

La sensación de presencia en entornos virtuales: un análisis basado en señales EEG, ECG y GSR

The sense of presence in virtual environments: an analysis based on EEG, ECG, and GSR signals

Víctor A Ortiz-Bravo¹   Walter Serna Serna²  Marisol Jiménez Gallego² 
Juan Pablo Trujillo Lemus²  Angie Correa Acosta² 

¹ Universidad Uniminuto Pereira. Risaralda, Colombia.

² Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.

Resumen

Introducción: el sentido de presencia se refiere a la experiencia subjetiva de estar inmerso en un entorno virtual o simulado. Estas sensaciones pueden evaluarse objetivamente mediante señales electrofisiológicas como la electroencefalografía (EEG), la electrocardiografía (ECG) y la respuesta galvánica de la piel (GSR). Sin embargo, existe evidencia que indica que las características psicológicas influyen significativamente en el grado de presencia experimentado en entornos virtuales.

Objetivos: este estudio propone una metodología para cuantificar el sentido de presencia durante la inmersión en entornos virtuales, combinando múltiples características electrofisiológicas validadas por la literatura científica actual.

Metodología: se evaluaron un total de 14 experiencias virtuales relacionadas con sitios turísticos del departamento del Magdalena, Colombia. Estas experiencias se segmentaron en ventanas de tiempo de 20 segundos, durante las cuales se registraron señales EEG, ECG y GSR. Cada escenario virtual fue evaluado seis veces por diferentes usuarios, obteniéndose 84 registros de bioseñales. De cada registro se extrajeron seis indicadores relacionados con la presencia. Además, los usuarios fueron clasificados como de alta o baja capacidad psicológica de involucramiento, según una evaluación cualitativa basada en cinco indicadores de presencia.

Resultados: los usuarios con alta capacidad de involucramiento experimentaron un sentido de presencia en un 15% más de los entornos virtuales en comparación con los usuarios con baja capacidad de involucramiento.

Conclusiones: los resultados respaldan que el sentido de presencia en un entorno virtual no depende únicamente del nivel de inmersión de la realidad virtual, sino también del perfil psicológico del usuario y su experiencia previa con tecnologías inmersivas.

Palabras clave: Electrofisiología, inmersión, procesamiento de señales, realidad virtual, sensación de presencia.

Abstract

Introduction: the sense of presence refers to the subjective experience of being immersed in a virtual or simulated environment. These sensations can be objectively assessed using electrophysiological signals such as electroencephalography (EEG), electrocardiography (ECG), and galvanic skin response (GSR). However, psychological characteristics also significantly influence the degree of presence experienced in virtual environments.

Objectives: this study proposes a methodology for quantifying the sense of presence during immersion in virtual environments by combining multiple electrophysiological features validated by current scientific literature.

Methodology: a total of 14 virtual experiences related to tourist locations in the Magdalena region of Colombia were evaluated. These experiences were segmented into 20-second time windows, during which EEG, ECG, and GSR signals were recorded. Each virtual scenario was evaluated six times by different users, yielding 84 biosignal recordings. From each recording, six presence-related indicators were extracted. Additionally, users were classified as either High or Low in their psychological capacity to engage with the experience, based on a qualitative assessment involving five presence indicators.

Results: users with a high engagement capacity experienced a sense of presence in 15% more of the virtual environments compared to users with low engagement capacity.

Conclusions: the findings support that a user's sense of presence in a virtual environment is not solely determined by the level of virtual reality immersion but is also influenced by psychological profile and prior experience with immersive technologies.

Keywords: Electrophysiology, immersion, signal processing, virtual reality, sense of presence

¿Cómo citar?

Ortiz-Bravo VA, Serna W, Jiménez G, Trujillo JP, Correa A. La sensación de presencia en entornos virtuales: un análisis basado en señales EEG, ECG y GSR. Ingeniería y Competitividad, 2025 27;(2):e-21314737

<https://doi.org/10.25100/iyc.v27i2.14737>

Recibido: 9-02-25

Evaluado: 19-03-25

Aceptado: 29-09-25

Online: 10-10-25

Correspondencia 

bravo.ortiz@uniminuto.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

El desarrollo de un proyecto de evaluación neurocientífica sobre la sensación de presencia durante la inmersión en entornos virtuales responde a la necesidad de comprender, desde una perspectiva objetiva y basada en la evidencia, cómo reaccionan el cerebro y el sistema nervioso a los estímulos multisensoriales que caracterizan las experiencias de Realidad Virtual. La mayoría de los estudios sobre usabilidad e inmersión en este tipo de entornos se basan en las percepciones subjetivas de los usuarios; sin embargo, estos enfoques no reflejan con precisión los procesos cognitivos que determinan la calidad real de la experiencia. Este proyecto busca integrar la neurociencia con el diseño de tecnologías inmersivas, proporcionando una metodología científicamente validada para medir el impacto cognitivo de los entornos virtuales.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

Los resultados más relevantes del estudio muestran una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de sensación de presencia entre participantes con alta y baja capacidad de inmersión. Asimismo, la integración de seis índices fisiológicos derivados del EEG, el ECG y la GSR permitió una diferenciación altamente precisa del estado de sensación de presencia, revelando una correspondencia directa entre las respuestas neurofisiológicas y las autopercepciones de los participantes. Además, se observó coherencia entre los patrones fisiológicos y los perfiles psicológicos, lo que indica que las personas con mayor capacidad para involucrarse emocional y cognitivamente en la experiencia virtual tienden a activar con mayor facilidad la sensación de presencia.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Estos hallazgos proporcionan evidencia sólida que respalda el uso de biomarcadores neurofisiológicos como medida objetiva de la sensación de presencia, ofreciendo una alternativa fiable a los métodos tradicionales basados en autoinformes, que suelen ser susceptibles a sesgos subjetivos. Además, este estudio valida la viabilidad de un enfoque multimodal que combina el EEG, el ECG y la GSR para evaluar la sensación de presencia en entornos virtuales, demostrando que la interacción entre las características fisiológicas y psicológicas de los usuarios desempeña un papel clave en la calidad de la experiencia virtual. Esto contribuye al cumplimiento de altos estándares de calidad, la optimización de recursos y la eficiencia de los procesos, lo que, a su vez, fortalece el desempeño general de la empresa ferroviaria y su capacidad para ofrecer servicios más confiables y seguros.



Introducción

En los últimos años, la realidad virtual (VR) se ha establecido como una tecnología prometedora con aplicaciones en diversas áreas, como: entretenimiento, turismo, educación, salud, entre muchas otras. Para lograr una experiencia inmersiva y convincente, donde el usuario experimente una sensación de presencia y se sumerja en la realidad virtual como si estuviera físicamente presente, es fundamental comprender y evaluar la sensación de presencia experimentada por los usuarios, con el fin de crear la ilusión de estar presente en un mundo virtual (1). La sensación subjetiva de estar presente en un entorno virtual absorbido por lo que está sucediendo en el mundo real, conocida como sensación de presencia, es un aspecto clave para determinar la efectividad y la calidad de la experiencia virtual (2). Si bien la calidad del contenido virtual genera una mayor inmersión, la sensación de presencia es única para cada individuo. A pesar de esto, no existen metodologías que realicen perfiles psicológicos y perfiles de experiencia de usuario con tecnología de realidad virtual para determinar las implicaciones para el sentido de presencia.

Además, la evaluación del sentido de presencia y el nivel de inmersión en la realidad virtual ha sido objeto de estudio en la comunidad científica. Tradicionalmente, la evaluación de la sensación de presencia generada por los entornos virtuales se realiza mediante la cumplimentación de cuestionarios para responder a esta pregunta. Sin embargo, esta metodología solo permite medir la respuesta consciente del usuario (3); este tipo de metodología de evaluación puede presentar múltiples dificultades, dada la posibilidad de producir respuestas sesgadas a voluntad o debido a características culturales, socioeconómicas, religiosas o de otro tipo. Ante esto, existe la necesidad de evaluar los entornos de RV más allá de las respuestas conscientes, con un enfoque cuantitativo y a nivel subconsciente de lo que generan los entornos virtuales en los usuarios. En este contexto, el uso de señales electrofisiológicas se ha constituido como una herramienta prometedora para medir objetivamente la respuesta electrofisiológica de los usuarios durante la interacción en entornos virtuales y, de esta manera, determinar si el perfil psicológico de un usuario afecta su sensación de presencia en un entorno virtual.

En este trabajo, nos proponemos analizar las señales electrofisiológicas como herramientas para la evaluación objetiva del sentido de presencia y su correspondencia con el perfil psicológico de un usuario durante una experiencia en entornos de realidad virtual.

Materiales y métodos

En esta sección se detallarán conceptos importantes para el lector y se analizará la metodología utilizada para realizar esta investigación. El proceso se desarrolló en varias etapas: primero, se diseñó y administró una encuesta para obtener el perfil psicológico del usuario en términos de su capacidad para participar en una experiencia virtual. En una segunda etapa, se registraron las respuestas electrofisiológicas durante los procesos de inmersión en RV. En tercer lugar, las señales adquiridas se adaptaron y preprocesaron. En la cuarta etapa, se obtuvieron, seleccionaron y validaron seis índices cuantitativos de los datos preprocesados para el sentido de presencia en investigaciones externas previas. Finalmente, se realizó un proceso de frecuencia absoluta basado en el número de índices, discriminando entre participantes con alto y bajo sentido de presencia, como se muestra en la sección de resultados.

Perfil psicológico de los participantes

Existen diferentes tipos de consumidores virtuales que están determinados por variables psicológicas como rasgos de personalidad, motivaciones y actitudes (5) y que determinan sus elecciones con respecto al uso de la tecnología digital. Estas variables psicológicas deben tenerse en cuenta en el diseño de escenarios virtuales, ya que pueden influir en el sentido de presencia de los usuarios.

Algunas investigaciones han encontrado que los rasgos de personalidad están asociados con la perspectiva que los consumidores toman en una interacción con la realidad virtual (6). En la misma línea de investigación, se han encontrado relaciones directas entre ciertas medidas psicológicas y el nivel de presencia en la realidad virtual inmersiva, lo que refleja que la capacidad de absorción, la disociación y el locus de control son rasgos psicológicos que son directamente proporcionales al sentido de presencia (7). Por otro lado, otros estudios han encontrado que la sensación de control, la capacidad de disfrute y la curiosidad son rasgos personales que impulsan el sentido de presencia de los usuarios en entornos de realidad virtual (8).

Ciertas variables psicológicas de los usuarios también pueden modificarse después de experiencias en entornos virtuales (9), incluso modificando experiencias subjetivas de dolor (10) o potenciando habilidades creativas en escenarios de compra (11), lo que demuestra nuevamente la interrelación bidireccional entre las medidas psicológicas y el sentido de presencia en escenarios virtuales.

Finalmente, la relación entre los patrones de comportamiento humano y su influencia en la interacción con las tecnologías virtuales se ha convertido en un campo de interés que debe considerarse en el diseño de realidad virtual (12). Este perfil psicológico nos permitirá establecer a priori la capacidad del sujeto para generar estados de sensación de presencia frente a contenidos virtuales.

Sensación de presencia

Se trata de un proceso cognitivo que implica la percepción subjetiva de estar presente en un entorno virtual, lo que conduce a la interpretación y procesamiento cognitivo de la información sensorial recibida. Cuando un usuario experimenta una sensación de presencia en un entorno de realidad virtual, está construyendo una representación mental de estar físicamente presente en ese entorno simulado. Este proceso cognitivo implica la integración de información visual, auditiva y táctil, así como la interpretación y asimilación de interacciones y estímulos presentes en el entorno virtual (1).

Además, el sentido de presencia también está relacionado con otros procesos cognitivos, como la atención, la memoria y la percepción espacial. La atención del usuario se dirige hacia el entorno virtual, lo que implica seleccionar y procesar información relevante para la experiencia inmersiva. Por otro lado, la memoria se encarga de almacenar y recuperar información del entorno virtual, lo que permite la continuidad y consistencia en la experiencia. La percepción espacial está involucrada en la interpretación de la ubicación y el movimiento en el entorno virtual, lo que contribuye a la sensación de estar realmente presente en un entorno de realidad virtual.

Medidas electrofisiológicas

A continuación se muestra una breve descripción de las principales variables electrofisiológicas que se utilizarán para el análisis cuantitativo del contenido de VR.

Electrocardiografía (ECG)

El proyecto propone el uso de señales electrocardiográficas, ya que son una de las señales que proporcionan más información en tiempo real sobre los estados emocionales de una persona. Estas señales proporcionan información tanto sobre el estado emocional como sobre su intensidad (18), (19). En concreto, el objetivo es medir la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), que evalúa las fluctuaciones en los intervalos de tiempo entre latidos del corazón, con el fin de medir los estados de estrés asociados a la inmersión en entornos virtuales, ya que la VFC proporciona información importante sobre cómo responde y se adapta el cuerpo a los episodios de estrés.

Respuesta galvánica de la piel (GSR)

La respuesta galvánica de la piel (GSR) es la medida de las variaciones en la actividad del sudor y el comportamiento eléctrico de la piel (20). Esta actividad responde a estímulos externos e internos y se asocia a estados emocionales y cognitivos (21), lo que permite detectar cambios en la actividad emocional y cognitiva de una persona generados por los entornos de realidad virtual presentados.

La plataforma e-Health Sensor se utilizará para adquirir la señal electrocardiográfica y la respuesta galvánica de la piel. Este dispositivo permite realizar aplicaciones biométricas y médicas utilizando Arduino y Raspberry Pi.

Electroencefalografía (EEG)

La señal electroencefalográfica (EEG) es el registro de la actividad eléctrica que se origina en el cerebro. Este registro se obtiene implantando electrodos en el cerebro o colocando electrodos en el cuero cabelludo (electroencefalografía de superficie, sEEG). Esta actividad eléctrica se genera continuamente en el cerebro debido a los pensamientos, actividades y casi todas las acciones realizadas por los humanos. El análisis de EEG considera muchas características para encontrar patrones morfológicos o alteraciones inesperadas que podrían conducir al descubrimiento de anomalías, compromiso patológico o interpretación de comportamientos funcionales y rendimiento cognitivo. Trabajaremos con el análisis temporal, frecuencial y espacial de las señales de EEG, utilizando índices de última generación como indicadores directos del sentido de presencia, basados principalmente en las potencias de las bandas cerebrales y las actividades eléctricas en áreas específicas del cerebro directamente relacionadas con procesos cognitivos de interés para el objeto de estudio.

Para capturar señales de EEG, se utilizará un equipo OpenBCI como interfaz cerebro-computadora. Se trata de un dispositivo de hardware abierto con 16 canales de entrada diferenciales, compatible con electrodos activos y pasivos, basado en la tecnología Arduino capaz de adquirir actividad eléctrica cerebral a una frecuencia de muestreo de 125 o 250 Hz con resolución de 24 bits y comunicación Bluetooth al ordenador.

Diseño experimental

Este estudio tiene un enfoque cuantitativo, exploratorio y experimental y se realizó de acuerdo con los estándares éticos aprobados por el comité de bioética de la Universidad del Magdalena; todos los participantes firmaron un Consentimiento Informado previo a su participación. En cuanto al perfil de los sujetos de estudio, se categorizaron dos tipos de sensación de presencia a priori en entornos virtuales como alta y baja. Se extendió una invitación abierta a 100 personas para completar dos formularios digitales. Este proceso involucró a sujetos de igual sexo, con una edad promedio de 32 ± 15 años, y sus datos fueron tratados bajo parámetros de confidencialidad. Las encuestas fueron diseñadas con la ayuda de un neuropsicólogo experto con un profundo conocimiento del tema y validadas por expertos en realidad virtual. El primer formulario generó un perfil sociodemográfico del usuario con el fin de recopilar características sociales, culturales y emocionales resultantes del contexto social que la persona ha construido, con el objetivo de determinar cómo las características socioculturales pueden impactar la forma en que los sujetos toman decisiones en ciertos escenarios virtuales. A partir de la investigación analizada en la literatura, se diseñó un segundo cuestionario con 15 preguntas evaluadas en una escala Likert: casi siempre, a veces y casi nunca. Esto permitió identificar características relevantes para facilitar la sensación de presencia en entornos virtuales para los usuarios. Los rasgos psicológicos buscados fueron:

1. **Capacidad de absorción:** capacidad de involucrarse o sumergirse en una situación (7), (16).
2. **Capacidad de disociación:** interrupción de las funciones integradas de la conciencia que implican la capacidad de "olvidar" o distanciarse del mundo real o alejarse del entorno (7), (9), (13).
3. **Extroversión:** la capacidad de interactuar con los estímulos del entorno (14), (15).
4. **Locus de control:** la medida en que un usuario cree que los eventos son causados por su propio comportamiento y acciones (locus de control interno) o por fuerzas externas como el destino, el azar, la suerte o la coincidencia (16).
5. **Creencias y significados en entornos virtuales:** concepto que un usuario asigna a la experiencia virtual y que le da a la experiencia mayor o menor significado y significación (17).

Este proceso categorizó a los diferentes usuarios, descartando aquellos con calificaciones intermedias y dejando una base de datos de 63 potenciales evaluadores de las experiencias. Sin embargo, debido al desequilibrio entre las categorías de usuarios y su disponibilidad para pruebas, buscamos garantizar que cada uno de los escenarios virtuales fuera evaluado por tres usuarios de alta capacidad y tres usuarios de baja capacidad en términos de presencia. Dado que trabajamos con indicadores consolidados de última generación, no se requirió un gran tamaño de muestra para explorar nuevas relaciones, sino un número suficiente de casos para validar la metodología propuesta para integrar señales de EEG, ECG y GSR en condiciones controladas.

Descripción del contenido virtual

En el marco del proyecto AvenHub Magdalena “Fortalecimiento de la oferta de turismo de aventura a través del desarrollo tecnológico en el departamento del Magdalena”, administrado y ejecutado por la empresa Innovanex, se construyeron 14 entornos virtuales en diferentes localidades de interés (ver Figura 1). El guión para cada entorno virtual incluye múltiples actividades turísticas, que corresponden a los principales atractivos de cada municipio del departamento del Magdalena.

Todos los entornos virtuales se desarrollaron utilizando el motor de renderizado en tiempo real Unity 3D, empleando el lenguaje de programación C#. La pantalla se configuró a una resolución de 1440x1600 píxeles por ojo. Además, todos los modelos tridimensionales se diseñaron con el software de código abierto Blender.



Figura 1. Ejemplo de diferentes entornos virtuales evaluados. **Fuente:** Autores

Captura de señales electrofisiológicas

Para evaluar los entornos de RV se utilizó la siguiente configuración experimental, detallando los procesos sometidos por los usuarios de la evaluación, con base en la propuesta de recolección de datos electrofisiológicos diseñada por (22). Cada entorno virtual, uno por municipio, con diferentes localidades turísticas del Magdalena, fue evaluado por tres usuarios con bajo y tres con alto sentido psicológico de presencia. Para capturar datos electrofisiológicos durante la experiencia de realidad virtual, el usuario usó gafas de realidad virtual Oculus Quest 2, con una visita automática y guiada para cada entorno virtual, que no implicaba movimiento físico. Cada una de las señales electrofisiológicas adquiridas se dividió en ventanas de 20 segundos, respondiendo tanto a criterios fisiológicos como metodológicos, ya que un intervalo de 20 segundos es suficiente para capturar respuestas fisiológicas estables a estímulos sensoriales en las tres bioseñales y permite un equilibrio adecuado entre la resolución temporal y la estabilidad de los indicadores extraídos. Esto permite un análisis más específico de la respuesta electrofisiológica en momentos segmentados en los entornos virtuales, ya que cada uno de los 14 entornos virtuales tuvo diferentes duraciones que van de 2 a 10 minutos.

Una de las prioridades en la aplicación del experimento fue asegurar la sincronización de la recolección de datos cardíacos, electrodérmicos y cerebrales con la proyección de estímulos (entornos virtuales). Para ello, se propuso incluir unos segundos de una pantalla en blanco en el contenido de RV para identificar la hora de inicio de las señales adquiridas a partir de un tono de iniciación. Este proceso también permite filtrar por corrección de línea de base en un estado de reposo antes de que se proyecte el estímulo.

Una vez que el usuario firmó y declaró su consentimiento para participar en las pruebas por escrito, se aplicó la metodología propuesta. El usuario tenía que estar sentado, tratando de moverse lo menos posible para evitar agregar ruido y artefactos a las señales adquiridas.

Inicialmente, se les pidió que cerraran los ojos y se les dijo que los abrieran cuando escucharan un sonido distintivo para garantizar la sincronización de la visualización de los entornos y la adquisición de datos.

En el caso de los registros electrocardiográficos, se utilizó la derivación I según el triángulo de Einthoven, que define los ejes de las derivaciones de la señal electrocardiográfica (ECG) en el plano frontal. Se colocaron dos electrodos cerca de los hombros del usuario y un tercer electrodo, que servía como referencia, se colocó en el lado izquierdo de la parte inferior del abdomen.

En el caso de las señales GSR, se realizó una conexión a los dedos índice y medio para medir la impedancia eléctrica. En este caso, es necesario pedir al usuario que se relaje durante dos minutos para establecer una línea de base para la medición, tiempo durante el cual no se esperan alteraciones físicas o emocionales.

Siguiendo la metodología presentada por Baka et al. (23), se priorizaron las localizaciones del sistema 10-20 de la siguiente manera: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4 referenciadas en A1 (lóbulos de las orejas). Se buscó una impedancia inferior a $5\text{ K}\Omega$ y una frecuencia de muestreo de 125 Hz. Se realizaron pruebas preliminares para asegurar la correcta adquisición de cada uno de los canales.

La Figura 2 muestra los dispositivos utilizados para adquirir las señales de EEG (tapa con electrodos en la cabeza), ECG (electrodos colocados en la parte inferior de las clavículas y la parte inferior del abdomen a la izquierda) y GSR (electrodos en los dedos índice y anular de la mano izquierda), así como las gafas de proyección VR.



Figura 2. Adquisición de señales electrofisiológicas. **Fuente:** Autores

Acondicionamiento y preprocesamiento de señales

Dada la naturaleza de las señales electrofisiológicas, estas se ven afectadas por artefactos musculares y oculares, movimiento de electrodos, ruido eléctrico, deriva de línea de base y otros ruidos. Debido a esto, es necesaria una fase de filtrado como preprocesamiento de señales (24, 25, 26). Para resolver este problema, utilizamos un filtro digital de paso de banda Butterworth de 5º orden. Este filtro tiene la mejor relación entre atenuación y respuesta de fase. No tiene ondulación en la banda de paso o banda de parada, y debido a esto, se conoce como un filtro plano máximo. Las frecuencias de corte utilizadas son (0,5 Hz – 50 Hz) para casos de EEG, ECG y GSR. Estas bandas están ubicadas de acuerdo con los estándares de la Asociación Americana de la Salud (AHA) (27). Estas frecuencias de corte permiten la eliminación del ruido mecánico generado por el movimiento de los electrodos y los movimientos musculares. Además, para eliminar las líneas de tendencia, se utilizó una técnica de ventana de tiempo y se eliminó el valor promedio correspondiente a cada ventana. Para datos atípicos, se implementó un filtro de Hampel.

En el caso del EEG, una vez que el registro estuvo libre de artefactos que pudieran alterar los resultados del análisis, las ondas se clasificaron según su frecuencia en cinco bandas principales: delta (0,5 Hz - 4 Hz), theta (4 Hz - 8 Hz), alfa (8 Hz - 12 Hz), beta (12 Hz - 30 Hz) y gamma (30 Hz - 50 Hz). Para esto, se utilizó nuevamente un filtro digital de paso de banda Butterworth de 5º orden en las frecuencias especificadas.

Índices de sensación de presencia

De la señal del EEG se extrajeron características espacio-temporales y de tiempo, que, según investigaciones previas, están directamente relacionadas con el aumento del sentido de presencia y sus principales correlatos. Esto se demostró en investigaciones previas relacionadas con lo siguiente:

Índice 1: Es el aumento de la coherencia en la banda beta entre el lóbulo temporal izquierdo y el lóbulo occipital izquierdo (4). Para ello, se utilizó la banda beta en los canales T7 y O1, y se aplicó

la ecuación (1), que relaciona la coherencia cerebral entre dos canales (). *Coh*

$$Coh = \frac{|P_{xy}(w)|^2}{P_x(w)P_y(w)}, \quad (1)$$

donde es la densidad espectral de potencia (PSD) de los pares de canales; y son las densidades de potencia de cada canal; se calcula para cada intervalo de frecuencia y, finalmente, se calcula el valor medio del vector de coherencia. P_{xy} P_x P_y

Índice 2: se ha determinado que los aumentos de potencia en la banda theta en el lóbulo occipital determinan un aumento en el sentido de presencia (4). Para esta implementación, se utilizó la transformada de Fourier de corto tiempo (STFT) con una ventana de Kaiser con L=125 y beta=5 para calcular la PSD en cada una de las ventanas generadas a partir de los canales O1 y O2 y sumar sus valores medios.

Índice 3: se ha demostrado que el aumento de la potencia total (1-50 Hz) en el lóbulo frontal es un buen indicador de la sensación de presencia (4). Para implementar este punto, se utilizó nuevamente la transformada de Fourier de corta duración (STFT) con una ventana de Kaiser con L=125 y beta=5, específicamente en los canales frontales: AF3, F7, F3, F4, F8, AF4. Se calculó su PSD y se sumaron sus valores promedio por ventanas de tiempo.

Estos tres primeros índices de sentido de presencia se compararon con la misma medición de referencia al inicio de la prueba, ya que el proceso de sentido de presencia no es instantáneo y requiere algún tiempo para que el usuario alcance este estado.

Índice 4: la investigación realizada por (28) indica la disminución de la participación de la corteza prefrontal dorsolateral derecha (DLPFC) y, en menor medida, de la DLPFC izquierda a altas frecuencias como correlaciones neuronales altamente específicas para la orquestación de la experiencia de presencia en adultos. Estos resultados fueron apoyados por otro estudio de los mismos autores (29). Dado lo anterior, el mapeo cerebral se realizó a partir de la señal temporal adquirida utilizando la caja de herramientas SMP12, que encuentra la solución al problema inverso. Esta solución permite visualizar la activación eléctrica en un modelo 3D del cerebro utilizando un mapa de colores. Tras esto, se realizó un seguimiento visual de la activación en el modelo cerebral de la zona derecha de DLPFC, verificando la disminución de la actividad cerebral y el aumento de la actividad cerebral en la DLPFC izquierda.

Se obtuvieron los siguientes indicadores de las señales de ECG y GSR:

Índice 5: se analizó el cambio en la frecuencia cardíaca (FC) con respecto a la actividad basal previamente registrada. Se calculó la diferencia entre la FC durante la estimulación visual y la FC en reposo, reflejando así el aumento o disminución de la frecuencia cardíaca (30).

Índice 6: la actividad de respuesta galvánica de la piel (GSR) se examinó en relación con la actividad inicial antes de la estimulación visual. La conductancia de la piel se registró durante la experiencia y se comparó con los niveles de referencia, revelando la presencia de variaciones en la respuesta galvánica de la piel asociadas con el estímulo visual (31).

Resultados y discusión

En esta sección se muestran los diferentes resultados obtenidos aplicando la metodología descrita en el capítulo anterior. Las tablas, gráficos y datos mostrados pertenecen a un solo usuario en una ubicación particular con una duración de 120 segundos, que se dividió en seis ventanas de tiempo. Esto es para ilustrar los resultados individualmente. Sin embargo, cada una de las 14 localizaciones tiene diferentes duraciones, y se aplicó la misma metodología a cada una de las ventanas de tiempo resultantes. Los resultados para todos los usuarios y ventanas de tiempo se resumen en tablas de datos. Finalmente, se discutirán los resultados.

Para los índices 1, 2 y 3 se obtuvo lo siguiente: en la figura 3 se muestran las métricas obtenidas a partir de las ventanas de tiempo en las que se dividió una experiencia virtual. La línea de puntos es el umbral para que cada una de las métricas se considere alta o baja y hace referencia al valor de la métrica en la ventana base. A: muestra la coherencia en la banda beta en los canales T7 y O1, y como se puede ver, solo las ventanas de tiempo 3 y 6 superan el umbral. B: encuentra el valor PSD en los canales occipitales O1 y O2 en la banda Theta usando STFT. En este caso, todas las ventanas de tiempo superan el umbral, lo que indica una alta sensación de presencia. C: para el índice 3, se realiza el mismo proceso descrito en el índice 2, pero solo en los canales frontales (AF3, AF4, F3, F4, F7, F8) y la señal de banda completa, es decir, (0,5 Hz - 50 Hz).

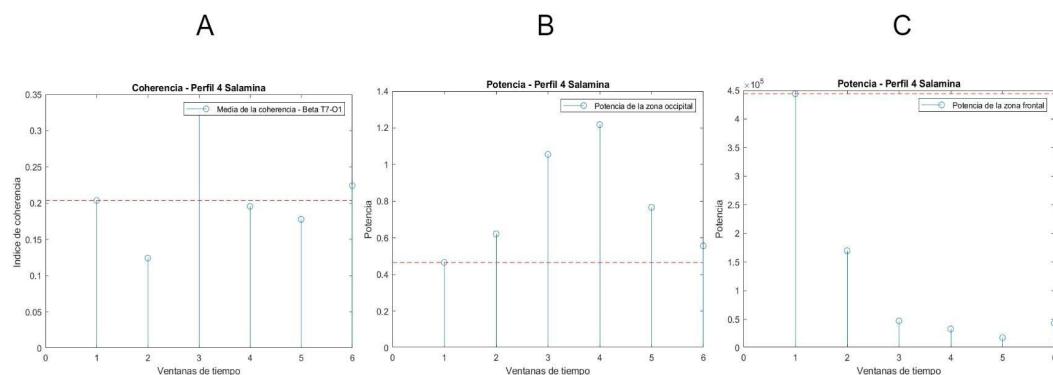


Figura 3. Resultados de los índices 1, 2 y 3 para cada ventana de tiempo. **Fuente:** Autores

En este caso específico, ninguna ventana de tiempo se clasificó como de alto sentido de presencia. Para el índice 4, se obtuvieron las siguientes representaciones de activación espacial: la Figura 4 muestra una representación tridimensional de la actividad eléctrica cerebral a partir de la señal de EEG capturada. Para ello, se utilizó un modelo cerebral con 14 canales por 2004 fuentes, utilizando la caja de herramientas SPM12 y el algoritmo de solución inversa de problemas Multiple Sparse Priors (MSP). Se generó un mapa sobre un modelo cerebral estandarizado que representa el poder de la actividad cerebral a través de escalas de colores, revelando las áreas y estructuras de comunicación más probables en cada momento.

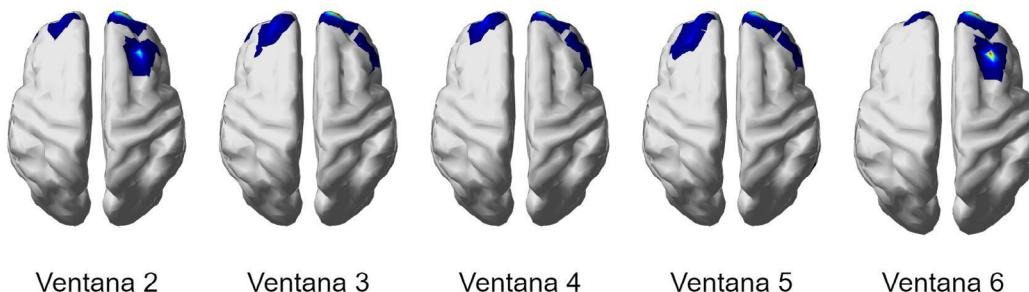


Figura 4. Mapeo cerebral de la señal por ventanas de tiempo. **Fuente:** Autores

La actividad eléctrica cerebral se promedió para cada ventana de tiempo para obtener una sola representación. Para los índices 5 y 6 se obtuvo la Tabla 1 de resultados:

Tabla 1. Resultados de las mediciones de ECG y GSR para el sentido de presencia.

Ventana	RRHH base	HR	Índice 5	GSR base	GSR	Índice 6
2	50.64	74.77	-	127,749.758	128,825.23	-
3	50.64	45,367	+	127,749.758	129,191.19	-
4	50.64	49,889	+	127,749.758	129,669.49	-
5	50.64	45,248	+	127,749.758	130,156.05	-
6	50.64	49,167	+	127,749.758	120,212.77	+

Fuente: Autores

La Tabla 1, índice 5, muestra un aumento o disminución de la frecuencia cardíaca en relación con la actividad basal, indicada por los símbolos "+" y "-" si la sensación de presencia aumentó o disminuyó en la ventana. El índice 6 evaluó la actividad de respuesta galvánica de la piel, mostrando nuevamente aumentos o disminuciones en relación con la actividad inicial. En la tabla 2 se recopila la información de todos los índices.

Tabla 2. Índices electrofisiológicos para el sentido de presencia de un usuario.

	Índice 1	Índice 2	Índice 3	Índice 4	Índice 5	Índice 6	# índices al alza
Ventana 1	Ventana base de referencia						
Ventana 2	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	1
Ventana 3	Alto	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	3
Ventana 4	Bajo	Alto	Bajo	neutral	Alto	Bajo	2
Ventana 5	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Alto	Bajo	3
Ventana 6	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto	4

Fuente: Autores

La Tabla 2 muestra los resultados para un solo usuario en los seis indicadores de presencia evaluados en cada ventana de tiempo. Este mismo proceso se llevó a cabo con los seis registros (tres con usuarios con bajo sentido de presencia y tres con usuarios con alto sentido de presencia) en cada uno de los 14 entornos de realidad virtual evaluados, cada uno subdividido en ventanas de tiempo. A partir de esta información, se calculó el número de índices de detección de presencia alta y se obtuvo la información mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3. Recuento de índices altos para las dos capacidades de detección de presencia.

	Usuarios con alto sentido de presencia	Usuarios con bajo sentido de presencia
Escenario 1		
Ventana 2	6	4
Ventana 3	8	7
:	:	:
Ventana 6	2	7
Escena 2		
Ventana 1	3	6
:	:	:
Ventana 14	12	5
Escenario 3		
Ventana 1	12	5
:	:	:
Ventana 20	9	7
↓		
Etapa 14		
Ventana 1	6	10
:	:	:
Ventana 14	6	10
Ventana 15	7	10

Fuente: Autores

La Tabla 3 resume los resultados de todas las pruebas realizadas en todos los usuarios y entornos virtuales. Las dos categorías se consideraron de acuerdo con su sentido psicológico de presencia, y se calculó un total sumando los 14 escenarios de 394 ventanas de tiempo. Se tuvo en cuenta el número de índices altos por ventana de tiempo en cada categoría.

En la Tabla 4 se realizó un recuento en cada una de las dos categorías del número de indicadores con alto sentido de presencia para cada una de las 394 ventanas de tiempo, teniendo en cuenta que había tres usuarios en cada categoría para un total de 1182 ventanas evaluadas, cada una con un máximo de 18 indicadores altos (seis por usuario). De las dos muestras se obtuvieron algunos datos estadísticos representativos, como el valor medio del número de indicadores de alta presencia por ventana para cada categoría y su respectivo valor de incertidumbre.

Tabla 4. Evaluación del sentido de presencia según la capacidad inmersiva.

Usuarios de baja presencia en 1182 ventanas evaluadas	Usuarios de alta presencia en 1182 ventanas evaluadas
Índices altos 255	Índices altos 3640
Promedio 6.5	Promedio 9.3
Desviación 2.1	Desviación 2.5

Fuente: Autores

Los resultados del análisis estadístico muestran una diferencia significativa en las puntuaciones medias entre los grupos categorizados por capacidad de presencia. Específicamente, el grupo con alta capacidad de presencia obtuvo una media significativamente mayor ($Ma = 9,3$; $DE = 2,5$) en comparación con el grupo con baja capacidad ($Mb = 6,5$; $DE = 2,1$), diferencia que fue confirmada por una prueba de hipótesis utilizando la prueba t de Student para muestras independientes ($t = -29,80$; $p < 0,001$).

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta muestran que el uso de señales electrofisiológicas para la evaluación del sentido de presencia en entornos de realidad virtual es una alternativa objetiva y confiable a los métodos tradicionales basados en autoinformes. La combinación de los seis índices cuantitativos extraídos de la electroencefalografía (EEG), la electrocardiografía (ECG) y la respuesta galvánica de la piel (GSR) permitió establecer con alta precisión si los participantes experimentaron o no una sensación de presencia en el entorno virtual. Esto respalda la viabilidad de un enfoque basado en biomarcadores para medir el sentido de presencia, eliminando la subjetividad inherente a los cuestionarios autoadministrados y reduciendo el sesgo asociado con la variabilidad individual en la interpretación de la experiencia inmersiva, validando los resultados obtenidos en (4) y (28).

Uno de los hallazgos más relevantes es la consistencia entre los índices fisiológicos y la categorización de los participantes según su perfil psicológico. Los resultados sugieren que los individuos con una mayor capacidad psicológica para participar en una experiencia tienden a activar el sentido de presencia en la realidad virtual con mayor facilidad, lo que podría estar relacionado con una menor carga cognitiva en la adaptación al entorno virtual, validando objetivamente el postulado propuesto en (7). Este hallazgo es consistente con investigaciones previas que indican que la experiencia en realidad virtual depende, en parte, de factores característicos del usuario con este tipo de tecnología.

A pesar de las contribuciones de esta investigación, es importante reconocer algunas limitaciones. En primer lugar, aunque los seis índices fisiológicos han sido validados en estudios anteriores, su combinación en un solo sistema de evaluación requiere una mayor generalización en diversas poblaciones con diferentes niveles de familiaridad con la realidad virtual.

Conclusión

Los resultados de esta investigación muestran que la capacidad inmersiva de los usuarios influye directamente en la activación del sentido de presencia en entornos de realidad virtual.

Los participantes con alta capacidad de participación en entornos virtuales mostraron un mayor número de indicadores fisiológicos asociados a la presencia (9,3 de media) en comparación con los de baja capacidad de inmersión (6,5 de media), diferencia que fue confirmada por una prueba de hipótesis utilizando la prueba t de Student para muestras independientes. Además, la validación a través de autoinformes mostró que los usuarios con mayor capacidad inmersiva percibieron una alta sensación de presencia en el 51% de las ventanas de tiempo, mientras que aquellos con baja capacidad inmersiva solo la experimentaron en el 36%.

Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que medir el sentido de presencia a través de señales electrofisiológicas es un enfoque objetivo y confiable, que reduce la dependencia de las respuestas subjetivas. Además, los datos obtenidos en relación con las características de personalidad y el perfil psicosocial de los sujetos de estudio indican que ciertos rasgos psicológicos pueden influir en la facilidad con la que una persona experimenta la presencia en entornos virtuales, lo que tiene implicaciones importantes para el diseño de experiencias más accesibles e inmersivas.

En conclusión, este estudio contribuye a la comprensión del sentido de presencia en la realidad virtual, proporcionando un marco metodológico basado en biomarcadores y características particulares de los usuarios que se puede aplicar en diversas áreas como la neurociencia cognitiva, el diseño de interfaces inmersivas y la optimización de experiencias en entornos virtuales.

Agradecimientos

Este artículo es el resultado directo de una investigación realizada por el equipo científico en el marco del proyecto "Fortalecimiento de la Oferta de Turismo de Aventura a través del Desarrollo Tecnológico en el Departamento del Magdalena - Avenhub Magdalena identificado con código BPIN 2020000100193" financiado por Minciencias, a través del Sistema General de Regalías.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Víctor Ortiz-Bravo, Walter Serna-Serna, Juan Pablo Trujillo-Lemus.
Curación de datos: Víctor Ortiz-Bravo, Marisol Jiménez-Gallego, Angie Correa-Acosta. **Análisis formal:** Víctor Ortiz-Bravo, Walter Serna-Serna, Marisol Jiménez-Gallego. **Adquisición de financiamiento:** Juan Pablo Trujillo-Lemus. **Investigación:** Víctor Ortiz Bravo, Walter Serna Serna, Marisol Jiménez Gallego. **Metodología:** Víctor Ortiz-Bravo, Walter Serna-Serna, Marisol Jiménez-Gallego. **Gerencia de Proyecto:** Marisol Jiménez-Gallego, Angie Correa-Acosta. **Recursos:** Víctor Ortiz-Bravo, Marisol Jiménez-Gallego, Angie Correa-Acosta. **Software:** Víctor Ortiz-Bravo, Walter Serna-Serna. **Supervisión:** Víctor Ortiz-Bravo, Walter Serna-Serna, Juan Pablo Trujillo-Lemus. **Validación:** Víctor Ortiz-Bravo, Marisol Jiménez-Gallego. **Redacción - borrador original - Elaboración:** Víctor Ortiz-Bravo, Marisol Jiménez-Gallego. **Redacción - revisión y edición - Elaboración:** Víctor Ortiz-Bravo, Marisol Jiménez-Gallego.

Financiamiento: Avenhub Magdalena en el marco del proyecto "Fortalecimiento de la Oferta de Turismo de Aventura a Través de Desarrollo Tecnológico en el Departamento de Magdalena, financiado por Minciencias, a través del Sistema General de Regalías.

Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara

Referencias

- (1) W. M. Felton and R. E. Jackson, "Presence: A review," *Int. J. Human-Comput. Interaction*, vol. 38, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1921368>
- (2) M. Slater and S. Wilbur, "A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments", *Presence (Camb)*, vol. 6, no. 6, 1997. doi: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
- (3) M. Kuri S. A. Karre and Y. R. Reddy, "Understanding software quality metrics for virtual reality products - A mapping study", in *En 14th Innov. Softw. Eng. Conf. (Formerly Known as India Softw. Eng. Conf.)*. <https://doi.org/10.1145/3452383.3452391>
- (4) M. Athif et al, "Using biosignals for objective measurement of presence in virtual reality environments", *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc*, 2020. doi: 10.1109/EMBC44109.2020.9176022
- (5) M. Á. Gandarillas Solinis and M. Montañés Serrano, "Psychosocial profiles of users of virtual environments: Motivations, behaviors, and consequences," *Univ. Psychol.*, vol. 18, no. 3, pp. 1–14, 2019. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy18-3.ppue>
- (6) A. Katifori C. Lougiakis and M. Roussou, "Exploring the effect of personality traits in VR interaction: The emergent role of perspective-taking in task performance", *Front. Virtual Real*, vol. 3, 2016. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.860916>
- (7) C. D. Murray, J. Fox and S. Pettifer, "Absorption, dissociation, locus of control and presence in virtual reality", *Comput. Hum. Behav.*, vol. 23, no. 3, pp. 1347–1354, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2004.12.010>.
- (8) W. Wei, R. Qi, and L. Zhang, "Effects of virtual reality on theme park visitors' experience and behaviors: A presence perspective," *Tour. Manag.*, vol. 71, pp. 282–293, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.10.024>
- (9) F. Aardema, K. O'Connor, S. Côté, and A. Taillon, "Virtual reality induces dissociation and lowers sense of presence in objective reality," *Cyberpsychol. Behav. Soc. Netw.*, vol. 13, no. 4, pp. 429–435, 2010. <https://doi.org/10.1089/cyber.2009.0164>
- (10) H. G. Hoffman, T. Richards, B. Coda, A. Richards and S. R. Sharar, "The illusion of presence in immersive virtual reality during an fMRI brain scan", *Cyberpsychol. Behav.*, vol. 6, no. 2, pp. 127–131, 2004. <https://doi.org/10.1089/109493103321640310>
- (11) W. B. Kim and H. O. J. Choo, "How virtual reality shopping experience enhances consumer creativity: The mediating role of perceptual curiosity", *SSRN Electron.*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113378>
- (12) M. Aristeidou, E. Scanlon and M. Sharples, "Profiles of engagement in online communities of citizen science participation", *Comput. Hum. Behav.*, vol. 74, pp. 246–25, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.04.044>
- (13) H. S. Wallach, M. P. Safir and R. Samana, "Personality variables and presence", *Virtual Real*, vol. 14, no. 1, pp. 3–13, 2010.

- (14) J Laarni, N Ravaja, T Saari and T Hartmann, "Personality-related differences in subjective presence", In Proceedings of the seventh annual international workshop presence. Valencia: UPV, Valencia, 2004.
- (15) A Caspi, BW Roberts and RL Shiner, "Personality development: Stability and change", *Annu. Rev. Psychol.*, pp. 453–484, 2005, Doi:10.1146/annurev.psych.55.090902.141913
- (16) SE Kober, C Neuper, "Personality and presence in virtual reality: Does their relationship depend on the used presence measure", *Int. J. Human-Comput. Interaction*, vol. 29, no. 1, pp. 13–25, 2013. <https://doi.org/10.1080/10447318.2012.668131>
- (17) H. Han-Chung et al, "Influence of temperament and character on online gamer loyalty: Perspectives from personality and flow theories", *Comput. Human Behav.*, vol. 70, pp. 398–406, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.01.009>
- (18) A. Sepúlveda, F. Castillo, C. Palma and M. Rodriguez-Fernandez, "Emotion recognition from ECG signals using wavelet scattering and machine learning", *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 11, no. 11, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11114945>
- (19) R. Castaldo, P. Melillo, U. Bracale, M. Caserta, M. Triassi and L. Pecchia, "Acute mental stress assessment via short term HRV analysis in healthy adults: A systematic review with meta-analysis", *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 18, pp. 370–377, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2015.02.012>
- (20) R. F. Navea, P. J. Buenvenida and C. D. Cruz, "Stress detection using galvanic skin response: An android application", *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1372, no. 1, 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1372/1/012001
- (21) C.-A., Wang, T. Baird, J. Huang, J. D. Coutinho, D. C. Brien and D. P. Munoz, "Arousal effects on pupil size, heart rate, and skin conductance in an emotional face task", *Front. Neurol.*, vol. 9, p. 1029, 2018. <https://doi.org/10.3389/fneur.2018.01029>
- (22) S. Grassini, K. Laumann, S. Thorp and V.M. Topranin, "Using electrophysiological measures to evaluate the sense of presence in immersive virtual environments: An event-related potential study", *Brain Behav.*, vol. 11, no. 8, p. 2269, 2021. <https://doi.org/10.1002/brb3.2269>
- (23) E. Baka, K. E. Stavroulia, N. Magnenat-Thalmann and A. Lanitis, "An EEG-based evaluation for comparing the sense of presence between virtual and physical environments", *Proc. Comput. Graph. Int.*, 2018. <https://doi.org/10.1145/3208159.3208179>
- (24) P. G. Malghan and M. K. Hota, "A review on ECG filtering techniques for rhythm analysis", *Res. Biomed. Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 171–186, 2020.
- (25) M. Z. Zadeh, S. Niketeghad and R. Amirkattahi, "A PLL based adaptive power line interference filtering from ecg signals", in 16th CSI Int. Symp. Artif. Intell. Signal Process. (AISP 2012). pp. 490–496. DOI: 10.1109/AISP.2012.6313797.
- (26) S. Mirza, K. Bhole and P. Singh, "Fetal ecg extraction and qrs detection using independent component analysis", in 2020 16th IEEE Int. Colloq. Signal Process. Its Appl. (CSPA). pp. 157–161. DOI: 10.1109/CSPA48992.2020.9068696.
- (27) P. Kligfield et al, "Recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: Part I: The electrocardiogram and its technology: A scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on

Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society: Endorsed by the International Society for Computer", Circulation, vol. 115, no. 10, pp. 1306–1324, 2007. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.180200>

(28) T. Baumgartner, D. Speck, D. Wettstein, O. Masnari, G. Beeli, and L. Jäncke, "Feeling present in arousing virtual reality worlds: Prefrontal brain regions differentially orchestrate presence experience in adults and children," Front. Hum. Neurosci, vol. 2, p. 8, 2008. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.008.2008>

(29) G. Beeli, G. Casutt, T. Baumgartner, and L. Jäncke, "Modulating presence and impulsiveness by external stimulation of the brain", Behav. Brain Funct, vol. 4, no. 1, 2008.

(30) A. Perkis et al, "QUALINET white paper on definitions of immersive media experience (IMEx)," ArXiv (cs.MM), 2020.

(31) D. Archer and A. Steed, "Optimizing performance through stress and induction levels in virtual reality using autonomic responses," in 2022 IEEE Int. Symp. Mixed Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), 2022. doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct57072.2022.00129