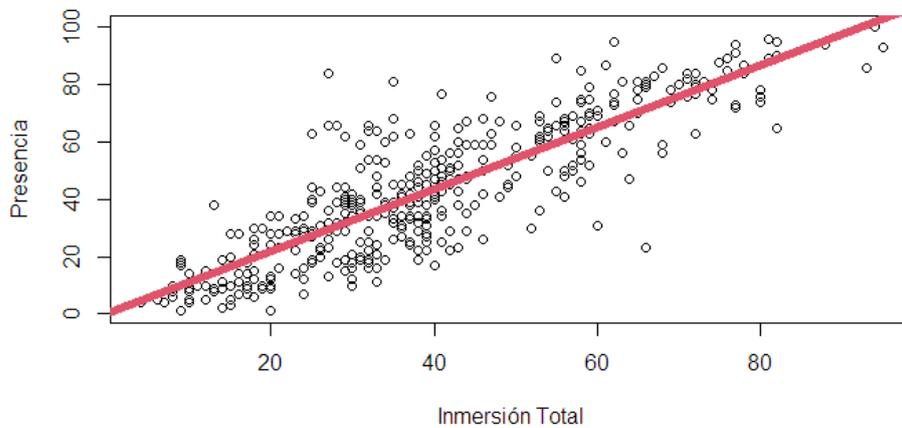


**Figura 7.31:** Relación entre el resultado de la partida y la inmersión total ( $\chi^2 = 37,992$ ,  $p < 0,01$ ).

Finalmente se halló una diferencia estadísticamente significativa cuando el participante gana o pierde la partida ( $\chi^2 = 37,992$ ,  $p < 0,01$ ). La figura 7.31 muestra que se obtuvo un mayor grado de inmersión total en los casos en los que el participante ganó la partida.

## 7.6. PRESENCIA

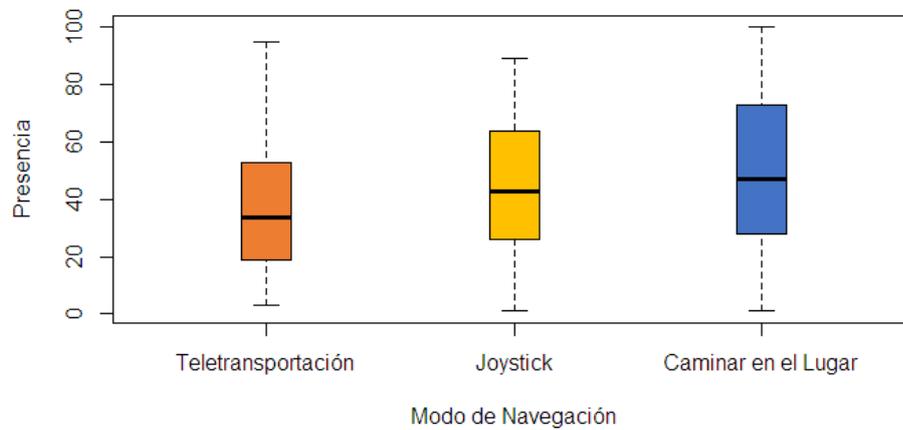
En el capítulo 4 se detalló cómo algunos de los modelos de presencia e inmersión existentes sugieren que la presencia se compone en función de la inmersión y de otros componentes, como por ejemplo la presencia social o la ilusión de plausibilidad. Por este motivo, se espera hallar una alta correlación entre la presencia y la inmersión total. La figura 7.32 muestra la relación entre la presencia y la inmersión total obtenida a partir de los datos del experimento. De acuerdo a lo esperado, fue hallada una correlación muy alta ( $r(401) = 0,853$ ,  $p < 0,01$ ) entre éstas.



**Figura 7.32:** Relación entre la inmersión total y la presencia ( $r(401) = 0,853$ ,  $p < 0,01$ ).

Teniendo en cuenta cada variable individual relacionada con la inmersión visual, e igualmente con las relacionadas con la inmersión total, con respecto a la presencia se halló una correlación media con el ancho de pantalla ( $r(401) = 0,292$ ,  $p < 0,01$ ), una correlación baja con los *frames* por segundo ( $r(401) = 0,203$ ,  $p < 0,01$ ), una diferencia significativa entre utilizar texturas y no utilizarlas ( $\chi^2 = 39,489$ ,  $p < 0,01$ ) y también una correlación baja con el contraste ( $r(401) = 0,125$ ,  $p = 0,012$ ). Por otro lado, a diferencia de lo que ocurre cuando se considera la inmersión total, sí se halló una diferencia estadísticamente significativa cuando la estereopsis está activada ( $\chi^2 = 9,908$ ,  $p < 0,01$ ).

Respecto a las variables de audio, a diferencia de lo hallado en la inmersión total, no se halló una diferencia estadísticamente significativa entre los distintos modos de salida de audio ( $\chi^2 = 2,416$ ,  $p = 0,298$ ). Por otro lado, sí se halló una diferencia estadísticamente significativa en el sonido espacial 3D cuando se utilizan auriculares ( $\chi^2 = 5,357$ ,  $p = 0,02$ ).



**Figura 7.33:** Relación entre los modos de navegación y la presencia ( $\chi^2 = 12,998$ ,  $p < 0,01$ ).

En cuanto a las variables de inmersión táctil, se halló una diferencia estadísticamente significativa entre los distintos modos de navegación ( $\chi^2 = 12,998$ ,  $p < 0,01$ ) (ver figura 7.33). Según el test de Dunn, la diferencia se produce entre el grupo de teletransportación respecto a los otros dos grupos.

Finalmente, al igual que en el caso de la inmersión total, se halló una correlación media entre el tiempo transcurrido y la presencia ( $r(401) = 0,271$ ,  $p < 0,01$ ), así como también una diferencia estadísticamente significativa cuando el participante gana o pierde la partida ( $\chi^2 = 44,184$ ,  $p < 0,01$ ).

## 7.7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se detallan los análisis estadísticos realizados para evaluar la relación entre las variables independientes y las variables dependientes del experimento. Para las variables numéricas se analizó la existencia de correlaciones y para las variables categóricas se analizaron las diferentes categorías.

### 7.7.1. INMERSIÓN VISUAL

Teniendo en cuenta lo analizado en el trabajo previo y en el capítulo 5, se espera que un determinado grupo de las variables independientes influyan o se relacionen de alguna forma con la inmersión visual. Estas variables son la resolución de pantalla, el campo de visión, la tasa de refresco, la estereopsis, el *antialiasing*, las texturas, la iluminación y el sombreado, la saturación, el brillo, el contraste, la definición, la fuerza de las sombras, las reflexiones, el detalle de los modelos, la profundidad de campo y las partículas. Entre dichas variables, sólo la resolución de pantalla, la aplicación de texturas, la iluminación y el sombreado, y la profundidad de campo, presentaron influencias estadísticamente significativas respecto a la inmersión visual.

La resolución de pantalla es una variable que se relaciona con la forma en la que ven los humanos; cuanto mejor resolución de pantalla, nos sentiremos más cómodos con la naturalidad de lo que estamos viendo y por este motivo tiene sentido que esta variable influya en la inmersión. Esto mismo se ve apoyado en gran medida por la literatura.

La aplicación de texturas representativas ha demostrado influir en la inmersión visual. Esto resulta interesante ya que no existen trabajos relativamente recientes en la literatura que analicen el impacto de dicha variable. Cuando los modelos 3D no tienen texturas representativas, dependiendo el material, pueden dar la sensación de estar hechos, por ejemplo, de plástico. Esto reduce la fidelidad del AV y en este caso también está reduciendo la inmersión visual.

El utilizar iluminación y sombreado realista también ha demostrado influir en la inmersión visual. Esto concuerda con la literatura y es esperable ya que la iluminación y el sombreado no solo mejoran la percepción del espacio 3D, sino que también ayudan a mejorar la fidelidad visual de todo el escenario. Si no se aplica iluminación y sombreado, todo se ve plano y los datos sugieren entonces que esto reduce la inmersión visual.

Finalmente, los resultados también sugieren que la profundidad de campo influye en la inmersión visual. Hasta el momento no se han realizado muchos estudios formales que analicen la influencia de la profundidad de campo en la inmersión. La profundidad de campo mejora en gran medida el efecto de profundidad 3D para lo que está lejos, y esto puede ser la causa de su influencia positiva en la inmersión. En este experimento, se utilizó un valor fijo de profundidad de campo, es decir, los objetos se veían desenfocados a partir de una distancia fija del usuario. Entre los puntos a trabajar a futuro se debería ahondar, por ejemplo, en qué sucede cuando se varían los parámetros que controlan la profundidad de campo y cuál es la influencia de esta variación en la inmersión.

Si nos basamos en el trabajo previo, era esperable hallar una influencia significativa en la inmersión de algunas de las variables analizadas. Sin embargo, esto no ocurrió. Este es el caso del campo de visión. Se esperaría que también influya en gran medida en la inmersión visual ya que la evolución tecnológica de los visores de RV han priorizado mejorar tanto la resolución de la pantalla como el campo de visión. Sin embargo, en este caso particular, esto no ocurre.

La variable tasa de refresco, es decir *frames* por segundo, presentó una correlación muy débil con la inmersión visual. Creemos que el principal motivo de esto es que, como se mencionó en el capítulo 6, el participante no relacionó los *frames* por segundo con la pregunta utilizada para medir la inmersión visual, es decir, “¿Qué tanto sentiste que VEÍAS de la misma forma en que VES en la vida real?”. Aunque las preguntas fueron explicadas en detalle al participante, en trabajo a futuro entonces deberá reformular el cuestionario o el uso de las variables para que éstas queden contempladas adecuadamente.

La estereopsis es otra variable que se esperó que tuviera una mayor influencia. La estereopsis contribuye con la visión 3D tan característica de los visores de RV. Como el visor está fijo a la cara del usuario, puede presentar la imagen correspondiente a cada ojo, generando así el efecto estereoscópico. Sin embargo, en este experimento particular, los resultados sugieren que no existe mucha diferencia entre usarla o no.

Los resultados en cuanto al detalle de los modelos resulta muy interesante. No se hallaron diferencias significativas entre utilizar modelos con poco detalle (polígonos) y modelos con un alto nivel de detalle. Los modelos con mayor detalle, entre otras cosas, permiten generar escenas más realistas ya que los modelos con muy pocos polígonos suelen dar una apariencia de caricatura o poco realista. El hecho de que no haya diferencia es una gran ventana para el área de RV, especialmente cuando se utilizan dispositivos de bajo costo, como teléfonos móviles. Aunque estos dispositivos cada vez son más poderosos, su poder computacional sigue siendo acotado y no pueden permitirse el procesamiento de muchos polígonos. Esto también coincide en parte con la literatura, que sugiere que no es necesario un escenario virtual altamente realista para generar presencia [156].

#### 7.7.2. INMERSIÓN AUDITIVA

El sonido es una variable muy importante que debe considerarse cuando se pretende maximizar el grado de inmersión en un sistema de RV. Esto queda claro a partir de los resultados, que muestran que el grado de inmersión auditiva fue nulo en los casos donde no se utilizó sonido (ver figura 7.17).

En el presente estudio se utilizaron 3 modos distintos de audio: sin sonido alguno, utilizando parlantes o altavoces y utilizando auriculares o audífonos. Los resultados presentan una diferencia estadísticamente significativa entre los 3 grupos. Esto significa que la respuesta inmersiva de los 3 grupos es muy distinta. Además, de acuerdo a lo reportado en la literatura, se esperaba obtener mayor presencia cuando se utilizan auriculares; nuestros resultados concuerdan con esto. El uso de auriculares permite presentar el sonido directamente en cada oído del usuario, favoreciendo así la presentación de sonido espacial 3D y, por lo tanto, mejorando la inmersión auditiva.

Los resultados muestran que no se produjo una diferencia estadísticamente significativa respecto al sonido espacial 3D. Sin embargo, esto se produjo cuando se consideraron todos los modos de salida de audio. Si consideramos los casos en los que solo se utilizan auriculares, sí existe una diferencia estadísticamente significativa respecto a la inmersión auditiva. Esto quiere decir que el sonido espacial 3D sí influye en la inmersión auditiva, y esto es especialmente notorio cuando se utilizan auriculares.

Finalmente, tampoco se halló una diferencia significativa en cuanto al sonido ambiente y a la reverberación. El sonido ambiente utilizado durante el experimento era una música de acción y tal vez no correspondía con la escena. En el trabajo futuro se debería analizar distintos tipos de sonido ambiente. Por otro lado, la reverberación (o eco) es un efecto que no es muy notorio si el participante no se traslada por un ambiente lo suficientemente grande. Por este motivo, también es esperable no hallar una diferencia significativa en cuanto a la reverberación. Como trabajo futuro se debería ahondar en el estudio de esta variable considerando, por ejemplo, AV más grandes.

### 7.7.3. INMERSIÓN TÁCTIL

En cuanto a la inmersión táctil, existe una diferencia muy clara entre los 3 grupos de la categoría navegación.

La teletransportación fue el modo que generó menor inmersión, lo que concuerda con la literatura. La teletransportación hace que el participante se teletransporte de un punto a otro del AV de forma instantánea, lo que está demostrado que reduce efectos de *cybersickness*.

El modo de caminar en el lugar, por otro lado, fue el que más inmersión generó. Esto también concuerda con la literatura y era esperable ya que el caminar en el lugar es el modo que más se asemeja a la forma en la que caminamos en la vida real.

El modo de caminar con *joystick* se encuentra en el medio. El caminar con el *joystick* resulta muy cómodo para aquellos participantes acostumbrados a jugar videojuegos dado que es habitual que utilicen este tipo de movimiento. Sin embargo, el caminar con un *joystick* mientras el participante se encuentra físicamente quieto produce un efecto denominado **vección**, esto es, discrepancia entre lo que el participante ve y lo que su cuerpo siente. En este caso, el participante ve que está caminando dentro del AV, pero su cuerpo se encuentra quieto. Este efecto puede causar síntomas graves de *cybersickness*; el participante no experimentó este tipo de síntomas en este caso, dado que la velocidad de movimiento era muy suave.

Por último, como se mencionó anteriormente, durante este experimento no se contaba con el espacio físico suficiente para utilizar el modo de caminar “caminar naturalmente”, es decir, que el participante pueda caminar por el AV de la misma forma en que lo hace en el mundo real. Según la literatura, como este modo de caminar es el más natural, es el que generaría un mayor grado de inmersión. Como trabajo futuro se analizará este modo de caminar para poder obtener una métrica de inmersión táctil más precisa.

#### 7.7.4. INMERSIÓN TOTAL

No solo se analizaron las variables en función de cada tipo de inmersión individual, sino que también se analizaron todas las variables en función de la inmersión total.

Si comparamos la inmersión total con la inmersión visual, ambas se ven afectadas en gran medida por la resolución de pantalla y la aplicación de texturas. Como se dijo anteriormente, estas variables son relevantes para maximizar la inmersión, tanto visual como total.

Por otro lado, la inmersión visual se vio afectada por la iluminación y por la profundidad de campo. Sin embargo, la inmersión total no se vio afectada por dichas variables. Esto sugiere que aunque su efecto fue notorio en la inmersión visual, la influencia de estas variables en la inmersión total no llega a ser lo suficientemente relevante como para ser estadísticamente significativa. En el capítulo 8 se verá cómo influyen estas variables cuando se realice un modelo de regresión que dependa de ellas.

Uno de los resultados más sorprendentes fue que la inmersión visual no se vio afectada por los *frames* por segundo. Sin embargo, los *frames* por segundo sí afectaron a la inmersión visual de forma estadísticamente significativa, aunque con una correlación pequeña.

Con respecto a la comparación entre la inmersión total y la inmersión auditiva, también se hallaron algunas diferencias. Por un lado, respecto al modo de salida de audio, en la inmersión auditiva se halló una diferencia significativa entre los 3 modos de audio entre sí. Sin embargo, en la inmersión total, sólo se halló una diferencia significativa entre el grupo sin sonido respecto al grupo con auriculares. En otras palabras, el grupo de los parlantes no llegó a ser estadísticamente diferente a los otros grupos. Este resultado es esperable ya que tiene sentido que la salida de audio afecte de forma más directa a la inmersión auditiva que a la inmersión total, que es afectada por muchos más factores.

Otro resultado sorprendente fue que la inmersión total, a diferencia de la inmersión auditiva, no se vio afectada por el sonido espacial 3D cuando se utilizaron auriculares. Esto puede deberse también a que la influencia de la variable no es tan fuerte en la inmersión total, como en la inmersión auditiva. Resultará interesante ver también qué sucede cuando se utilice esta variable para un modelo de regresión de inmersión total.

Respecto a la comparación con la inmersión táctil, se halló una diferencia estadísticamente significativa entre los 3 modos de navegación, tanto en la inmersión total como en la inmersión táctil. Esto sugiere que el modo de navegación es lo suficientemente fuerte como para afectar en gran medida la inmersión total.

Además de analizar las variables relacionadas con los tipos de inmersión particular, se analizó la relación entre la inmersión total y el tiempo de duración transcurrido en cada prueba. Algunos trabajos de la literatura sugieren que el tiempo transcurrido puede afectar la sensación de presencia, pero la razón de esto continúa siendo un motivo de discusión. Nuestros resultados apoyan esta teoría ya que se halló una correlación media entre el tiempo transcurrido y la inmersión total. En base a esto, creemos que este efecto debe tener una cota superior a partir de la cual el agregar más duración ya no afecte a la inmersión. También podría ocurrir que los usuarios se cansen y esto haga que la inmersión comience a disminuir. Por este motivo, el trabajo a futuro debería investigar este efecto, realizando experimentación sobre la variable tiempo, tal vez de forma aislada, para poder así hallar los límites de tiempo respecto a la inmersión.

Finalmente, se obtuvo un mayor grado de inmersión total en los casos donde el participante ganó la partida, respecto a los casos en donde perdió la partida. Una posible causa de esto puede deberse a que el escenario era lo suficientemente inmersivo como para favorecer la motivación del usuario en finalizar la partida. Por este mismo motivo, aquellos escenarios muy poco inmersivos al punto de volverse “incómodos” para el usuario (como por ejemplo con muy poca resolución, muy pocos *frames* por segundo, imagen muy oscura, etc.) podrían haber llevado a que el usuario no tenga motivación para ganar la partida e incluso podrían llevarlo a perder adrede para terminar con este escenario “incómodo” lo antes posible. Aunque resulte interesante analizar esta variable, no influirá en el modelo de regresión ya que es una variable dependiente que no puede configurarse.

#### 7.7.5. PRESENCIA

Aunque estamos interesados principalmente en la inmersión, también se utilizó el experimento para recolectar datos sobre la presencia percibida. Como mencionamos anteriormente, y en base a la literatura, se halló una gran correlación entre la presencia y la inmersión total, lo que apoya la noción de que la inmersión es una componente de la presencia.

En cuanto a las variables individuales, se hallaron algunas diferencias con respecto a la inmersión total. La presencia se vio afectada por la estereopsis. Recordemos que la presencia se refiere a la sensación de estar ahí dentro del ambiente virtual, a diferencia de la inmersión que se refiere a qué tanto el participante sintió que sus sentidos estaban considerados por el sistema. En base a las preguntas, los resultados podrían indicar que el participante asoció más la visión 3D provista por la estereopsis con la sensación de presencia y no tanto con la inmersión.

Sorprendentemente no se halló una diferencia significativa entre los distintos modos de salida de audio, lo que indicaría que el audio no afectaría la sensación de presencia. Es importante notar que puede ocurrir que el participante no asocie el audio con la sensación de encontrarse dentro del mundo virtual, lo que podría derivar en el resultado obtenido. A continuación se discuten algunos inconvenientes que pueden surgir de este tipo de experimentos y que pueden afectar los resultados. También se complementan con sugerencias para el trabajo futuro.

#### 7.7.6. INCONVENIENTES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se presentaron los resultados estadísticos respecto a la relación entre las distintas variables dependientes e independientes. El análisis produjo muchos resultados interesantes, algunos de los cuales eran esperables y otros resultaron inesperados o sorprendentes. Esto puede deberse a distintos motivos, como por ejemplo la cantidad de datos del experimento, las características del participante o el diseño del sistema utilizado en el experimento.

Recordemos que este experimento fue realizado con una metodología *single-user*, es decir, con un solo participante. Por este motivo, los resultados son generalizables sólo al tipo de participante que realizó el experimento. Por ejemplo, si el participante verdaderamente no percibe ninguna diferencia cuando se utiliza estereopsis, esto se reflejará en los resultados, que dirán que la estereopsis no es relevante. Este tipo de inconvenientes se mitiga al realizar un experimento con muchos usuarios y de distintas características. El trabajo futuro será, en este caso, complementar este experimento con múltiples participantes.

El cuestionario es una herramienta sumamente importante en lo que respecta a la evaluación del experimento. Si las preguntas están mal formuladas, no se entienden o no reflejan lo que se quiere medir, los resultados serán erróneos o producirán todo tipo de errores. En este trabajo, se utilizaron los cuestionarios existentes en la literatura y se le explicó al participante cada una de las preguntas. Asimismo, no queda descartado que el participante malentienda alguna de las preguntas. Aunque se trató de realizar un cuestionario simple y claro, el trabajo futuro podría utilizar cuestionarios más complejos que brinden más información.

Para el experimento realizado, el participante realizó 401 pruebas. Este es un gran número de pruebas teniendo en cuenta que las realizó un solo participante. Sin embargo, si consideramos la cantidad de variables y los distintos valores que cada una de ellas puede tomar, 401 pruebas puede resultar poco. Se espera realizar una cantidad mucho más grande de pruebas cuando se lleve a cabo este experimento con muchos participantes. Esto brindará más información lo que permitirá complementar los resultados.



# 8

## Obteniendo una Métrica de Inmersión

### 8.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se analizó la influencia estadística de cada variable con respecto a la inmersión total en base a los datos obtenidos durante el experimento presentado en el capítulo 6. A partir de estos datos, nuestro objetivo es construir una métrica que nos permita calcular o predecir el nivel de inmersión de un sistema de RV dado, en función de sus características de *software* y de *hardware*. En este capítulo veremos distintas estrategias y técnicas para poder construir dicha métrica en función de nuestros datos, así como también detallaremos todo el proceso llevado a cabo.

Comenzamos detallando los conceptos básicos utilizados para alcanzar nuestro objetivo. En la sección 8.2 se presenta una breve descripción del análisis de regresión y de cómo podemos utilizarlo en este trabajo. Los modelos de regresión son una técnica que permite hallar una relación entre un conjunto de variables independientes y la variable dependiente que se quiere estimar. Estos modelos permiten capturar tanto relaciones lineales como no lineales entre las variables.

A partir del análisis de regresión podemos construir modelos que relacionen las variables independientes para así poder estimar el valor de la inmersión total. Si la cantidad de variables es muy grande, estos modelos pueden llegar a ser muy complejos. Dado que no todas las variables utilizadas en el experimento podrían ser relevantes en la construcción del modelo, se pueden utilizar técnicas de selección de variables que permitan construir modelos más pequeños y efectivos. La sección 8.3 presenta algunas de estas técnicas de selección.

Una vez construido el o los modelos, éstos deben ser validados. Existen diversas técnicas de validación de modelos y en la sección 8.5 se presentan las técnicas más utilizadas para esto.

En la sección 8.6 se describe el procedimiento que se siguió en el presente trabajo para poder obtener un conjunto de modelos de inmersión. Luego, en la sección 8.7 se detalla cómo, a partir de todos los modelos generados, se seleccionaron los 3 mejores. Finalmente, se muestran las ecuaciones de los 3 modelos seleccionados en la sección 8.8 y se presentan discusiones y conclusiones del capítulo en la sección 8.9.

## 8.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN

El análisis de regresión es una técnica de modelado predictivo que permite estimar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. En pocas palabras podemos decir que el análisis de regresión es una forma de encontrar tendencias en los datos. Este análisis utiliza un conjunto de datos para hacer algún tipo de predicción. Por ejemplo, si hemos aumentado de peso durante los últimos años, se podrá predecir cuánto pesaremos en diez años si continuamos aumentando de peso al mismo ritmo. También nos brindará diversas estadísticas (incluido un p-valor y un coeficiente de correlación) que indicarán qué tan preciso es el modelo.

La regresión lineal es un tipo básico de análisis predictivo que generalmente se aplica a datos continuos, pero también puede utilizarse con variables categóricas. A partir de los datos se puede obtener una recta de regresión que minimice el error:

$$Y = b_0 + b_1 \times x.$$

donde Y es la variable dependiente y x la variable independiente;  $b_1$  y  $b_0$  son los parámetros y representan respectivamente la pendiente de la recta y la intersección con el eje y. Los valores de  $b_0$  y  $b_1$  deben elegirse de tal forma que se minimice el error.

En la regresión lineal de una variable, se ingresaría una variable independiente (por ejemplo, “ventas”) frente a una variable dependiente (por ejemplo, “ganancias”). Esto nos daría una predicción de las ganancias en función de las ventas.

Si debemos considerar más de una variable independiente, se utiliza el análisis de regresión múltiple para encontrar tendencias en esos conjuntos de datos. La única diferencia entre la regresión lineal simple y la regresión múltiple está en el número de predictores (variables “x”) utilizados en la regresión. Así, se obtiene una fórmula como la siguiente:

$$Y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + \dots + b_n \times x_n$$

Este tipo de ecuación asume que no existe relación entre los predictores. Pero puede suceder que un predictor sea dependiente del valor de otro predictor. Esta dependencia se conoce en estadística como *efecto de interacción*. Para considerar este efecto, podemos extender el modelo al incluir el término de interacción. En un ejemplo con 2 predictores tendríamos una ecuación como la siguiente:

$$Y = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_1 \times x_2$$

En aquellos casos en los que se considere que la relación entre las variables pueda ser no lineal, se puede utilizar una regresión polinomial para ajustar una ecuación polinomial. En estadística, una regresión polinomial es una forma de análisis de regresión en el que la relación entre la variable dependiente y la/s independiente/s es modelada por un polinomio de grado n.

Una regresión polinomial es muy similar a una regresión múltiple pero en lugar de tener múltiples variables (o predictores) como  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , etc. tiene una sola variable elevada a diferentes potencias. Por ejemplo, para un solo predictor, podríamos tener una ecuación como la siguiente:

$$Y = b_0 + b_1 \times x + b_2 \times x^2 + b_3 \times x^3 + \dots + b_n \times x^n$$

Es claro que a medida que aumenta el grado del polinomio se incrementa la complejidad del modelo. Por lo tanto, el valor de n debe elegirse adecuadamente.

Es importante mencionar que la regresión polinomial sigue siendo una regresión lineal. Cuando hablamos de lineal y no-lineal no nos estamos refiriendo a las “variables” sino a las “variables b” o parámetros. Si la función puede expresarse como una combinación lineal de coeficientes, entonces es una regresión lineal.

Cada vez que agregamos más términos o coeficientes a un modelo de regresión, este modelo se hace más complejo y pueden surgir diferentes problemas. El sobreajuste (conocido como *overfitting*), por ejemplo, produce un análisis que se corresponde en gran medida con un conjunto particular de datos y, por lo tanto, puede fallar a la hora de ajustar datos adicionales o al predecir futuras observaciones. Puede producirse cuando el modelo es demasiado complejo para los datos o cuando el tamaño de la muestra es demasiado pequeña.

Si en un modelo de regresión se utilizan suficientes variables predictoras, casi siempre se obtendrá un modelo que parece significativo. Si bien este modelo sobreajustado puede ajustarse a los datos extremadamente bien, no se ajustará a muestras de prueba adicionales ni a la población general. Por este motivo, existen técnicas de selección de variables.

### 8.3. SELECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS (VARIABLES) (*FEATURE SELECTION*)

La selección de características es una forma de reducir la cantidad de variables y por lo tanto reducir la complejidad computacional de un modelo. Muchas veces, la técnica de selección de características resulta útil para solucionar problemas de *overfitting*. En este caso, ayuda a determinar el conjunto más pequeño de variables necesarias para predecir la variable de respuesta con una gran precisión.

Cuando alimentamos un modelo de regresión, cada vez que se agrega una nueva variable, todo puede cambiar. No solo se afecta la relación con la nueva variable, sino que también se puede estar afectando al resto de las variables. Si introducimos y sacamos variables a modo “prueba y error” con todas las combinaciones de variables, entonces tendremos un total de  $2^{(k-1)}$  modelos lineales que tendremos que probar para ver cuáles son las variables significativas, donde  $k$  es la cantidad de variables.

Las técnicas de selección de características nos ayudan a encontrar el conjunto más pequeño de variables que alimentan el modelo de manera significativa. Estas técnicas añaden o remueven variables potenciales iterativamente y testean la significancia estadística luego de cada iteración.

Generalmente nos basamos en la teoría y en la experiencia para obtener una dirección general sobre qué variables candidatas deben incluirse en el modelo de regresión. El conjunto real de variables predictoras utilizadas en el modelo de regresión final debe determinarse mediante el análisis de los datos.

Encontrar este subconjunto de variables regresoras (independientes) involucra dos objetivos contrapuestos. En primera instancia queremos un modelo de regresión lo más completo y realista posible. Queremos incluir cada regresor que esté, aunque esté mínimamente relacionado con la variable dependiente. Pero, por otro lado, queremos incluir la menor cantidad posible de variables porque cada regresor irrelevante disminuye la precisión de los coeficientes estimados y los valores predichos. La presencia de variables adicionales aumenta la complejidad de la recopilación de datos y el mantenimiento del modelo. El objetivo de la selección de variables se traduce en poder lograr un equilibrio entre la simplicidad (tan pocos regresores como sea posible) y el ajuste (tantos regresores como sea necesario). A continuación se describen algunas de las técnicas de selección de características más utilizadas para regresiones.

#### 8.3.1. SELECCIÓN HACIA ADELANTE (*FORWARD SELECTION*)

Se comienza sin variables candidatas en el modelo, es decir que se comienza con un modelo vacío. Las variables se incorporan una a una, comenzando por la que tenga mayor correlación con la variable dependiente. En cada paso, se selecciona la variable candidata que más aumente el R-cuadrado. Se dejan de agregar variables cuando ninguna de las variables restantes sea significativa, es decir, cuya inclusión no mejore el R-cuadrado. Es importante notar que una vez que una variable se introduce al modelo, no se puede eliminar.

### 8.3.2. SELECCIÓN HACIA ATRÁS (*BACKWARD SELECTION*)

Este método sigue un proceso reverso al anterior. Comienza con un modelo en el que se han incluido todas las variables candidatas, es decir que se introducen en el modelo todas las variables independientes. Luego las variables se eliminan de una en una si no contribuyen al modelo de regresión. La variable que se elimina es la menos significativa. Este proceso continúa hasta que no queden variables no significativas, o en otras palabras, hasta que sólo queden variables significativas. El usuario establece el nivel de significancia con el que las variables se pueden eliminar del modelo. El problema es que los modelos seleccionados por este procedimiento pueden incluir variables que no son realmente necesarias.

### 8.3.3. SELECCIÓN ESCALONADA (*STEPWISE SELECTION*)

La selección escalonada es una combinación de las técnicas de selección hacia adelante y hacia atrás. El método de selección escalonada es una modificación de la selección hacia adelante de modo que después de cada paso en el que se agrega una variable, todas las variables candidatas en el modelo se comprueban para ver si su significancia se ha reducido por debajo del nivel de tolerancia especificado. Si se encuentra una variable no significativa, se elimina del modelo. Este método requiere considerar dos niveles de significancia: uno para agregar variables y otro para eliminar variables. La probabilidad de corte para agregar variables debe ser menor que la probabilidad de corte para eliminar variables.

## 8.4. MÉTRICAS DE *PERFORMANCE* DEL MODELO

Dado un modelo, queremos determinar la precisión de este modelo para predecir el resultado de nuevas observaciones que no se utilizaron para construir el modelo. En otras palabras, queremos estimar el error de predicción. Para esto, la estrategia básica consiste en:

- Construir el modelo con un conjunto de datos de entrenamiento.

- Aplicar el modelo sobre un nuevo conjunto de datos de test para realizar predicciones.
- Calcular los errores de la predicción.

Las métricas estadísticas más utilizadas para cuantificar la calidad promedio de los modelos de regresión incluyen:

- R-cuadrado ( $R^2$ ). Representa la correlación al cuadrado entre los valores de la salida observada y los valores predichos por el modelo. Cuanto mayor sea el R-cuadrado ajustado, mejor será el modelo. Por ejemplo, un valor de R-cuadrado igual a 0.74 nos está diciendo que alrededor de 74 % de la varianza es explicada por el modelo.
- R-cuadrado Ajustado. Cada vez que se agregan más variables independientes o predictores a un modelo de regresión, el valor de R-cuadrado tiene a aumentar. Esto es producto del *overfitting* que nos lleva a generar modelos con valores altos de R-cuadrado injustificados. El valor de R-cuadrado Ajustado se utiliza para determinar qué tan confiable es una correlación y qué tanto es determinado por la adición de una nueva variable independiente.
- Error medio cuadrático (RMSE - Root Mean Squared Error). Mide el error de predicción promedio hecho por el modelo al predecir la salida de una observación. Esto es, la diferencia promedio entre los valores de salida observados conocidos y el valor predicho por el modelo. Cuanto más chico sea el RMSE, mejor será el modelo.
- Error medio absoluto (MAE - Mean Absolute Error). Es una alternativa al RMSE que es menos sensible a valores atípicos (*outliers*). Corresponde a la diferencia promedio absoluta entre la salida observada y predicha. Cuanto más chico sea el MAE, mejor será el modelo.

- Criterio de información de Akaike *AIC - Akaike Information Criteria*. Es una métrica que cuantifica la cantidad de información perdida debido a la simplificación realizada en el modelo. *AIC* es similar al *R-cuadrado* ajustado, ya que también penaliza agregar más variables al modelo. Por tanto, podemos decir que *AIC* proporciona un medio para la selección del modelo, pero se debe tener en cuenta que es solo una medida relativa entre múltiples modelos, el valor absoluto de *AIC* no tiene ningún significado. Solo se puede comparar el valor de *AIC*, si aumenta o disminuye agregando más variables. Si tenemos varios modelos, preferiremos entonces el modelo con un valor de *AIC* más bajo.

Estas métricas se utilizan entonces para medir la performance de un modelo de regresión durante la validación cruzada.

## 8.5. VALIDACIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN

La validación cruzada (o *cross-validation* en inglés) es una de las estrategias más utilizadas a la hora de validar este tipo de modelos y se refiere a un conjunto de métodos para medir el rendimiento de un modelo de predicción dado en un nuevo conjunto de datos. La idea principal de la validación cruzada consiste en dividir los datos en dos conjuntos:

- Un conjunto de entrenamiento, utilizado para entrenar (o construir) el modelo.
- Un conjunto de prueba (test, o validación), usado para testear o validar el modelo mediante la estimación del error de predicción.

A grandes rasgos, los algoritmos de validación cruzada pueden resumirse de la siguiente manera:

- Reservar una muestra pequeña del *dataset*.
- Construir (o entrenar) el modelo utilizando el resto del *dataset*.

- Probar la efectividad del modelo en la muestra reservada del *dataset*. Si el modelo funciona bien en este *dataset* de prueba, entonces se dice que es bueno.

A continuación se describen las distintas técnicas de validación cruzada.

#### 8.5.1. CONJUNTO DE VALIDACIÓN

La técnica del conjunto de validación es la técnica más básica y consiste en separar aleatoriamente los datos en dos conjuntos: uno utilizado para entrenar el modelo y el otro utilizado para testear el modelo. Se cuantifica el error de la predicción como la diferencia media al cuadrado entre los valores de salida observados y los predichos.

La técnica del conjunto de validación sólo es útil cuando se tiene un gran conjunto de datos que pueda ser particionado. Una desventaja es que se construye un modelo con una fracción del *dataset*, dejando afuera información posiblemente interesante sobre los datos, llevando a un mayor sesgo. Por lo tanto, la tasa de error de prueba puede ser altamente variable, dependiendo de cuales observaciones fueron incluidas en el conjunto de entrenamiento y cuales fueron incluidas en el conjunto de validación.

#### 8.5.2. VALIDACIÓN CRUZADA DEJANDO UNO AFUERA (LEAVE ONE OUT CROSS VALIDATION - LOOCV)

Este método funciona de la siguiente manera:

- Dejar afuera un dato y construir el modelo con el resto de los datos del *dataset*.
- Testear el modelo contra el dato que se dejó afuera y guardar el error asociado con la predicción.
- Repetir este proceso para cada uno de los datos del *dataset*.

- Calcular el error de predicción promedio al promediar todos los errores guardados de cada dato particular.

La ventaja del método LOOCV es que, como se utilizan todos los datos, se reduce el sesgo potencial. Sin embargo, dado que el proceso se debe repetir tantas veces como datos tenga el *dataset*, resulta en un tiempo de ejecución alto cuando la cantidad de datos es muy grande. Además, se está testeando la performance del modelo contra un solo dato en cada iteración. Esto puede resultar en una gran variación en el error de predicción si, por ejemplo, algunos datos fueran valores atípicos. Para solucionar este problema es necesario considerar una mejor proporción de la cantidad de datos seleccionados para testear, una solución provista por el método que se detalla a continuación.

#### 8.5.3. VALIDACIÓN CRUZADA DE K ITERACIONES (*K-FOLD CROSS VALIDATION*)

Este método permite evaluar la performance del modelo en diferentes conjuntos de entrenamiento del *dataset* y luego calcular la tasa de error de predicción promedio. El algoritmo trabaja de la siguiente manera:

- Se separa de forma aleatoria el *dataset* en  $k$  subconjuntos.
- Se reserva un subconjunto y se entrena el modelo utilizando el resto de subconjuntos.
- Se testea el modelo con el subconjunto reservado y se guarda el error de la predicción.
- Se repite este proceso para cada uno de los  $k$  subconjuntos.
- Se calcula el promedio de los  $k$  errores guardados. Este error se utiliza entonces como una métrica de performance del modelo.

La ventaja más obvia comparada con LOOCV es computacional. Una ventaja menos obvia pero más importante es que generalmente provee una estimación de la tasa de error más precisa que LOOCV.

Respecto al valor de  $k$ , un valor más bajo es más sesgado y por lo tanto indeseable. Por el otro lado, un valor de  $k$  alto es menos sesgado, pero puede sufrir de una gran variabilidad. Se puede ver entonces cómo un valor pequeño de  $k$  tiende a la técnica del conjunto de validación, mientras que un valor alto de  $k$  tiende a la técnica LOOCV.

En la práctica, se suele utilizar validación cruzada de  $K$  iteraciones con un valor de  $k=5$  o  $k=10$ , ya que estos valores han presentado empíricamente valores de estimaciones de errores que no sufren de un sesgo excesivamente alto ni tampoco de una alta varianza.

El proceso de separar el *dataset* en  $k$  subconjuntos puede repetirse una cantidad de veces, lo que se denomina validación cruzada de  $K$  iteraciones con repetición. Esta proporciona una forma de mejorar el rendimiento estimado del modelo. Se trata simplemente de repetir el procedimiento de validación cruzada varias veces e informar del resultado medio de todas las iteraciones de todas las ejecuciones. Así, el error final del modelo se calcula como el error promedio de todas las repeticiones.

## 8.6. GENERACIÓN DE LOS MODELOS DE INMERSIÓN

En este trabajo se llevó a cabo un procedimiento para hallar el mejor (o los mejores) modelo(s) de regresión para la inmersión total en función de las 22 variables independientes del experimento. A continuación se detalla cada etapa del proceso de evolución y selección de los modelos desarrollados y analizados.

### 8.6.1. ETAPA 1: MODELOS DIRECTOS

En una primera etapa se desarrollaron modelos que pueden generarse directamente a partir de las variables del experimento, sin realizar ningún paso extra. Se crearon entonces los siguientes 5 modelos:

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -15.536895   5.510843  -2.819  0.00507 **
anchoDePantalla  0.007579   0.001293   5.862 1.00e-08 ***
campoDeVisión  0.018707   0.036024   0.519  0.60387
framesPorSegundo  0.167823   0.055863   3.004  0.00284 **
estereopsisActivado  2.859159   1.509313   1.894  0.05895 .
antialiasingActivado -1.375323   1.472216  -0.934  0.35081
modoDeTexturasConTexturas 14.297655   1.485580   9.624 < 2e-16 ***
modoDeIluminaciónLucesYSombreado 2.916123   1.479141   1.971  0.04940 *
saturación -0.409731   1.340270  -0.306  0.76000
brillo -3.414633   1.582399  -2.158  0.03157 *
contraste  3.767076   1.645338   2.290  0.02260 *
definición -0.686105   2.662833  -0.258  0.79681
fuerzaDeLaSombra  2.252576   2.526673   0.892  0.37322
reflexionesActivado -0.136805   1.469236  -0.093  0.92586
detalleDeLosModelosAlto  1.976847   1.495081   1.322  0.18689
profundidadDeCampoActivado  2.713836   1.468911   1.848  0.06546 .
partículasActivado  0.534609   1.506326   0.355  0.72286
modoSalidaAudioParlantesExternos 4.764431   2.023770   2.354  0.01907 *
modoSalidaAudioAuriculares  9.579972   2.148991   4.458 1.09e-05 ***
sonidoAmbienteActivado  0.825383   1.465504   0.563  0.57363
reverberaciónActivado -2.698661   1.490895  -1.810  0.07108 .
sonidoEspacial3dActivado  2.383097   1.496456   1.592  0.11211
modoDeNavegaciónJoystick  5.905511   1.843927   3.203  0.00148 **
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar 14.463050   2.109587   6.856 2.92e-11 ***
tiempoDuración  0.017770   0.003323   5.348 1.55e-07 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14.41 on 376 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4473,    Adjusted R-squared:  0.412
F-statistic: 12.68 on 24 and 376 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

**Figura 8.1:** Resultados obtenidos con el modelo lineal simple.

## MODELO LINEAL SIMPLE

Este modelo consiste en una regresión lineal entre la inmersión total y las 22 variables independientes. Los resultados se muestran en la figura 8.1. A partir de estos resultados, podemos construir una ecuación de la forma:

$$\begin{aligned}
 \text{InmersiónTotal} = & -15,5369 \\
 & + 0,0076 \times \text{anchoDePantalla} \\
 & + 0,0187 \times \text{campoDeVisin} \\
 & + 0,1678 \times \text{framesPorSegundo} \\
 & + \dots
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

para las 22 variables independientes.

### MODELO SIMPLE CON INTERACCIÓN

En este caso, como estamos trabajando con un modelo de múltiples variables, también resulta interesante analizar la interacción entre las distintas variables independientes. Esta interacción puede afectar el resultado final. Entonces, la ecuación correspondiente a este modelo tendría la siguiente forma:

$$\text{InmersiónTotal} = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_1 \times x_2 + \dots \quad (8.2)$$

### MODELO COMPLETO SIN INTERACCIONES

En este caso, no se consideran las interacciones entre las variables sino que además de incluir todas las variables se incluyen las variables de orden 2, es decir, las variables elevadas al cuadrado, como por ejemplo *anchoDePantalla*<sup>2</sup>. La ecuación correspondiente a este modelo tendría la siguiente forma:

$$\text{InmersiónTotal} = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_1^2 + b_4 \times x_2^2 + \dots \quad (8.3)$$

### MODELO COMPLETO

Llamamos *modelo completo* al modelo que, además de incluir todas las variables, incluye tanto las interacciones entre las variables como las variables de orden 2. La ecuación correspondiente a este modelo tendría la siguiente forma:

$$\text{InmersiónTotal} = b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_1^2 + b_4 \times x_2^2 + b_5 \times x_1 \times x_2 + \dots \quad (8.4)$$

**Tabla 8.1:** Comparación de los Modelos de la Etapa 1

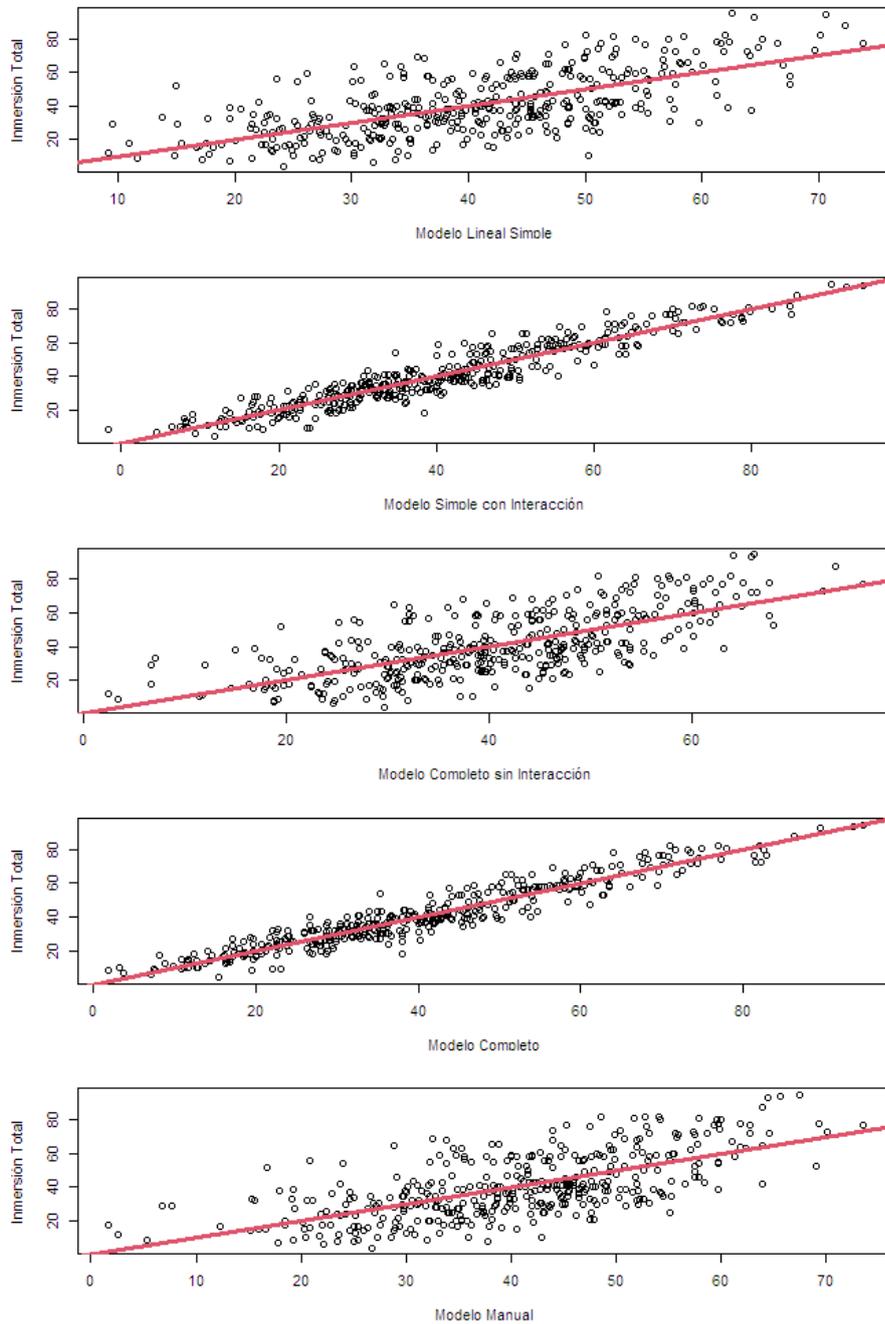
<b>Nombre del Modelo</b>	<b><math>R^2</math> Ajustado</b>	<b>AIC</b>	<b>Predictores</b>	<b>Coefficientes</b>
Lineal Simple	0.4121	3303	22	25
Simple con Interacción	0.5647	3208	22	299
Completo sin Interacción	0.4423	3288	22	34
Completo	0.5999	3155	22	308
Manual	0.4182	3289	7	14

#### MODELO MANUAL

En el capítulo anterior, se analizó la relación estadística entre cada una de las variables independientes y la inmersión total. Sería lógico entonces plantear un modelo que considere sólo aquellas variables que afectaron a la inmersión total de forma estadísticamente significativa. Para este modelo entonces se incluyeron las variables ancho de pantalla, *frames* por segundo, contraste, tiempo, texturas, salida de audio y el modo de navegación. También se incluyeron las variables de orden 2 y las interacciones entre las variables, para las variables mencionadas.

#### ANÁLISIS

Una forma de visualizar el poder de predicción de estos modelos es utilizarlos y comparar el resultado predicho con el valor real. La figura 8.2 muestra la relación entre la inmersión total y la inmersión total predicha por los modelos generados durante la etapa 1. En estos casos, cuanto más cercana a 1 sea la pendiente de la recta y cuanto más cerca estén los puntos de la recta, mejor será la predicción. Es importante tener en cuenta que esto es sólo una primera estimación. Problemas como el *overfitting* no se aprecian en estas figuras ya que se están utilizando los mismos datos del entrenamiento para predecir.



**Figura 8.2:** Relación entre la inmersión total y la predicción de inmersión total utilizando los modelos de la etapa 1.

En esta primera etapa se desarrollaron 5 modelos diferentes en función de las variables independientes y sus relaciones. Como se aprecia en la tabla 8.1, cada modelo produce resultados distintos. Los predictores corresponden a las variables utilizadas para predecir la salida. Podemos considerar que el “mejor” modelo es aquél que tenga un  $R^2$  mayor o un AIC menor. En este caso, los datos sugieren que el mejor modelo es el modelo completo.

El modelo completo se basa en la información provista por las 22 variables independientes para predecir la inmersión total. La ecuación correspondiente tiene 308 coeficientes. Por un lado, el tener tantos coeficientes puede ser un indicio de la baja eficiencia del modelo. Por otro lado, este modelo está considerando todas las combinaciones de variables entre sí, por esto resultan tantos coeficientes. Por este motivo, es muy probable que este modelo tenga problemas de *overfitting*, cuestión que se analizará en las próximas secciones.

El modelo simple con interacción presenta un  $R^2$  muy cercano al modelo completo, y también contiene muchos coeficientes, por lo que también está sujeto a los mismos problemas que el modelo completo.

El modelo lineal simple, el modelo simple con interacción y el modelo manual tienen muchos coeficientes menos si los comparamos con los otros dos modelos. La ventaja del modelo manual es que sólo utiliza 7 de las 22 variables independientes del experimento, lo que es una gran ventaja. En las siguientes secciones se realizará un análisis más detallado de estos modelos y las variables asociadas.

#### 8.6.2. ETAPA 2: SELECCIÓN DE VARIABLES

A partir del modelo completo (que incluye la combinación de todas las variables entre sí), podemos aplicar técnicas de selección de características para construir modelos más pequeños pero efectivos. Para esto, utilizaremos la técnica de selección escalonada *Stepwise Regression* detallada previamente en la sección 8.3.3.

**Tabla 8.2:** Comparación de los Modelos de la Etapa 2

<b>Nombre del Modelo</b>	<b><math>R^2</math> Ajustado</b>	<b>AIC</b>	<b>Predictores</b>	<b>Coefficientes</b>
A Forward	0.5999	3155	22	308
A Backward	0.7604	3040	22	177
A Stepwise	0.7604	3040	22	177
B Forward	0.5999	3155	22	308
B Backward	0.5704	3191	19	40
B Stepwise	0.5925	3172	18	42
C Forward	0.5999	3155	22	308
C Backward	0.492	3244	13	24
C Stepwise	0.5741	3187	18	39
D Forward	0.5999	3155	22	308
D Backward	0.4362	3277	9	15
D Stepwise	0.4362	3277	9	15

Esta técnica nos permite establecer un  $p$ -valor objetivo y se tratará de cumplir con dicho valor en la medida de lo posible. Cuanto más pequeño es el  $p$ -valor establecido, más pequeña será la cantidad de variables que permitan cumplir con dicho valor, logrando un modelo más pequeño.

Se definieron entonces 4 grupos en función del  $p$ -valor utilizado:

- A)  $p$ -valor = 0.05
- B)  $p$ -valor = 0.01
- C)  $p$ -valor = 0.005
- D)  $p$ -valor = 0.001

Por otro lado, para cada uno de estos 4 grupos, se generaron 3 modelos: uno con selección hacia adelante (*Forward Selection*), otro con selección hacia atrás (*Backward Selection*), y finalmente otro con selección escalonada (*Stepwise Selection*). De esta manera, se obtuvieron 12 nuevos modelos, representados en la tabla 8.2

## ANÁLISIS

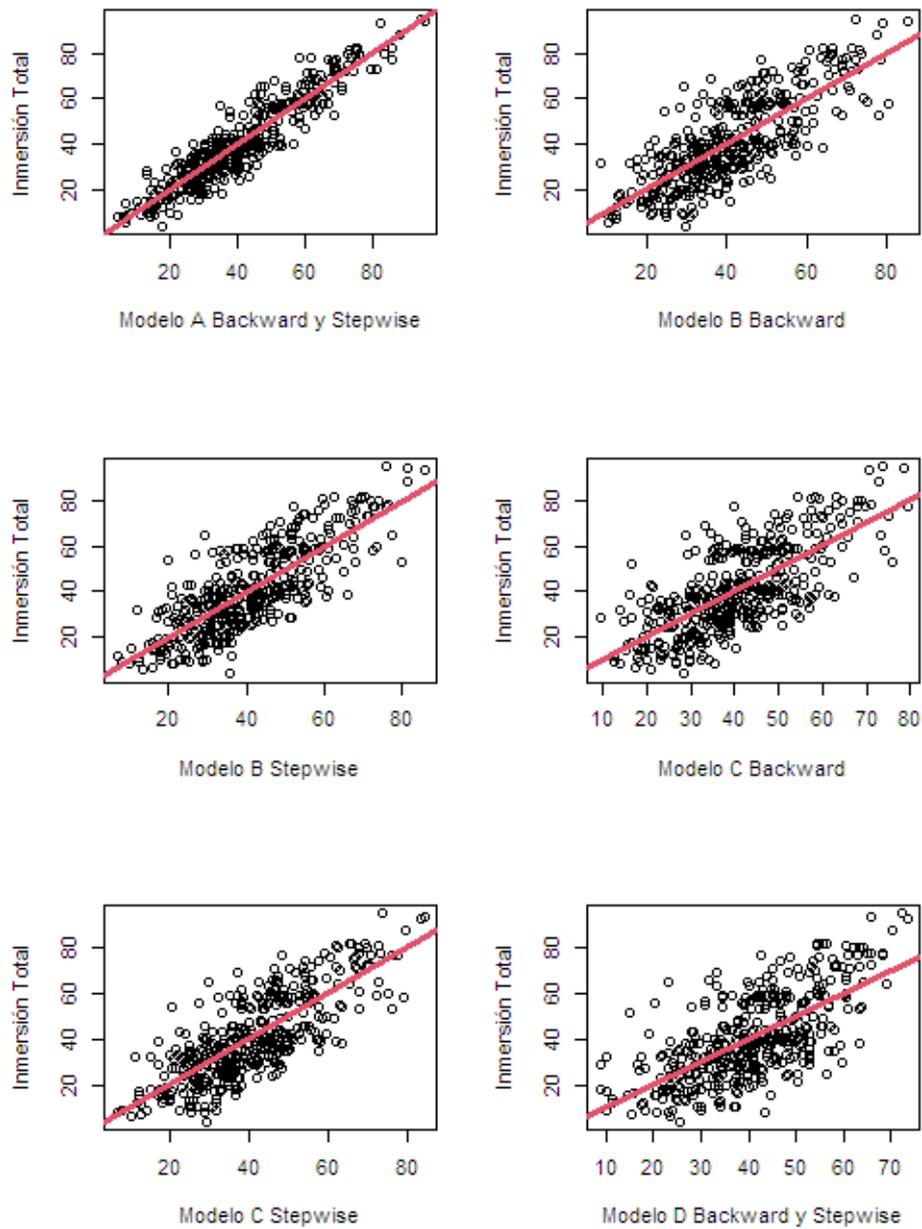
La tabla 8.2 muestra la información respecto a los modelos generados durante la etapa 2. A primera vista, es importante notar que todos los modelos que utilizaron la técnica de Selección hacia adelante resultaron ser iguales entre sí e iguales al modelo completo de la etapa 1. Esto indica que el algoritmo no se detuvo hasta incluir todas las variables. Por otro lado, tanto el modelo A Backward y el modelo A Stepwise, como el modelo D Backward y el modelo D Stepwise, son también iguales entre sí.

La figura 8.3 muestra la relación entre las predicciones hechas por cada uno de los modelos nuevos y el valor original de inmersión total. De la misma forma que en la etapa 1, esto sólo nos brinda una estimación visual de la eficiencia de la predicción del modelo ya que se están utilizando los mismos valores que fueron utilizados para entrenar el modelo.

Hasta el momento, analizando la figura 8.3, pareciera que aquellos modelos que tienen más coeficientes son los que mejor predicen. En este trabajo no sólo buscamos hallar el modelo que realice mejores predicciones, sino también resulta interesante analizar qué sucede con los modelos que utilicen menos variables. Esto último se debe a que cada vez que se agrega una nueva variable al modelo, se está incrementando la complejidad del modelo en función de la cantidad de coeficientes que utilicen dicha variable. Además, cada nueva variable agrega más dependencia a los datos iniciales, o en otras palabras, al sistema de RV utilizado.

### 8.6.3. ETAPA 3: VALIDACIÓN

A partir de todos los distintos modelos obtenidos hasta el momento, se realizó la validación de los mismos mediante el método de validación cruzada de  $k$  iteraciones con repetición. Se realizaron las pruebas con 5 iteraciones y con 10 iteraciones pero, dado que se obtuvieron resultados prácticamente iguales, sólo se muestran los resultados obtenidos para 10 iteraciones. En cuanto a la cantidad de repeticiones se utilizaron diez, lo que suele considerarse como un valor adecuado.



**Figura 8.3:** Relación entre la inmersión total y la predicción de inmersión total utilizando los modelos de la etapa 2.

En resumen, el procedimiento de validación cruzada de  $k$  iteraciones con  $k=10$ , por ejemplo, toma el *dataset* y lo divide en 10 subconjuntos. Utiliza 9 de estos 10 subconjuntos para entrenar el modelo y el restante para testarlo. Así se obtiene un error de predicción. El proceso realiza esto para los 10 subconjuntos y el error de predicción total es el promedio de los 10 errores individuales.

Dado que utilizamos repetición, es decir, todo el proceso anteriormente descrito se realiza 10 veces. De esta forma, el error de predicción final será el resultado de promediar las 10 corridas. Esto se realiza para cada modelo, obteniendo así los valores de RMSE,  $R^2$  ajustado y MAE.

Para una mejor visualización de los datos correspondientes a todos los modelos, éstos se agruparon en la tabla 8.3, ordenados según la cantidad de coeficientes. En esta tabla, los modelos agrupados son exactamente el mismo, con la misma cantidad de coeficientes, predictores y valores de predicción. Como se mencionó anteriormente, la mejor predicción puede definirse por el mayor valor de  $R^2$  ajustado o el menor valor de RMSE o MAE. Para decidir cuál modelo “es mejor” en nuestro análisis, nos enfocaremos en el valor de  $R^2$ . Sin embargo, en la tabla 8.3 se puede apreciar que tanto los valores de RMSE como de MAE concuerdan con este orden.

## ANÁLISIS

Una de las cosas que primero llaman la atención es que el modelo completo no es tan poderoso como pensábamos, obteniendo solo un  $R^2 = 0,1403$ . La principal explicación para esto es el *overfitting*. Es sumamente probable que un modelo que utiliza absolutamente todas las variables y todas las combinaciones entre éstas quede ajustado a características muy específicas de los datos de entrenamiento que no tienen relación causal con la función objetivo. Esto es un tema de discusión respecto a modelos de regresión y *Machine Learning* y se escapa del contenido de esta tesis, pero resulta interesante observar que el modelo más completo no suele ser el mejor.

**Tabla 8.3:** Comparación y Validación de todos los modelos. Los modelos agrupados son exactamente iguales.

Nombre del Modelo	Datos del Modelo				Datos de la Validación		
	Coefficientes	Predictores	$R^2$ Ajustado	AIC	RMSE	$R^2$ Ajustado	MAE
Completo							
A Forward							
B Forward	308	22	0.5999	3155	32.18	0.1403	25.47
C Forward							
D Forward							
Simple con Interacción	299	22	0.5647	3208	30.56	0.1393	24.23
A Backward							
A Stepwise	177	22	0.7604	3040	12.71	0.5973	10.23
B Stepwise	42	18	0.5925	3172	12.62	0.5542	10.29
B Backward	40	19	0.5704	3191	12.99	0.5297	10.59
C Stepwise	39	18	0.5741	3187	12.94	0.5314	10.68
Completo sin Interacción	34	22	0.4423	3290	14.71	0.4037	12.01
Lineal Simple	25	22	0.412	3303	14.86	0.3869	12.16
C Backward	24	13	0.492	3244	13.78	0.4691	11.36
D Backward							
D Stepwise	15	9	0.4362	3277	14.36	0.4235	11.75
Manual	14	7	0.4182	3289	14.55	0.4091	11.94

El modelo simple con interacciones obtuvo casi los mismos resultados que el modelo completo. Debemos recordar que este modelo es exactamente igual al modelo completo, sólo que no incluye los términos de grado 2. Por este motivo, la cantidad de coeficientes es casi la misma y los resultados son muy similares. Este modelo obtuvo un  $R^2 = 0,1392$ , que es un valor de predicción muy bajo.

Los modelos A Backward y A Stepwise con 177 coeficientes, resultaron ser el mejor modelo en cuanto a predicción, con un  $R^2 = 0,5973$ . Sin embargo, 177 coeficientes pueden ser muchos según la aplicación o el sistema en el que se desee utilizar el modelo. También se debe tener en cuenta que este modelo utiliza las 22 variables independientes.

El resto de los modelos tienen todos 42 coeficientes o menos. Los modelos B Stepwise, B Backward y C Stepwise tienen un  $R^2$  mayor a 0.5. Estos 3 modelos tienen entre 18 y 19 predictores, por lo que no presentan mucha diferencia respecto al modelo con 177 coeficientes y 22 predictores. Sin embargo, la diferencia entre la cantidad de coeficientes es notoria. A la hora de elegir alguno de estos modelos, es necesario analizar cuáles son los predictores que no se están utilizando. Esto nos brinda información sobre las variables que utiliza el modelo y, considerando un sistema de RV, es muy importante saber qué variables de *hardware* o de *software* considerar ya que esto puede incrementar el costo de *hardware* o de implementación del sistema.

Los modelos restantes tienen 34 o menos coeficientes. El mejor de ellos en cuanto a poder de predicción es el modelo C Backward con  $R^2 = 0,4691$ . Este modelo sólo utiliza 13 predictores de las 22 variables independientes y tiene 24 coeficientes. Claramente los modelos Completo sin Interacción y Lineal Simple son inferiores al Modelo C Backward ya que tienen un  $R^2$  inferior, utilizan las 22 variables y tienen más coeficientes.

Finalmente, los últimos dos modelos tienen 14 y 15 coeficientes. Estos modelos utilizan muy pocas variables y tienen un  $R^2$  de alrededor de 0.4. Si se quiere obtener un modelo que utilice muy pocas variables, estos dos modelos son una buena elección. Es necesario además analizar las variables que utilizan.

## 8.7. SELECCIÓN FINAL

A partir de todos los modelos obtenidos hasta el momento, deseamos quedarnos con el o los mejores. Esto está fuertemente ligado al uso que queremos darle al modelo. Por un lado, nos puede interesar el modelo con mayor poder de predicción ya que nos proveerá una mejor aproximación de inmersión en función de las variables del sistema. Por otro lado, podemos querer sacrificar algo de este poder de predicción y seleccionar un modelo que tenga menos coeficientes y predictores. De esta forma, tendremos un modelo más simple, con menos variables y por lo tanto con un cómputo más rápido. Entonces, existe un *trade-off* entre el poder de predicción y la cantidad de coeficientes y predictores que debe considerarse a la hora de seleccionar los mejores modelos.

De los modelos resultantes, el modelo que mejor predice, en base al  $R^2$  es el modelo A Backward o Stepwise con 177 coeficientes y  $R^2 = 0,5973$ . Sin embargo, también se hallaron modelos con un  $R^2$  similar y con muchos menos coeficientes. Por lo tanto, descartaremos el modelo de 177 coeficientes y analizaremos en detalle los modelos con 42, 40 y 39 coeficientes que tiene respectivamente  $R^2 = 0,5542, 0,5297$  y  $0,5314$ .

Coefficients:	Estimate
(Intercept)	-5.280e+01
anchoDePantalla	2.313e-02
campoDeVisión	2.330e-01
framesPorSegundo	1.525e+00
estereopsisActivado	-3.741e+00
antialiasingActivado	-1.446e+01
modoDeTexturasConTexturas	-3.558e+00
modoDeIluminaciónLucesYSombreado	1.793e+00
brillo	-5.051e+00
contraste	1.578e+01
definición	2.606e+01
fuerzaDeLaSombra	1.474e+01
detalleDeLosModelosAlto	1.605e+00
profundidadDeCampoActivado	7.431e+00
partículasActivado	4.943e+00
modoSalidaAudioParlantesExternos	1.870e+00
modoSalidaAudioAuriculares	1.183e+01
sonidoAmbienteActivado	1.170e+01
modoDeNavegaciónJoystick	1.826e+01
modoDeNavegaciónCaminarEnELugar	2.376e+00
tiempoDuración	2.978e-03
I(anchoDePantalla^2)	-7.600e-06
I(framesPorSegundo^2)	-1.761e-02
anchoDePantalla:modoDeIluminaciónLucesYSombreado	7.121e-03
campoDeVisión:contraste	-2.278e-01
campoDeVisión:definición	-4.317e-01
estereopsisActivado:fuerzaDeLaSombra	-1.369e+01
estereopsisActivado:tiempoDuración	1.541e-02
antialiasingActivado:tiempoDuración	1.700e-02
modoDeTexturasConTexturas:contraste	8.745e+00
modoDeTexturasConTexturas:detalleDeLosModelosAlto	1.079e+01
modoDeTexturasConTexturas:tiempoDuración	1.943e-02
fuerzaDeLaSombra:partículasActivado	-1.470e+01
sonidoAmbienteActivado:tiempoDuración	-1.777e-02
modoDeNavegaciónJoystick:tiempoDuración	-1.410e-02
modoDeNavegaciónCaminarEnELugar:tiempoDuración	1.691e-02
detalleDeLosModelosAlto:profundidadDeCampoActivado	-8.055e+00
partículasActivado:sonidoAmbienteActivado	6.549e+00
antialiasingActivado:modoSalidaAudioParlantesExternos	7.244e+00
antialiasingActivado:modoSalidaAudioAuriculares	-2.993e+00
antialiasingActivado:modoDeIluminaciónLucesYSombreado	-6.452e+00
modoDeTexturasConTexturas:modoDeIluminaciónLucesYSombreado	-7.165e+00

**Figura 8.4:** Especificación del modelo B Stepwise con 42 coeficientes.

Coefficients:	Estimate
(Intercept)	-4.179e+01
anchoDePantalla	2.197e-02
campoDeVisión	2.254e-01
framesPorSegundo	1.428e+00
estereopsisActivado	-4.123e+00
antialiasingActivado	-1.470e+01
modoDeTexturasConTexturas	-6.504e+00
modoDeIluminaciónLucesYSombreado	-8.300e+00
saturación	2.672e+00
brillo	-3.862e+00
contraste	1.596e+01
definición	2.531e+01
fuerzaDeLaSombra	1.421e+01
detalleDeLosModelosAlto	-5.820e+00
profundidadDeCampoActivado	3.485e+00
partículasActivado	2.590e+00
modoSalidaAudioParlantesExternos	5.013e+00
modoSalidaAudioAuriculares	1.070e+01
sonidoAmbienteActivado	9.528e+00
modoDeNavegaciónJoystick	1.665e+01
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar	6.185e-01
tiempoDuración	1.622e-03
I(anchoDePantalla^2)	-6.822e-06
I(framesPorSegundo^2)	-1.659e-02
anchoDePantalla:modoDeIluminaciónLucesYSombreado	6.908e-03
campoDeVisión:contraste	-2.349e-01
campoDeVisión:definición	-4.252e-01
estereopsisActivado:fuerzaDeLaSombra	-1.259e+01
estereopsisActivado:tiempoDuración	1.525e-02
antialiasingActivado:saturación	-6.027e+00
antialiasingActivado:tiempoDuración	1.672e-02
modoDeTexturasConTexturas:contraste	7.788e+00
modoDeTexturasConTexturas:detalleDeLosModelosAlto	8.575e+00
modoDeTexturasConTexturas:tiempoDuración	1.917e-02
modoDeIluminaciónLucesYSombreado:detalleDeLosModelosAlto	7.749e+00
fuerzaDeLaSombra:partículasActivado	-1.189e+01
partículasActivado:sonidoAmbienteActivado	7.176e+00
sonidoAmbienteActivado:tiempoDuración	-1.644e-02
modoDeNavegaciónJoystick:tiempoDuración	-1.249e-02
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar:tiempoDuración	1.850e-02

**Figura 8.5:** Especificación del modelo B Backward con 40 coeficientes.

Coefficients:	Estimate
(Intercept)	-4.587e+01
anchoDePantalla	2.205e-02
campoDeVisión	2.196e-01
framesPorSegundo	1.490e+00
estereopsisActivado	-4.975e+00
antialiasingActivado	-1.458e+01
modoDeTexturasConTexturas	-6.370e+00
modoDeIluminaciónLucesYSombreado	-8.521e+00
brillo	-4.246e+00
contraste	1.600e+01
definición	2.561e+01
fuerzaDeLaSombra	1.405e+01
detalleDeLosModelosAlto	-2.127e+00
profundidadDeCampoActivado	7.085e+00
partículasActivado	3.329e+00
modoSalidaAudioParlantesExternos	5.074e+00
modoSalidaAudioAuriculares	1.035e+01
sonidoAmbienteActivado	1.004e+01
modoDeNavegaciónJoystick	1.859e+01
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar	3.064e+00
tiempoDuración	3.586e-03
I(anchoDePantalla^2)	-6.937e-06
I(framesPorSegundo^2)	-1.735e-02
anchoDePantalla:modoDeIluminaciónLucesYSombreado	6.904e-03
campoDeVisión:contraste	-2.275e-01
campoDeVisión:definición	-4.178e-01
estereopsisActivado:fuerzaDeLaSombra	-1.300e+01
estereopsisActivado:tiempoDuración	1.700e-02
antialiasingActivado:tiempoDuración	1.647e-02
modoDeTexturasConTexturas:contraste	7.761e+00
modoDeTexturasConTexturas:detalleDeLosModelosAlto	9.612e+00
modoDeTexturasConTexturas:tiempoDuración	1.856e-02
modoDeIluminaciónLucesYSombreado:detalleDeLosModelosAlto	7.576e+00
fuerzaDeLaSombra:partículasActivado	-1.324e+01
partículasActivado:sonidoAmbienteActivado	7.180e+00
sonidoAmbienteActivado:tiempoDuración	-1.657e-02
modoDeNavegaciónJoystick:tiempoDuración	-1.521e-02
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar:tiempoDuración	1.526e-02
detalleDeLosModelosAlto:profundidadDeCampoActivado	-7.657e+00

**Figura 8.6:** Especificación del modelo C Stepwise con 39 coeficientes.

Los resultados de los modelos B Stepwise, B Backward y C Stepwise pueden apreciarse en las figuras 8.4, 8.5 y 8.6 respectivamente. De las 22 variables, ninguno de los 3 modelos utiliza las variables *reflexiones*, **reverberación** y *sonidoEspacial3D*. Además, el modelo B Backward tampoco utiliza la variable *saturación*. Resulta sorprendente que el sonido espacial 3D no influya ya que es una variable muy estudiada en la literatura. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo 7, esto puede deberse a los datos del experimento en particular. Es esperable que las variables *reflexiones*, *reverberación* y *saturación* no influyan tanto en la inmersión ya que no existen muchos indicios en la literatura sobre su influencia. Teniendo en cuenta lo expuesto, consideramos que el modelo B Stepwise, con 42 coeficientes, es el mejor de los tres ya que, aunque tiene 2 o 3 coeficientes más que los otros modelos, presenta un mayor poder de predicción.

Respecto al Modelo Completo sin Interacción, con 34 coeficientes, y al Modelo Lineal Simple, con 25 coeficientes, claramente no son de los mejores ya que ambos utilizan las 22 variables y su poder de predicción es inferior a los otros modelos.

Consideramos que el Modelo C Backward, con 24 coeficientes, también es uno de los mejores modelos ya que utiliza 13 de las 22 variables y su poder de predicción no es tan inferior a los modelos de más coeficientes y variables. Los resultados de este modelo pueden verse en la figura 8.7.

De las 22 variables, este modelo no utiliza las variables *estereopsis*, **antialiasing**, *modoDeIluminación*, *saturación*, *fuerzaDeLasSombras*, *reflexiones*, *profundidadDeCampo*, *reverberación* ni *sonidoEspacial3d*. Consideramos que de estas variables la *estereopsis*, el modo de iluminación y el sonido espacial 3d son las más importantes en el sentido de que, según la literatura, son variables muy relevantes cuya influencia en la inmersión y la presencia son importantes. Resultará interesante ver qué resultados nos proveerá este modelo.

Coefficients:	Estimate
(Intercept)	-38.160960
anchoDePantalla	0.008504
campoDeVisión	0.196812
framesPorSegundo	1.541130
modoDeTexturasConTexturas	-5.464079
brillo	-4.085711
contraste	19.386448
definición	23.334551
detalleDeLosModelosAlto	-1.670229
partículasActivado	-3.069367
modoSalidaAudioParlantesExternos	5.297976
modoSalidaAudioAuriculares	10.454059
sonidoAmbienteActivado	-2.809010
modoDeNavegaciónJoystick	18.953781
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar	1.551341
tiempoDuración	0.012916
I(framesPorSegundo^2)	-0.018564
campoDeVisión:contraste	-0.222599
campoDeVisión:definición	-0.381922
modoDeTexturasConTexturas:detalleDeLosModelosAlto	8.765078
modoDeTexturasConTexturas:tiempoDuración	0.019750
partículasActivado:sonidoAmbienteActivado	7.579476
modoDeNavegaciónJoystick:tiempoDuración	-0.015178
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar:tiempoDuración	0.015704

**Figura 8.7:** Especificación del modelo C Backward con 24 coeficientes.

Coefficients:	
	Estimate
(Intercept)	-44.783225
anchoDePantalla	0.008238
campoDeVisión	0.227430
framesPorSegundo	1.608568
modoDeTexturasConTexturas	9.717910
definición	26.410259
detalleDeLosModelosAlto	-3.064720
modoSalidaAudioParlantesExternos	5.519799
modoSalidaAudioAuriculares	10.191287
modoDeNavegaciónJoystick	5.692684
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar	13.379316
tiempoDuración	0.017861
I(framesPorSegundo^2)	-0.019224
campoDeVisión:definición	-0.431999
modoDeTexturasConTexturas:detalleDeLosModelosAlto	9.859038

**Figura 8.8:** Especificación del modelo D Backward y Stepwise con 15 coeficientes.

Finalmente, los modelos de 15 y 14 coeficientes son muy similares en cuanto a poder de predicción, cantidad de coeficientes y cantidad de predictores. Los resultados de estos modelos puede verse en las figuras 8.8 y 8.9. El modelo con 15 coeficientes tiene 3 variables que no tiene el modelo con 14 coeficientes, estas son *campo de visión*, *definición* y *detalleDeLosModelos*. Por el otro lado, el modelo con 14 coeficientes tiene una variable que no tiene el modelo con 15 coeficientes, esta es *contraste*. Según el análisis estadístico el contraste influye en la inmersión total, aunque muy levemente. Sin embargo, consideramos que el campo de visión y el detalle de los modelos son variables más influyentes o más importantes que el contraste. Por este motivo, seleccionaremos el modelo con 15 coeficientes en lugar del de 14.

Coefficients:	
	Estimate
(Intercept)	-3.717e+01
anchoDePantalla	1.894e-02
framesPorSegundo	1.410e+00
contraste	4.732e+00
tiempoDuración	2.844e-02
I(anchoDePantalla^2)	-4.688e-06
I(framesPorSegundo^2)	-1.642e-02
modoDeTexturasConTexturas	1.379e+01
I(contraste^2)	-1.681e+00
modoSalidaAudioParlantesExternos	4.474e+00
modoSalidaAudioAuriculares	9.558e+00
modoDeNavegaciónJoystick	6.220e+00
modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar	1.364e+01
I(tiempoDuración^2)	-6.568e-06

**Figura 8.9:** Especificación del modelo Manual con 14 coeficientes.

**Tabla 8.4:** Modelos de Inmersión

Datos del Modelo			Datos de la Validación
Nombre del Modelo	Coefficientes	Predictores	$R^2$ Ajustado
Modelo 1	42	18	0.5542
Modelo 2	24	13	0.4691
Modelo 3	15	9	0.4235

## 8.8. MÉTRICAS DE INMERSIÓN: MODELOS SELECCIONADOS Y ECUACIONES

En base a los datos generados durante el experimento, a la experiencia en cuanto a los conceptos teóricos, y al análisis estadístico, se han construido varias métricas de inmersión, de las cuales se han seleccionado 3.

La tabla 8.4 muestra los 3 modelos seleccionados. Para una mejor organización y claridad, de ahora en más estos modelos los denominaremos “Modelo 1”, “Modelo 2” y “Modelo 3”. La tabla detalla la cantidad de coeficientes, la cantidad de predictores y el  $R^2$  de la validación, que nos indica el poder de predicción de cada modelo. También se presentan las ecuaciones resultantes de cada uno de los tres modelos.

La ecuación resultante del Modelo 1 es:

$$\begin{aligned}
 \text{InmersiónTotal} &= -52,795864 + \\
 \text{anchoDePantalla} &\times 0,023127 + \\
 \text{campoDeVisión} &\times 0,233013 + \\
 \text{framesPorSegundo} &\times 1,524708 + \\
 \text{estereopsisActivado} &\times -3,741471 + \\
 \text{antialiasingActivado} &\times -14,463670 + \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} &\times -3,558318 + \\
 \text{modoDeIluminaciónLucesYSombreado} &\times 1,792554 + \\
 \text{brillo} &\times -5,050710 + \\
 \text{contraste} &\times 15,784897 + \\
 \text{definición} &\times 26,061258 + \\
 \text{fuerzaDeLaSombra} &\times 14,743503 + \\
 \text{detalleDeLosModelosAlto} &\times 1,604808 + \\
 \text{profundidadDeCampoActivado} &\times 7,430725 + \\
 \text{particulasActivado} &\times 4,942608 + \\
 \text{modoSalidaAudioParlantesExternos} &\times 1,870371 + \\
 \text{modoSalidaAudioAuriculares} &\times 11,826967 + \\
 \text{sonidoAmbienteActivado} &\times 11,696136 + \\
 \text{modoDeNavegaciónJoystick} &\times 18,260037 + \\
 \text{modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar} &\times 2,375830 + \\
 \text{tiempoDuración} &\times 0,002978 + \\
 \text{anchoDePantalla}^2 &\times -0,000008 + \\
 \text{framesPorSegundo}^2 &\times -0,017609 + \\
 \text{anchoDePantalla} \times \text{modoDeIluminaciónLucesYSombreado} &\times 0,007121 + \\
 \text{campoDeVisión} \times \text{contraste} &\times -0,227759 + \\
 \text{campoDeVisión} \times \text{definición} &\times -0,431735 + \\
 \text{estereopsisActivado} \times \text{fuerzaDeLaSombra} &\times -13,691010 + \\
 \text{estereopsisActivado} \times \text{tiempoDuración} &\times 0,015409 + \\
 \text{antialiasingActivado} \times \text{tiempoDuración} &\times 0,017004 + \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{contraste} &\times 8,744551 + \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{detalleDeLosModelosAlto} &\times 10,788037 + \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{tiempoDuración} &\times 0,019434 + \\
 \text{fuerzaDeLaSombra} \times \text{particulasActivado} &\times -14,702403 + \\
 \text{sonidoAmbienteActivado} \times \text{tiempoDuración} &\times -0,017771 + \\
 \text{modoDeNavegaciónJoystick} \times \text{tiempoDuración} &\times -0,014104 + \\
 \text{modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar} \times \text{tiempoDuración} &\times 0,016911 + \\
 \text{detalleDeLosModelosAlto} \times \text{profundidadDeCampoActivado} &\times -8,055026 + \\
 \text{particulasActivado} \times \text{sonidoAmbienteActivado} &\times 6,549401 + \\
 \text{antialiasingActivado} \times \text{modoSalidaAudioParlantesExternos} &\times 7,244033 + \\
 \text{antialiasingActivado} \times \text{modoSalidaAudioAuriculares} &\times -2,993224 + \\
 \text{antialiasingActivado} \times \text{modoDeIluminaciónLucesYSombreado} &\times -6,452346 + \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{modoDeIluminaciónLucesYSombreado} &\times -7,164926(8.5)
 \end{aligned}$$

La ecuación resultante del Modelo 2 es:

$$\begin{aligned}
 \text{InmersiónTotal} &= -38,16095974+ \\
 \text{anchoDePantalla} &\times 0,008504384+ \\
 \text{campoDeVisión} &\times 0,196812152+ \\
 \text{framesPorSegundo} &\times 1,541130003+ \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} &\times -5,46407892+ \\
 \text{brillo} &\times -4,085710982+ \\
 \text{contraste} &\times 19,38644806+ \\
 \text{definición} &\times 23,33455116+ \\
 \text{detalleDeLosModelosAlto} &\times -1,670228672+ \\
 \text{particulasActivado} &\times -3,069366777+ \\
 \text{modoSalidaAudioParlantesExternos} &\times 5,297975701+ \\
 \text{modoSalidaAudioAuriculares} &\times 10,45405873+ \\
 \text{sonidoAmbienteActivado} &\times -2,809009675+ \\
 \text{modoDeNavegaciónJoystick} &\times 18,95378116+ \\
 \text{modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar} &\times 1,551341478+ \\
 \text{tiempoDuración} &\times 0,012916461+ \\
 \text{framesPorSegundo}^2 &\times -0,018563525+ \\
 \text{campoDeVisión} \times \text{contraste} &\times -0,222598953+ \\
 \text{campoDeVisión} \times \text{definición} &\times -0,38192204+ \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{detalleDeLosModelosAlto} &\times 8,765077901+ \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{tiempoDuración} &\times 0,019749586+ \\
 \text{particulasActivado} \times \text{sonidoAmbienteActivado} &\times 7,579476366+ \\
 \text{modoDeNavegaciónJoystick} \times \text{tiempoDuración} &\times -0,015178069+ \\
 \text{modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar} \times \text{tiempoDuración} &\times 0,015704389
 \end{aligned}
 \tag{8.6}$$

Y, la ecuación resultante del Modelo 3 es:

$$\begin{aligned}
 \text{InmersiónTotal} &= -44,78322466+ \\
 \text{anchoDePantalla} &\times 0,008237546+ \\
 \text{campoDeVisión} &\times 0,227429898+ \\
 \text{framesPorSegundo} &\times 1,608568062+ \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} &\times 9,717910348+ \\
 \text{definición} &\times 26,4102586+ \\
 \text{detalleDeLosModelosAlto} &\times -3,064720396+ \\
 \text{modoSalidaAudioParlantesExternos} &\times 5,519798682+ \\
 \text{modoSalidaAudioAuriculares} &\times 10,19128742+ \\
 \text{modoDeNavegaciónJoystick} &\times 5,692683516+ \\
 \text{modoDeNavegaciónCaminarEnElLugar} &\times 13,37931564+ \\
 \text{tiempoDuración} &\times 0,017860572+ \\
 \text{framesPorSegundo}^2 &\times -0,019223957+ \\
 \text{campoDeVisión} \times \text{definición} &\times -0,431998513+ \\
 \text{modoDeTexturasConTexturas} \times \text{detalleDeLosModelosAlto} &\times 9,859037709
 \end{aligned}
 \tag{8.7}$$

## 8.9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las distintas estrategias y técnicas utilizadas para hallar un conjunto de modelos a utilizar para predecir la inmersión total en base a los datos obtenidos en el experimento detallado en el capítulo 6.

Particularmente, para hallar una métrica de inmersión total, se utilizaron modelos de regresión de múltiples variables y polinómicos. Además, se usaron técnicas de selección de características para obtener modelos más acotados y eficientes. Finalmente, se emplearon técnicas de validación que permitieron validar todos los modelos generados para poder seleccionar, de este modo, los modelos que realizan las mejores predicciones.

Para cada técnica se generaron modelos utilizando distintos parámetros de configuración. Para selección de características, por ejemplo, se pudieron generar 12 modelos distintos. Con respecto a la validación, se podrían haber utilizado además otros métodos. Sin embargo, como la validación cruzada de  $k$  iteraciones con repetición es considerada como la mejor de las que analizamos, optamos por utilizar sólo ésta. De todos modos, se utilizaron distintos valores de  $k$  pero los resultados obtenidos fueron casi idénticos.

Algunos de los modelos generados utilizan las 22 variables independientes del experimento y algunos no. Es muy interesante el análisis de qué variables no están siendo consideradas por los modelos, lo que se detalló en la sección 8.7.

En el capítulo anterior se realizó un análisis estadístico de cada variable para comprender mejor qué variables influyen en la inmersión total del sistema. Es a partir de ese análisis que en este capítulo se consideró la influencia de dichas variables para crear un modelo manual que considerara sólo las variables con mayor influencia y sus interacciones. Desafortunadamente este modelo no fue uno de los 3 mejores debido a su bajo poder de predicción. Este modelo utiliza solo 7 de las 22 variables del experimento y aunque la influencia de las variables utilizadas por el modelo es estadísticamente significativa, las demás variables que no fueron consideradas también aportan al poder de la predicción del modelo. Por este motivo, resultó con un poder de predicción bastante bajo.

Habiendo generado modelos o métricas de inmersión, estamos ahora en condiciones de predecir el grado de inmersión de un sistema de RV dado. Además, algo sumamente interesante que puede hacerse a partir de lo realizado es maximizar la función para obtener los valores que deben tener las variables del modelo para maximizar el nivel de inmersión total. Este análisis será llevado a cabo en el próximo capítulo.



# 9

## Aplicando la Métrica de Inmersión

### 9.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos previos se detalló el experimento llevado a cabo con el objetivo de obtener una métrica para cuantificar la inmersión de un sistema de RV dado. A partir del experimento se generó un conjunto de datos con los cuales se pudieron desarrollar tres modelos diferentes o métricas de inmersión, en función de las variables de *hardware* y de *software* del sistema.

A partir de estas métricas, analizaremos ahora qué valores deben tomar las variables para que un sistema de RV provea el mayor grado posible de inmersión. En la sección 9.2 se describe el proceso que se llevó a cabo para poder obtener aquellos valores que maximizan y también aquellos que minimizan la inmersión, para los tres modelos obtenidos.

Uno de los objetivos principales de la obtención de estas métricas era el poder utilizarlas para cuantificar la inmersión de cualquier sistema de RV dado. En la sección 9.3 se presenta un análisis en el que utilizamos nuestras métricas para calcular la inmersión provista por tres de los sistemas de RV comerciales más populares.

## 9.2. LA MEJOR INMERSIÓN

Resulta muy interesante analizar cuáles son los valores máximos y mínimos de inmersión que nos provee esta métrica. En este trabajo se utilizó la técnica de fuerza bruta para obtener estos valores de inmersión máximos y mínimos. La optimización (maximización o minimización) de modelos de regresión es un área cuya profundización escapa al objetivo de esta tesis; sin embargo, se considerará cómo abordarla como trabajo a futuro. A continuación se explica el procedimiento utilizado.

### 9.2.1. FUERZA BRUTA Y COMBINACIONES

Mediante la fuerza bruta se evalúa la función considerando todas las combinaciones de valores de variables, quedándose con los valores máximos y mínimos de inmersión y con los valores correspondientes para cada una de las variables. El principal problema de esta técnica es que si la cantidad de combinaciones es muy grande, no podríamos calcular todas las combinaciones en un tiempo razonable.

En una primera instancia se optó por discretizar las variables continuas en aproximadamente 10 valores distintos por variable, abarcando su rango de valores. Para el análisis y cálculo de los modelos utilizamos el lenguaje de programación R. Utilizando este lenguaje y en base al hardware utilizado para realizar los cálculos, si consideramos por ejemplo el Modelo 1, con sus predictores y coeficientes, nuestros cálculos estiman que podemos realizar alrededor de 185.000 iteraciones en 1 segundo. Dado que la cantidad de combinaciones totales es de 7.283.889.930.240, el cálculo demoraría alrededor de 1,25 años.

Acotamos los valores, dejando valores mínimos, medios y máximos para las variables continuas:

- anchoDePantalla = 200, 1000, 2200
- campoDeVision = 30, 100
- framesPorSegundo = 16, 40, 60
- estereopsis = Desactivado , Activado
- antialiasing = Desactivado , Activado
- modoDeTexturas = SinTexturas , ConTexturas
- modoDeIluminacion = Ambiente , LucesYSombreado
- saturacion = -1.0, 0.2, 1.0
- brillo = -0.8, 0.2, 0.8
- contraste = -0.8, 0.2, 0.8
- definicion = 0.2, 1.0
- fuerzaDeLaSombra = 0.2, 1.0
- reflexiones = Desactivado , Activado
- detalleDeLosObjetos = Bajo , Alto
- profundidadDeCampo = Desactivado , Activado
- particulas = Desactivado , Activado
- modoSalidaAudio = SinSonido , ParlantesExternos , Auriculares
- sonidoAmbiente = Desactivado , Activado
- reverberacion = Desactivado , Activado
- sonidoEspacial = Desactivado , Activado
- modoDeNavegacion = Teletransportacion , Joystick , CaminarEnElLugar
- tiempoDuracion = 200, 700, 1200

Esto genera un total de 107.498.424 combinaciones, cuyo cálculo demoró poco menos de 10 minutos. Si bien, no obtendremos los mismos resultados que al haber utilizado un conjunto mayor de valores para algunas de las variables, consideramos que, en primera instancia los valores para cada variable son representativos.

En la tabla 9.1 se presenta una comparación de los resultados obtenidos para el Modelo 1, el Modelo 2 y el Modelo 3 en función de los valores máximos y mínimos de las variables consideradas. Los valores con “\*” son aquellos valores que el modelo no considera, por lo que pueden tomar cualquier valor y no afectará al resultado.

De acuerdo al experimento que desarrollamos en el capítulo 6, la variable *inmersión total* se encontraba en el rango de 0 a 100. En la tabla puede observarse que algunos de los valores máximos y mínimos de inmersión resultaron ser mayores a 100 o menores a 0. Esto se debe a que el modelo de regresión es un modelo lineal que ajusta la ecuación de una recta en el espacio multidimensional, por lo que no tiene máximos ni mínimos. Por este motivo, los resultados que sobrepasan el límite impuesto en el experimento son muy interesantes ya que sugieren que podemos obtener valores de inmersión más allá de 100 o menores a 0.

### 9.2.2. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES

En el capítulo 7 se estudió la relación estadística entre las distintas variables del experimento y la inmersión total. Las variables que mostraron influenciar la inmersión total fueron: el ancho de pantalla, los *frames* por segundo, el uso de texturas, el contraste, el modo de salida de audio, el modo de navegación y el tiempo transcurrido. Es muy interesante ver qué ocurre con los valores de estas variables cuando se utilizan para el cálculo de la inmersión mínima y máxima.

Para los 3 modelos, la inmersión mínima utiliza un ancho de pantalla de 200 (el mínimo disponible) y la inmersión máxima un ancho de pantalla de 2200 (el máximo disponible). Esto efectivamente apoya los resultados del trabajo relacionado que sugiere que una mayor resolución de pantalla incrementa la inmersión.

**Tabla 9.1:** Valores de las Variables para Obtener Valores Mínimos y Máximos de Inmersión, para cada Modelo.

Nombre Variable	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	Inmersión	Inmersión	Inmersión	Inmersión	Inmersión	Inmersión
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
anchoDePantalla	200	2200	200	2200	200	2200
campoDeVisión	30	30	30	30	100	30
framesPorSegundo	16	40	16	40	16	40
estereopsis	Activado	Activado	*	*	*	*
antialiasing	Activado	Desactivado	*	*	*	*
modoDeTexturas	ConTexturas	ConTexturas	SinTexturas	ConTexturas	SinTexturas	ConTexturas
modoDeIluminación	LucesYSombreado	LucesYSombreado	*	*	*	*
saturación	*	*	*	*	*	*
brillo	0.8	-0.8	0.8	-0.8	*	*
contraste	-0.8	0.8	-0.8	0.8	*	*
definición	0.2	1	0.2	1	1	1
fuerzaDeLaSombra	1	0.2	*	*	*	*
reflexiones	*	*	*	*	*	*
detalleDeLosModelos	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
profundidadDeCampo	Desactivado	Desactivado	*	*	*	*
partículas	Activado	Activado	Activado	Activado	*	*
modoSalidaAudio	SinAudio	Auriculares	SinAudio	Auriculares	SinAudio	Auriculares
sonidoAmbiente	Desactivado	Desactivado	Desactivado	Activado	*	*
reverberación	*	*	*	*	*	*
sonidoEspacial3d	*	*	*	*	*	*
modoDeNavegación	Teletransportación	CaminarEnElLugar	Teletransportación	CaminarEnElLugar	Teletransportación	CaminarEnElLugar
tiempoDuración	200	1200	200	1200	200	1200
<b>Inmersión Total</b>	<b>-67.0786</b>	<b>129.8967</b>	<b>-23.86618</b>	<b>117.0906</b>	<b>-15.85917</b>	<b>88.71248</b>

Por otro lado, el campo de visión de los 3 modelos es de 30, tanto en inmersión mínima como máxima (a excepción del modelo 3 con un campo de visión de 100 para el cálculo de la inmersión mínima). Este valor resulta sorprendente ya que se esperaría que la inmersión máxima utilice el campo de visión máximo. Como se detalló en el capítulo anterior, este tipo de situaciones puede deberse a muchos factores como, por ejemplo, la cantidad de datos o las características del participante.

Los *frames* por segundo también fueron consistentes para los tres modelos, con 16 *frames* por segundo para la inmersión mínima y 40 para la inmersión máxima. En este caso los modelos con inmersión máxima no están utilizando el valor máximo disponible de *frames* por segundo (60), sino que utilizan 40.

El Modelo 1 es el único que considera la estereopsis y el *antialiasing*. En este caso, la estereopsis está activada tanto para la inmersión mínima como máxima, indicando que no es relevante. Contrariamente a lo se pensaría intuitivamente, el *antialiasing* está activado en la inmersión mínima y desactivado en la inmersión máxima, lo que sugiere que que incrementa la inmersión al estar desactivado.

El Modelo 1 también es el único que considera el modo de iluminación, utilizando luces y sombreado tanto para la inmersión mínima como máxima. Esto también indica que esta variable no sería relevante.

A excepción del Modelo 1, todos los modelos utilizan texturas y detalle alto de los modelos para el cálculo de la inmersión mínima. Para la inmersión mínima, el Modelo 1 también usa texturas pero utiliza un detalle bajo de modelos. Esto último tiene sentido ya que el detalle bajo de los modelos 3D debería reducir la inmersión. Al parecer, el resto de los modelos no consideran esto.

El Modelo 3 no considera el brillo ni el contraste. Sin embargo, los modelos 1 y 2 son consistentes en cuanto a los valores de brillo y contraste. Ambos utilizan el valor máximo de brillo (0.8) para la inmersión mínima y el valor mínimo de brillo (-0.8) para la inmersión máxima. Por el contrario, ambos modelos utilizan el contraste mínimo (-0.8) para la inmersión mínima y el contraste máximo (0.8) para la inmersión máxima.

Respecto a la definición, los modelos 1 y 2 consideraron el valor mínimo disponible (0.2) para la inmersión mínima, y el valor máximo disponible (1) para la inmersión máxima. El Modelo 3, por el contrario, utiliza un valor de 1 tanto para la inmersión mínima como máxima.

El Modelo 1 es el único que considera la fuerza de la sombra, indicando el valor mínimo (0.2) para la inmersión máxima y el valor máximo (1) para la inmersión mínima. Esto sugiere que la fuerza de la sombra debería reducirse para mejorar la inmersión total del sistema.

Tanto el Modelo 1 como el Modelo 2 tienen las partículas activadas para la inmersión mínima y máxima, indicando que no es relevante.

El modo de salida de audio presentó una diferencia estadísticamente muy significativa entre los tres modos de audio. En este caso, los 3 modelos son consistentes en cuanto al modo de salida de audio. Para la inmersión mínima no utilizan audio y para la inmersión máxima utilizan auriculares. Esto concuerda con la literatura que sugiere que se obtiene una mejor inmersión al utilizar sonido, especialmente auriculares que puedan proveer sonido espacial 3D.

Sólo el Modelo 2 considera el sonido ambiente activado para obtener la inmersión máxima.

En cuanto al modo de navegación, los 3 modelos son consistentes al utilizar teletransportación para la inmersión mínima y caminar en el lugar para la inmersión máxima, lo que concuerda con los datos estadísticos y con la literatura.

Finalmente, el tiempo de duración de la prueba también resultó consistente para los 3 modelos, con un tiempo de 200 (el mínimo disponible) para la inmersión mínima y un tiempo de 1200 (el máximo disponible) para la inmersión máxima.

### 9.2.3. LOS MODELOS EN FUNCIONAMIENTO

Para poder evaluar los resultados de los modelos para la inmersión mínima y máxima, se utilizó el sistema desarrollado para el experimento del capítulo 6 con los valores provistos por los modelos.

A continuación se detallan los valores que se asignaron a las variables que no fueron consideradas por cada uno de los modelos. Particularmente, para aquellas variables con valores numéricos se eligió un valor intermedio y para las variables categóricas se optó por desactivar la variable o elegir el modo más bajo.

La configuración de las variables que no considera el Modelo 1 fue la siguiente:

- Saturación = 0
- Reflexiones = Desactivado
- Reverberación = Desactivado
- Sonido Espacial 3D = Desactivado

La configuración de las variables que no considera el Modelo 2 fue la siguiente:

- Estereopsis = Desactivado
- Antialiasing = Desactivado
- Modo de Iluminación = Luces y Sombreado
- Saturación = 0
- Fuerza de la Sombra = 0.5
- Reflexiones = Desactivado
- Profundidad de Campo = Desactivado
- Reverberación = Desactivado
- Sonido Espacial 3D = Desactivado

La configuración de las variables que no considera el modelo 3 fue la siguiente:

- Estereopsis = Desactivado
- Antialiasing = Desactivado
- Modo de Iluminación = Luces y Sombreado
- Saturación = 0
- Brillo = 0
- Contraste = 0
- Fuerza de la Sombra = 0.5

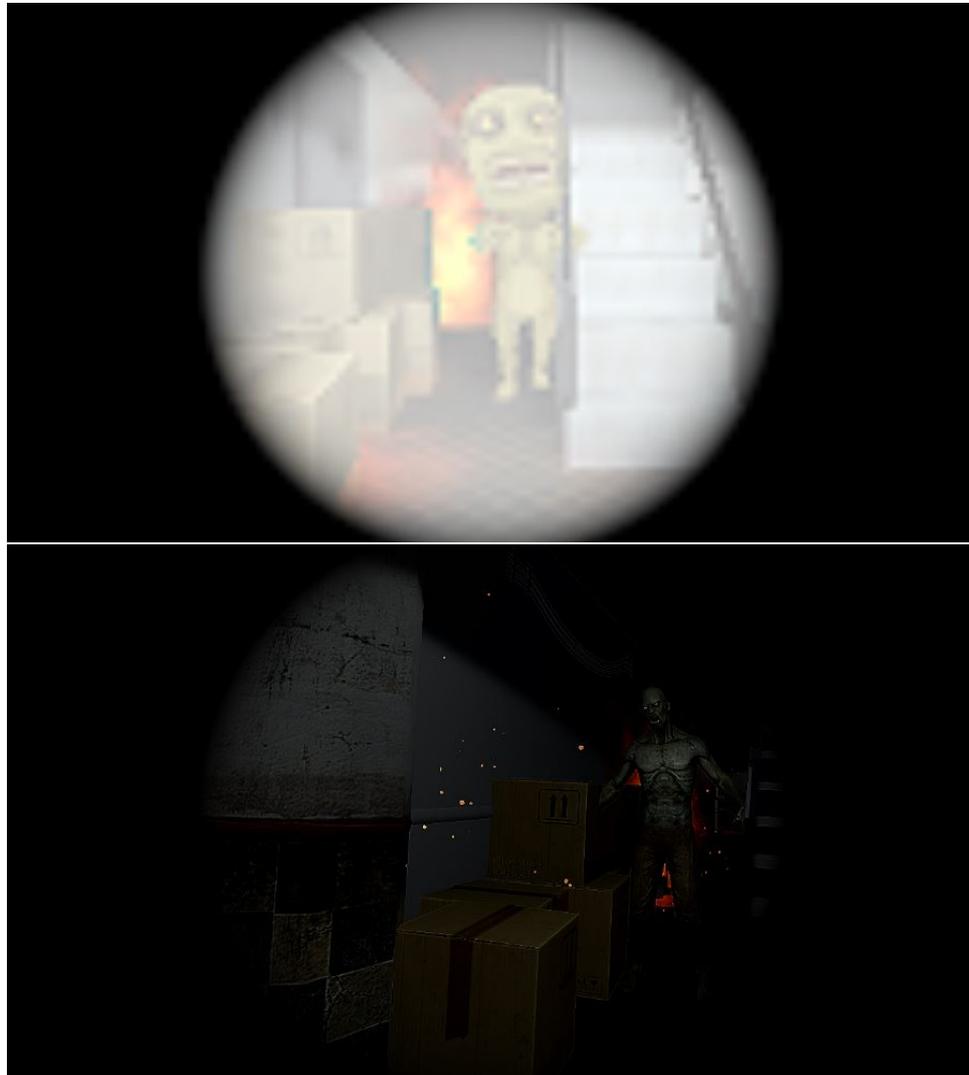
- Reflexiones = Desactivado
- Profundidad de Campo = Desactivado
- Partículas = Desactivado
- Sonido Ambiente = Desactivado
- Reverberación = Desactivado
- Sonido Espacial 3D = Desactivado

#### 9.2.4. ANÁLISIS

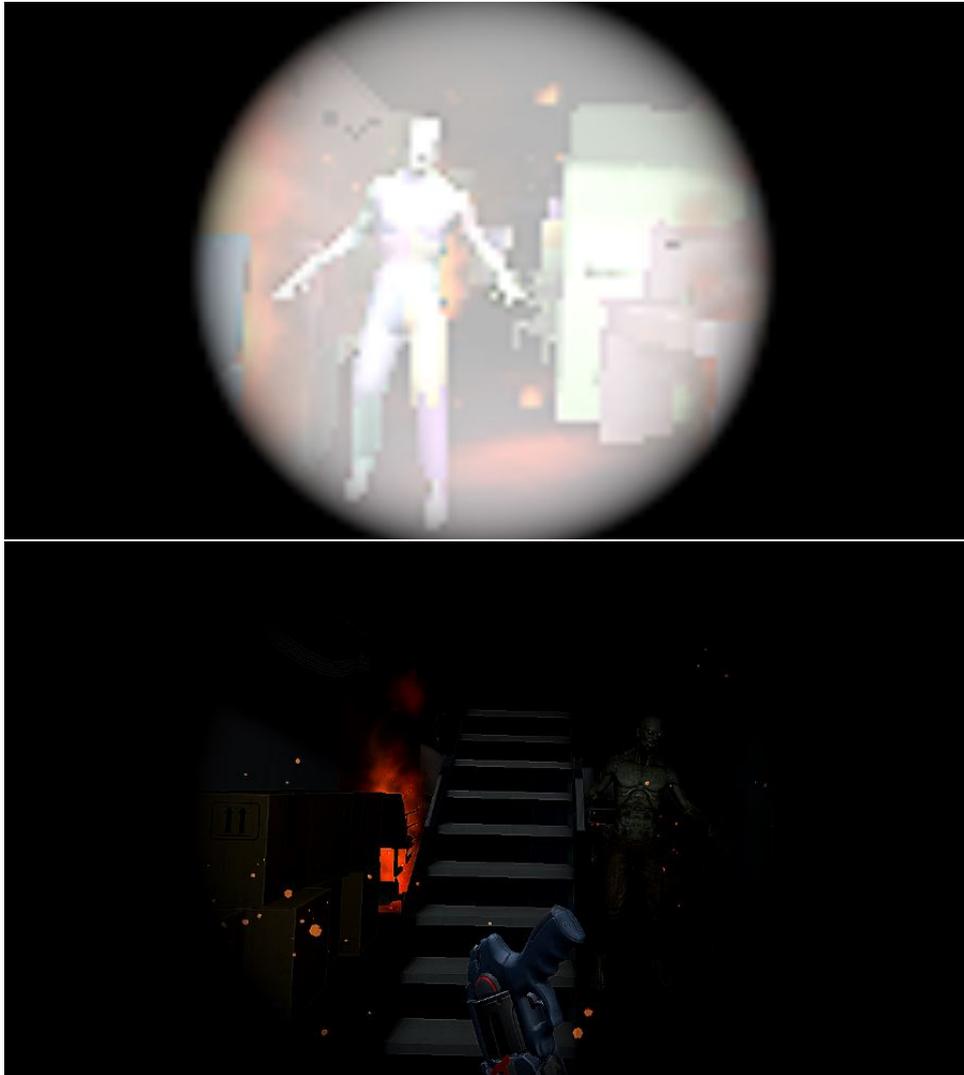
Las figuras 9.1, 9.2 y 9.3 muestran respectivamente para los modelos 1, 2 y 3, los escenarios correspondientes con la inmersión mínima y máxima. Respecto a la inmersión mínima, los tres modelos presentan un resultado que a simple vista parece ser muy poco inmersivo. Esto se debe en gran parte a la baja resolución y al campo de visión (esto último exceptuando el Modelo 3). Las variables que no se pueden apreciar en una imagen, como los *frames* por segundo, el sonido, el modo de navegación y el tiempo de duración de la prueba, contribuyen a que los escenarios con inmersión mínima realmente presenten una experiencia muy poco inmersiva.

En cuanto a la inmersión máxima, los resultados finales de cada modelo se ven bastante similares. Aún más, pareciera que el Modelo 3 se viera incluso mejor que los otros. Esto se debe principalmente a que los modelos 1 y 2 utilizan valores de brillo y contraste que tal vez generan una escena demasiado oscura. Más allá de las variables que pueden apreciarse en la imagen, en estos casos los *frames* por segundo, el sonido, el modo de navegación y el tiempo de duración de la prueba, verdaderamente ayudan a lograr una experiencia muy inmersiva.

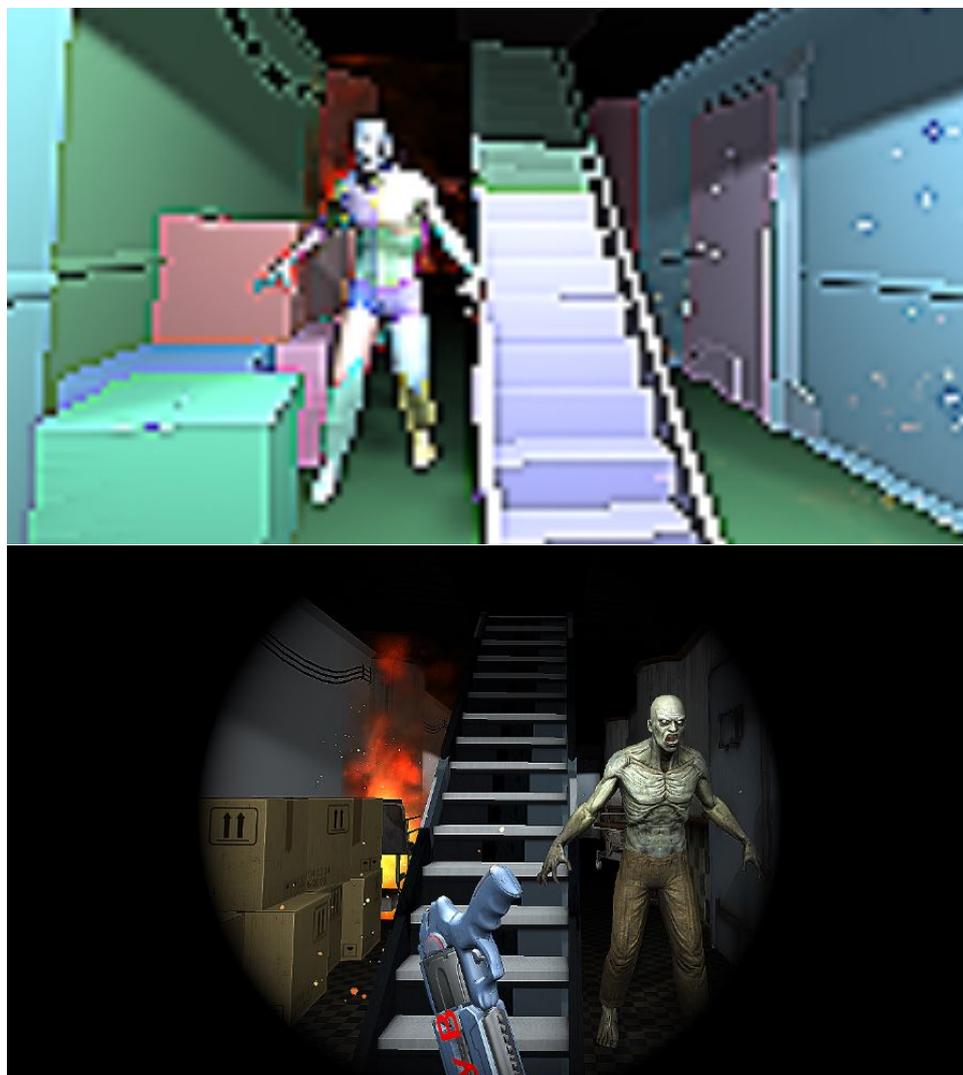
Resulta sorprendente y muy interesante el hecho de que los tres modelos provean casi el mismo resultado. Los tres modelos generaron un valor de inmersión máxima muy distinto y a simple vista esto no se ve fuertemente reflejado en los escenarios finales. Esto favorece el uso del Modelo 3 por sobre los otros modelos, ya que puede generar un resultado similar y utiliza muchas menos variables.



**Figura 9.1:** Imágenes del escenario correspondientes a la inmersión mínima y máxima cuando se utiliza el Modelo 1. (arriba) Inmersión Mínima. (abajo) Inmersión Máxima.



**Figura 9.2:** Imágenes del escenario correspondientes a la inmersión mínima y máxima cuando se utiliza el Modelo 2. (arriba) Inmersión Mínima. (abajo) Inmersión Máxima.



**Figura 9.3:** Imágenes del escenario correspondientes a la inmersión mínima y máxima cuando se utiliza el Modelo 3. (arriba) Inmersión Mínima. (abajo) Inmersión Máxima.



**Figura 9.4:** Tres de los visores de RV más populares.

### 9.3. INMERSIÓN EN DISPOSITIVOS COMERCIALES

En esta sección, utilizaremos nuestra métrica de inmersión para calcular la inmersión provista por tres de los sistemas de RV más populares hoy en día. Estos son el Oculus Rift S<sup>1</sup>, el Oculus Quest<sup>2</sup> y el Oculus GO<sup>3</sup>. Estos visores pueden verse en la figura 9.4 y sus características técnicas en la tabla 9.2. Además de las características técnicas, la mayor diferencia entre estos visores es que el Oculus Rift S funciona conectado a una PC, por lo que el *software* depende en gran medida de la PC que se esté utilizando. Por el contrario, tanto el Oculus Quest como el Oculus GO están completamente integrados y no requieren de ningún elemento externo.

---

<sup>1</sup><https://www.oculus.com/rift-s/>

<sup>2</sup><https://www.oculus.com/quest/>

<sup>3</sup><https://www.oculus.com/go/>

**Tabla 9.2:** Características de *Hardware* del Oculus Rift S, Oculus Quest y Oculus GO

	Oculus Rift S	Oculus Quest	Oculus GO
<b>Seguimiento</b>	6 DoF	6 DoF	3 DoF
<b>Controles</b>	2 controles x 6 DoF	2 Controles x 6DoF	1 control x 3 DoF
<b>Espacio de Juego</b>	Estacionario o <i>Roomscale</i>	Estacionario o <i>Roomscale</i>	Estacionario
<b>Pantalla</b>	LCD (single)	OLED (dual)	LCD (single)
<b>Distancia entre Pupilas</b>	Ajuste por <i>Software</i>	Ajuste por <i>Hardware</i>	Fijo
<b>Resolución</b>	2560 x 1440 total	2880 x 1600	2560 x 1440 total
<b>Campo de Visión</b>	110°	110°	100°
<b>Tasa de Refresco</b>	80Hz	72Hz	72Hz
<b>Audio</b>	Parlantes Integrados compatible con Auriculares	Parlantes Integrados compatible con Auriculares	Parlantes Integrados compatible con Auriculares



**Figura 9.5:** Imagen representativa del juego *Beat Saber*.<sup>4</sup>

Para poder realizar este análisis necesitamos una aplicación que pueda ejecutarse en los tres visores. *Beat Saber*<sup>4</sup> es un juego rítmico desarrollado exclusivamente para RV y se ha convertido en uno de los juegos más populares de los últimos años (ver figura 9.5). Por este motivo, el juego está implementado para los tres visores que estamos considerando y podemos entonces usarlo para el cálculo de inmersión utilizando nuestros modelos. Asumimos que los tres visores pueden correr el juego a 60 *frames* por segundo, como lo indica la especificación del juego.

<sup>4</sup><https://beatsaber.com/>

Para utilizar nuestra métrica de inmersión necesitamos conocer especificaciones de *software* (por ejemplo si se están usando sombras o no, o el nivel de brillo o saturación) que sólo vamos a poder estimar al analizar imágenes o videos del juego. En base a esto seleccionamos los siguientes valores para las variables:

- Estereopsis = Activado
- Antialiasing = Activado
- ModoDeTexturas = ConTexturas
- ModoDeIluminación = LucesConSombreado
- Saturación = 0
- Brillo = 0
- Contraste = 0
- Definición = 0
- FuerzaDeLaSombra = 0
- Reflexiones = Activado
- DetalleDeLosModelos = Alto
- ProfundidadDeCampo = Desactivado
- Partículas = Activado
- ModoSalidaAudio = Auriculares
- SonidoAmbiente = Activado
- Reverberación = Desactivado
- SonidoEspacial3D = Activado
- ModoDeNavegación = CaminarEnElLugar
- TiempoDeDuración = 300

**Tabla 9.3:** Inmersión calculada de acuerdo a los tres modelos para los tres tipos de visores.

	Oculus Rift S	Oculus Quest	Oculus GO
<b>Modelo 1</b>	57.95020	54.40024	48.17092
<b>Modelo 2</b>	60.74711	63.46851	52.51633
<b>Modelo 3</b>	74.07102	76.70703	58.41741

Se tuvieron en cuenta algunas consideraciones respecto a estos valores. Por un lado, la saturación, el brillo, el contraste y la definición se dejaron en un valor intermedio. El detalle de los modelos se estableció como *alto*. Para el modo de salida de audio asumiremos que los tres visores utilizan auriculares. Respecto al sonido ambiente, al ser un juego rítmico siempre hay música de fondo, por lo que lo consideraremos como *activado*. Respecto al modo de navegación, este juego permite caminar como en la vida real. Esto es posible tanto en el Oculus Rift S como en el Oculus Quest. Sin embargo, el Oculus GO no realiza seguimiento de translación. Por este motivo, seleccionaremos los modos más cercanos en función a nuestro modelos, es decir, el modo *CaminarEnElLugar* para el Oculus Rift S y el Oculus Quest y el modo *Teletransportación* para el Oculus GO. Finalmente, el tiempo de duración se estableció en 300 segundos ya que una canción en el juego dura aproximadamente 5 minutos.

Los resultados del cálculo de inmersión se muestran en la tabla 9.3 para los tres modelos y para los tres visores. El Oculus GO presenta la menor inmersión en los tres modelos. Esto concuerda con las especificaciones técnicas del visor, así como también las valoraciones de los usuarios a lo largo de los últimos años. Este visor fue el primer intento de Oculus de hacer un visor totalmente independiente de una PC, y no tiene el mejor sistema de seguimiento ni la mejor calidad visual.

Por otro lado, el Oculus Rift S y el Oculus Quest resultaron ser muy comparables en cuanto a inmersión. Según el Modelo 1, el Oculus Rift S generó una mayor inmersión que el Oculus Quest, pero para los modelos 2 y 3 el Oculus Quest supera al Oculus Rift S. Esta pequeña diferencia entre ambos dispositivos tiene sentido y es esperable ya que la única variable diferente entre los dos es la resolución de pantalla, que el Oculus Quest supera por poco.

#### 9.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente capítulo se utilizaron las métricas de inmersión obtenidas en esta tesis con dos objetivos posibles. Por un lado, calculamos la máxima y la mínima inmersión que se experimenta en función de las variables utilizadas en los modelos. Por otro lado, utilizamos las métricas desarrolladas para calcular el grado de inmersión provisto por tres de los sistemas de RV comerciales más populares de hoy en día.

Para poder obtener los valores que maximicen la inmersión, se optó por un algoritmo artesanal o de fuerza bruta. Este algoritmo es efectivo siempre y cuando los tiempos de ejecución sean razonables. En este caso, se tuvieron que acotar bastante la cantidad de valores de las variables para poder realizar los cálculos. Sin embargo se vio la utilidad de contar con una métrica. El trabajo a futuro debería ahondar en otras técnicas para poder calcular los valores máximos y mínimos de inmersión de una forma más precisa, teniendo en cuenta mayores conjuntos de valores de algunas de las variables. La utilización de los modelos de inmersión generó escenarios muy similares para los tres modelos. Esto sugiere que hay variables que son importantes y consistentes en los tres modelos que se están considerando, como la resolución de pantalla, el campo de visión, los *frames* por segundo, el modo de textura, el detalle de los modelos, la salida de audio, el modo de navegación y el tiempo de duración. Es muy notorio también resaltar que los tres modelos coinciden en los valores que se deben asignar a estas variables tanto para minimizar como para maximizar la inmersión. En el capítulo 11 presentamos un análisis detallado y sugerencias sobre qué variables son más importantes y cuáles consideramos que deben estar en un modelo de inmersión y cuáles no.

En cuanto a la utilización de nuestras métricas para comparar la inmersión de sistemas de RV comerciales, consideramos que pueden aplicarse de manera sencilla para obtener resultados relevantes. Uno de los principales inconvenientes es que, como la métrica también utiliza variables relacionadas con el *software*, se debe contar con una forma de conocer los valores de estas variables o, al menos, estimarlos.

Las métricas de inmersión no sólo pueden utilizarse para comparar los visores con el objetivo de mostrar cuál es mejor (o el más inmersivo), sino también ayudan a describir, dado un visor particular, qué variables de *software* se pueden ajustar y cómo para mejorar la inmersión total del sistema.



# 10

## La Inmersión y los Sentidos

### 10.1. INTRODUCCIÓN

A través de los sentidos el ser humano adquiere información del mundo exterior. Nuestros cinco sentidos perciben los estímulos sensoriales de este mundo exterior, constituyéndose en canales de entrada de toda la información sensorial.

Vimos que la inmersión es una variable que se define como “qué tanto de nuestros sentidos está contemplado por el sistema de RV”. También analizamos la relación entre la inmersión total y las distintas variables que integran el sistema. Sin embargo, este análisis no se llevó a cabo considerando la inmersión total como función de la inmersión visual, la auditiva y la táctil, sino en función de las distintas variables que caracterizan cada una de éstas. Si asociamos cada tipo de inmersión con uno de los sentidos humanos (excluyendo el olfato y el gusto), podremos obtener una proporción de cada uno de éstos en la inmersión total.

**Tabla 10.1:** Porcentaje de capacidad de procesamiento de información de cada sentido en relación con los otros ([244])

Sentido	Porcentaje
Vista	83.0 %
Oído	11.0 %
Olfato	3.5 %
Tacto	1.5 %
Gusto	1.0 %
<b>Total: 100 %</b>	

De este modo, podemos realizar una estimación del porcentaje de la información sensorial procesada por cada uno de los sentidos con respecto a la información sensorial recibida. Otra forma de pensarlo es estimando la capacidad de procesamiento de cada sentido comparado con los demás, o cuánta información podemos obtener a través de cada sentido en una determinada unidad de tiempo. Si se asume que cada sentido funciona perfectamente, esto es sin ninguna discapacidad, Stolovitch et al. [244] proponen los porcentajes de capacidad de procesamiento de información de cada sentido en relación con los otros, presentados en la tabla 10.1. Por otro lado, Altner et al. [245] proponen valores diferentes en función de la capacidad sensorial (ver tabla 10.2).

**Tabla 10.2:** Capacidad de Canal de cada sentido y Porcentaje de Información que maneja cada Sentido ([245]). Se indica la cantidad de receptores asociados a cada sentido en función de los nervios correspondientes. La capacidad de canal psicofísica se refiere al flujo máximo de información disponible mientras se está consciente.

Sentido	Cantidad de Receptores	Capacidad de Canal Psicofísica (bits/s)	Porcentaje
Vista	$2 \times 10^8$	40	52.0 %
Oído	$3 \times 10^4$	30	39.0 %
Tacto	$10^7$	5	6.5 %
Gusto	$3 \times 10^7$	1	1.25 %
Olfato	$7 \times 10^7$	1	1.25 %
<b>Total:</b>			<b>100 %</b>

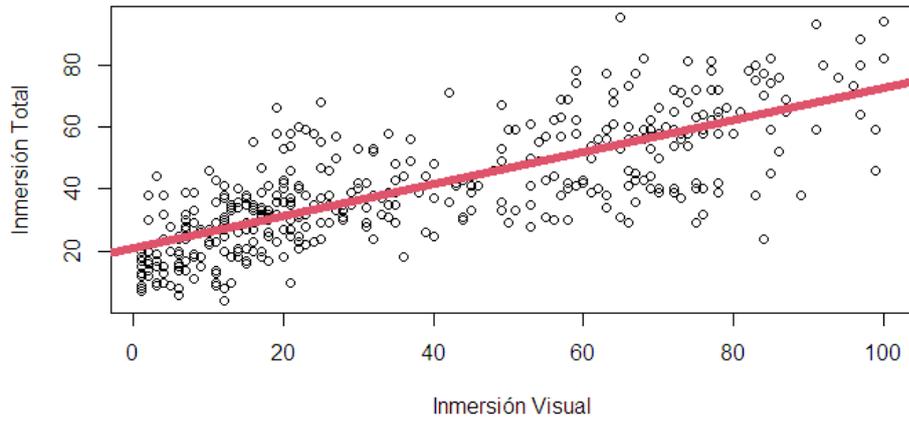
En 2015, investigadores de la Universidad of York y del Instituto Max Planck realizaron estudios conjuntos con el objetivo de medir la importancia de cada uno de los cinco sentidos en un estudio considerando 13 culturas e idiomas diferentes. Éste lo realizaron contando la frecuencia de uso de palabras que se refirieran a ver, oír, tocar, oler y saborear. Si bien determinaron que la vista es el sentido más importante, su análisis muestra que no hay una jerarquía totalmente universal. En efecto, en la mayoría de las lenguas que revisaron, el oído es el segundo sentido más relevante, pero no en todas las culturas; el oído y el tacto se alternaron en el segundo y tercer lugar, lo que muestra que la jerarquía de los sentidos no es universal, sino que depende de cada cultura. El sabor y el olor, fueron en general los menos relevantes pero no se estableció un porcentaje de influencia de cada uno de ellos. También cabe mencionar que, incluso en culturas occidentales, la disputa sobre la importancia del gusto y del tacto, tampoco está completamente determinada.

Dada la no existencia de un porcentaje determinante de la importancia de cada sentido y, más aún, no existiendo una jerarquía sensorial completamente especificada, es importante poder tener una forma de caracterizar la inmersión total como una función de la inmersión visual, la auditiva y la táctil, y no sólo de las distintas variables que caracterizan cada una de éstas. A continuación se presenta este análisis.

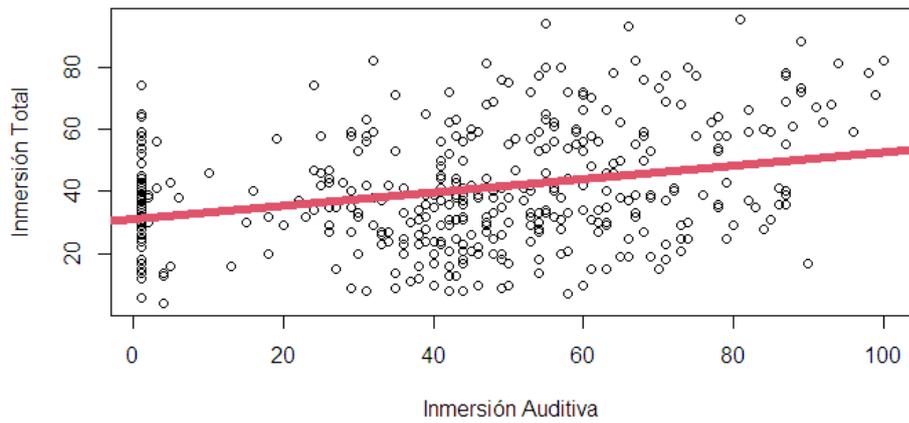
## 10.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MODELO DE REGRESIÓN

Resulta muy interesante analizar la relación entre cada tipo de inmersión particular respecto a la inmersión total. Como se puede ver en la figura 10.1, existe una correlación alta entre la inmersión visual y la inmersión total ( $r(401) = 0,758, p < 0,01$ ). Por otro lado, existe una correlación media entre la inmersión auditiva y la inmersión total ( $r(401) = 0,298, p < 0,01$ ). Esto puede apreciarse en la figura 10.2. Por último, como puede verse en la figura 10.3, la inmersión táctil también presenta una correlación media respecto a la inmersión total ( $r(401) = 0,403, p < 0,01$ ).

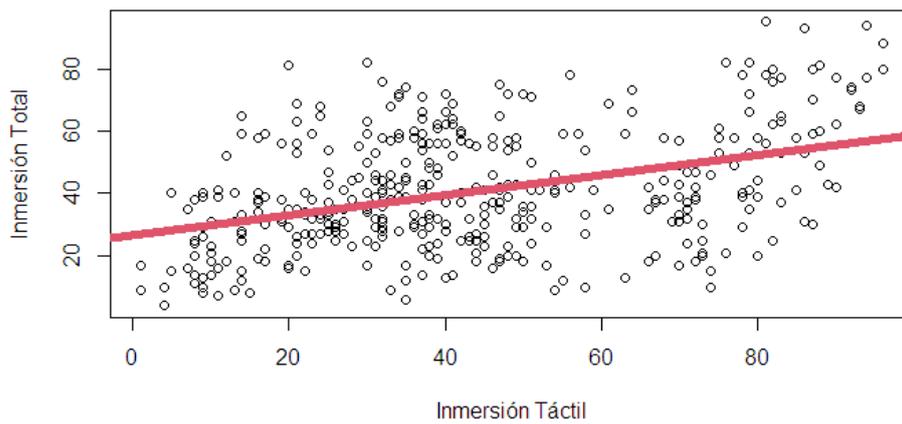
De la misma forma que se realizó en el capítulo 8, utilizaremos un modelo de regresión para obtener una relación entre la inmersión total respecto a la inmersión visual, auditiva



**Figura 10.1:** Relación entre la inmersión visual y la inmersión total.



**Figura 10.2:** Relación entre la inmersión auditiva y la inmersión total.



**Figura 10.3:** Relación entre la inmersión táctil y la inmersión total.

```

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
InmersiónVisual  0.51215    0.01815   28.22  <2e-16 ***
InmersiónAuditiva 0.19710    0.01824   10.80  <2e-16 ***
InmersiónTáctil  0.26503    0.01980   13.39  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

**Figura 10.4:** Resultados del modelo de inmersión total en función de la inmersión visual, auditiva y táctil.

y táctil. Esto nos brinda el resultado de la figura 10.4 y nos provee la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{InmersiónTotal} &= 0,5121 \times \text{InmersiónVisual} \\
 &+ 0,1971 \times \text{InmersiónAuditiva} \\
 &+ 0,2651 \times \text{InmersiónTáctil}
 \end{aligned}
 \tag{10.1}$$

Como se detalló en el experimento presentado en el capítulo 6, tanto la inmersión total como las inmersiones individuales consistían de un valor entre 1 y 100. Por lo tanto, la inmersión total máxima se producirá cuando la inmersión visual, la inmersión auditiva y la inmersión táctil sean máximas, es decir, con un valor igual a 100. Realizando el cálculo, obtenemos una inmersión total igual a 97.43.

Como la inmersión total consiste de un valor entre 1 y 100, se puede calcular un porcentaje de forma directa. Podemos asumir entonces que la inmersión visual, auditiva y táctil sólo componen un total de 97.43 % de la inmersión total. Más específicamente, el modelo sugiere que la inmersión visual corresponde a un 51.21 % de la inmersión total, la inmersión auditiva a un 19.71 % y la inmersión táctil a un 26.51 %. Estos resultados se presentan en la tabla 10.3.

**Tabla 10.3:** Resultados y porcentajes de cada tipo de Inmersión en la Inmersión Total en función de nuestros datos.

<b>Tipo de Inmersión</b>	<b>Porcentaje de Inmersión Total</b>
Visual	51.21 %
Auditiva	19.71 %
Táctil	26.51 %
Otra	2.57 %
<b>Total: 100 %</b>	

### 10.3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La inmersión es una métrica que está muy ligada a la forma en la que percibimos el mundo externo. Como percibimos este mundo externo a través de nuestros sentidos, y los sistemas de RV tratan de “engañar” nuestros sentidos para hacernos creer que nos encontramos en una realidad distinta, resulta interesante comparar el grado de inmersión de cada sentido respecto a la proporción con la que percibimos con cada uno de los sentidos.

En base a los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta tesis, la inmersión visual corresponde a un 51.21 % de la inmersión total. Esto se asemeja al resultado de Stolovitch et al. [244] que sugería que el sentido de la vista componía un 52 % del total.

Tanto Altner et al. [245] como Stolovitch et al. [244] sugieren que el sentido del oído compone un mayor porcentaje que el sentido del tacto. Sin embargo, en nuestros resultados no es así y la inmersión táctil corresponde a un 26.51 % del total en tanto que la auditiva a un 19.71 %. Como hemos mencionado anteriormente, estos resultados están muy ligados al experimento que se llevó a cabo y se requerirán estudios posteriores para profundizar estos resultados.

Nuestros resultados también indican que un 2.57 % no se compone ni por la inmersión visual, ni auditiva, ni táctil. Esto podría sugerir que este porcentaje de inmersión restante podría componerse por la inmersión olfativa y gustativa, que no fueron analizadas durante el experimento. Lo que es más, esto también se corresponde aproximadamente con el 2.5 % sugerido por Altner et al. y con el 2.5 % sugerido por Stolovitch et al. Sin embargo, también puede deberse a que no se han tenido en cuenta variables que consideren factores no analizados. Es relevante mencionar que, con el avance de la tecnología podemos utilizar la metodología propuesta para contemplar dichas variables y, probablemente, esto permita obtener resultados más concluyentes.



# 11

## Conclusiones y Trabajo Futuro

### 11.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el desarrollo de nuevos sistemas de RV, cada uno con diferentes características, se ha acelerado. Cada uno de estos sistemas desea ser mejor que los demás pero, en su mayoría, sólo se basan en los avances tecnológicos para tratar de mejorar la inmersión y la experiencia del usuario. Sin embargo, existen muchas otras variables del sistema que deben considerarse.

Dos de los conceptos más relevantes en la literatura relacionada con RV y sistemas inmersivos son la **presencia** y la *inmersión*. En el capítulo 2 se presentaron estos conceptos en detalle, además de aquellos conceptos directamente relacionados, como realismo, fidelidad y coherencia. En esta tesis se utilizó la definición de Slater et al. [174] que define a la presencia como una medida subjetiva y a la inmersión como una medida objetiva del sistema de RV. De esta forma, dado un determinado sistema de RV y un conjunto de participantes, se espera que todos los participantes perciban el mismo grado de inmersión pero no así el mismo grado de presencia.

En el capítulo 3 se detallaron las alternativas existentes para medir presencia e inmersión. A partir de estos trabajos, se puede cuantificar la inmersión de un dado sistema de RV. También es posible comparar la inmersión de varios sistemas entre sí. Sin embargo, aunque este tipo de mediciones nos brindan información sobre la inmersión total, no nos brindan información sobre las variables que componen el sistema de RV.

Los sistemas de RV consideran un conjunto de variables tanto de *hardware* como de *software* y cada una de estas variables influye en la inmersión total del sistema. No sólo es interesante sino que es necesario conocer cuáles son las variables que más influyen y de qué forma. Así, por ejemplo, cuando se deba seleccionar entre 2 variables distintas para incluir en un nuevo sistema de RV, se podrá elegir aquella que influya más en la inmersión. Hasta el momento no se ha llevado a cabo ningún estudio que haya analizado, en conjunto, la influencia de las variables que influyen en la inmersión ni siquiera aún una cantidad representativa de las mismas.

La motivación de este estudio es tener en cuenta dichas variables de *hardware* y *software* del sistema y sus interrelaciones para construir una métrica de inmersión en función de las mismas. De esta forma se podrá calcular el grado de inmersión de cualquier sistema de RV sin necesidad de realizar pruebas con usuarios.

### 1 1.2. EXPERIMENTO Y GENERACIÓN DE DATOS

Para poder hallar dicha métrica de inmersión, se realizó un experimento en el que, para todas las variables de *hardware* y de *software* del sistema, se asignó una combinación de valores. El participante debía utilizar este sistema de RV, asignando un valor de inmersión correspondiente con los valores actuales de las variables. Esto se repitió para 401 combinaciones de valores, obteniendo así un *dataset* con el cual poder realizar análisis posteriores.

El experimento se llevó a cabo con un solo participante dada la situación del contexto. El hecho de realizar el experimento con un solo participante, brindó información interesante sobre las relaciones entre las variables y la inmersión, aunque los resultados sólo pueden generalizarse al tipo de participante que realizó la prueba. Por otro lado, si los datos presentan algún resultado inesperado o “extraño”, esto puede deberse a la condición del participante.

Por lo expuesto resultará interesante realizar experimentos que consideren un gran número de participantes con características muy diversas. Así, los resultados podrán generalizarse a la población general. Se considerara solucionar las desventajas ocasionadas por realizar el experimento con un solo participante en el trabajo a futuro. Debe señalarse que la metodología planteada para la generación de los datos puede aplicarse para realizar experimentos con varios participantes.

### 1 1.3. VARIABLES

En el capítulo 3 se describen las técnicas utilizadas para obtener una métrica de inmersión en función de las variables independientes del experimento. Luego de analizar las ventajas y desventajas de 12 modelos distintos, seleccionamos los 3 mejores en función del poder de predicción, la cantidad de predictores y la cantidad de coeficientes. En función del objetivo de hallar una métrica de inmersión que pueda utilizarse en cualquier sistema de RV dado en base a sus características de *hardware* y de *software*, es esencial considerar cada variable dado que su inclusión o exclusión en el modelo puede afectar en gran medida la inmersión.

### 1.1.3.1. VARIABLES RELEVANTES NO CONSIDERADAS

Dentro de los modelos resultantes, consideramos que el modelo 3 tiene la ventaja de considerar muchas menos variables que los otros modelos y tal vez las variables que considera sean las más adecuadas para cuantificar la inmersión. Sin embargo, en base a lo reportado en la literatura, consideramos que algunas de las variables que no considera este modelo son muy importantes y deberían analizarse con más detalle en el futuro.

La estereopsis, por ejemplo, es una variable que nos provee pistas sobre la profundidad dentro del mundo virtual. En conjunto con las demás pistas de profundidad 3D que nos puede proveer la imagen, ayuda al usuario a percibir la distancia a los objetos. Hoy en día, sin embargo, los visores de RV tienen la capacidad de sumergir a los usuarios dentro de un mundo virtual incluso aunque la estereopsis esté desactivada.

Como mencionamos anteriormente, una posible explicación de que esta variable no haya sido considerada en los modelos puede deberse a las características del experimento o del usuario. Por otro lado, existe la posibilidad de que el AV presentado brinde tantas otras pistas de profundidad 3D, que pudo hacer que la estereopsis perdiera protagonismo y por lo tanto su activación no resultó significativa en la inmersión. Consideramos que la estereopsis es una variable importante y una métrica de inmersión debería considerarla. El trabajo a futuro debería analizar más en detalle esta variable, especialmente en conjunto con las otras variables que proveen pistas de profundidad 3D.

Sólo el modelo 1 considera el modo de iluminación. Si sólo se utiliza luz ambiente, se pierde un poco la forma de los objetos al no estar sombreados apropiadamente. Esta es otra de las variables que consideramos importantes y que deberían estar en una métrica de inmersión.

Ninguno de los modelos considera el sonido espacial 3D. Aunque no es necesario que un sistema de RV utilice sonido espacial 3D, su uso hace que el usuario se sienta más inmerso en el AV ya que podrá distinguir de dónde provienen los sonidos, lo que se asemeja al mundo real. Esto se respalda en la literatura (ver capítulo 5) y consideramos que ésta es otra de las variables que deberían estar en una métrica de inmersión.

### 1.1.3.2. VARIABLES IRRELEVANTES CONSIDERADAS

Por otro lado, luego de estudiar las distintas variables y su influencia en la inmersión, y considerando también lo mencionado en la literatura, algunas de las variables que fueron tenidas en cuenta en este trabajo tal vez puedan ser excluidas del experimento y del cálculo de los modelos. Por ejemplo, la variable saturación no fue considerada por ningún modelo. Esto podría indicarnos que esta variable no es importante a la hora de estimar la inmersión de un sistema de RV. Consideramos que lo mismo podría ocurrir con el brillo, el contraste y la definición. Si bien se encontró una pequeña correlación entre el contraste y la inmersión, consideramos que el cambio en la imagen producido por estas variables no está muy relacionado con la inmersión percibida por el usuario. El control de estas variables ayudan a generar escenas a las que se les pueda variar la iluminación en mayor o menor medida, entre otras cosas, y tal vez favorezcan ciertos escenarios en particular, pero no es algo que se pueda generalizar a todos los ambientes. En todos los casos, más pruebas específicas son necesarias para analizar la influencia de cada una de estas variables individualmente.

La variable *reflexiones* tampoco fue considerada por ningún modelo. Esto puede deberse también al experimento particular que se realizó, en el que tal vez las reflexiones de los objetos no fueron relevantes. Por otro lado, las reflexiones están ligadas a los materiales de los modelos 3D por lo que dependerá de cada modelo 3D o de cada escenario decidir dónde utilizar reflexiones y, por lo tanto, dónde considerar su variación. Esto generará escenarios más realistas pero que tal vez no sean más inmersivos solo por este motivo.

El sonido ambiente es una variable que consideramos que influye positivamente en la inmersión, siempre y cuando se corresponda con el escenario particular que se está experimentando. Por ejemplo, si el escenario virtual es un bosque, el sonido ambiente de un bosque favorecería la inmersión. Por este motivo, esta variable debería renombrarse a “sonido ambiente representativo” y no solo a la inclusión de cualquier sonido ambiente. El trabajo a futuro deberá considerar este tipo de variable.

Finalmente, la reverberación es una variable que genera eco en una zona determinada y tampoco fue considerada por ninguno de los modelos. Estamos de acuerdo con esto ya que la inclusión de eco puede generar mayor inmersión, pero esto dependerá del escenario virtual que se esté experimentando. Es decir, es una variable que puede afectar en gran medida a la experiencia o no en función del escenario particular. Por ejemplo, en un escenario de una cueva sería muy importante. Por este motivo consideramos que esta es otra variable que podría retirarse del experimento, pero igualmente el trabajo a futuro debería analizar en detalle esta variable para obtener una mejor interpretación de su influencia en la inmersión total.

### 11.3.3. INMERSIÓN TÁCTIL

En este trabajo se considera la inmersión total en función de la inmersión visual, la inmersión auditiva y la inmersión táctil. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo 6, sólo estamos considerando como inmersión táctil la variable correspondiente al modo de navegación .

Existen otras variables como los grados de libertad del visor, la cantidad de controles, la vibración del dispositivo y la respuesta háptica, entre otras, que resultan muy difíciles de implementar o manipular, por lo que no fueron consideradas en el experimento. El trabajo futuro debería analizar y considerar algunas de estas variables, para complementar la inmersión táctil del sistema.

Por otro lado, teniendo en cuenta el modo de navegación, en un principio se había considerado el modo *real-walking*, en el que el participante puede caminar libremente como lo hace en el mundo real. Sin embargo, debido a las limitaciones del espacio físico, el participante no contaba con un área de 3m x 3m para navegar, por lo que esta variable no fue considerada para el experimento. Esta modalidad debería ser considerada en el trabajo futuro y se espera que genere incluso un mayor grado de inmersión. Como la mayoría de los usuarios que utilizan sistemas de RV comerciales disponen de ambientes físicos pequeños en sus hogares, éste es un problema bastante común. Por este motivo, se está trabajando complementariamente en el diseño de técnicas que maximicen el uso del espacio físico en ambientes virtuales más grandes y que permitan *real-walking*. De este modo se pretende contar con espacios virtuales más amplios que los espacios reales.

#### 11.3.4. TIEMPO DE DURACIÓN

Como se mencionó en el capítulo 5, algunos estudios sugieren que el tiempo de duración de la prueba influye en el grado de presencia e inmersión percibidos. Nuestros resultados sugieren lo mismo.

Sin embargo, si lo analizamos detenidamente, nos podríamos preguntar por qué el tiempo en el que el participante se encuentra dentro del ambiente virtual debería influir en la inmersión. Sería más lógico que el mismo sistema de RV sea igual de inmersivo sin importar si el participante lo experimenta por 2 minutos o por 20 minutos. Por este motivo consideramos que esta es una de las variables más “sorprendentes” o “extrañas” y su influencia en la inmersión de un sistema debería ser estudiada más en detalle.

#### 11.4. CONTRIBUCIONES

En esta tesis se ha desarrollado un trabajo sumamente interesante y sin dudas muy desafiante, cuyos resultados aportan al área de tecnologías inmersivas y más específicamente al área de RV. Los sistemas de RV comerciales desarrollados en los últimos años asumen que cuanto mejor sea el *hardware* utilizado, mayor será la inmersión y por lo tanto mejor será la experiencia. Aunque la mejora del *hardware* puede contribuir a mejorar la inmersión, existen cuestiones que no se están considerando.

Es cierto que, por ejemplo, cuanto mejor sea la resolución de pantalla o los *frames* por segundo mayor será la inmersión; sin embargo, no son sólo estas dos variables del sistema las que deben considerarse para obtener los mejores resultados. Las métricas de inmersión nos pueden ayudar tanto para decidir qué variables debemos favorecer a la hora de diseñar un nuevo sistema de RV, así como también para calcular la inmersión de sistemas de RV que ya existen. Esto permite la comparación entre los distintos sistemas, pudiendo elegir la mejor alternativa para llevar a cabo la tarea que deseemos realizar.

En este trabajo de tesis hemos desarrollado métricas de inmersión que permiten calcular o predecir el grado de inmersión de cualquier sistema de RV en función de las variables que lo componen, y pueden usarse tanto para ayudar en el diseño de nuevos sistemas de RV como para evaluar el diseño de sistemas de RV existentes. En el desarrollo de estas métricas, se llevaron a cabo distintas tareas que también constituyen aportes de esta tesis. En resumen, los aportes de la misma son:

- **Creación dinámica de escenarios.** Se diseñó y desarrolló un sistema que permite la creación dinámica de AVs parametrizados de acuerdo a las distintas variables a considerar y en los que pueden manipularse los valores de las variables analizadas, permitiendo al usuario puntuar el grado de inmersión de dicho sistema en función de dichos valores. Este sistema también almacena los resultados en un *dataset* de manera dinámica con cada nueva prueba realizada.
- **Determinación de las variables de inmersión.** La literatura presenta trabajos individuales en los que se analiza la relación entre una sola variable y la presencia e inmersión del sistema. En esta tesis se han recopilado todas aquellas variables que influyen en la presencia e inmersión, se ha presentado una clasificación en función de cada uno de los sentidos y del tipo de inmersión particular, y se han realizado análisis estadísticos para determinar la influencia significativa de cada una, no solo entre ellas sino que también con respecto a la inmersión.
- **Diseño de una metodología para el desarrollo de métricas de inmersión en sistemas de RV.** En esta tesis se detalla todo el procedimiento con el cual obtener métricas de inmersión a partir de los datos provenientes del experimento. La metodología detalla cómo utilizar modelos de regresión para obtener dicha métrica, así como también cómo optimizar y validar el modelo. También se presenta cómo utilizar la métrica con sistemas de RV existentes.
- **Desarrollo de métricas de inmersión en RV** Diversos trabajos que presentan modelos de inmersión en función de las características del sistema fueron realizados hace más de 10 o 20 años (ver capítulo 4). En esta propuesta presentamos un análisis y la creación de modelos de inmersión considerando el avance de la tecnología actual y todas aquellas características que presentan los sistemas de RV modernos.

- **Estimación de la inmersión máxima** Existe un amplio debate en la literatura sobre cómo se puede maximizar el grado de inmersión de un sistema de RV en función de sus características de *hardware* y de *software*. En este trabajo se propone una estrategia para hallar los valores correspondientes a las variables del sistema para poder maximizar el grado de inmersión mediante la utilización de las métricas.
- **Estimación y análisis de los porcentajes de incidencia de cada tipo de inmersión en la inmersión total, respecto a los sentidos del ser humano** Dado que la inmersión es una métrica que está muy ligada a la forma en la que percibimos el mundo externo y éste se percibe a través de nuestros sentidos, comparamos el grado de inmersión de cada sentido respecto a la proporción con la que percibimos con cada uno de los sentidos. Esto brinda una estimación de la relevancia de cada tipo de inmersión en comparación de cada sentido del ser humano, lo que ayudará a elegir entre un tipo de inmersión u otro a la hora de diseñar un nuevo sistema y hace que esta métrica pueda ser de utilidad aún cuando se deba considerar una discapacidad en alguno de los sentidos.

Además, durante el desarrollo de la tesis se llevaron a cabo las siguientes contribuciones en trabajos estrechamente relacionados:

- **Diseño y desarrollo de varios sistemas de RV.** Se diseñaron y desarrollaron diversos sistemas de RV, documentados en las publicaciones realizadas. Estos trabajos contribuyeron al análisis y selección de las variables que se consideraron para el experimento presentado en esta tesis. Además, fortalecieron nuestros conocimientos técnicos y teóricos para poder diseñar un sistema eficiente, robusto y extensible.

- **Definición de límites para manipulación del espacio.** De acuerdo a lo que se detalló en el capítulo 5, la mejor estrategia de navegación sería que en el mundo virtual se pudiera caminar libremente como se hace en el mundo real. Sin embargo pueden presentarse limitaciones de espacio debido a que el usuario debe contar con el espacio suficiente para poder caminar en función al espacio del mundo virtual. Por esto, en uno de los trabajos realizados denominado *Analysis of Translation Gains in Virtual Reality: The Limits of Space Manipulation* se han estudiado y desarrollado distintas técnicas para extender el espacio virtual de manera tal de aprovechar mejor el espacio físico disponible. Esto permitirá que este modo de navegación se incorpore a las variables de navegación que considera el experimento.
  
- **Generación y exploración de escenarios virtuales basados en imágenes.** Se ha trabajado sobre la generación de escenarios virtuales basados únicamente en imágenes, esto es, el escenario no se *renderiza* de manera tradicional sino que se compone de un conjunto de imágenes que simulan un escenario 3D. En este escenario se trabajó sobre las distintas variables visuales, auditivas y de navegación que permitan una navegación natural y realista del usuario en el escenario. Esto también contribuyó al estudio de las variables del sistema y de las distintas estrategias para su implementación y manipulación dentro del sistema de RV.

### 11.5. TRABAJO FUTURO

Las propuestas realizadas tienen la particularidad de involucrar definiciones generales, pudiendo ser exploradas en diferentes problemas y configuraciones. En cada capítulo de la presente tesis se han propuesto distintas estrategias particulares de trabajo a futuro relacionadas específicamente a cada capítulo. A continuación se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

- **Variables de inmersión.** Nos hemos basado en la literatura y en nuestros conocimientos previos para seleccionar y estudiar las variables que se utilizaron en esta tesis. Sin embargo, el estudio de la inmersión no debe limitarse sólo a estas variables. A medida que avance la tecnología irán surgiendo nuevas variables que deberán ser consideradas, estudiadas e incorporadas en las métricas.

- **Diseño de una metodología para el desarrollo de métricas de inmersión en sistemas de RV.** En esta tesis se ha utilizado una metodología específica para la generación de métricas de inmersión. Esto es, mediante la utilización de modelos de regresión en conjunto con técnicas de selección de variables y validación. Los modelos presentados en esta tesis son flexibles. Existen otras técnicas y metodologías que se pueden utilizar para obtener métricas distintas. Los modelos deberán ser actualizados y perfeccionados con nuevos experimentos cada vez más completos y precisos. El trabajo a futuro, por lo tanto, debería considerar el estudio y aplicación de estas otras técnicas.
- **Evaluación en casos de estudio para otros problemas de RV.** Nuestras métricas de inmersión se caracterizan por funcionar con cualquier sistema de RV dado, en función de sus características de *hardware* y de *software*. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, algunas de las variables estudiadas son muy dependientes del escenario virtual que se está utilizando, así como también pueden estar relacionadas con la tarea específica que se esté realizando. En este sentido, el trabajo a futuro debería considerar la evaluación de las métricas de inmersión en diversos casos de estudio y en distintos dominios de aplicación.



# Bibliografía

- [1] H Fuchs and G Bishop. Research directions in virtual environments. *Journal*, 1992.
- [2] Michael A Gigante. 1 - virtual reality: Definitions, history and applications. In RA Earnshaw, MA Gigante, and H Jones, editors, *Virtual Reality Systems*, pages 3–14. Academic Press, Boston, January 1993.
- [3] A Bhardwaj, M Bhardwaj, and A Gaur. Virtual reality: an overview. *International Journal of Scientific and*, 2016.
- [4] C Cruz-Neira. Virtual reality overview. *SIGGRAPH*, 1993.
- [5] Laura Freina and Michela Ott. A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives. In *The International Scientific Conference eLearning and Software for Education*, volume 1, page 133. Çarol I”National Defence University, 2015.
- [6] Teresa Monahan, Gavin McArdle, and Michela Bertolotto. Virtual reality for collaborative e-learning. *Computers & Education*, 50(4):1339–1353, 2008.
- [7] Ioannis Messinis, Dimitrios Saltaouras, Panayotis Pintelas, and Tassos Mikropoulos. Investigation of the relation between interaction and sense of presence in educational virtual environments. In *2010 International Conference on e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning*, pages 428–431. IEEE, 2010.
- [8] Jia Qiao, Jing Xu, Lu Li, and Yan-Qiong Ouyang. The integration of immersive virtual reality simulation in interprofessional education: A scoping review. *Nurse Education Today*, page 104773, 2021.

- [9] Samuel P Ang, Michael Montuori, Yuriy Trimba, Nicole Maldari, Divya Patel, and Qian Cece Chen. Recent applications of virtual reality for the management of pain in burn and pediatric patients. *Current Pain and Headache Reports*, 25(1):1–8, 2021.
- [10] Peter R Swiatek, Joseph A Weiner, Daniel J Johnson, Philip K Louie, Michael H McCarthy, Garrett K Harada, Niccole Germscheid, Jason PY Cheung, Marko H Neva, Mohammad El-Sharkawi, et al. Covid-19 and the rise of virtual medicine in spine surgery: a worldwide study. *European Spine Journal*, pages 1–10, 2021.
- [11] Teodor P Grantcharov, VB Kristiansen, Jørgen Bendix, L Bardram, J Rosenberg, and Peter Funch-Jensen. Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. *British journal of surgery*, 91(2):146–150, 2004.
- [12] Luís Barbosa, Pedro Monteiro, Manuel Pinto, Hugo Coelho, Miguel Melo, and Maximino Bessa. Multisensory virtual environment for firefighter training simulation: Study of the impact of haptic feedback on task execution. In *2017 24<sup>o</sup> Encontro Português de Computação Gráfica e Interação (EPCGI)*, pages 1–7. IEEE, 2017.
- [13] Florence Aïm, Guillaume Lonjon, Didier Hannouche, and Remy Nizard. Effectiveness of virtual reality training in orthopaedic surgery. *Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery*, 32(1):224–232, 2016.
- [14] Sayali Joshi, Michael Hamilton, Robert Warren, Danny Faucett, Wenmeng Tian, Yu Wang, and Junfeng Ma. Implementing virtual reality technology for safety training in the precast/prestressed concrete industry. *Applied ergonomics*, 90:103286, 2021.
- [15] Michael Zyda. From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, 38(9):25–32, 2005.
- [16] Adrian David Cheok, Michael Haller, Owen Noel Newton Fernando, and Janaka Prasad Wijesena. Mixed reality entertainment and art. *The International Journal of Virtual Reality*, 8(2):83–90, 2009.
- [17] S Graceline Jasmine, L Jani Anbarasi, Modigari Narendra, and Benson Edwin Raj. Augmented and virtual reality and its applications. In *Multimedia and Sensory Input for Augmented, Mixed, and Virtual Reality*, pages 68–85. IGI Global, 2021.

- [18] Wijnand A IJsselsteijn, Huib De Ridder, Jonathan Freeman, and Steve E Avons. Presence: concept, determinants, and measurement. In *Human vision and electronic imaging V*, volume 3959, pages 520–529. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [19] Jack M Loomis. Distal attribution and presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1):113–119, 1992.
- [20] Tomasz Mazuryk and Michael Gervautz. History, applications, technology and future. *Journal*, 2008.
- [21] Jonathan Steuer. Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, 42(4):73–93, 1992.
- [22] Thomas B Sheridan. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):120–126, January 1992.
- [23] David L Akin, Marvin L Minsky, Eric D Thiel, and Clifford R Kurtzman. Space applications of automation, robotics, and machine intelligence systems (aramis), phase ii, vol. 3: Executive summary. *National Aeronautics and Space Administration, NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama*, 983, 1983.
- [24] JJ Gibson. The ecological approach to visual perception houghton mifflin boston google scholar. *Journal*, 1979.
- [25] Richard Skarbez, Frederick P Brooks Jr, and Mary C Whitton. A survey of presence and related concepts. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50(6):96, 2017.
- [26] Eva L Waterworth and John A Waterworth. Focus, locus, and sensus: The three dimensions of virtual experience. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):203–213, 2001.
- [27] Kwan Min Lee. Presence, explicated. *Communication theory*, 14(1):27–50, 2004.
- [28] Thomas A Stoffregen, Benoit G Bardy, LJ Smart, and RJ Pagulayan. On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments. *Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues*, pages 111–128, 2003.
- [29] Max Parola, Samuel Johnson, and Ruth West. Turning presence inside-out: Metanarratives. *Electronic Imaging*, 2016(4):1–9, 2016.

- [30] Claudia Hendrix and Woodrow Barfield. The sense of presence within auditory virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(3):290–301, 1996.
- [31] Michael Meehan. *Physiological reaction as an objective measure of presence in virtual environments*. PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.
- [32] Bob G Witmer and Michael J Singer. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, 7(3):225–240, 1998.
- [33] Frank Biocca. Inserting the presence of mind into a philosophy of presence: A response to sheridan and mantovani and riva. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(5):546–556, 2001.
- [34] Mel Slater. A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3):1–5, 2003.
- [35] Corina Sas and Gregory MP O’Hare. Presence equation: An investigation into cognitive factors underlying presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12(5):523–537, 2003.
- [36] Anna Spagnolli and Luciano Gamberini. The sense of being ‘there’: a model for the space of presence. *EXPLORING THE SENSE OF PRESENCE*, page 48, 2004.
- [37] Werner Wirth, Susanne Wolf, Ursina Mögerle, and Saskia Böcking. Measuring the subjective experience of presence with think-aloud method: Theory, instruments, implications. In *Proceedings of the Seventh Annual International Workshop on Presence*, pages 351–358, 2004.
- [38] Giuseppe Riva, John A Waterworth, and Eva L Waterworth. The layers of presence: a bio-cultural approach to understanding presence in natural and mediated environments. *CyberPsychology & Behavior*, 7(4):402–416, 2004.
- [39] Bob G Witmer, Christian J Jerome, and Michael J Singer. The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 14(3):298–312, 2005.
- [40] Gerardo Herrera, Rita Jordan, and Lucí Vera. Agency and presence: A common dependence on subjectivity? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5):539–552, 2006.

- [41] Werner Wirth, Tilo Hartmann, Saskia Böcking, Peter Vorderer, Christoph Klimmt, Holger Schramm, Timo Saari, Jari Laarni, Niklas Ravaja, Feliz Ribeiro Gouveia, et al. A process model of the formation of spatial presence experiences. *Media psychology*, 9(3):493–525, 2007.
- [42] Mel Slater and Martin Usoh. Representations systems, perceptual position, and presence in immersive virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 2(3):221–233, 1993.
- [43] Matthew Lombard and Theresa Ditton. At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 1997.
- [44] David W Schloerb. A quantitative measure of telepresence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 4(1):64–80, 1995.
- [45] Mel Slater. Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 364(1535):3549–3557, 2009.
- [46] Mel Slater. Measuring presence: A response to the witmer and singer presence questionnaire. *Presence*, 8(5):560–565, 1999.
- [47] Frank Biocca and Ben Delaney. Immersive virtual reality technology. *Communication in the age of virtual reality*, 15:32, 1995.
- [48] Matthew Lombard, Theresa B Ditton, Daliza Crane, Bill Davis, Gisela Gil-Egui, Karl Horvath, Jessica Rossman, and S Park. Measuring presence: A literature-based approach to the development of a standardized paper-and-pencil instrument. In *Third international workshop on presence, delft, the netherlands*, volume 240, pages 2–4, 2000.
- [49] Amy L Alexander, Tad Brunyé, Jason Sidman, and Shawn A Weil. From gaming to training: A review of studies on fidelity, immersion, presence, and buy-in and their effects on transfer in pc-based simulations and games. *DARWARS Training Impact Group*, 5:1–14, 2005.
- [50] Richard T Skarbez. *Plausibility illusion in virtual environments*. PhD thesis, The University of North Carolina at Chapel Hill, 2016.
- [51] Saskia Böcking, Andre Gysbers, Werner Wirth, Christoph Klimmt, Tilo Hartmann, Holger Schramm, Jari Laarni, Ana Sacau, and Peter Vorderer. Theoretical and empirical support for distinctions between components and conditions of spatial presence. In *Proceedings of the Seventh Annual International Workshop on Presence*, pages 224–231, 2004.

- [52] James J Cummings and Jeremy N Bailenson. How immersive is enough? a meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence. *Media Psychology*, 19(2):272–309, 2016.
- [53] M Csikszentmihalyi. *Flow: The psychology of optimal experience* harper perennial, 1990.
- [54] Jari Takatalo. Presence and flow in virtual environments: An explorative study. *Master's thesis, University of Helsinki*, 2002.
- [55] Jeanne H Brockmyer, Christine M Fox, Kathleen A Curtiss, Evan Mc-Broom, Kimberly M Burkhart, and Jacquelyn N Pidruzny. The development of the game engagement questionnaire: A measure of engagement in video game-playing. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4):624–634, 2009.
- [56] Donna L Hoffman and Thomas P Novak. Flow online: lessons learned and future prospects. *Journal of interactive marketing*, 23(1):23–34, 2009.
- [57] R Banos, Cristina Botella, Azucena Garcia-Palacios, H Villa, Concepción Perpiñá, and M Gallardo. Psychological variables and reality judgment in virtual environments: the roles of absorption and dissociation. *CyberPsychology & Behavior*, 2(2):143–148, 1999.
- [58] Auke Tellegen and Gilbert Atkinson. Openness to absorbing and self-altering experiences (“absorption”), a trait related to hypnotic susceptibility. *Journal of abnormal psychology*, 83(3):268, 1974.
- [59] Melanie C Green and Timothy C Brock. The role of transportation in the persuasiveness of public narratives. *Journal of personality and social psychology*, 79(5):701, 2000.
- [60] Thomas W Schubert. A new conception of spatial presence: Once again, with feeling. *Communication Theory*, 19(2):161–187, 2009.
- [61] Anna Spagnolli and Luciano Gamberini. Immersion/emersion: Presence in hybrid environments, 2002.
- [62] Frank Biocca. Presence working group research targets. *Presentation at the "Presence Info Day" of the European Commission*, 2002.
- [63] Frank Biocca. The cyborg's dilemma: Progressive embodiment in virtual environments. *Journal of computer-mediated communication*, 3(2):JCMC324, 1997.

- [64] Frank Biocca. The cyborg's dilemma: Progressive embodiment in virtual environments. *Human Factors in Information Technology*, 13:113–144, 1999.
- [65] Joy Van Baren. Measuring presence: A guide to current measurement approaches. *Deliverable of the OmniPres project IST-2001-39237*, 2004.
- [66] Dimitri Hein, Christian Mai, and Heinrich Hußmann. The usage of presence measurements in research: a review. In *Proceedings of the International Society for Presence Research Annual Conference (Presence'18)*. *The International Society for Presence Research*, 2018.
- [67] Jane Lessiter, Jonathan Freeman, Edmund Keogh, and Jules Davidoff. A Cross-Media presence questionnaire: The ITC-Sense of presence inventory. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):282–297, June 2001.
- [68] Bob G Witmer, Christian J Jerome, and Michael J Singer. The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3):298–312, June 2005.
- [69] Thomas Schubert, Frank Friedmann, and Holger Regenbrecht. The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3):266–281, 2001.
- [70] Mel Slater and Anthony Steed. A virtual presence counter. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9(5):413–434, 2000.
- [71] RS Kalawsky, ST Bee, and SP Nee. Human factors evaluation techniques to aid understanding of virtual interfaces. *BT technology Journal*, 17(1):128–141, 1999.
- [72] Silvia Erika Kober and Christa Neuper. Personality and presence in virtual reality: Does their relationship depend on the used presence measure? *International Journal of Human-Computer Interaction*, 29(1):13–25, 2013.
- [73] Krzysztof Szczurowski and Matt Smith. Measuring presence: hypothetical quantitative framework. In *2017 23rd International Conference on Virtual System & Multimedia (VSMM)*, pages 1–8. IEEE, 2017.
- [74] Patrice Renaud, Joanne L Rouleau, Luc Granger, Ian Barsetti, and Stéphane Bouchard. Measuring sexual preferences in virtual reality: a pilot study. *Cyberpsychol. Behav.*, 5(1):1–9, February 2002.

- [75] Kay M Stanney, Kelly S Kingdon, David Graeber, and Robert S Kennedy. Human performance in immersive virtual environments: Effects of exposure duration, user control, and scene complexity. *Hum. Perform.*, 15(4):339–366, September 2002.
- [76] Hunter G Hoffman, Todd Richards, Barbara Coda, Anne Richards, and Sam R Sharar. The illusion of presence in immersive virtual reality during an fmri brain scan. *CyberPsychology & Behavior*, 6(2):127–131, 2003.
- [77] Stéphane Bouchard, Julie St-Jacques, Geneviève Robillard, and Patrice Renaud. Anxiety increases the feeling of presence in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 17(4):376–391, 2008.
- [78] Davide Salanitri, Glyn Lawson, and Brian Waterfield. The relationship between presence and trust in virtual reality. In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics*, pages 1–4, 2016.
- [79] Richard Skarbez, Frederick P Brooks, and Mary C Whitton. Immersion and coherence in a visual cliff environment. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 397–398. IEEE, 2017.
- [80] Myungho Lee, Gerd Bruder, and Gregory F Welch. Exploring the effect of vibrotactile feedback through the floor on social presence in an immersive virtual environment. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 105–111. IEEE, 2017.
- [81] Jeremy N Bailenson, Jim Blascovich, Andrew C Beall, and Jack M Loomis. Interpersonal distance in immersive virtual environments. *Personality and social psychology bulletin*, 29(7):819–833, 2003.
- [82] JJ-W Lin, Henry Been-Lirn Duh, Donald E Parker, Habib Abi-Rached, and Thomas A Furness. Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. In *Proceedings ieee virtual reality 2002*, pages 164–171. IEEE, 2002.
- [83] Julian Frommel, Sven Sonntag, and Michael Weber. Effects of controller-based locomotion on player experience in a virtual reality exploration game. In *Proceedings of the 12th international conference on the foundations of digital games*, pages 1–6, 2017.
- [84] Peter Vorderer, Werner Wirth, Feliz Ribeiro Gouveia, Frank Biocca, Timo Saari, Lutz Jäncke, Saskia Böcking, Holger Schramm, Andre Gysbers, Tilo Hartmann, et al. Mec spatial presence questionnaire. Retrieved Sept, 18:2015, 2004.

- [85] Nick Sohre, Charlie Mackin, Victoria Interrante, and Stephen J Guy. Evaluating collision avoidance effects on discomfort in virtual environments. In *2017 IEEE Virtual Humans and Crowds for Immersive Environments (VHCIE)*, pages 1–5. IEEE, 2017.
- [86] Ryan P McMahan, Doug A Bowman, David J Zielinski, and Rachael B Brady. Evaluating display fidelity and interaction fidelity in a virtual reality game. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 18(4):626–633, 2012.
- [87] Melanie Colette Green. *Mechanisms of narrative-based belief change*. PhD thesis, The Ohio State University, 1996.
- [88] Peter Vorderer, Tilo Hartmann, and Christoph Klimmt. Explaining the enjoyment of playing video games: the role of competition. In *Proceedings of the second international conference on Entertainment computing*, pages 1–9, 2003.
- [89] Charlene Jennett, Anna L Cox, Paul Cairns, Samira Dhoparee, Andrew Epps, Tim Tijs, and Alison Walton. Measuring and defining the experience of immersion in games. *International journal of human-computer studies*, 66(9):641–661, 2008.
- [90] Guido Makransky, Lau Lilleholt, and Anders Aaby. Development and validation of the multimodal presence scale for virtual reality environments: A confirmatory factor analysis and item response theory approach. *Computers in Human Behavior*, 72:276–285, 2017.
- [91] Timothy A Brown. *Confirmatory factor analysis for applied research*. Guilford publications, 2015.
- [92] Susan E Embretson and Steven P Reise. *Item response theory*. Psychology Press, 2013.
- [93] Michael Meehan, Brent Insko, Mary Whitton, and Frederick P Brooks Jr. Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *Acm transactions on graphics (tog)*, 21(3):645–652, 2002.
- [94] Sebastian Arndt, Kjell Brunnström, Eva Cheng, Ulrich Engelke, Sebastian Möller, and Jan-Niklas Antons. Review on using physiology in quality of experience. *Electronic Imaging*, 2016(16):1–9, 2016.

- [95] Thomas Terkildsen and Guido Makransky. Measuring presence in video games: An investigation of the potential use of physiological measures as indicators of presence. *International Journal of Human-Computer Studies*, 126:64–80, 2019.
- [96] John L Andreassi. *Psychophysiology: Human behavior & physiological response*. Psychology Press, 2013.
- [97] René Weber, Katharina-Maria Behr, Ron Tamborini, Ute Ritterfeld, and Klaus Mathiak. What do we really know about first-person-shooter games? an event-related, high-resolution content analysis. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 14(4):1016–1037, 2009.
- [98] Karolien Poels, Wouter van den Hoogen, Wijnand Ijsselsteijn, and Yvonne de Kort. Pleasure to play, arousal to stay: the effect of player emotions on digital game preferences and playing time. *Cyberpsychology, behavior, and social networking*, 15(1):1–6, 2012.
- [99] Pierre Chalfoun and Jonathan Dankoff. Developing actionable biometric insights for production teams. *Games User Research*, pages 281–299, 2018.
- [100] Hindra Kurniawan, Alexandr V Maslov, and Mykola Pechenizkiy. Stress detection from speech and galvanic skin response signals. In *Proceedings of the 26th IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems*, pages 209–214. IEEE, 2013.
- [101] Conny MA van Ravenswaaij-Arts, Louis AA Kollee, Jeroen CW Hopman, Gerard BA Stoelinga, and Herman P van Geijn. Heart rate variability. *Annals of internal medicine*, 118(6):436–447, 1993.
- [102] José L González-Mora, A Rodriguez-Hernandez, LF Rodriguez-Ramos, L Díaz-Saco, and N Sosa. Development of a new space perception system for blind people, based on the creation of a virtual acoustic space. In *International Work-Conference on Artificial Neural Networks*, pages 321–330. Springer, 1999.
- [103] Christina Maslach, Gary Marshall, and Philip G Zimbardo. Hypnotic control of peripheral skin temperature: A case report. *Psychophysiology*, 9(6):600–605, 1972.
- [104] Tania Lara, Enrique Molina, Juan Antonio Madrid, and Ángel Correa. Electroencephalographic and skin temperature indices of vigilance and inhibitory control. *Psicológica Journal*, 39(2):223–260, 2018.

- [105] Catriona Steele. *Applications of EMG in clinical and sports medicine*. BoD–Books on Demand, 2012.
- [106] Francis T Durso, Kaitlin M Geldbach, and Paul Corballis. Detecting confusion using facial electromyography. *Human factors*, 54(1):60–69, 2012.
- [107] Mel Slater. Presence and the sixth sense. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 11(4):435–439, 2002.
- [108] Daniel Freeman, Sarah Reeve, A Robinson, Anke Ehlers, David Clark, Bernhard Spanlang, and Mel Slater. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders. *Psychological medicine*, 47(14):2393–2400, 2017.
- [109] Mel Slater and Sylvia Wilbur. A framework for immersive virtual environments (five): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6):603–616, 1997.
- [110] Maria V Sanchez-Vives and Mel Slater. From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4):332–339, 2005.
- [111] David W Schloerb. A quantitative measure of telepresence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 4(1):64–80, January 1995.
- [112] Mel Slater and Anthony Steed. A virtual presence counter. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9(5):413–434, October 2000.
- [113] A Spagnolli and L Gamberini. A place for presence. understanding the human involvement in mediated interactive environments. *PsychNology Journal*, 2005.
- [114] A Spagnolli, L Gamberini, and D Gasparini. Breakdown analysis in virtual reality usability evaluation. *Psychology journal*, 2003.
- [115] K Stanney, G Salvendy, J Deisinger, P DiZio, S Ellis, J Ellison, G Fogleman, J Gallimore, M Singer, L Hettinger, R Kennedy, J Lackner, B Lawson, J Maida, A Mead, M Mon-Williams, D Newman, T Piantanida, L Reeves, O Riedel, T Stoffregen, J Wann, R Welch, J Wilson, and B Witmer. Aftereffects and sense of presence in virtual environments: formulation of a research and development agenda. *Int. J. Hum. Comput. Interact.*, 10(2):135–187, 1998.

- [116] Eric B Nash, Gregory W Edwards, Jennifer A Thompson, and Woodrow Barfield. A review of presence and performance in virtual environments. *International Journal of human-computer Interaction*, 12(1):1–41, 2000.
- [117] Mel Slater, Martin Usoh, and Anthony Steed. Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2):130–144, 1994.
- [118] Carrie Heeter. Being there: The subjective experience of presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(2):262–271, 1992.
- [119] Thomas B Sheridan. Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1):120–126, 1992.
- [120] Richard M Held and Nathaniel I Durlach. Telepresence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1):109–112, 1992.
- [121] Taeyong Kim and Frank Biocca. Telepresence via television: Two dimensions of telepresence may have different connections to memory and persuasion. *Journal of computer-mediated communication*, 3(2):JCMC325, 1997.
- [122] John V Draper, David B Kaber, and John M Usher. Telepresence. *Human factors*, 40(3):354–375, 1998.
- [123] Karl-Erik Bystrom, Woodrow Barfield, and Claudia Hendrix. A conceptual model of the sense of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 8(2):241–244, 1999.
- [124] Mel Slater, Vasilis Linakis, Martin Usoh, Rob Kooper, and Gower Street. Immersion, presence, and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess. In *ACM virtual reality software and technology (VRST)*, volume 163, page 72. ACM Press New York, NY, 1996.
- [125] Claudia Hendrix and Woodrow Barfield. Presence within virtual environments as a function of visual display parameters. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(3):274–289, 1996.
- [126] TW Schubert, Frank Friedmann, and HT Regenbrecht. Decomposing the sense of presence: Factor analytic insights. In *2nd international workshop on presence*, volume 1999, 1999.
- [127] Albert S Carlin, Hunter G Hoffman, and Suzanne Weghorst. Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia: a case report. *Behaviour research and therapy*, 35(2):153–158, 1997.

- [128] Stephen R Ellis, Nancy S Dorigi, Brian M Menges, Bernard D Adelstein, and Richard H Jacoby. In search of equivalence classes in subjective scales of reality. *Advances in human factors/ergonomics*, pages 873–876, 1997.
- [129] John Towell and Elizabeth Towell. Presence in text-based networked virtual environments or “muds”. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(5):590–595, 1997.
- [130] Holger T Regenbrecht, Thomas W Schubert, and Frank Friedmann. Measuring the sense of presence and its relations to fear of heights in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(3):233–249, 1998.
- [131] Dustin B Chertoff, Brian Goldiez, and Joseph J LaViola. Virtual experience test: A virtual environment evaluation questionnaire. In *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE*, pages 103–110. IEEE, 2010.
- [132] Kent Bye. An elemental theory of presence + future of ai and interactive storytelling. *journal*, 2017.
- [133] Michael P Snow. *Charting presence in virtual environments and its effects on performance*. PhD thesis, Virginia Tech, 1998.
- [134] Michael P Snow and Robert C Williges. Empirical models based on free-modulus magnitude estimation of perceived presence in virtual environments. *Human factors*, 40(3):386–402, 1998.
- [135] Bimal Balakrishnan and S Shyam Sundar. Where am i? how can I get there? impact of navigability and narrative transportation on spatial presence. *Human-Computer Interaction*, 26(3):161–204, August 2011.
- [136] Maribeth Gandy, Richard Catrambone, Blair MacIntyre, Chris Alvarez, Elsa Eiriksdottir, Matthew Hilimire, Brian Davidson, and Anne Collins McLaughlin. Experiences with an ar evaluation test bed: Presence, performance, and physiological measurement. In *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2010 9th IEEE International Symposium on*, pages 127–136. IEEE, 2010.
- [137] Laura Aymerich-Franch. Presence and emotions in playing a group game in a virtual environment: the influence of body participation. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 13(6):649–654, 2010.
- [138] Karl-Erik Bystrom and Woodrow Barfield. Collaborative task performance for learning using a virtual environment. *Presence*, 8(4):435–448, 1999.

- [139] Rory McGloin, Kirstie M Farrar, and Marina Krcmar. The impact of controller naturalness on spatial presence, gamer enjoyment, and perceived realism in a tennis simulation video game. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 20(4):309–324, 2011.
- [140] Catherine A Zambaka, Benjamin C Lok, Sabarish V Babu, Amy Catherine Ulinski, and Larry F Hodges. Comparison of path visualizations and cognitive measures relative to travel technique in a virtual environment. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(6):694–705, 2005.
- [141] Kevin D Williams. The effects of video game controls on hostility, identification, and presence. *Mass communication and Society*, 16(1):26–48, 2013.
- [142] Rolf Nordahl. Self-induced footsteps sounds in virtual reality: Latency, recognition, quality and presence. In *The 8th Annual International Workshop on Presence, PRESENCE 2005*, pages 353–355. Department of Computer Science, Aalborg University, 2005.
- [143] Holger Regenbrecht and Thomas Schubert. Real and illusory interactions enhance presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 11(4):425–434, 2002.
- [144] Robert B Welch, Theodore T Blackmon, Andrew Liu, Barbara A Mellers, and Lawrence W Stark. The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(3):263–273, January 1996.
- [145] Cheryl Campanella Bracken, Gary Pettey, Trupti Guha, and Bridget E Rubenking. Sounding out small screens and telepresence: The impact of audio, screen size, and pace. *Journal of Media Psychology: Theories, Methods, and Applications*, 22(3):125, 2010.
- [146] Marcelo da Silva Hounsell, Avanilde Kemczinski, and Luiz Fernando Mattos Schlindwein. A comparative study on aspects that influence the sense of presence in virtual environments. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 5(1):113–125, 2013.
- [147] A Fleming Seay, David M Krum, Larry Hodges, and William Ribarsky. Simulator sickness and presence in a high field-of-view virtual environment. In *CHI'02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 784–785. ACM, 2002.

- [148] Huong Q Dinh, Neff Walker, Larry F Hodges, Chang Song, and Akira Kobayashi. Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. In *Virtual Reality, 1999. Proceedings., IEEE*, pages 222–228. IEEE, 1999.
- [149] Paul Skalski and Robert Whitbred. Image versus sound: A comparison of formal feature effects on presence and video game enjoyment. *PsychNology Journal*, 8(1), 2010.
- [150] Rosa M Baños, Cristina Botella, Isabel Rubió, Soledad Quero, Azucena García-Palacios, and Mariano Alcañiz. Presence and emotions in virtual environments: The influence of stereoscopy. *CyberPsychology & Behavior*, 11(1):1–8, 2008.
- [151] Jari Takatalo, Takashi Kawai, Jyrki Kaistinen, Göte Nyman, and Jukka Häkkinen. User experience in 3d stereoscopic games. *Media Psychology*, 14(4):387–414, 2011.
- [152] Sandra Poeschl, Konstantin Wall, and Nicola Doering. Integration of spatial sound in immersive virtual environments an experimental study on effects of spatial sound on presence. In *Virtual Reality (VR), 2013 IEEE*, pages 129–130. IEEE, 2013.
- [153] Rosa Mar ía Baños, Cristina Botella, Mariano Alcañiz, Víctor Liaño, Belén Guerrero, and Beatriz Rey. Immersion and emotion: their impact on the sense of presence. *Cyberpsychology & behavior*, 7(6):734–741, 2004.
- [154] M Carmen Juan and David Pérez. Comparison of the levels of presence and anxiety in an acrophobic environment viewed via hmd or cave. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 18(3):232–248, 2009.
- [155] Kwanguk Kim, M Zachary Rosenthal, David J Zielinski, and Rachael Brady. Effects of virtual environment platforms on emotional responses. *Computer methods and programs in biomedicine*, 113(3):882–893, 2014.
- [156] Giuseppe Riva, Fabrizia Mantovani, Claret Samantha Capideville, Alessandra Preziosa, Francesca Morganti, Daniela Villani, Andrea Gaggioli, Cristina Botella, and Mariano Alcañiz. Affective interactions using virtual reality: the link between presence and emotions. *CyberPsychology & Behavior*, 10(1):45–56, 2007.
- [157] Roy S Kalawsky. A comprehensive virtual environment laboratory facility. In *Virtual Reality Systems*, pages 77–89. Elsevier, 1993.

- [158] Craig D Murray, Jez Fox, and Steve Pettifer. Absorption, dissociation, locus of control and presence in virtual reality. *Computers in Human Behavior*, 23(3):1347–1354, 2007.
- [159] Hunter G Hoffman, Sam R Sharar, Barbara Coda, John J Everett, Marcia Ciol, Todd Richards, and David R Patterson. Manipulating presence influences the magnitude of virtual reality analgesia. *Pain*, 111(1-2):162–168, 2004.
- [160] Rudolph P Darken, David Bernatovich, John P Lawson, and Barry Peterson. Quantitative measures of presence in virtual environments: the roles of attention and spatial comprehension. *CyberPsychology & Behavior*, 2(4):337–347, 1999.
- [161] Cath Dillon, Edmund Keogh, Jonathan Freeman, and Jules Davidoff. Presence: Is your heart in it. In *Proceedings of the 4th Annual international workshop on presence*. Citeseer, 2001.
- [162] Toyohiko Hatada, Haruo Sakata, and Hideo Kusaka. Psychophysical analysis of the “sensation of reality” induced by a visual wide-field display. *Smpte Journal*, 89(8):560–569, 1980.
- [163] Peter R Atherton and Linnda R Caporael. A subjective judgment study of polygon based curved surface imagery. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 27–34. ACM, 1985.
- [164] John P Zenyuh, John M Reising, Scott WalchliLt, and David Biers. A comparison of a stereographic 3-d display versus a 2-d display using an advanced air-to-air format. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, volume 32, pages 53–57. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1988.
- [165] William F Reinhart, Robert J Beaton, and Harry L Snyder. Comparison of depth cues for relative depth judgments. In *Stereoscopic displays and applications*, volume 1256, pages 12–22. International Society for Optics and Photonics, 1990.
- [166] David Zeltzer. Autonomy, interaction, and presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1):127–132, 1992.
- [167] Jack M Loomis. Presence and distal attribution: Phenomenology, determinants, and assessment. In *Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III*, volume 1666, pages 590–596. International Society for Optics and Photonics, 1992.

- [168] Kichul Cha, Kenneth W Horch, and Richard A Normann. Mobility performance with a pixelized vision system. *Vision research*, 32(7):1367–1372, 1992.
- [169] Michael W McGreevy. The presence of field geologists in mars-like terrain. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(4):375–403, 1992.
- [170] W Barfield and S Weghorst. The sense of presence within virtual environments. In *Proc. of the Fifth International Conference on Human Computer Interaction*, 1993.
- [171] Kevin W Arthur, Kellogg S Booth, and Colin Ware. Evaluating 3d task performance for fish tank virtual worlds. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 11(3):239–265, 1993.
- [172] Joseph Psozka, SA Davison, and Sonya A Lewis. Exploring immersion in virtual space. *Virtual Reality Systems*, 1(2):70–92, 1993.
- [173] Karen Carr and RD England. The role of realism in virtual reality. In *Virtual Reality International 93: Proceedings of the Third Annual Conference on Virtual Reality*, pages 24–33, 1993.
- [174] Mel Slater and Martin Usoh. Presence in immersive virtual environments. In *Virtual Reality Annual International Symposium, 1993., 1993 IEEE*, pages 90–96. IEEE, 1993.
- [175] JD Waldern. Virtual reality—the next generation. In *Virtual Reality International 93. Proceedings of the Third Annual Conference on Virtual Reality*, pages 87–100, 1993.
- [176] JA Ehrlich and MJ Singer. Are stereoscopic displays necessary for virtual environments. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society 38th annual meeting*, page 952, 1994.
- [177] Michael J Singer, Bob G Witmer, and John H Bailey. Development of “presence” measures for virtual environments. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 38, pages 983–983. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 1994.
- [178] Michael W McGreevy. An ethnographic object-oriented analysis of explorer presence in a volcanic terrain environment: Claims and evidence. NASA Technical Memorandum 108823, 1994.

- [179] Colin Ware and Ravin Balakrishnan. Reaching for objects in vr displays: lag and frame rate. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 1(4):331–356, 1994.
- [180] Woodrow Barfield and Claudia Hendrix. The effect of update rate on the sense of presence within virtual environments. *Virtual Reality*, 1(1):3–15, 1995.
- [181] Lothar Muhlbach, Martin Bocker, and Angela Prussog. Telepresence in videocommunications: A study on stereoscopy and individual eye contact. *Human Factors*, 37(2):290–305, 1995.
- [182] Robert H Gilkey and Janet M Weisenberger. The sense of presence for the suddenly deafened adult: Implications for virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 4(4):357–363, 1995.
- [183] K Morgan, M Satava, and B Sieburg. Factors affecting presence and performance. *Interactive Technology and the New Paradigm for Healthcare*, 18:21, 1995.
- [184] Thomas B Sheridan. Further musings on the psychophysics of presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(2):241–246, 1996.
- [185] Tomasz Mazuryk and Michael Gervautz. Virtual reality - history, applications, technology and future. *Journal*, 1996.
- [186] Woodrow Barfield, Kevin M Baird, and Ove J Bjorneseth. Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate. *Displays*, 19(2):91–98, 1998.
- [187] David M Johnson and John E Stewart. Use of virtual environments for the acquisition of spatial knowledge: Comparison among different visual displays. *Military Psychology*, 11(2):129–148, 1999.
- [188] Matthew Lombard, Robert D Reich, Maria E Grabe, Cheryl C Bracken, and Theresa B Ditton. Presence and television. *Human Communication Research*, 26(1):75–98, 2000.
- [189] Jonathan Freeman, Steve E Avons, Ray Meddis, Don E Pearson, and Wijnand IJsselsteijn. Using behavioral realism to estimate presence: A study of the utility of postural responses to motion stimuli. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9(2):149–164, 2000.

- [190] Wijnand IJsselsteijn, Huib de Ridder, Jonathan Freeman, Steve E Avons, and Don Bouwhuis. Effects of stereoscopic presentation, image motion, and screen size on subjective and objective corroborative measures of presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(3):298–311, 2001.
- [191] Ann-Sofie Axelsson, Åsa Abelin, Ilona Heldal, Ralph Schroeder, and Josef Wideström. Cubes in the cube: A comparison of a puzzle-solving task in a virtual and a real environment. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2):279–286, 2001.
- [192] Cheryl Campanella Bracken and Renée A Botta. Presence and television: Form versus content. In *Proceedings of the 5th Annual International Workshop on PRESENCE*, pages 9–11, 2002.
- [193] Roxana Moreno and Richard E Mayer. Learning science in virtual reality multimedia environments: Role of methods and media. *Journal of educational psychology*, 94(3):598, 2002.
- [194] Corrado Lo Priore, Gianluca Castelnuovo, Diego Liccione, and Davide Liccione. Experience with v-store: considerations on presence in virtual environments for effective neuropsychological rehabilitation of executive functions. *Cyberpsychology & behavior*, 6(3):281–287, 2003.
- [195] Wooyoung Shim and Gerard Jounghyun Kim. Designing for presence and performance: The case of the virtual fish tank. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 12(4):374–386, 2003.
- [196] Paul Zimmons and Abigail Panter. The influence of rendering quality on presence and task performance in a virtual environment. In *Virtual Reality, 2003. Proceedings. IEEE*, pages 293–294. IEEE, 2003.
- [197] Alison Lott, Etienne Bisson, Yves Lajoie, Joan McComas, and Heidi Sveistrup. The effect of two types of virtual reality on voluntary center of pressure displacement. *Cyberpsychology & behavior*, 6(5):477–485, 2003.
- [198] Roxana Moreno and Richard E Mayer. Personalized messages that promote science learning in virtual environments. *Journal of Educational Psychology*, 96(1):165, 2004.
- [199] Merel Krijn, Paul MG Emmelkamp, Roeline Biemond, Claudius de Wilde de Ligny, Martijn J Schuemie, and Charles APG van der Mast. Treatment of acrophobia in virtual reality: The role of immersion and presence. *Behaviour research and therapy*, 42(2):229–239, 2004.

- [200] Cheryl Campanella Bracken. Presence and image quality: The case of high-definition television. *Media psychology*, 7(2):191–205, 2005.
- [201] R Rajae-Joordens, E Langendijk, P Wilinski, and I Heynderickx. Added value of a multi-view auto-stereoscopic 3d display in gaming applications. In *Proc Int Disp Workshop*, 2005.
- [202] Debbie Rand, Rachel Kizony, Uri Feintuch, Noomi Katz, Naomi Josman, Albert “Skip” Rizzo, and Patrice L Weiss. Comparison of two vr platforms for rehabilitation: video capture versus hmd. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 14(2):147–160, 2005.
- [203] YAW De Kort, AL Meijnders, AAG Sponselee, and WA IJsselsteijn. What’s wrong with virtual trees? restoring from stress in a mediated environment. *Journal of environmental psychology*, 26(4):309–320, 2006.
- [204] L Gamito and M Anastácio. Presence: Head mounted display vs. translucent screen. *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 4:111–116, 2006.
- [205] Pontus Larsson, Daniel Västfjäll, Pierre Olsson, and Mendel Kleiner. When what you hear is what you see: Presence and auditory-visual integration in virtual environments. In *Proceedings of the 10th annual international workshop on presence*, pages 11–18, 2007.
- [206] Eui Jun Jeong, Frank A Biocca, and Corey J Bohil. Effects of representational realism in 3d violent games. In *Proceedings of the 11th Annual International Workshop on PRESENCE*, pages 16–18, 2008.
- [207] Cheryl Campanella Bracken and Paul Skalski. Telepresence and video games: The impact of image quality. *PsychNology Journal*, 7(1), 2009.
- [208] Mel Slater, Bernhard Spanlang, and David Corominas. Simulating virtual environments within virtual environments as the basis for a psychophysics of presence. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4):92, 2010.
- [209] Alessandra Gorini, Claret S Capideville, Gianluca De Leo, Fabrizia Mantovani, and Giuseppe Riva. The role of immersion and narrative in mediated presence: the virtual hospital experience. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 14(3):99–105, 2011.
- [210] Mark Yi-Cheon Yim, Vincent J Cicchirillo, and Minette E Drumwright. The impact of stereoscopic three-dimensional (3-d) advertising. *Journal of Advertising*, 41(2):113–128, 2012.

- [211] Jinghui Hou, Yujung Nam, Wei Peng, and Kwan Min Lee. Effects of screen size, viewing angle, and players' immersion tendencies on game experience. *Computers in Human Behavior*, 28(2):617–623, 2012.
- [212] Brendan Rooney, Ciarán Benson, and Eilis Hennessy. The apparent reality of movies and emotional arousal: A study using physiological and self-report measures. *Poetics*, 40(5):405–422, 2012.
- [213] Behrang Keshavarz and Heiko Hecht. Stereoscopic viewing enhances visually induced motion sickness but sound does not. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(2):213–228, 2012.
- [214] Mel Slater, Martin Usoh, and Yiorgos Chrysanthou. The influence of dynamic shadows on presence in. In *Virtual Environments' 95: Selected papers of the Eurographics Workshops in Barcelona, Spain, 1993, and Monte Carlo, Monaco, 1995*, page 8. Springer Science & Business Media, 2012.
- [215] Cédric André, Jean-Jacques Embrechts, Jacques Verly, Marc Rébillat, and Brian FG Katz. Sound for 3d cinema and the sense of presence. In *Proceedings of the 18th International Conference on Auditory Display*, 2012.
- [216] Yun Ling, Willem-Paul Brinkman, Harold T Nefs, Chao Qu, and Ingrid Heynderickx. Effects of stereoscopic viewing on presence, anxiety, and cybersickness in a virtual reality environment for public speaking. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21(3):254–267, 2012.
- [217] Anna Felnhöfer, Anna-Katharina Heinzle, and Oswald David Kothgassner. Game experience and behavior in young women: A comparison of interface technologies. *Proceedings of the Usability Day XI*, 2013.
- [218] Brendan Rooney and Eilis Hennessy. Actually in the cinema: A field study comparing real 3d and 2d movie patrons' attention, emotion, and film satisfaction. *Media Psychology*, 16(4):441–460, 2013.
- [219] Guy Wallis and Jennifer Tichon. Predicting the efficacy of simulator-based training using a perceptual judgment task versus questionnaire-based measures of presence. *Presence*, 22(1):67–85, 2013.
- [220] Ki Joon Kim and S Shyam Sundar. Can interface features affect aggression resulting from violent video game play? an examination of realistic controller and large screen size. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 16(5):329–334, 2013.

- [221] António Sérgio Azevedo. *3D Sound Enhanced Presence in Virtual Environments*. PhD thesis, Master's thesis. University of Lisbon, 2013.
- [222] António Sérgio Azevedo, Joaquim Jorge, and Pedro Campos. Combining eeg data with place and plausibility responses as an approach to measuring presence in outdoor virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 23(4):354–368, 2014.
- [223] Dohyun Ahn, Youngnam Seo, Minkyung Kim, Joung Huem Kwon, Younbo Jung, Jungsun Ahn, and Doohwang Lee. The effects of actual human size display and stereoscopic presentation on users' sense of being together with and of psychological immersion in a virtual character. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 17(7):483–487, 2014.
- [224] Ilias Bergström, Sérgio Azevedo, Panos Papiotis, Nuno Saldanha, and Mel Slater. The plausibility of a string quartet performance in virtual reality. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(4):1352–1359, 2017.
- [225] Projectcars, racing game. <https://www.projectcarsgame.com/two/>. Accedido en Enero 2021.
- [226] differentresolutions. <https://www.youtube.com/watch?v=aXN6Hc4K8To>. Accedido en Enero 2021.
- [227] Sarah Nichols, Clovissa Haldane, and John R Wilson. Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(3):471–491, 2000.
- [228] Jonathan Freeman, Jane Lessiter, and Wijnand IJsselsteijn. An introduction to presence: A sense of being there in a mediated environment. *The Psychologist*, 14:190–194, 2001.
- [229] Robert B Welch, Theodore T Blackmon, Andrew Liu, Barbara A Mellers, and Lawrence W Stark. The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(3):263–273, 1996.
- [230] Nathaniel I Durlach. Virtual reality-scientific and techonological challenges. *National Academy Press*, pages 213–220, 1995.
- [231] Woodrow Barfield, Kevin M Baird, and Ove J Bjorneseth. Presence in virtual environments as a function of type of input device and display update rate. *Displays*, 19(2):91–98, October 1998.

- [232] Juno Kim, Wilson Luu, and Stephen Palmisano. Multisensory integration and the experience of scene instability, presence and cybersickness in virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 113:106484, 2020.
- [233] Anna Spagnolli, Cheryl Campanella Bracken, and Valeria Orso. The role played by the concept of presence in validating the efficacy of a cybertherapy treatment: a literature review. *Virtual Reality*, 18(1):13–36, 2014.
- [234] Torben Volkman, Daniel Wessel, Tim Ole Caliebe, and Nicole Jochems. What you see isn't necessarily what you get: testing the influence of polygon count on physical and self-presence in virtual environments. In *Proceedings of the Conference on Mensch und Computer*, pages 119–128, 2020.
- [235] Poligonos, blueholefoliage. <http://www.chico-spans.com/pages/blueholefoliage.html>. Accedido en Enero 2021.
- [236] Martin Usoh, Christina Alberto, and Mel Slater. Presence: experiments in the psychology of virtual environments. *Department of Computer Science, University College London, UK*, 1996.
- [237] Matias Nicolás Selzer. Interacción humano computadora en ambientes virtuales. Tesis de Magister, Universidad Nacional del Sur, 2018.
- [238] Matthias Hoppe, Jakob Karolus, Felix Dietz, Paweł W Woźniak, Albrecht Schmidt, and Tonja-Katrin Machulla. Vrsneaky: Increasing presence in vr through gait-aware auditory feedback. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–9, 2019.
- [239] H Q Dinh, N Walker, L F Hodges, Chang Song, and A Kobayashi. Evaluating the importance of multi-sensory input on memory and the sense of presence in virtual environments. In *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, pages 222–228. [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org), March 1999.
- [240] Carrie Heeter. Being there: The subjective experience of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2):262–271, January 1992.
- [241] Frederick J Gravetter and Lori-Ann B Forzano. *Research methods for the behavioral sciences*. Cengage Learning, 2018.
- [242] Guido Makransky, Thomas S Terkildsen, and Richard E Mayer. Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, 60:225–236, 2019.

- [243] Jacob Cohen. A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1):155, 1992.
- [244] Harold D Stolovitch and Erica J Keeps. *Telling ain't training*. American Society for Training and Development, 2011.
- [245] Helmut Altner, Josef Dudel, Otto-Joachim Grüsser, Ursula Grüsser-Cornehls, Rainer Klinke, and Manfred Zimmermann. *Fundamentals of Sensory Physiology*. Springer Science & Business Media, 2012.