



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE
VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

Uso de Realidad Virtual Como Herramienta de
Estabilización Emocional Previa a Sesiones
Psicoterapéuticas

HÉCTOR ENRIQUE VILLALOBOS CASTRO

Profesor Guía: BENJAMÍN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

Talca – Chile
Noviembre, 2025



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE
VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

**Uso de Realidad Virtual Como Herramienta de
Estabilización Emocional Previa a Sesiones
Psicoterapéuticas**

HÉCTOR ENRIQUE VILLALOBOS CASTRO

Profesor Guía: BENJAMÍN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

El presente documento fue calificado con nota: _____

Talca – Chile

Noviembre, 2025

*Dedicado a mi hermana, mi madre y mi padre. Cada uno fue la fuerza que me
animó a llegar a donde estoy.*

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a aquellos docentes que marcaron mi camino en esta carrera, en especial a mi docente guía, el profesor Ben Ingram, quien, a pesar de no haber tenido el honor de asistir a sus clases, pude conocerlo como docente y llegar a esta instancia. También agradecer a las personas que participaron en mis pruebas de usuario; sin ellas, no podría haber completado mi investigación.

Agradecimientos a los funcionarios de la DAOI, quienes, pese a no formar parte directa de mi tesis, siempre se vieron preocupados de mi avance y ofrecieron su apoyo frente a cualquier necesidad, todo nacido por el vínculo generado por Utagaming, grupo intermedio al cual agradezco darme un escape de la presión universitaria al organizar las actividades.

Agradezco a mis compañeros de carrera y amigos, quienes fueron parte de mi formación y experiencia. Pese a las constantes burlas (con cariño), siempre se encontraron cuando los necesité, en las tardes de charlas y copuchas constantes, cada cumpleaños y celebración. En especial agradezco a Bárbara Latín, quien se volvió mi mejor amiga en la carrera y estuvo presente en mis momentos más complejos, y me mantuvo alimentado a mí y a todos en esos días donde no parábamos de hacer trabajos. A Ian, Patricio, Sergio, Franco y Matías, con quienes pude vivir mi última etapa universitaria; no podría pedir mejores roomies. A todo el grupo de amigos, que hacían que cada junta se volviera una lista de más de 20 personas como mínimo, gracias por acompañarme en este camino.

A mi familia, iniciando por mi padre, Luis Villalobos, quien lamentablemente ya no se encuentra para verme completar esta etapa, pero sé, sin dudarlo, que él siempre supo que lo lograría. A mi madre, Karin Castro, quien me tuvo la paciencia y comprensión para dejarme estudiar una nueva carrera pese a haber estado 4 años estudiando lejos; no podría haber pedido una mejor persona para tener de apoyo. A mi hermana, Florencia Mondaca, mi complemento y mi mayor motivación, siempre escuchando sobre mis trabajos sin entender mucho, pero dando todo su apoyo.

TABLA DE CONTENIDOS

	página
Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Tabla de Contenidos	III
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	VII
Resumen	VIII
 1. Introducción	 1
1.1. Contexto y Problema	1
1.2. Pregunta de Investigación e Hipótesis	2
1.2.1. Pregunta de Investigación	2
1.2.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivos del Proyecto	2
1.3.1. Objetivo General	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Contribuciones del Trabajo	3
1.5. Alcance y Limitaciones	4
1.6. Estructura del Documento	4
 2. Estado del Arte y Marco Teórico	 5
2.1. Mecanismos Psicológicos: Presencia y Entornos Restaurativos	5
2.1.1. El Rol de la Inmersión y la Presencia	6
2.1.2. Entornos Naturales Virtuales como Agentes Terapéuticos	6
2.2. RV como Distracción Pasiva vs. Exposición	6
2.3. RV para la Ansiedad de Estado en Población Clínica	7
2.4. RV como Intervención Activa (Serious Games)	7
2.5. El Rol del Audio y la Estimulación Multisensorial	8

2.6.	Consideraciones de Seguridad y Cinetosis en Población Clínica	8
2.7.	Análisis Comparativo de Soluciones Tecnológicas	8
2.8.	Síntesis y Brecha Identificada	9
3.	Metodología Propuesta	11
3.1.	Consideraciones Éticas	11
3.2.	Instrumentos de Evaluación y Criterios de Cálculo	12
3.2.1.	Medidas de Usabilidad y Aceptación (SUS - OE 4)	12
3.2.2.	Medidas de Presencia e Inmersión (IPQ - OE 4)	12
3.2.3.	Medidas Psicométricas de Ansiedad (STAI-S - OE 5)	12
3.3.	Diseño Experimental, Muestreo y Procedimiento	13
3.3.1.	Estrategia de Muestreo y Evolución de Evaluaciones	13
3.3.2.	Procedimiento Experimental	13
3.4.	Planificación y Diseño Tecnológico	14
3.4.1.	Metodología de Desarrollo	14
3.4.2.	Definición de Requerimientos	14
3.5.	Diseño Conceptual y Experiencial	15
3.5.1.	Selección y Justificación de Entornos Virtuales	15
3.5.2.	Diseño de Interacción y Audio	15
3.6.	Planificación del Proyecto (Carta Gantt)	16
4.	Diseño y desarrollo de la solución	17
4.1.	Arquitectura del Software	17
4.1.1.	Componentes Principales de la Arquitectura	18
4.1.2.	Flujo de Estados de la Aplicación	19
4.2.	Construcción y Optimización de Entornos	19
4.3.	Implementación de Locomoción e Interacciones	21
4.4.	Diseño de Audio Espacial	23
5.	Resultados y Análisis	25
5.1.	Datos Demográficos y Protocolo Experimental	25
5.2.	Análisis de Usabilidad del Sistema (SUS)	26
5.2.1.	Análisis de Ítems Críticos y Casos Extremos	27
5.3.	Sensación de Presencia e Inmersión (IPQ)	28
5.3.1.	Limitaciones de la Inmersión y Fricciones del Sistema	31

5.4. Evaluación del Impacto Clínico en la Ansiedad (STAI-S)	32
5.4.1. Resultados Cuantitativos del STAI	32
5.5. Discusión y Relación entre Variables	34
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	36
6.1. Respuesta a la Pregunta de Investigación e Hipótesis	36
6.2. Cumplimiento de los Objetivos Específicos	37
6.3. Limitaciones del Estudio	38
6.4. Trabajo Futuro	38
Bibliografía	40
A: Scripts principales	43
A.1. Algoritmo de recentrado del visor	43
A.2. Sistema de reducción de cinetosis	44
A.3. Sistema de interacción mediante mirada	46
A.4. Sistema de audio espacial dinámico	48
B: Herramientas de optimización	51
B.1. Renderizado optimizado de vegetación mediante GPU Instancing . . .	51
B.2. Automatización de la optimización de texturas	55

ÍNDICE DE FIGURAS

	página
4.1. Diagrama de la arquitectura de componentes de RelaxVR.	18
4.2. *	22
4.3. *	22
4.4. *	22
4.5. Capturas en tiempo real desde Meta Quest 3 de los tres entornos desarrollados. La coherencia visual se mantiene intacta tras el proceso de horneado de luces y compresión ASTC.	22
5.1. Distribución de frecuencias para las puntuaciones globales de la escala SUS ($N = 39$).	27
5.2. Desempeño promedio de usabilidad desglosado por ítem de evaluación.	28
5.3. Distribución del puntaje del cuestionario IPQ y su relación con el promedio obtenido por la muestra.	30
5.4. Puntajes promedio obtenidos en los seis ítems críticos seleccionados para la evaluación de la ingeniería del entorno.	30
5.5. Distribución comparativa de los puntajes STAI. Se observa una com- presión y descenso significativo en los niveles de Ansiedad-Estado tras la intervención.	34

ÍNDICE DE TABLAS

	página
3.1. Carta Gantt del Proyecto (18 Semanas).	16
5.1. Consolidado estadístico descriptivo de los puntajes STAI antes y después del uso de RelaxVR.	33

RESUMEN

La ansiedad experimentada por pacientes antes de iniciar sesiones psicoterapéuticas es una barrera que obstaculiza la receptividad al tratamiento. Si bien la Realidad Virtual (RV) ha demostrado eficacia en la regulación emocional, las soluciones actuales predominantes se basan en videos pasivos que limitan la inmersión y la agencia del usuario.

Este proyecto presenta el desarrollo de un prototipo de videojuego de RV interactivo construido en Unity, diseñado específicamente para la estabilización emocional rápida en salas de espera. La solución se distingue por integrar **entornos naturales virtuales inmersivos** con un sistema de audio dinámico y espacializado, optimizado para inducir relajación sin requerir biofeedback externo complejo.

La metodología contempló un diseño cuasi-experimental con una muestra de 39 voluntarios universitarios (31 para la evaluación de ansiedad), evaluando la usabilidad técnica mediante la escala SUS, la inmersión con IPQ, y el impacto emocional mediante el STAI-S. Los resultados demostraron una usabilidad excelente con un puntaje de 81.09 y una reducción estadísticamente muy significativa del 50.4 % ($p < 0,001$) en la ansiedad de estado. El impacto del proyecto es ofrecer una herramienta tecnológica accesible y segura con el **potencial de optimizar** la preparación emocional, sentando las bases para su **futura validación clínica con pacientes** en diversos contextos de salud mental.

1. Introducción

1.1. Contexto y Problema

Si bien la psicoterapia es un pilar fundamental en el tratamiento de la salud mental, su efectividad puede verse influenciada por el estado con el que el paciente ingresa a la sesión. Con frecuencia, los pacientes llegan a la consulta experimentando altos niveles de estrés, ansiedad o rumiación, estados que interfieren con el bienestar psicológico y el procesamiento emocional [1].

Esta hiperactivación emocional inicial constituye una barrera que obliga al terapeuta a destinar una porción considerable de la sesión para estabilizar al paciente. Esta situación es análoga a la ansiedad pre-procedimiento en otros escenarios clínicos, donde la RV ya ha demostrado ser eficaz como herramienta de distracción (p.ej., venopunción en pediatría) [2, 3]. Por consiguiente, existe una falta de herramientas eficaces y rápidas que sirvan como un **mecanismo de estabilización emocional** en los minutos previos al inicio de la terapia.

La Realidad Virtual (RV) ofrece una solución innovadora a esta barrera inicial. Gracias a su capacidad para generar un **alto sentido de presencia** en entornos controlados, la RV permite desvincular al usuario del entorno ansiógeno inmediato [4]. La literatura respalda que la exposición a entornos naturales virtuales, combinada con estímulos auditivos relajantes, representa una estrategia efectiva para inducir estados de relajación y reducir la ansiedad de forma rápida [1, 5, 6]. De este modo, aunque el **uso clínico esperado** de la solución desarrollada (*RelaxVR*) apunta a la preparación emocional previa en salas de espera, la **validación realizada** en este trabajo corresponde a un pilotaje de usabilidad, presencia e impacto emocional en una muestra de voluntarios universitarios [7, 8].

1.2. Pregunta de Investigación e Hipótesis

1.2.1. Pregunta de Investigación

Basado en el problema planteado, la pregunta central que guía este proyecto es la siguiente:

¿Puede un videojuego de realidad virtual con entornos naturales inmersivos actuar como una herramienta de estabilización emocional previa a sesiones psicoterapéuticas mediante la reducción de la ansiedad de estado en los usuarios?

1.2.2. Hipótesis

La hipótesis principal de este trabajo sostiene que:

La exposición a entornos naturales virtuales inmersivos producirá una reducción estadísticamente significativa en los niveles de ansiedad de estado en los usuarios, validando el prototipo de realidad virtual como una herramienta viable de estabilización emocional previa a sesiones psicoterapéuticas.

1.3. Objetivos del Proyecto

Para responder a la pregunta de investigación y validar la hipótesis, se establecen los siguientes objetivos:

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un prototipo interactivo de realidad virtual en Unity para visores autónomos Meta Quest 3, orientado a la reducción rápida de la ansiedad-estado mediante entornos naturales inmersivos y audio espacializado, validado en una muestra universitaria.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para la consecución del objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

- **OE 1:** Desarrollar tres entornos virtuales inmersivos basados en escenarios naturales, logrando un renderizado estable en hardware autónomo para propiciar la sensación de presencia.
- **OE 2:** Incorporar elementos sonoros ambientales personalizados para cada entorno, que contribuyan a la inducción de un estado de calma y disminución del estrés.
- **OE 3:** Implementar interacciones simples y adaptativas en el videojuego que permitan al usuario explorar y controlar la experiencia sin generar sobrecarga cognitiva ni distracciones.
- **OE 4:** Realizar pruebas de usabilidad y ajuste técnico con participantes voluntarios para optimizar la funcionalidad, comodidad y aceptación del juego.
- **OE 5:** Cuantificar el impacto preliminar de la experiencia inmersiva sobre la ansiedad-estado y el confort del usuario mediante instrumentos psicométricos estandarizados (STAI-S, SUS e IPQ) en estudiantes voluntarios.

1.4. Contribuciones del Trabajo

Este proyecto aporta al campo de la ingeniería aplicada a la salud mental mediante:

- **Desarrollo de un sistema interactivo:** A diferencia de intervenciones inmersivas basadas en videos 360° [3], se entrega un entorno tridimensional renderizado en tiempo real que permite interacción y respuesta dinámica, factores clave para la presencia [4].
- **Integración de Audio Adaptativo:** Implementación de un sistema sonoro que modula el paisaje auditivo en tiempo real según la orientación del usuario, potenciando la regulación emocional [9].
- **Protocolo de Seguridad:** Incorporación de medidas técnicas específicas para mitigar la cinetosis y asegurar la viabilidad clínica del software [10].
- **Validación Piloto:** Un marco de evaluación que combina métricas de ingeniería de software con instrumentos clínicos validados [11].

1.5. Alcance y Limitaciones

El alcance abarca el diseño, desarrollo en Unity y validación preliminar de un prototipo funcional para visores Meta Quest 3. La validación se limita a una prueba piloto con una muestra de conveniencia ($n = 39$), priorizando la evaluación de la usabilidad y seguridad del sistema en población general antes de considerar su aplicación en contextos clínicos más complejos, en línea con las recomendaciones sobre el desarrollo progresivo y la validación rigurosa de intervenciones basadas en realidad virtual [12].

1.6. Estructura del Documento

Esta memoria se organiza en seis capítulos que guían al lector desde la conceptualización hasta la validación de la propuesta. El Capítulo 1 introduce el contexto de la Realidad Virtual en la salud mental, define el problema de la estabilización emocional pre-terapéutica y establece los objetivos del proyecto. A continuación, el Capítulo 2 presenta el Marco Teórico y el Estado del Arte, revisando la literatura sobre regulación emocional, los efectos de los entornos naturales y las tecnologías existentes.

El Capítulo 3 detalla la Metodología, incluyendo el diseño del prototipo, las consideraciones éticas, los instrumentos de evaluación y el diseño experimental. El Capítulo 4 se dedica al Diseño y Desarrollo, describiendo el proceso técnico de creación de los entornos y la implementación de las mecánicas. Posteriormente, el Capítulo 5 expondrá los Resultados obtenidos en las pruebas de usabilidad y la evaluación preliminar. Finalmente, el Capítulo 6 ofrece la Discusión y Conclusiones, analizando los hallazgos, las limitaciones del estudio y las líneas de trabajo futuro.

2. Estado del Arte y Marco Teórico

Este capítulo revisa la literatura científica que fundamenta el proyecto. Inicia con los mecanismos psicológicos que explican el potencial de la RV (2.1). Posteriormente, se analizan y contrastan las aplicaciones existentes, diferenciando entre enfoques de distracción pasiva y exposición (2.2), reducción de ansiedad en población clínica (2.3) e intervenciones activas (2.4). Además, se profundiza en el rol de la estimulación multisensorial (2.5) y las consideraciones de seguridad (2.6). Finalmente, se sintetiza la evidencia para identificar la brecha específica que este proyecto busca abordar (2.7).

2.1. Mecanismos Psicológicos: Presencia y Entornos Restaurativos

Para que la RV sea una herramienta de apoyo efectiva, debe activar mecanismos psicológicos específicos que vayan más allá de la simple visualización. La evidencia actual apunta a una combinación de factores clave: la inmersión tecnológica, el sentido de presencia y la cualidad restaurativa del contenido.

Asimismo, la elección de un entorno natural no es meramente estética. Estudios como el de Szczepańska-Gieracha et al. [13] sobre “jardines terapéuticos virtuales” han indicado que la inmersión en estos espacios propicia respuestas de calma y favorece el estado de ánimo en diversos contextos, lo que respalda el diseño de entornos de naturaleza como un componente activo de la intervención.

2.1.1. El Rol de la Inmersión y la Presencia

Si bien clásicamente se ha destacado el sentido de presencia o la sensación de “estar allí” como mediador de la relajación [4], metaanálisis recientes han refinado esta comprensión. Li et al. [5] demostraron que el nivel de inmersión tecnológica (definido por el tipo de dispositivo y la capacidad de rastreo de movimiento) modera significativamente los efectos restaurativos: los sistemas de inmersión media y alta generan un aumento mayor en el afecto positivo en comparación con sistemas de baja inmersión (como pantallas 2D).

Por consiguiente, la capacidad de aislar al usuario del entorno físico real y sumergirlo sensorialmente resulta determinante para la regulación emocional rápida [14], respaldando la selección de visores HMD frente a soluciones no inmersivas.

2.1.2. Entornos Naturales Virtuales como Agentes Terapéuticos

El contenido del entorno virtual es el segundo pilar. La exposición a la naturaleza virtual ha mostrado resultados favorables en la reducción del estrés y la mejora del estado de ánimo [1, 6]. Estudios recientes como el de Blackmore et al. [15] han sugerido que intervenciones breves (15 minutos) en entornos de bosque mediante video 360 pueden disminuir el afecto negativo en usuarios con sintomatología ansiosa.

Además, la revisión de Riches et al. [16] destaca que estos entornos facilitan procesos de “relajación segura”, permitiendo a personas con niveles elevados de ansiedad sentirse protegidas mientras regulan su activación fisiológica.

2.2. RV como Distracción Pasiva vs. Exposición

Históricamente, la RV se ha utilizado en contextos médicos como una herramienta de distracción para el manejo del dolor y la ansiedad aguda [2, 17]. Sin embargo, la evidencia más reciente sugiere matices importantes.

Un metaanálisis de Gao et al. [17], que revisó 11 ensayos clínicos controlados con casi 900 pacientes adultos, encontró que, si bien la RV por distracción es útil, las intervenciones basadas en **exposición virtual** (que familiarizan al usuario con el entorno o procedimiento) tienden a presentar un mayor impacto en la reducción de la ansiedad preoperatoria. Esto respalda la idea de que la herramienta no debe ser solo un “escape” pasivo, sino un entorno que facilite la familiarización y la preparación

psicológica frente al procedimiento estresante [3].

2.3. RV para la Ansiedad de Estado en Población Clínica

Más allá de la ansiedad ante exámenes clínicos o procedimientos médicos puntuales [18], la literatura actual explora el uso de la RV para la ansiedad de estado en poblaciones con diagnósticos establecidos.

El estudio de Malbos et al. [19] proporciona indicios favorables sobre el uso de la RV combinada con relajación para el abordaje del Trastorno de Ansiedad Generalizada, logrando reducciones sintomatológicas comparables a métodos tradicionales. Similarmente, Veling et al. [20] observaron que entornos virtuales relajantes disminuían la ansiedad subjetiva y la frecuencia cardíaca en muestras con trastornos complejos, sugiriendo que esta tecnología es segura y bien aceptada.

Estos hallazgos son relevantes para este proyecto, pues respaldan que la estabilización emocional mediante RV posee potencial no solo en población general, sino como complemento al perfil de usuario que acude a psicoterapia [16, 21].

2.4. RV como Intervención Activa (Serious Games)

La RV también puede operar como una herramienta de entrenamiento activo (*serious games*), donde el usuario no solo recibe estímulos pasivos, sino que aprende y ejercita habilidades de regulación.

El trabajo de Weerdmeester et al. [22] sobre juegos con biofeedback (como “DEEP” que usa la respiración) resalta la importancia de la **autoeficacia** que es la percepción del usuario de que *puede* controlar sus estados y la interacción directa para mejorar la regulación emocional (OE 3). Similarmente, Colombo et al. [8] y Gaggioli et al. [23] proponen el concepto de “Interrealidad”, combinando RV con monitoreo en tiempo real para entrenar el manejo del estrés.

En la misma línea, estudios recientes como el de Lee et al. [21] han examinado programas de meditación inmersiva en RV, indicando que la participación activa en entornos virtuales guiados favorece la regulación emocional y reduce la sintomatología ansiosa.

2.5. El Rol del Audio y la Estimulación Multisensorial

La inmersión en RV no es un fenómeno puramente visual; la literatura reciente sugiere que la coherencia audiovisual es determinante para la regulación emocional. Li et al. [5] demostraron en su metaanálisis que la exposición a entornos naturales simulados potencia su efecto restaurador cuando los estímulos auditivos (como el viento o el agua) están sincronizados espacial y temporalmente con lo visual.

Más allá de la fidelidad ambiental, el audio actúa como un componente clave. Martín Moratinos [9] evidenció que la integración de paisajes sonoros diseñados para la regulación emocional contribuye a potenciar la experiencia en videojuegos de RV. Esto refuerza que el diseño sonoro debe concebirse como un elemento activo para favorecer la calma (OE 2), diferenciando una experiencia pasiva de una simulación interactiva completa.

2.6. Consideraciones de Seguridad y Cinetosis en Población Clínica

La implementación de RV en contextos de salud mental requiere una atención rigurosa a la seguridad, específicamente respecto a la cinetosis (*cybersickness*). Stanica et al. [10] advierten que los síntomas de mareo o incomodidad visual pueden afectar la tolerabilidad de la intervención en usuarios sensibles.

No obstante, la evidencia actual muestra una alta tolerabilidad general. Blackmore et al. [15] reportaron que intervenciones breves de RV (15 minutos) fueron percibidas como seguras por los participantes, sin efectos adversos mayores. Para mitigar estos riesgos, es fundamental un diseño técnico adecuado: mantener una tasa de refresco estable, evitar movimientos de cámara involuntarios y limitar la duración de las sesiones, factores que se han considerado en el diseño de esta propuesta para asegurar la viabilidad clínica de la herramienta.

2.7. Análisis Comparativo de Soluciones Tecnológicas

Al evaluar las tecnologías vigentes para la regulación emocional, se distinguen tres enfoques principales con limitaciones que este proyecto busca superar:

1. **Videos 360 Pasivos:** Comunes por su bajo costo y utilidad demostrada en

la reducción de ansiedad [3, 15]. Sin embargo, Li et al. [5] y Riches et al. [16] señalan que la falta de interactividad limita el potencial restaurativo en comparación con entornos generados por computadora.

2. **Biofeedback Complejo:** Sistemas como la “Interrealidad” [23] o juegos de respiración [22] son avanzados, pero exigen hardware externo y calibración, dificultando su uso rápido en salas de espera.
3. **Intervenciones Activas de Relajación:** Respaldadas para trastornos de ansiedad [19, 20], pero que frecuentemente dependen de la supervisión constante de un terapeuta, limitando la autonomía.

La propuesta actual aprovecha la capacidad inmersiva de la RV interactiva mediante mecánicas sencillas que no requieren biofeedback externo, facilitando un uso autónomo [6, 24].

2.8. Síntesis y Brecha Identificada

El análisis de la literatura reciente (2020-2025) refleja un consenso sobre las ventajas de la RV como apoyo para la regulación emocional. Revisiones sistemáticas y metaanálisis, como el de Gao et al. [17], confirman que la exposición a RV contribuye a disminuir la ansiedad y los marcadores de estrés.

Sin embargo, al contrastar las soluciones existentes, se identifican limitaciones tecnológicas y metodológicas:

- **Predominio de la pasividad:** Gran parte de la literatura reciente emplea videos en 360 grados; aunque útiles, limitan la agencia del usuario. Li et al. [5] demostraron que la interacción y el audio dinámico son claves para potenciar el afecto positivo.
- **Brecha en el contexto psicoterapéutico:** Si bien el uso de RV para la ansiedad preoperatoria está documentado [3, 17], su aplicación como herramienta de “pre-acondicionamiento” inmediato en la sala de espera de psicoterapia sigue siendo poco explorada.
- **Integración técnica incompleta:** Escasas propuestas combinan entornos interactivos con protocolos de seguridad orientados a minimizar la cinetosis en usuarios con alta sensibilidad al estrés [10].

La brecha que este proyecto aborda se ubica en esta intersección: desarrollar una herramienta **interactiva** (no basada en video) que integre audio dinámico y protocolos de seguridad orientados a optimizar los minutos previos a la sesión terapéutica.

3. Metodología Propuesta

En este capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo y la validación del prototipo de realidad virtual *RelaxVR*. Se presentan las consideraciones éticas adoptadas, los instrumentos psicométricos utilizados junto con sus criterios de cálculo y documentación, y el diseño experimental implementado. Asimismo, se detalla la estrategia de muestreo evolutivo, la planificación tecnológica y el diseño conceptual de la experiencia inmersiva.

3.1. Consideraciones Éticas

El desarrollo de esta investigación se realizó resguardando la protección, el bienestar y la privacidad de los participantes durante las fases de validación del prototipo, en concordancia con los Objetivos Específicos 4 y 5. Para ello, el estudio se desarrolló bajo principios éticos orientados a garantizar una participación voluntaria, informada y segura.

Antes del inicio de las pruebas, todos los participantes firmaron un **consentimiento informado**, explicando el propósito, el procedimiento experimental, la voluntariedad y el derecho a abandonar el estudio sin consecuencias. Se indicó explícitamente que la aplicación es un prototipo de investigación tecnológica y no constituye un tratamiento clínico.

Respecto al manejo de la información, se asignó un código identificador a cada participante para desvincular su identidad de los resultados. Los datos se utilizaron exclusivamente con fines académicos y se presentan de manera agregada y anonimizada.

Considerando los riesgos de cinetosis (*cybersickness*), las sesiones se rigieron por las recomendaciones de Stanica et al. [10]. Se excluyó a personas con antecedentes de

epilepsia fotosensible o trastornos vestibulares, supervisando el bienestar del usuario durante toda la inmersión con opción de interrupción inmediata. La validación se realizó con voluntarios universitarios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca, bajo condiciones seguras [14].

3.2. Instrumentos de Evaluación y Criterios de Cálculo

La evaluación del prototipo combinó métricas de usabilidad, presencia e impacto emocional mediante instrumentos estandarizados y debidamente documentados:

3.2.1. Medidas de Usabilidad y Aceptación (SUS - OE 4)

Se utilizó la **System Usability Scale (SUS)** para medir la facilidad de uso percibida mediante diez afirmaciones en escala Likert de 5 puntos. Su puntaje global se calcula ponderando las respuestas (restando 1 a los ítems impares y restando el valor a 5 en los pares), multiplicando la sumatoria resultante por 2,5 para estandarizar la métrica en un rango de 0 a 100 puntos, lo que la valida como un estándar robusto en tecnologías de salud [10].

3.2.2. Medidas de Presencia e Inmersión (IPQ - OE 4)

Se empleó el **Igroup Presence Questionnaire (IPQ)** para cuantificar la percepción subjetiva de presencia a través de 14 ítems (escala Likert de 1 a 5) que evalúan la presencia espacial, el involucramiento y el realismo, obteniendo un puntaje global promedio. Una alta presencia potencia los efectos restaurativos de los entornos virtuales [4, 5].

3.2.3. Medidas Psicométricas de Ansiedad (STAI-S - OE 5)

Para evaluar los cambios en la ansiedad de estado, se aplicó la subescala de estado del **State-Trait Anxiety Inventory (STAI-S)**, un instrumento clásico que consta de 20 afirmaciones valoradas en una escala Likert de 1 a 4 puntos. El puntaje global se obtiene mediante la sumatoria directa de los ítems, reflejando el nivel de activación emocional transitorio. Su aplicación pre y post ha sido sólidamente validada en estudios recientes para cuantificar el impacto inmediato de intervenciones

con Realidad Virtual, demostrando una alta sensibilidad y fiabilidad psicométrica [17, 19].

3.3. Diseño Experimental, Muestreo y Procedimiento

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo con un diseño pre-experimental de una sola muestra (Pre-Post sin grupo control pasivo), justificado como una validación de concepto y viabilidad ergonómica temprana. La sesión experimental se estructuró en un tiempo estricto de 7 minutos, respaldado por la literatura sobre exposiciones breves para reducir el estrés sin generar fatiga visual [5, 15].

3.3.1. Estrategia de Muestreo y Evolución de Evaluaciones

El proceso de recolección de datos se estructuró mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia en la Universidad de Talca. Cabe destacar que la evaluación metodológica evolucionó durante el proceso: en una fase inicial se recopilaban exclusivamente métricas de usabilidad técnica ($N = 39$ participantes evaluados con SUS e IPQ) para ajustar la interfaz de mirada; posteriormente, una vez consolidada la herramienta orientada a la reducción de ansiedad, se incorporó la medición clínica pre-post, obteniendo la submuestra de $n = 31$ participantes evaluados con el inventario STAI-S.

3.3.2. Procedimiento Experimental

Tras la firma del consentimiento informado y la aplicación del STAI-S inicial, los usuarios utilizaron el visor Meta Quest 3 durante una inmersión de 7 minutos. Al finalizar la experiencia, respondieron nuevamente el cuestionario STAI-S en la submuestra de evaluación emocional y completaron los instrumentos de usabilidad (SUS) y presencia (IPQ).

Para el análisis inferencial de la ansiedad de estado, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk sobre las diferencias de las puntuaciones en la submuestra de $n = 31$. Al constatar que los datos seguían una distribución normal con un nivel de significancia superior al umbral establecido ($p > 0,05$), se justificó la utilización de la prueba t de Student para muestras relacionadas como prueba paramétrica de contraste de hipótesis, en lugar de recurrir a alternativas no paramétricas. Por su parte,

las variables de usabilidad y presencia se analizaron mediante estadística descriptiva.

3.4. Planificación y Diseño Tecnológico

El prototipo se desarrolló mediante una metodología iterativa e incremental en Unity 6000.3.12f1 LTS para el visor Meta Quest 3, priorizando la estabilidad gráfica y el confort visual.

3.4.1. Metodología de Desarrollo

El desarrollo del prototipo se realizó mediante una metodología iterativa e incremental, adecuada para proyectos de investigación en realidad virtual. Este enfoque permitió refinar progresivamente las mecánicas de interacción, el diseño de los escenarios y el sistema de audio a partir de pruebas funcionales realizadas durante el proceso de implementación. El proceso de desarrollo se organizó en tres etapas principales. En primer lugar, se implementaron las mecánicas básicas de interacción y navegación dentro del entorno virtual. Posteriormente, se desarrollaron los escenarios naturales, el sistema de audio ambiental y los distintos elementos que conformaron la experiencia inmersiva. Finalmente, se integraron todos los componentes del sistema y se realizaron las optimizaciones necesarias para garantizar un funcionamiento estable en el visor Meta Quest 3.

3.4.2. Definición de Requerimientos

- **Requerimientos Funcionales (RF):** Sistema de audio dinámico ambiental (RF-01) basado en la propuesta de Martín Moratinos [9]; control automatizado de la sesión y duración (RF-02); e interacción mediante activación por mirada (*gaze-based*) para reducir la carga cognitiva (RF-03) [8].
- **Requerimientos No Funcionales (RNF):** Mantener un rendimiento gráfico estable entre 72 y 90 FPS para mitigar la cinetosis [10], empleando entornos naturales coherentes y optimizados [5, 6].

3.5. Diseño Conceptual y Experiencial

Para evitar las limitaciones del arte conceptual 2D tradicional en entornos tridimensionales, se utilizó una metodología de **Prototipado Rápido Visual (Asset-Driven Design)** directamente en Unity, garantizando métricas de oclusión y rendimiento adecuadas para visores autónomos.

3.5.1. Selección y Justificación de Entornos Virtuales

El prototipo implementó tres biomas inspirados en la Teoría de Restauración de la Atención para inducir la “fascinación suave” [1], cada escenario fue concebido para ofrecer una experiencia inmersiva distinta, manteniendo una estética visual coherente y un paisaje sonoro acorde con la temática representada:

1. **Bosque Nocturno:** Iluminación tenue y vegetación densa para generar resguardo (efecto refugio) y reducir el estrés agudo [5, 15].
2. **Pradera con Cascada:** Espacio abierto con flujo de agua continuo y vistas al horizonte para fomentar la restauración psicológica y el enmascaramiento acústico natural [6].
3. **Entorno Asiático (Jardín Zen):** Estructura minimalista de baja carga cognitiva, con senderos y una estatua de Buda como punto focal de interacción meditativa (cuenco tibetano) [13].

3.5.2. Diseño de Interacción y Audio

Las mecánicas de interacción fueron diseñadas priorizando la comodidad del usuario y la reducción de la carga cognitiva durante la experiencia inmersiva. Para ello se implementaron controles simples, adecuados tanto para usuarios experimentados como para principiantes [8].

- **Locomoción y Confort Visual:** El desplazamiento continuo se realizó mediante el *joystick* izquierdo. Para prevenir la cinetosis, la rotación operó mediante *Snap Turn* de 30° apoyado por un oscurecimiento temporal de la cámara (*camera fade*) [10].

- **Interacción por Mirada (*Gaze-based*):** La selección de puntos de interés interactivos se gatilló al mantener la mirada sobre el objeto, eliminando la necesidad de utilizar combinaciones complejas de botones y favoreciendo una interacción sencilla [8].
- **Interfaz y Diseño Sonoro:** La interfaz visual se mantuvo deliberadamente minimalista. En su lugar, el diseño sonoro integró audio ambiental espacializado y modulado dinámicamente (*ducking*), optimizando la inducción de estados de calma [9].

3.6. Planificación del Proyecto (Carta Gantt)

La Tabla 3.1 detalla el cronograma de trabajo distribuido en 18 semanas a partir de marzo de 2026.

Fase / Mes (2026)	Marzo		Abril	Mayo	Junio	Julio
Semanas	1-2	3-4	5-8	9-12	13-16	17-18
Fase 1: Investigación y Diseño						
- Revisión Bibliográfica y RF/RNF	X					
- Definición de Arquitectura	X					
Fase 2: Desarrollo del Prototipo						
- Implementación Entorno Unity		X	X			
- Programación Audio Dinámico			X	X		
- Integración Interacción Gaze				X		
Fase 3: Validación Experimental						
- Reclutamiento y Pruebas Piloto					X	
- Recolección de Datos (Pre-Post)					X	
Fase 4: Cierre						
- Análisis Estadístico						X
- Escritura Final y Defensa						X

Tabla 3.1: Carta Gantt del Proyecto (18 Semanas).

4. Diseño y desarrollo de la solución

Este capítulo aborda la implementación técnica de *RelaxVR*, dando cumplimiento a los Objetivos Específicos orientados al desarrollo de entornos inmersivos (OE 1), la integración de audio espacializado (OE 2) y la programación de mecánicas de interacción (OE 3).

4.1. Arquitectura del Software

La arquitectura del sistema se diseñó bajo un enfoque modular y desacoplado en el motor de desarrollo Unity, priorizando la separación de responsabilidades y la extensibilidad del entorno de realidad virtual. Para ello, se estructuró un patrón de componentes coordinado por manejadores globales (Managers) y controladores locales de escena:

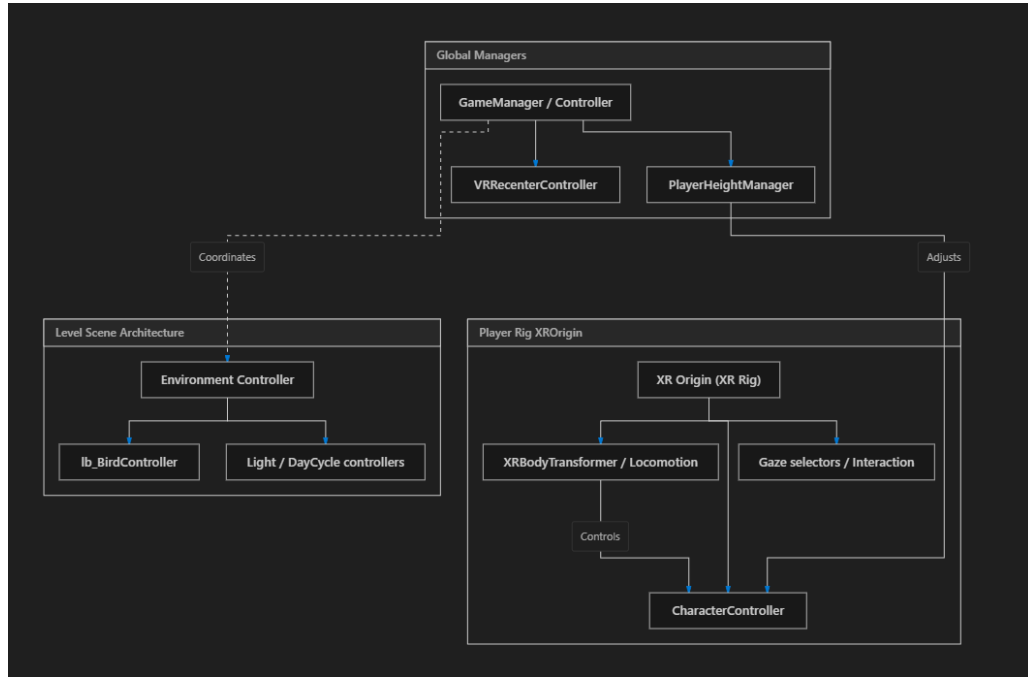


Figura 4.1: Diagrama de la arquitectura de componentes de RelaxVR.

4.1.1. Componentes Principales de la Arquitectura

GameManager y controladores globales: Actúan en el nivel más alto del ciclo de vida del software. `VRRecenterController` centraliza las llamadas de re-centrado del hardware de seguimiento de realidad virtual (HMD) y alinea la rotación del rig de cámara con el eje frontal del mundo físico. El núcleo de este procedimiento se presenta en el Anexo A.1.

`PlayerHeightManager` actúa como un orquestador dinámico del tamaño físico del usuario, calibrando la altura del visor con respecto al suelo y calculando el desfase necesario para simular estaturas estándar de forma consistente.

Environment Controller (Controladores del Entorno): Encargados de gestionar el ciclo de vida de los elementos dinámicos propios de cada nivel, como la iluminación global, el comportamiento de agentes autónomos (controladores de aves `lb_BirdController`) y las variaciones climáticas o temporales.

Interaction Manager (Manejador de Interacciones): Soportado por los selectores de mirada del usuario (`GazeInteractionSelector` y `GazeAudioSelector`). Estos componentes proyectan continuamente un *raycast* desde la posición del visor para detectar objetos interactivos que implementan la interfaz `IGazeTarget`. Cuando el usuario mantiene la mirada sobre un mismo objeto durante el tiempo de activación configurado, el sistema ejecuta automáticamente la acción correspondiente y delega el evento a componentes específicos, como `SeatInteraction` o `GazeAudioTarget`. El algoritmo principal utilizado por `GazeInteractionSelector` se presenta en el Listado A.3.

4.1.2. Flujo de Estados de la Aplicación

El ciclo de ejecución de la aplicación transita de manera estructurada a través de tres estados principales del usuario dentro del rig físico:

1. **Estado de Calibración y Espera:** Al cargar una escena, el sistema inicializa las variables de tracking del HMD, detecta la altura del suelo físico y aplica los desplazamientos calibrados en el rig de cámara antes de habilitar el movimiento.
2. **Estado de Locomoción Activa:** El usuario explora libremente el entorno mediante movimiento continuo guiado por joysticks. El rig físico del colisionador (*CharacterController*) y el visor se mantienen sincronizados espacialmente bajo la validación de colisiones de *XRBodyTransformer*.
3. **Estado de Interacción y Transición:** Al iniciar o finalizar una acción de asiento o teletransporte, se deshabilitan temporalmente las físicas del colisionador y se ejecuta una transición visual suave (fundido a negro) para evitar la cinetosis provocada por la aceleración o saltos de cámara.

4.2. Construcción y Optimización de Entornos

El software cuenta con tres niveles temáticos inspirados en la literatura sobre restauración psicológica: el Bosque (nivel de exploración densa), el Río (entorno centrado en el sonido de agua corriente y puentes colgantes) y el Jardín Zen (escena de meditación con foco en elementos asiáticos y un templo de Buda) [5, 6, 13].

Debido a que el hardware objetivo del desarrollo es el dispositivo móvil autónomo Meta Quest 3, se implementó una estrategia rigurosa de optimización para mantener

un rendimiento estable y reducir los factores asociados a la aparición de cinetosis [10]. Las técnicas aplicadas se detallan a continuación:

1. Compresión de Texturas ASTC sin MipMaps: Se utilizó el formato ASTC (*Adaptive Scalable Texture Compression*), el cual es nativo y óptimo para la GPU Adreno de Quest 3. Este formato permite elegir ratios de compresión flexibles por bloques para reducir drásticamente el uso de memoria de video (VRAM) sin pérdida perceptible de detalle visual. Se desactivaron los *Mip-Maps* en elementos de interfaz de usuario (Canvas) y retículos de mirada para ahorrar aproximadamente un 33 % de almacenamiento por textura y evitar la sobrecarga en la GPU.

Con el fin de automatizar esta configuración, se desarrolló la herramienta de editor `OptimizeProjectTextures`, la cual clasifica las texturas del proyecto y aplica automáticamente la configuración de importación correspondiente para Android (ASTC, resolución máxima y uso de MipMaps). Su algoritmo principal se presenta en el Anexo B.2.

2. Iluminación Simulada (Fake Lights): Para evitar el costo computacional prohibitivo del cálculo de sombras dinámicas en tiempo real en dispositivos móviles, se reemplazaron las luces direccionales dinámicas por un sistema híbrido de iluminación horneada (*Lightmapping*) combinada con luces falsas (rayos solares proyectados mediante geometrías transparentes). El uso de *Light Probes* permitió transferir la iluminación del entorno a los elementos dinámicos con un costo de cómputo despreciable.

3. GPU Instancing para Elementos de Vegetación (Pasto): La vegetación densa se renderiza delegando el dibujado directamente a la GPU mediante la técnica de *GPU Instancing*. La vegetación se distribuye proceduralmente mediante ruido de Perlin y se agrupa en lotes de renderizado (*batches*) utilizando *GPU Instancing*. Cada lote almacena la posición, rotación y escala de sus instancias, las cuales son renderizadas mediante una única llamada de dibujo. Además, se aplica descarte por distancia (*Distance Culling*) para evitar procesar vegetación alejada del usuario. El algoritmo principal se presenta en el Anexo B.1.

4. Automatización de la Optimización mediante Extensiones del Editor:

Para garantizar la viabilidad técnica, se desarrollaron herramientas personalizadas dentro del editor de Unity:

- **OptimizeProjectTextures:** Escanea de forma automatizada los activos para forzar la compresión ASTC.
- **OptimizeSceneShadows:** Recorre las jerarquías complejas para desactivar el cálculo de sombras dinámicas en los componentes **MeshRenderer**.

5. Procesamiento y Combinación de Arbolado Estático (Terrain Tree Batching):

Se implementó la herramienta **TerrainTreeBatcher** para extraer los datos de posición del arbolado del sistema nativo de Unity y consolidarlos en mallas estáticas combinadas por cercanía espacial. Esto permite aprovechar el descarte por oclusión (*Frustum Culling*) y reduce el impacto sobre el procesador.

6. Activación de Sistemas de Interacción por Proximidad: Los sistemas de interacción basados en mirada permanecen deshabilitados mientras el usuario se encuentra fuera de las zonas interactivas. Mediante el componente **GazeActivationArea**, los selectores de interacción se activan únicamente cuando el usuario ingresa al volumen de una zona de interés y vuelven a deshabilitarse al abandonarla. Esta estrategia evita la ejecución continua de lanzamientos de rayos (*Physics.Raycast*) sobre toda la escena, reduciendo la carga de procesamiento de la CPU. El mecanismo de activación puede consultarse en el Anexo A.3.

Resultado Visual de los Entornos

Tras aplicar el *pipeline* de optimización descrito, se logró mantener la estética inmersiva requerida por el marco psicológico del proyecto. En la Figura 4.5 se aprecia el nivel de detalle renderizado en tiempo real dentro del visor.

4.3. Implementación de Locomoción e Interacciones

La experiencia virtual busca inducir relajación, por lo que la mitigación de la cinetosis (*VR sickness*) fue una prioridad fundamental en el diseño técnico [10, 15]. Para resguardar al usuario y mantener un nivel de confort óptimo, se implementaron los siguientes sistemas:

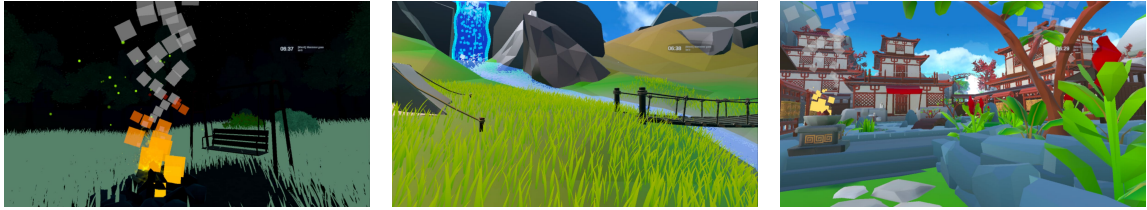


Figura 4.2: *
a) Bosque Nocturno

Figura 4.3: *
b) Pradera con Cascada

Figura 4.4: *
c) Jardín Asiático

Figura 4.5: Capturas en tiempo real desde Meta Quest 3 de los tres entornos desarrollados. La coherencia visual se mantiene intacta tras el proceso de horneado de luces y compresión ASTC.

1. Locomoción Anticinetosis: Para el desplazamiento del jugador, se configuraron dos barreras de seguridad visual:

- **Viñeta de Túnel (Tunneling Vignette):** Durante el movimiento continuo con el *joystick*, se oscurece gradualmente la periferia de la pantalla en función de la velocidad del jugador. Esto reduce la estimulación del flujo óptico periférico y disminuye el mareo significativamente.
- **Giro por Incrementos (Snap Turn):** El giro de cámara se realiza mediante saltos discretos angulares (30°) en lugar de un giro suave continuo, evitando la desorientación visual.

2. Transición Visual (Blink / Fundido a Negro): Durante los giros rápidos y los desplazamientos instantáneos, se implementó un fundido rápido a negro gestionado por `VRBlinkEffect` (véase el Listado A.2 del Anexo A), con una duración menor a 0.2 segundos. Este efecto simula el parpadeo ocular natural, mitigando la cinetosis provocada por discrepancias sensoriales [10].

3. Interacción mediante Mirada (Gaze Activation): Para evitar la sobrecarga cognitiva que supone operar los botones de un mando de realidad virtual, la selección de puntos de interés se delegó a un sistema de selección por mirada (`GazeInteractionSelector`). El usuario solo debe mantener la vista sobre el objetivo por 2 segundos (*dwell time*) para gatillar el evento de forma intuitiva, eliminando la necesidad de comandos complejos [8].

4. Seguridad en el Anclaje (Seat Interaction): Las mecánicas de descanso en bancas y columpios requieren un control estricto de las físicas. Al activarse, el componente `SeatInteraction` desactiva temporalmente la locomoción forzando la velocidad del `DynamicMoveProvider` a cero. Además, impone un bloqueo (*Sit Lock*) de 5 segundos para asegurar la pausa motriz del usuario. Para salir, el sistema lee directamente el eje del *joystick*, realizando un *raycast* vertical para teletransportar al jugador a una posición nivelada antes de devolverle el control de movimiento.

4.4. Diseño de Audio Espacial

El audio espacial se estructuró para actuar como un elemento restaurador clave, implementando conceptos de la Teoría de Restauración de la Atención (ART) que inducen una “fascinación suave”, es decir, estímulos sutiles que capturan la atención sin agotar cognitivamente al usuario [5, 6]. El paisaje sonoro no se concibe como un mero acompañamiento estético, sino como una variable manipulada intencionalmente para la inducción de estados de calma y regulación emocional [?].

1. Configuración de Capas de Sonido: Se diseñó un ecosistema de audio tridimensional de tres capas jerárquicas sincronizadas temporal y espacialmente con la fidelidad visual de los entornos [5]:

- **Capa 1: Ambiente Estéreo Local (Fondo):** Un bucle continuo estéreo no espacializado de baja intensidad que representa elementos ambientales difusos como el viento susurrando en los árboles u hojas secas, proporcionando una base sonora constante de confort.
- **Capa 2: Audio Espacializado Estático (Puntos de Interés):** Fuentes de sonido 3D ubicadas en posiciones fijas del escenario (la cascada, el río fluyendo, o un cuenco tibetano al mirar al Buda en el Jardín Zen). Estas fuentes utilizan curvas de atenuación logarítmicas personalizadas que simulan la propagación física del sonido en función de la distancia y dirección del visor Meta Quest 3.
- **Capa 3: Sonidos Dinámicos y Eventos Aleatorios (Entorno Vivo):** Sonidos emitidos por agentes dinámicos autónomos, como el graznido de un búho o el cantar de las aves que se desplazan libremente por el entorno.

- 2. Audio Mixer y Control de Saturación (Ducking):** Para evitar que la acumulación de múltiples sonidos espaciales simultáneos sature el canal maestro y rompa la sensación de presencia o genere fatiga auditiva, se implementó un **Audio Mixer** jerárquico que separa los canales en: *Master*, *Ambient*, *SFX* y *UI*.

A través de este mezclador, se configuró un efecto de *Ducking* dinámico (compresión de cadena cruzada o *Sidechain Compression*). Cuando se activan sonidos prioritarios con alto contenido de interacción (por ejemplo, el audio focalizado del cuenco tibetano al fijar la mirada en la estatua de Buda), el volumen general de la música de fondo y del ambiente disminuye de forma automática y atenuada. Esto permite que el estímulo interactivo destaque con nitidez sin obligar al usuario a realizar un esfuerzo de focalización auditiva que eleve su carga mental [8].

Como complemento a este sistema de mezcla, las fuentes sonoras ambientales móviles implementan un algoritmo de posicionamiento y modulación espacial que actualiza dinámicamente la ubicación del sonido y ajusta su intensidad en función de la orientación del usuario, reforzando la percepción direccional del entorno. El algoritmo principal utilizado para este propósito se presenta en el Listado A.4.

- 3. Aleatoriedad Espacial para la “Fascinación Suave”:** Para evitar patrones repetitivos y predecibles que rompan la inmersión, los agentes que vuelan dinámicamente por la escena tienen integrado un comportamiento de canto espacial probabilístico en su script `lb_Bird.cs`. Durante el vuelo entre perchas, el script calcula en cada fotograma una probabilidad por segundo (`m.InFlightSongChance = 0.08f`) para emitir un canto espontáneo en pleno trayecto aéreo.

Esta micro-emisión sonora se traslada tridimensionalmente junto a la trayectoria del ave. Al originarse desde posiciones impredecibles pero naturales, esta micro-emisión favorece la percepción de un entorno dinámico y contribuye a mantener la sensación de inmersión [5]. De este modo, se propicia un estado de fascinación pasiva, ideal para el alivio del estrés previo a la terapia.

5. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la validación experimental del prototipo *RelaxVR*. El análisis se estructura en tres dimensiones complementarias. En primer lugar, se evalúa el desempeño técnico del sistema mediante indicadores de usabilidad, confort e inmersión. Posteriormente, se analizan los resultados obtenidos a partir de los instrumentos psicométricos aplicados antes y después de la experiencia de realidad virtual. Finalmente, se discuten los hallazgos considerando el contexto experimental en que fueron obtenidos y las limitaciones propias de esta etapa de validación.

5.1. Datos Demográficos y Protocolo Experimental

Las pruebas de validación del prototipo *RelaxVR* se realizaron en dependencias de la Escuela de Ingeniería en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual de la Universidad de Talca, bajo condiciones controladas que permitieron evaluar tanto el desempeño técnico de la aplicación como su impacto preliminar sobre el estado emocional de los participantes.

La muestra total estuvo compuesta por 39 voluntarios, quienes participaron en la evaluación de usabilidad, comodidad e inmersión de la experiencia. La edad promedio de los participantes fue de 22,15 años ($\sigma = 2, 24$), representando una población joven acorde al contexto universitario donde se desarrolló la investigación.

Para el análisis relacionado con la regulación emocional y la ansiedad de estado, se trabajó con una submuestra de 31 participantes que completaron la totalidad del protocolo psicométrico. Esta separación metodológica permitió utilizar la totalidad de los datos disponibles para la evaluación técnica del sistema, manteniendo al mismo

tiempo la consistencia requerida para los análisis clínicos comparativos de tipo pre-post.

Cada sesión experimental siguió un procedimiento estandarizado compuesto por las siguientes etapas:

1. Lectura y firma del consentimiento informado.
2. Aplicación del cuestionario STAI-S previo a la experiencia (*Pre-test*).
3. Uso de la aplicación *RelaxVR* mediante visor Meta Quest 3 durante aproximadamente siete minutos.
4. Aplicación del cuestionario STAI-S posterior a la experiencia (*Post-test*).
5. Aplicación de los instrumentos de evaluación de usabilidad (SUS) y presencia e inmersión (IPQ).
6. Registro de observaciones y comentarios finales de los participantes.

La duración total de cada sesión fue cercana a los 15 minutos, incluyendo el tiempo destinado a la explicación inicial, aplicación de instrumentos y utilización del sistema. Todos los participantes completaron la experiencia sin incidentes mayores, no registrándose eventos que obligaran a interrumpir las pruebas por motivos de seguridad o malestar asociado al uso de realidad virtual.

Este protocolo permitió obtener información cuantitativa sobre la usabilidad del sistema, la sensación de presencia generada por los entornos virtuales y los posibles cambios en los niveles de ansiedad de estado producidos tras la exposición a la experiencia inmersiva.

5.2. Análisis de Usabilidad del Sistema (SUS)

Para evaluar la interacción basada en la mirada (*Gaze Activation*) y el control de locomoción anticinetosis, se procesaron las respuestas de la escala SUS (*System Usability Scale*) sobre la muestra técnica ($N = 39$). El puntaje global del SUS varía entre 0 y 100 puntos, donde el estándar de la industria determina que cualquier sistema que supere los 68 puntos posee una usabilidad aceptable [10].

La aplicación del instrumento arrojó un puntaje promedio general de **81.09 puntos** con una desviación estándar de $\sigma = 15,20$. Considerando que el punto de referencia habitualmente utilizado para la escala SUS corresponde a 68 puntos, el resultado obtenido indica una alta percepción de usabilidad por parte de los participantes.

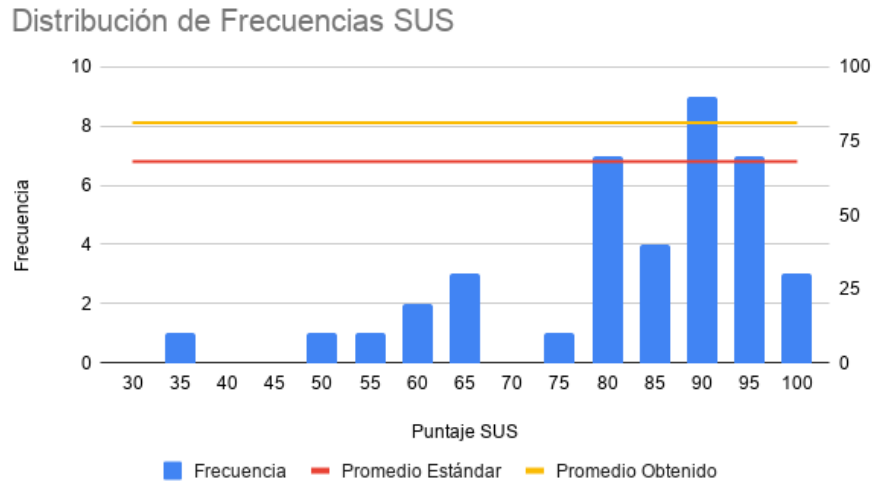


Figura 5.1: Distribución de frecuencias para las puntuaciones globales de la escala SUS ($N = 39$).

5.2.1. Análisis de Ítems Críticos y Casos Extremos

El desglose de los datos individuales revela dinámicas de uso altamente diferenciadas entre los participantes:

- **Curva de Aprendizaje Inmediata:** Sujetos como P-14 y P-87 otorgaron la calificación máxima de 100 puntos. Al analizar sus respuestas, se observa un puntaje de 5/5 en el ítem sobre aprendizaje rápido, lo que sugiere que la interacción basada en la mirada facilitó el aprendizaje inicial del sistema.
- **Fricción Tecnológica por Inexperiencia:** En contraposición, se registraron puntuaciones deficientes como las de los participantes P-A (32.5 puntos) y P-8 (47.5 puntos). Al revisar los registros de las sesiones, se observó que estos participantes correspondían a personas que experimentaban su primera inmersión en realidad virtual. Para este perfil, la adaptación al peso del visor (HMD) y al

ajuste de las lentes fueron aspectos mencionados durante la sesión y podrían haber influido en la percepción inicial de facilidad de uso.

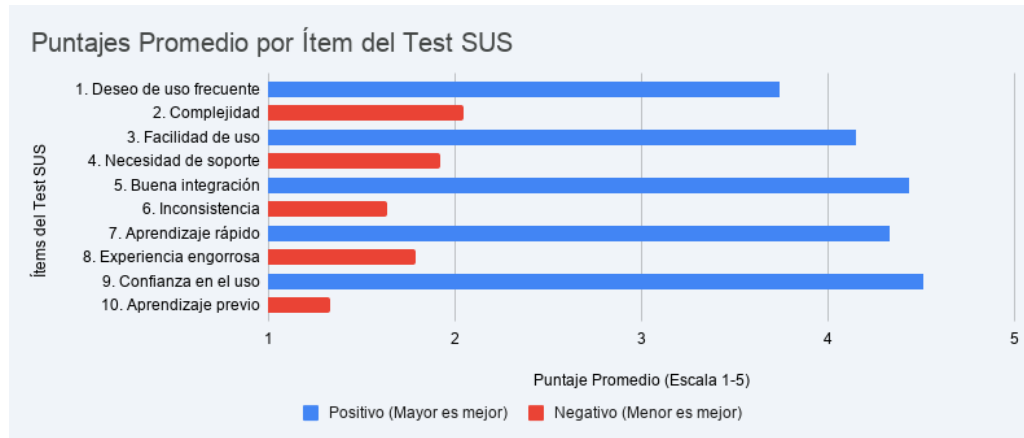


Figura 5.2: Desempeño promedio de usabilidad desglosado por ítem de evaluación.

5.3. Sensación de Presencia e Inmersión (IPQ)

La sensación de presencia constituye una variable ampliamente utilizada para evaluar la calidad de una experiencia inmersiva, ya que refleja la percepción subjetiva de “estar allí” y se ha asociado con experiencias de relajación más convincentes en realidad virtual [4]. El cuestionario IPQ evaluó esta propiedad sobre la muestra completa ($N = 39$). El puntaje global promedio obtenido fue de **54.33 puntos** ($\sigma = 9,69$) de un máximo de 70, reflejando un alto índice de inmersión multidimensional. La distribución detallada de estos puntajes individuales y su dispersión respecto al promedio se presenta en la Figura 5.3, evidenciando una concentración positiva en los rangos superiores de la escala.

Dado el enfoque técnico de este proyecto, el análisis visual de la inmersión no se limitó a las cuatro dimensiones psicométricas estándar del instrumento. En su lugar, se seleccionaron seis ítems específicos del cuestionario que permiten evaluar directamente el impacto perceptivo de las decisiones de ingeniería, optimización y programación implementadas en Unity. El rendimiento comparativo de estos atributos se ilustra en la Figura 5.4, y su desglose detallado arrojó los siguientes resultados:

- **Presencia Espacial (3.92 / 5.0):** Evalúa la sensación directa de “estar allí”.

Estos resultados sugieren que las decisiones de diseño adoptadas durante el desarrollo contribuyeron a una adecuada percepción de presencia espacial.

- **Atención e Involucramiento (4.26 / 5.0):** Mide la captación de la atención por sobre el mundo físico. Este resultado es consistente con un diseño audio-visual orientado a minimizar distracciones y favorecer la atención durante la experiencia.
- **Involucramiento en Relajación (4.03 / 5.0):** Sugiere que los participantes experimentaron un adecuado nivel de involucramiento durante la experiencia de relajación propuesta.
- **Coherencia y Naturalidad (4.10 / 5.0):** Refleja la aceptación cognitiva de las reglas del mundo virtual, lo que sugiere que los participantes percibieron el entorno como internamente consistente.
- **Autenticidad del Entorno (4.36 / 5.0):** Este resultado sugiere que los participantes percibieron el entorno como natural y coherente. Es posible que la incorporación de comportamientos dinámicos en la fauna y de sonidos ambientales contribuyera a esta percepción.
- **Fluidez Visual (4.33 / 5.0):** Actúa como un indicador directo de confort. Este alto puntaje refleja que los usuarios percibieron la experiencia como fluida, lo cual se alinea con el rendimiento técnico alcanzado. A pesar de la alta exigencia gráfica propia de los entornos naturales, el arduo proceso de optimización del *pipeline* (identificado como uno de los mayores desafíos del desarrollo) permitió mantener un rendimiento estable de **72 FPS**, cumpliendo con el umbral base exigido para Meta Quest 3 y previniendo eficazmente la aparición de cinetosis.

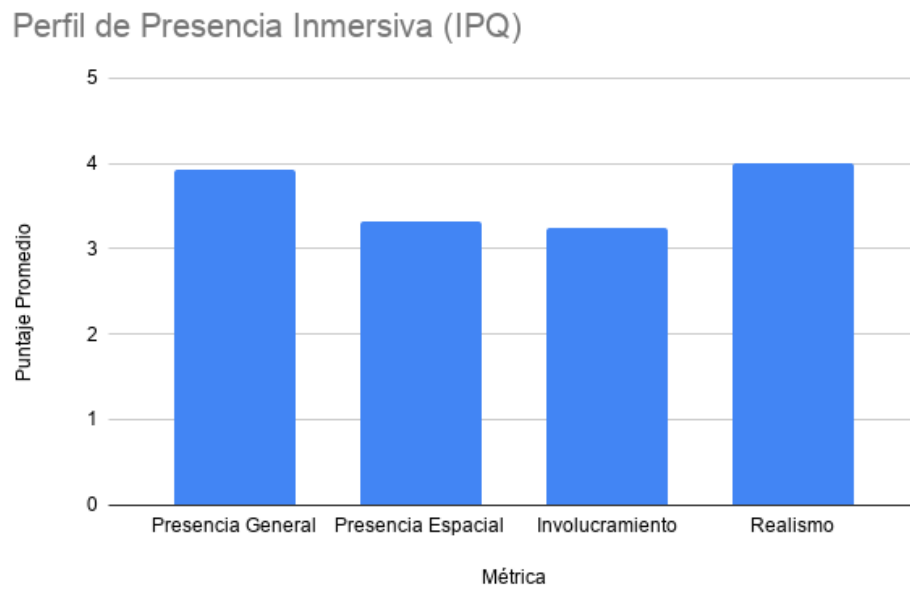


Figura 5.3: Distribución del puntaje del cuestionario IPQ y su relación con el promedio obtenido por la muestra.

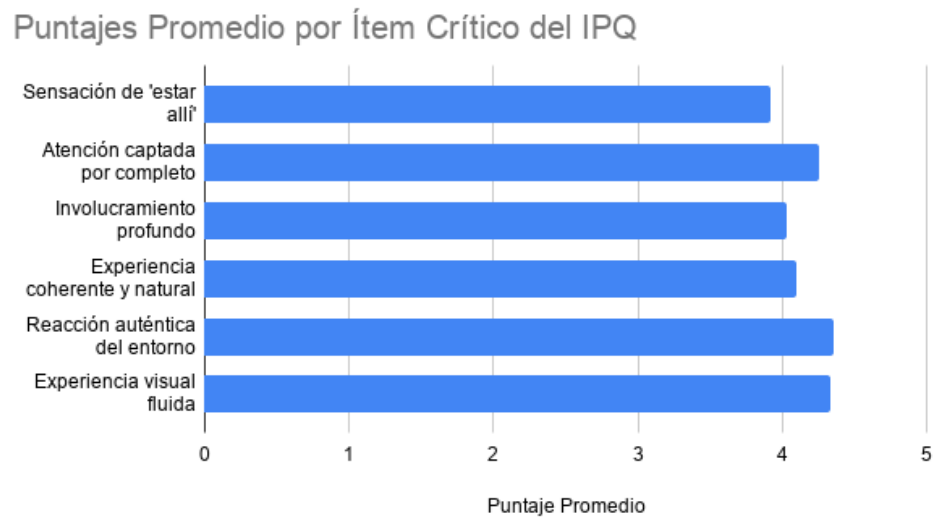


Figura 5.4: Puntajes promedio obtenidos en los seis ítems críticos seleccionados para la evaluación de la ingeniería del entorno.

5.3.1. Limitaciones de la Inmersión y Fricciones del Sistema

A pesar de los resultados positivos generales en las métricas de confort y presencia, el análisis detallado del cuestionario IPQ revela áreas específicas donde el prototipo presenta limitaciones propias de su etapa actual de desarrollo y de las restricciones del *hardware*.

Desde una perspectiva crítica, se identificaron cuatro factores que redujeron la inmersión total de los usuarios:

- **Carencia de Fotorealismo** ($\bar{x} = 3,23$): Ante la afirmación de si el entorno parecía “muy real”, la puntuación media fue una de las más bajas del instrumento. Esto sugiere que, si bien la estética de *RelaxVR* es coherente, el *pipeline* gráfico optimizado para Meta Quest 3 obliga a utilizar texturas y mallas estilizadas que los usuarios identifican claramente como sintéticas.
- **Falta de Representación Corporal** ($\bar{x} = 3,46$): La percepción de tener un cuerpo físico dentro del espacio virtual obtuvo un desempeño moderado. Al priorizar un diseño libre de controladores para evitar la carga cognitiva, el sistema carece de un modelo de avatar visible (manos o cuerpo), lo que podría haber limitado la percepción de embodiment por parte de algunos participantes.
- **Agencia Espacial Limitada** ($\bar{x} = 3,49$): En contraste con la presencia espacial pasiva, la sensación de “estar actuando” activamente en el entorno no alcanzó el cuartil superior. La interacción basada exclusivamente en la mirada (*Gaze Activation*) puede haber limitado las posibilidades de manipulación directa del entorno.
- **Fugas de Aislamiento del Entorno Físico**: En el ítem de control inverso sobre la consciencia de la habitación real, se obtuvo una media de $\bar{x} = 2,62$ (donde 1.0 es el aislamiento ideal). Este resultado podría estar asociado tanto a factores propios del software como a condiciones externas de la sesión, tales como la ergonomía del visor o las características del entorno físico.

El reconocimiento de estas métricas no invalida la eficacia de la intervención de relajación —la cual fue comprobada mediante los resultados del STAI—, pero establece una hoja de ruta clara para futuras iteraciones del desarrollo, sugiriendo

que la incorporación de *Hand-Tracking* básico y mejoras ergonómicas podrían elevar la presencia general de la aplicación.

5.4. Evaluación del Impacto Clínico en la Ansiedad (STAI-S)

Es importante considerar que la evaluación mediante STAI-S fue realizada en un entorno universitario semicontrolado y no en el contexto clínico originalmente planteado para la aplicación del sistema. En consecuencia, los niveles iniciales de ansiedad registrados corresponden al estado emocional de voluntarios durante una sesión experimental y no al de pacientes en espera de atención psicoterapéutica. Por ello, y dada la ausencia de un grupo control, los hallazgos deben interpretarse estrictamente como una **reducción observada** en la ansiedad de estado como parte de una validación preliminar, y no como una eficacia clínica comprobada del sistema.

Para cuantificar esta variación en el estado emocional, se contrastaron los puntajes de Ansiedad-Estado medidos inmediatamente antes (Pre-test) y después (Post-test) de la sesión de 7 minutos en la submuestra ($n = 31$). Se utilizó la versión Y-1 del Inventario de Ansiedad Estado-Rasgo (STAI-S), la cual consta de 20 ítems evaluados en una escala tipo Likert de 1 a 4. Las puntuaciones totales posibles oscilan entre 20 y 80 puntos, donde valores más altos indican mayores niveles de ansiedad transitoria.

5.4.1. Resultados Cuantitativos del STAI

Los resultados muestran una reducción considerable en los puntajes de ansiedad-estado:

- **Puntaje Estado Inicial (Pre-Test):** La media de ansiedad-estado se situó en **23.61 puntos** con una desviación estándar de $\sigma = 10,47$.
- **Puntaje Estado Final (Post-Test):** Tras la exposición ultracorta, la media disminuyó a **11.71 puntos** ($\sigma = 6,89$).

Esta variación equivale a una reducción neta del **50.4 %** en los niveles declarados de ansiedad. La prueba T de Student para muestras relacionadas arrojó un cambio estadísticamente significativo, revelando una disminución real en los puntajes:

$t(30) = 7,42$, $p < 0,001$, con un intervalo de confianza al 95 % para la diferencia de medias de $[8,62, 15,18]$. Adicionalmente, el tamaño del efecto estimado es clasificado como grande (d de *Cohen* = 1,34), indicando una fuerte magnitud de cambio. No obstante, dada la ausencia de un grupo de control pasivo, esta reducción no puede atribuirse exclusivamente al sistema inmersivo, sino a la combinación de la tecnología y el tiempo de reposo, planteando la necesidad de futuros ensayos controlados para aislar la variable tecnológica. La Tabla 5.1 detalla estos datos descriptivos.

Métrica de Evaluación (STAI, $n = 31$)	Media ($\bar{x}$)	Desviación Estándar (σ)
Ansiedad-Estado (Pre-Test)	23.61	10.47
Ansiedad-Estado (Post-Test)	11.71	6.89
Ansiedad-Rasgo (Pre-Test)	28.74	10.84
Ansiedad-Rasgo (Post-Test)	23.84	10.40

Tabla 5.1: Consolidado estadístico descriptivo de los puntajes STAI antes y después del uso de RelaxVR.

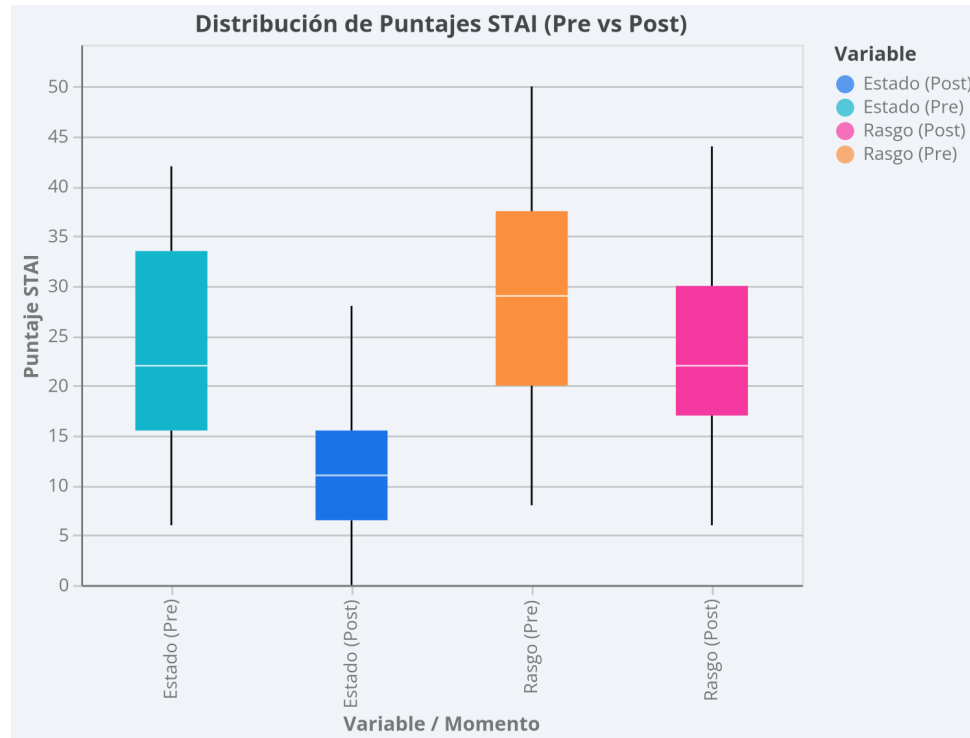


Figura 5.5: Distribución comparativa de los puntajes STAI. Se observa una compresión y descenso significativo en los niveles de Ansiedad-Estado tras la intervención.

5.5. Discusión y Relación entre Variables

Los resultados permiten analizar la relación entre las características del sistema desarrollado y la respuesta observada durante la evaluación experimental. La reducción observada en los puntajes de la subescala de ansiedad-estado ofrece evidencia preliminar concordante con la hipótesis de trabajo, sugiriendo que una experiencia tridimensional de corta duración, optimizada para hardware móvil, se asocia con una disminución en los niveles de ansiedad-estado reportados por los usuarios. No obstante, al tratarse de un diseño pre-post sin grupo de control pasivo, esta variación constituye una asociación temporal y no permite establecer una relación de causalidad directa atribuible de forma exclusiva al software.

La confluencia de un SUS evaluado como excelente (81.09) y un índice IPQ elevado (54.33) sugiere que la simplificación de las mecánicas no afectó la fidelidad ni la capacidad de inmersión del sistema. Al automatizar la optimización de texturas

y mallas mediante herramientas personalizadas en el editor, las optimizaciones implementadas permitieron mantener un comportamiento visual que los participantes percibieron como fluido.

Asimismo, el comportamiento dinámico de la compresión por *Ducking* configurado en el **Audio Mixer** pudo haber contribuido a enriquecer la percepción auditiva de la experiencia. Al priorizar el audio posicional mediante transiciones suaves, se resguardó el principio de “fascinación suave” de Kaplan, favoreciendo la percepción de un entorno sonoro coherente durante la inmersión.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este capítulo se sintetizan las principales conclusiones alcanzadas al finalizar el desarrollo y la evaluación del prototipo *RelaxVR*. Se responde directamente a la pregunta de investigación, se detalla el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos, se explicitan las limitaciones del estudio y se establecen las líneas de trabajo futuro.

6.1. Respuesta a la Pregunta de Investigación e Hipótesis

En respuesta directa a la pregunta de investigación planteada, los resultados experimentales indican que un videojuego de realidad virtual interactivo con entornos naturales e inmersión sonora actúa como una herramienta viable de estabilización emocional previa a la atención psicológica mediante la reducción de la ansiedad de estado en usuarios universitarios durante sesiones de 7 minutos.

Asimismo, los hallazgos entregan evidencia favorable a la hipótesis de trabajo. La exposición al entorno inmersivo se asoció con un descenso estadísticamente significativo del 50.4 % en los puntajes de ansiedad de estado ($t(30) = 7,42$, $p < 0,001$, $d = 1,34$), alcanzando además niveles de usabilidad técnica evaluados como excelentes (81.09 puntos en la escala SUS) y un alto índice de presencia espacial (54.33 puntos en el cuestionario IPQ).

6.2. Cumplimiento de los Objetivos Específicos

El desarrollo del proyecto permitió cumplir de forma satisfactoria la totalidad de los objetivos específicos definidos:

- **Diseño y Desarrollo de Entornos Virtuales (OE 1):** Se construyeron tres escenarios naturales virtuales (Bosque Nocturno, Pradera con Cascada y Jardín Zen) optimizados para el visor autónomo Meta Quest 3, logrando sostener una tasa estable de 72 FPS que garantizó la fluidez visual necesaria para prevenir la cinetosis.
- **Integración de Paisaje Sonoro Espacializado (OE 2):** Se implementó un sistema de audio tridimensional espacializado con modulación dinámica mediante *ducking*, enriqueciendo el entorno ambiental y promoviendo la inducción de estados de calma y fascinación suave.
- **Programación de Interacciones Accesibles (OE 3):** Se diseñó un esquema de interacción basado en la mirada (*Gaze Activation*) y locomoción por *Snap Turn* de 30° con fundido visual a negro, eliminando la necesidad de controladores físicos y minimizando la carga cognitiva.
- **Pruebas de Usabilidad, Confort y Aceptación Técnica (OE 4):** Se evaluó la usabilidad, la comodidad y la inmersión del sistema en $N = 39$ participantes voluntarios mediante las escalas estandarizadas SUS e IPQ. El prototipo alcanzó un puntaje promedio SUS de 81.09 puntos sobre 100 (usabilidad excelente) y un puntaje global IPQ de 54.33 puntos sobre 70 (alta presencia espacial), identificando además los puntos de fricción técnica en usuarios primerizos.
- **Cuantificación del Impacto Psicométrico en la Ansiedad-Estado (OE 5):** Se cuantificó la variación inmediata en los niveles de ansiedad de estado mediante la aplicación del instrumento psicométrico STAI-S en la submuestra de $n = 31$ participantes. Los resultados reflejaron un descenso en la puntuación media desde 23.61 puntos hasta 11.71 puntos tras la sesión inmersiva, confirmando un cambio estadísticamente significativo con un tamaño del efecto alto.

6.3. Limitaciones del Estudio

En consonancia con el rigor académico, se reconocen las siguientes limitaciones metodológicas y técnicas:

1. **Validez Externa Muestral:** Las evaluaciones se realizaron con estudiantes universitarios voluntarios en un entorno académico semicontrolado, por lo que los resultados corresponden a población general no clínica.
2. **Diseño Pre-Experimental:** Al emplear un diseño pre-post sin grupo de control pasivo (como reposo en silencio sin visor), la reducción observada en la ansiedad constituye una asociación temporal y no permite aislar la causalidad exclusiva del software frente al simple paso del tiempo.
3. **Interacción y Representación Corporal:** La interacción basada únicamente en la mirada y la ausencia de un modelo corporal o manos virtuales limitaron la percepción de agencia corporal (*embodiment*) en algunos usuarios.

6.4. Trabajo Futuro

Para profundizar y proyectar los aportes de esta investigación, se plantean las siguientes líneas futuras:

- **Ensayos Clínicos Aleatorizados (RCT):** Diseñar estudios comparativos que incluyan un grupo de control pasivo y se apliquen directamente con pacientes en salas de espera de centros de atención en salud mental.
- **Mecánicas de Interacción Avanzadas:** Incorporar tecnología de seguimiento de manos (*Hand-Tracking*) y modelos de representación corporal para elevar el índice de presencia y agencia espacial.
- **Medición Fisiológica Complementaria:** Integrar sensores biométricos no invasivos (frecuencia cardíaca y variabilidad de la frecuencia cardíaca, HRV) para triangular los auto-reportes psicométricos con métricas biológicas en tiempo real.
- **Evaluación Comparativa de Usabilidad e Inmersión:** Utilizar la línea base establecida en este estudio mediante SUS e IPQ para aplicar pruebas

estadísticas inferenciales en diseños A/B, evaluando cuantitativamente si las nuevas iteraciones del software logran mitigar las fricciones identificadas.

Bibliografía

- [1] J. I. Montana, M. Matamala-Gomez, M. Maisto, P. A. Mavrodiev, C. M. Cavalera, B. Diana, F. Mantovani, and O. Realdon, “The benefits of emotion regulation interventions in virtual reality for the improvement of wellbeing in adults and older adults: a systematic review,” *Journal of clinical medicine*, vol. 9, no. 2, p. 500, 2020.
- [2] S. Tejada, I. T. T. Santillán, R. Díaz, L. D. R. Cruz, M. M. Pino, S. Huyhua, and M. J. S. Chero, “Realidad virtual en la reducción del dolor y la ansiedad en niños sometidos a venopunción,” *Revista de la Universidad del Zulia*, vol. 11, no. 30, pp. 438–447, 2020.
- [3] P. L. Chiu, H. Li, K. Y.-L. Yap, K.-m. C. Lam, P.-l. R. Yip, and C. L. Wong, “Virtual reality-based intervention to reduce preoperative anxiety in adults undergoing elective surgery: A randomized clinical trial,” *JAMA network open*, vol. 6, no. 10, pp. e2340588–e2340588, 2023.
- [4] D. Villani and G. Riva, “Presence and relaxation: A preliminary controlled study,” *PsychNology J.*, vol. 6, no. 1, pp. 7–25, 2008.
- [5] H. Li, Y. Ding, B. Zhao, Y. Xu, and W. Wei, “Effects of immersion in a simulated natural environment on stress reduction and emotional arousal: A systematic review and meta-analysis,” *Frontiers in psychology*, vol. 13, p. 1058177, 2023.
- [6] S. S. Syed Abdullah, D. R. Awang Rambli, S. Sulaiman, E. Alyan, F. Merienne, and N. D. Mohd Muhaiyuddin, “The impact of virtual nature therapy on stress responses: A systematic qualitative review,” *Forests*, vol. 12, no. 12, p. 1776, 2021.
- [7] A.-L. Macey, J. Macey, and J. Hamari, “Virtual reality in emotion regulation: a scoping review,” in *International GamiFIN Conference*, pp. 64–74, CEUR, 2022.

- [8] D. Colombo, J. Fernández-Álvarez, A. Garcia Palacios, P. Cipresso, C. Botella, and G. Riva, “New technologies for the understanding, assessment, and intervention of emotion regulation,” *Frontiers in psychology*, vol. 10, p. 1261, 2019.
- [9] M. M. Moratinos, *Eficacia de un videojuego de realidad virtual en la mejora de la regulación emocional de niños y adolescentes con TDAH a través de la música: un ensayo clínico aleatorizado*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Madrid, 2025.
- [10] I.-C. Stanica, S. M. Hainagiu, A. Milicu, M.-I. Dascalu, and G.-P. Portelli, “Effectiveness of virtual reality-based multi-therapy systems for physio-psychological rehabilitation: A clinical study,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 19, p. 9093, 2024.
- [11] C. Tacca, B. A. Kerr, C. McLamb, K. L. Ridgway, and E. A. Friis, “Efficacy of a remote virtual reality and eeg enabled psychotherapy system for the treatment of depressive symptoms,” *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 5, p. 1281017, 2024.
- [12] L. Valmaggia, “The use of virtual reality in psychosis research and treatment,” *World Psychiatry*, vol. 16, no. 3, p. 246, 2017.
- [13] J. Szczepańska-Gieracha, B. Cieřlik, A. Serweta, and K. Klajs, “Virtual therapeutic garden: a promising method supporting the treatment of depressive symptoms in late-life: a randomized pilot study,” *Journal of Clinical Medicine*, vol. 10, no. 9, p. 1942, 2021.
- [14] S. Riches, L. Azevedo, L. Bird, S. Pisani, and L. Valmaggia, “Virtual reality relaxation for the general population: a systematic review,” *Social psychiatry and psychiatric epidemiology*, vol. 56, no. 10, pp. 1707–1727, 2021.
- [15] R. Blackmore, C. Giles, H. Tremain, R. Kelly, F. Foley, K. Fletcher, M. Nedeljkovic, G. Wadley, E. Seabrook, and N. Thomas, “Examining the use of virtual reality to support mindfulness skills practice in mood and anxiety disorders: Mixed methods study,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 26, p. e45640, 2024.
- [16] S. Riches, P. Jeyarajaguru, L. Taylor, C. Fialho, J. Little, L. Ahmed, A. O’Brien, C. van Driel, W. Veling, and L. Valmaggia, “Virtual reality relaxation for people with mental health conditions: a systematic review,” *Social psychiatry and psychiatric epidemiology*, vol. 58, no. 7, pp. 989–1007, 2023.

- [17] Y. Gao, N. Wang, and N. Liu, “Effectiveness of virtual reality in reducing preoperative anxiety in adults: A systematic review and meta-analysis,” *Journal of Advanced Nursing*, vol. 79, no. 10, pp. 3678–3690, 2023.
- [18] B. J. Concannon, S. Esmail, and M. R. Roberts, “Immersive virtual reality for the reduction of state anxiety in clinical interview exams: Prospective cohort study,” *JMIR Serious Games*, vol. 8, no. 3, p. e18313, 2020.
- [19] E. Malbos, N. Chichery, B. Borwell, G. Weindel, J. Molitor, M. Einig-Iscaïn, J. Seimandi, and C. Lançon, “Virtual reality and relaxation for the treatment of generalized anxiety disorder: A randomized comparative study with standard intervention,” *Journal of Clinical Medicine*, vol. 14, no. 4, p. 1351, 2025.
- [20] W. Veling, B. Lestestuiiver, M. Jongma, H. R. Hoenders, and C. van Driel, “Virtual reality relaxation for patients with a psychiatric disorder: crossover randomized controlled trial,” *Journal of medical Internet research*, vol. 23, no. 1, p. e17233, 2021.
- [21] J. Lee, J. Kim, and M. G. Ory, “The impact of immersive virtual reality meditation for depression and anxiety among inpatients with major depressive and generalized anxiety disorders,” *Frontiers in Psychology*, vol. 15, p. 1471269, 2024.
- [22] J. Weerdmeester, M. Van Rooij, O. Harris, N. Smit, R. C. Engels, and I. Granic, “Exploring the role of self-efficacy in biofeedback video games,” in *Extended abstracts publication of the annual symposium on computer-human interaction in play*, pp. 453–461, 2017.
- [23] A. Gaggioli, F. Pallavicini, L. Morganti, S. Serino, C. Scaratti, M. Briguglio, G. Crifaci, N. Vetrano, A. Giurlintano, G. Bernava, *et al.*, “Experiential virtual scenarios with real-time monitoring (interreality) for the management of psychological stress: a block randomized controlled trial,” *Journal of medical Internet research*, vol. 16, no. 7, p. e3235, 2014.
- [24] M. Velana, S. Sobieraj, J. Digutsch, and G. Rinkenauer, “The advances of immersive virtual reality interventions for the enhancement of stress management and relaxation among healthy adults: a systematic review,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 7309, 2022.

A. Scripts principales del sistema

A.1. Algoritmo de recentrado del visor

El Listado A.1 presenta el núcleo del algoritmo de recentrado implementado en el script `VRRecenterController.cs`. Este procedimiento calcula el desfase angular del visor respecto al sistema de referencia del entorno virtual y aplica la corrección correspondiente sobre el *XR Origin*, permitiendo mantener la alineación entre la orientación física del usuario y el entorno virtual. Por motivos de legibilidad, el listado omite validaciones, control de errores y operaciones auxiliares que no forman parte del algoritmo central.

Listing A.1: Fragmento central del algoritmo de recentrado implementado en `VRRecenterController.cs`.

```
1 public void RecenterYaw()
2 {
3     // Algoritmo central...
4
5     Transform cameraOffsetTransform = cameraTransform.parent;
6
7     Quaternion cameraInRigSpace =
8         Quaternion.Inverse(xrOrigin.transform.rotation) *
9         cameraTransform.rotation;
10
11     float cameraLocalYaw = cameraInRigSpace.eulerAngles.y;
12
13     if (cameraLocalYaw > 180f)
14         cameraLocalYaw -= 360f;
```

```

15
16     cameraOffsetTransform.RotateAround(
17         cameraTransform.position,
18         Vector3.up,
19         -cameraLocalYaw);
20
21     Vector3 camForward = cameraTransform.forward;
22     camForward.y = 0;
23
24     if (camForward.sqrMagnitude > 0.001f)
25     {
26         float angle = Vector3.SignedAngle(
27             camForward.normalized,
28             Vector3.forward,
29             Vector3.up);
30
31         xrOrigin.transform.RotateAround(
32             cameraTransform.position,
33             Vector3.up,
34             angle);
35     }
36 }

```

Como puede observarse en el Listado A.1, el algoritmo calcula el desfase angular (*Yaw*) entre la orientación actual del visor y el sistema de referencia del entorno virtual. Posteriormente, dicho desfase es compensado mediante una rotación del *Camera Offset* y una alineación del *XR Origin*, permitiendo conservar una referencia espacial coherente durante la experiencia inmersiva.

A.2. Sistema de reducción de cinetosis

El Listado A.2 presenta el núcleo del algoritmo implementado en el script `VRBlinkEffect.cs`. Este procedimiento detecta variaciones bruscas en la orientación horizontal del usuario provocadas por la locomoción mediante *Snap Turn*. Cuando el cambio angular supera un umbral predefinido, el sistema activa un fundido temporal a negro y posteriormente restaura la imagen de forma gradual, reduciendo la percepción visual del giro y contribuyendo a disminuir el riesgo de cinetosis. Para facilitar la lectura, se omiten las tareas de inicialización y configuración del componente.

Listing A.2: Fragmento central del algoritmo implementado en VRBlinkEffect.cs.

```

1 private void LateUpdate()
2 {
3     if (fadeCanvasGroup == null || xrOrigin == null)
4         return;
5
6     // Obtener la rotacion horizontal actual del XR Origin.
7     float currentY = xrOrigin.eulerAngles.y;
8
9     // Calcular la diferencia angular respecto al cuadro anterior.
10    float deltaY = Mathf.Abs(Mathf.DeltaAngle(currentY,
11        lastYRotation));
12
13    // Detectar un giro brusco producido por la locomocion Snap Turn
14    .
15    if (deltaY >= (snapThreshold - 0.5f))
16    {
17        // Aplicar un fundido inmediato para ocultar el cambio de
18        // orientacion.
19        fadeCanvasGroup.gameObject.SetActive(true);
20        fadeCanvasGroup.alpha = 1f;
21
22        // Iniciar la transicion para recuperar gradualmente la
23        // vision.
24        if (fadeCoroutine != null)
25            StopCoroutine(fadeCoroutine);
26
27        fadeCoroutine = StartCoroutine(FadeOut());
28    }
29
30    // Guardar la orientacion para la siguiente actualizacion.
31    lastYRotation = currentY;
32 }
33
34 private IEnumerator FadeOut()
35 {
36     yield return null;
37
38     while (fadeCanvasGroup.alpha > 0f)
39     {
40         fadeCanvasGroup.alpha -= Time.deltaTime * fadeSpeed;

```

```

37         yield return null;
38     }
39
40     fadeCanvasGroup.alpha = 0f;
41     fadeCanvasGroup.gameObject.SetActive(false);
42 }

```

Como se observa en el Listado A.2, el algoritmo calcula la diferencia angular entre dos cuadros consecutivos utilizando `Mathf.DeltaAngle()`. Cuando dicha diferencia supera el umbral establecido, se activa inmediatamente un fundido a negro y se inicia una transición gradual que restablece la imagen una vez completado el giro, reduciendo el impacto visual del cambio de orientación.

A.3. Sistema de interacción mediante mirada

El Listado A.3 presenta el núcleo del algoritmo implementado en el script `GazeInteractionSelector`. Este procedimiento utiliza un *Raycast* proyectado desde la cámara del usuario para detectar objetos interactivos que implementan la interfaz `IGazeTarget`. Cuando el usuario mantiene la mirada sobre un mismo elemento durante el tiempo configurado, el sistema ejecuta automáticamente la acción asociada sin requerir controladores físicos. Para facilitar la lectura, el listado omite las rutinas de inicialización y restauración del estado interno.

Listing A.3: Fragmento central del algoritmo de interacción mediante mirada implementado en `GazeInteractionSelector.cs`.

```

1  void Update()
2  {
3      Ray ray = new Ray(transform.position, transform.forward);
4
5      if (Physics.Raycast(ray, out RaycastHit hit,
6          maxGazeDistance, gazeLayerMask))
7      {
8          IGazeTarget target = hit.collider.GetComponent<IGazeTarget>();
9
10         if (target == null || !target.CanTrigger)
11         {
12             ResetGaze();

```

```

13         return;
14     }
15
16     if (target == currentTarget)
17     {
18         gazeTimer += Time.deltaTime;
19
20         if (gazeProgressImage != null)
21             gazeProgressImage.fillAmount =
22                 gazeTimer / currentTarget.GazeDuration;
23
24         if (gazeTimer >= currentTarget.GazeDuration)
25         {
26             currentTarget.TriggerActivation();
27             hasTriggered = true;
28             gazeTimer = 0f;
29
30             if (gazeProgressImage != null)
31                 gazeProgressImage.fillAmount = 0f;
32         }
33     }
34     else
35     {
36         ResetGaze();
37         currentTarget = target;
38         currentTarget.OnGazeEnter();
39
40         if (gazeCursorContainer != null)
41             gazeCursorContainer.SetActive(true);
42     }
43 }
44 else
45 {
46     ResetGaze();
47 }
48 }

```

Como puede observarse en el Listado A.3, el algoritmo proyecta continuamente un rayo desde la posición del visor hacia la dirección de observación del usuario. Cuando detecta un objeto interactivo, acumula el tiempo de permanencia de la mi-

rada y actualiza un indicador visual de progreso. Una vez alcanzado el tiempo de activación configurado, ejecuta la acción correspondiente y reinicia el proceso para futuras interacciones.

A.4. Sistema de audio espacial dinámico

El Listado A.4 presenta el núcleo del algoritmo implementado en el script `RiverAudioFollower`. Este procedimiento calcula periódicamente la posición más cercana del cauce del río respecto al usuario utilizando una *Spline*, reposicionando dinámicamente la fuente sonora para mantener una percepción espacial coherente durante el desplazamiento. Adicionalmente, modula el volumen y la frecuencia de corte de un filtro paso bajo según la orientación de la cabeza del usuario, reforzando la direccionalidad del sonido sin requerir múltiples fuentes de audio. Para facilitar la lectura, el listado omite las tareas de inicialización y configuración del componente.

Listing A.4: Fragmento central del algoritmo de audio espacial implementado en `RiverAudioFollower.cs`.

```

1  using UnityEngine;
2  using UnityEngine.Splines;
3
4  public class RiverAudioFollower : MonoBehaviour
5  {
6      private void UpdateAudioPosition()
7      {
8          // 1. Obtenemos la posición del jugador en el espacio local
9          //    del Spline
10         Vector3 playerPosLocal = riverSpline.transform.
11             InverseTransformPoint(playerTransform.position);
12
13         // 2. Usamos la API de Splines para encontrar el punto más
14         //    cercano de la línea al jugador
15         // Esto devuelve un valor entre 0 y 1 (t)
16         SplineUtility.GetNearestPoint(riverSpline.Spline,
17             playerPosLocal, out var nearestPosLocal, out float t);
18
19         // 3. Convertimos esa posición local de vuelta al mundo real
20         Vector3 nearestPosWorld = riverSpline.transform.
21             TransformPoint((Vector3)nearestPosLocal);

```

```
17
18     // 4. Movemos suavemente el AudioSource a esa posición
19     // Usamos Lerp para que el movimiento del sonido no sea
20     // brusco si el Spline tiene curvas cerradas
21     riverAudio.transform.position = Vector3.Lerp(riverAudio.
22         transform.position, nearestPosWorld, 0.1f);
23 }
24
25 private void UpdateAudioModulation()
26 {
27     // Asegurar que el filtro existe en ejecución si se activa
28     // dinámicamente
29     if (lowPassFilter == null)
30     {
31         lowPassFilter = riverAudio.GetComponent<
32             AudioLowPassFilter>();
33         if (lowPassFilter == null)
34         {
35             lowPassFilter = riverAudio.gameObject.AddComponent<
36                 AudioLowPassFilter>();
37         }
38     }
39
40     // 1. Obtener la dirección desde el jugador hacia el
41     // AudioSource
42     Vector3 playerPos = playerTransform.position;
43     Vector3 soundPos = riverAudio.transform.position;
44
45     Vector3 dirToSound = (soundPos - playerPos);
46     if (dirToSound.sqrMagnitude < 0.001f) return;
47     dirToSound.Normalize();
48
49     // 2. Calcular alineamiento entre la mirada del jugador (cá
50     // mara forward) y la dirección al sonido
51     float dot = Vector3.Dot(playerTransform.forward, dirToSound)
52         ;
53
54     // 3. Mapear producto punto de [-1, 1] a [0, 1]
55     // 1 = mirando directamente al sonido, 0 = mirando de
56     // espaldas
57     float alignment = (dot + 1f) / 2f;
```

```
49
50     // 4. Calcular volumen y frecuencia de corte objetivo
51     float targetVolume = Mathf.Lerp(baseVolume * minVolumeScale,
52                                     baseVolume, alignment);
53     float targetCutoff = Mathf.Lerp(minCutoffFrequency, 22000f,
54                                     alignment);
55
56     // 5. Aplicar suavemente a lo largo del tiempo
57     riverAudio.volume = Mathf.Lerp(riverAudio.volume,
58                                     targetVolume, Time.deltaTime * modulationSmoothness);
59     if (lowPassFilter != null)
60     {
61         lowPassFilter.cutoffFrequency = Mathf.Lerp(lowPassFilter
62                                                       .cutoffFrequency, targetCutoff, Time.deltaTime *
63                                                       modulationSmoothness);
64     }
65 }
```

Como puede observarse en el Listado A.4, el algoritmo combina el cálculo geométrico del punto más cercano sobre la trayectoria del río con una modulación basada en la orientación del usuario. De este modo, la fuente sonora acompaña el recorrido del jugador y adapta su intensidad y filtrado en función de la dirección de la mirada, favoreciendo una percepción auditiva más natural e inmersiva.

B. Herramientas de optimización utilizadas durante el desarrollo

B.1. Renderizado optimizado de vegetación mediante GPU Instancing

El Listado B.1 presenta el núcleo del algoritmo implementado en el script `GPUGrassRenderer.cs`. Su objetivo es generar grandes cantidades de vegetación sin crear miles de objetos individuales en la escena. Para ello, el algoritmo distribuye instancias de pasto sobre el terreno utilizando ruido de Perlin, las agrupa espacialmente en celdas y posteriormente las envía a la GPU mediante renderizado instanciado. Con fines de claridad, se omiten parámetros de configuración y tareas auxiliares de inicialización.

Listing B.1: Fragmento central del algoritmo de renderizado de vegetación mediante GPU Instancing.

```
1 private IEnumerator GenerateMatricesAsync()  
2 {  
3     int addedGrassCount = 0;  
4     int targetGrassCount = totalPoints * grassPerPoint;  
5  
6     Dictionary<Vector2Int, List<Matrix4x4>> grid =  
7         new Dictionary<Vector2Int, List<Matrix4x4>>();  
8  
9     Bounds bounds = terrainCollider.bounds;  
10  
11     int attempts = 0;  
12     int operationsThisFrame = 0;
```

```

13
14     while (addedGrassCount < targetGrassCount &&
15           attempts < totalPoints * 5)
16     {
17         attempts++;
18         operationsThisFrame++;
19
20         Vector3 rayOrigin = new Vector3(
21             Random.Range(bounds.min.x, bounds.max.x),
22             bounds.max.y + 10f,
23             Random.Range(bounds.min.z, bounds.max.z));
24
25         if (Physics.Raycast(rayOrigin, Vector3.down,
26             out RaycastHit hit, Mathf.Infinity))
27         {
28             if (hit.collider != terrainCollider) continue;
29             if (hit.point.y > maxHeight) continue;
30
31             if (!Physics.CheckSphere(hit.point,
32                 avoidanceRadius, obstacleLayers))
33             {
34                 float xCoord =
35                     (hit.point.x + transform.position.x) *
36                     noiseScale;
37
38                 float zCoord =
39                     (hit.point.z + transform.position.z) *
40                     noiseScale;
41
42                 if (Mathf.PerlinNoise(xCoord, zCoord) >
43                     noiseThreshold)
44                 {
45                     for (int g = 0; g < grassPerPoint; g++)
46                     {
47                         Vector2 offset =
48                             Random.insideUnitCircle * clumpRadius;
49
49                         Vector3 position =
50                             hit.point + new Vector3(offset.x, 0,
51                                 offset.y);

```

```
50         position -= hit.normal * rootSink;
51
52         Quaternion rotation =
53             Quaternion.FromToRotation(Vector3.up,
54                 hit.normal) *
55             Quaternion.Euler(0, Random.Range(0, 360)
56                 , 0);
57
58         Vector3 scale =
59             Vector3.one *
60             Random.Range(scaleRange.x, scaleRange.y)
61             ;
62
63         Vector2Int cell =
64             new Vector2Int(
65                 Mathf.FloorToInt(position.x /
66                     cellSize),
67                 Mathf.FloorToInt(position.z /
68                     cellSize));
69
70         if (!grid.ContainsKey(cell))
71             grid[cell] = new List<Matrix4x4>();
72
73         grid[cell].Add(
74             Matrix4x4.TRS(position, rotation, scale)
75             );
76
77         addedGrassCount++;
78     }
79 }
80
81 }
82
83
84     if (operationsThisFrame >= operationsPerFrame)
85     {
86         operationsThisFrame = 0;
87         yield return null;
88     }
89 }
```

```

85     {
86         List<Matrix4x4> grass = cell.Value;
87
88         Vector3 center =
89             new Vector3(
90                 cell.Key.x * cellSize + cellSize * 0.5f,
91                 bounds.center.y,
92                 cell.Key.y * cellSize + cellSize * 0.5f);
93
94         for (int i = 0; i < grass.Count; i += 1023)
95         {
96             int size = Mathf.Min(1023, grass.Count - i);
97
98             Matrix4x4[] batch = new Matrix4x4[size];
99             grass.CopyTo(i, batch, 0, size);
100
101             batches.Add(new GrassBatch
102             {
103                 matrices = batch,
104                 centerPos = center
105             });
106         }
107     }
108 }
109
110 private void Update()
111 {
112     if (batches.Count == 0 || playerCamera == null)
113         return;
114
115     float maxDistSq = maxDrawDistance * maxDrawDistance;
116
117     foreach (var batch in batches)
118     {
119         if ((batch.centerPos - playerCamera.position).sqrMagnitude
120             <= maxDistSq)
121         {
122             Graphics.DrawMeshInstanced(
123                 grassMesh,
124                 0,
125                 grassMaterial,

```

```

125         batch.matrices,
126         batch.matrices.Length);
127     }
128 }
129 }

```

Como se observa en el Listado B.1, la vegetación es distribuida únicamente sobre regiones válidas del terreno utilizando ruido de Perlin para obtener una distribución orgánica. Posteriormente, las instancias se agrupan en bloques espaciales y únicamente aquellos cuya distancia respecto al jugador es inferior al umbral establecido son enviados a la GPU mediante `Graphics.DrawMeshInstanced()`, reduciendo significativamente la cantidad de llamadas de dibujo y la carga de procesamiento de la CPU.

B.2. Automatización de la optimización de texturas

El Listado B.2 presenta el núcleo de la herramienta desarrollada para automatizar la optimización de texturas del proyecto. El algoritmo analiza los recursos gráficos disponibles, clasifica cada textura según su finalidad (interfaz, mapas normales, iluminación o texturas generales) y aplica automáticamente la configuración de importación más adecuada para dispositivos Meta Quest 3. Para facilitar la lectura, se omite la implementación de la interfaz gráfica del editor.

Listing B.2: Algoritmo principal de la herramienta `OptimizeProjectTextures.cs`.

```

1 private void Analyze()
2 {
3     string[] guids = AssetDatabase.FindAssets("t:Texture2D");
4
5     foreach (string guid in guids)
6     {
7         string path = AssetDatabase.GUIDToAssetPath(guid);
8
9         if (path.StartsWith("Packages/") ||
10            path.Contains("/Editor/") ||
11            path.Contains("/Resources/"))
12             continue;
13
14         TextureImporter importer =

```

```
15         AssetImporter.GetAtPath(path) as TextureImporter;
16
17         if (importer == null)
18             continue;
19
20         allTextures.Add(new TextureInfo
21         {
22             path = path,
23             importer = importer,
24             category = ClassifyTexture(importer, path)
25         });
26     }
27 }
28
29 private void OptimizeAll()
30 {
31     AssetDatabase.StartAssetEditing();
32
33     foreach (var texture in allTextures)
34     {
35         ApplyOptimization(texture);
36     }
37
38     AssetDatabase.StopAssetEditing();
39     AssetDatabase.Refresh();
40 }
41
42 private bool ApplyOptimization(TextureInfo info)
43 {
44     TextureImporter importer = info.importer;
45
46     importer.mipmapEnabled =
47         info.category != TextureCategory.UISprite;
48
49     TextureImporterPlatformSettings android =
50         importer.GetPlatformTextureSettings("Android");
51
52     android.overridden = true;
53
54     switch (info.category)
55     {
```

```
56         case TextureCategory.UISprite:
57             android.format = TextureImporterFormat.ASTC_8x8;
58             break;
59
60         case TextureCategory.NormalMap:
61             android.format = TextureImporterFormat.ASTC_6x6;
62             break;
63
64         case TextureCategory.Lightmap:
65             android.format = TextureImporterFormat.ASTC_6x6;
66             break;
67
68         default:
69             android.format = TextureImporterFormat.ASTC_8x8;
70             break;
71     }
72
73     importer.SetPlatformTextureSettings(android);
74
75     EditorUtility.SetDirty(importer);
76     AssetDatabase.WriteImportSettingsIfDirty(info.path);
77
78     return true;
79 }
```

Como se aprecia en el Listado B.2, el algoritmo recorre automáticamente todas las texturas del proyecto, determina su categoría y configura parámetros específicos de importación para Android, incluyendo el formato de compresión ASTC y la activación o desactivación de *MipMaps*. Este proceso permitió estandarizar la optimización de recursos gráficos y reducir significativamente el tiempo requerido para preparar nuevas escenas del proyecto.