



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**Facultad de Ingeniería
y Ciencias**

Ingeniería Biomédica

MONOGRAFÍA DE TRABAJO DE GRADO

Uso de realidad virtual en fisioterapia de paciente
cuadriplejico: estudio de caso

Angela Maria Aguilar Perea

Director

Ing. Juan Camilo Vergara Gil

30 de enero de 2026

Santiago de Cali, 30 de enero de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Mateo López Victoria
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “Uso de realidad virtual en fisioterapia de paciente cuadriplejico: estudio de caso”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Angela Maria Aguilar Perea', written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the right.

Angela Maria Aguilar Perea

Santiago de Cali, 30 de enero de 2026

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Mateo López Victoria

Decano

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certifico que el presente Trabajo de Grado titulado “Uso de realidad virtual en fisioterapia de paciente cuadriplejico: estudio de caso”, realizado por Angela Maria Aguilar Perea, estudiante de Ingeniería Biomédica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,

Ing. Juan Camilo Vergara Gil

Director Trabajo de Grado

Agradecimientos

Dedico especialmente este trabajo de grado a mi tío, Nerere Zokoto, por ser mi inspiración principal para realizarlo. La fuerza y alegría que siempre te representaron fueron el elefante que lideró la manada de mis pensamientos. Que Yewá siempre esté contigo. A mi madre, agradezco cada uno de sus esfuerzos para formarme profesional e integralmente; es maravilloso vivir en el mundo sabiendo que eres mi madre.

Agradezco a mi pareja por acompañarme durante las noches en vela de escritura; a pesar de las tinieblas. A mi hermano por ayudarme a mantener el foco en mi meta. A mis amigos, por cada abrazo que reconfortó mi espíritu.

Finalmente, expreso mi máxima gratitud a mi director de tesis por su apoyo y paciencia incondicionales, que junto con los demás docentes aportaron significativamente a mi crecimiento profesional, siendo fundamental para culminar este trabajo.

Glosario

Acrónimos y Abreviaturas

<i>RV</i>	Realidad Virtual
<i>MIP</i>	Procedimientos de Inducción del Estado de Animo (<i>Mood Induction Procedures</i>)
<i>DNC</i>	Dolor neuropático crónico de origen central
<i>LME</i>	Lesiones de la médula espinal
<i>NRS</i>	Escala numerica de clasificación del dolor (<i>Numeric Rate Pain Scale</i>)
<i>AVD</i>	Actividades de la vida diaria

Términos

<i>C#</i>	Un lenguaje de programación utilizado especialmente para el desarrollo de videojuegos en el motor Unity
-----------	---

Resumen

El dolor neuropático crónico afecta al (42-60) % de pacientes con lesiones medulares, representando la principal causa de abandono de fisioterapia. La realidad virtual emerge como estrategia no farmacológica prometedora para el manejo del dolor mediante distracción cognitiva e inmersión multisensorial. Este proyecto desarrolló e implementó un prototipo de realidad virtual inmersiva personalizada para reducir la percepción del dolor durante sesiones de fisioterapia en un paciente cuadripléjico con dolor neuropático crónico. La metodología incluyó: caracterización exhaustiva de necesidades mediante entrevistas semiestructuradas al participante y al fisioterapeuta tratante; diseño e implementación de un escenario virtual basado en las características naturales del Lago Calima con avatar en primera persona, música de salsa romántica personalizada, y sistema de waypoints contextual, desarrollado en Unity 2022.3 y optimizado para Meta Quest 3S; y evaluación pre-experimental usando la escala de clasificación numérica del dolor. Los resultados demostraron una reducción promedio del 24,1 % en la percepción del dolor durante las sesiones con la implementación de realidad virtual comparado con el dolor basal convencional. El participante reportó mayor tolerancia a los ejercicios y no presentó efectos adversos como cinetosis. Este estudio establece un precedente metodológico para la implementación de realidad virtual personalizada en tratamientos terapéuticos en Colombia, contribuyendo al desarrollo de tecnologías de asistencia para poblaciones vulnerables con discapacidades motoras.

Palabras Clave: Realidad virtual, dolor neuropático central, lesiones de la medular espinal, cuadriplejia, fisioterapia, distracción cognitiva, tecnología de asistencia.

Abstract

Chronic neuropathic pain affects 42-60% of patients with spinal cord injuries, representing the main cause of abandonment of physiotherapy. Virtual reality emerges as a promising non-pharmacological strategy for pain management through cognitive distraction and multi-sensory immersion. This project developed and implemented a personalized immersive virtual reality prototype to reduce pain perception during physical therapy sessions in a quadriplegic patient with chronic neuropathic pain. The methodology included: exhaustive characterization of needs through semi-structured interviews with the participant and the treating physiotherapist; design and implementation of a virtual scenario based on the natural characteristics of Lake Calima with a first-person avatar, personalized romantic salsa music, and contextual waypoint system, developed in Unity 2022.3 and optimized for Meta Quest 3S; and pre-experimental evaluation using the numerical pain rating scale. The results demonstrated an average reduction of 24.1% in pain perception during sessions with virtual reality implementation compared to conventional baseline pain. The participant reported greater tolerance to the exercises and did not present adverse effects such as motion sickness. This study establishes a methodological precedent for the implementation of personalized virtual reality in treatments in Colombia, contributing to the development of assistive technologies for vulnerable populations with motor disabilities.

Keywords: Virtual reality, central neuropathic pain, spinal cord injuries, quadriplegia, physical therapy, cognitive distraction, assistive technology.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo General	11
4.2. Objetivos Específicos	11
5. Marco de Referencia	13
5.1. Áreas Temáticas	13
5.2. Marco Teórico	13
5.2.1. Marco Ético Legal	17
5.3. Trabajos Relacionados	18
6. Materiales y Métodos	21
6.0.1. Tipo de estudio	21
6.0.2. Actividades	22
6.0.3. Materiales	23
7. Resultados y Discusión	25
7.1. Identificación de las necesidades específicas de paciente con cuadriplejia con presencia de dolor neuropático para personalización de RV	25
7.1.1. Búsqueda sistemática y análisis de crítico de los artículos	25
7.1.2. Realización de entrevistas semiestructuras a sujetos de interés	29
7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente.	35
7.2.1. Requisitos del entorno derivados de la caracterización y selección cuantitativa del diseño	35
7.2.2. Diseño del escenario inmersivo de RV incorporando elementos visuales, sonoros e interactivos personalizados al paciente.	38
7.3. Evaluación de la efectividad del entorno virtual mediante un estudio pre-experimental al paciente usando la escala de NRS.	53
7.3.1. Diseño de protocolo de evaluación y encuestas de percepción a sujetos de interés	53
7.3.2. Implementación y evaluación del entorno virtual mediante el uso de encuestas de percepción.	56

7.3.3. Documentación y análisis de las mediciones de dolor obtenidas	57
8. Conclusiones	61
9. Trabajos futuros	63
10. Anexos	65
Anexos	65
Anexo 1 – Entrevistas a sujetos de interés	67
Anexo 2 – Encuesta perceptual de utilidad a fisioterapeuta tratante	71
Anexo 3 – Fotografías de sesiones con el paciente	73
Anexo 4 – Scripts completos utilizados en el proyecto	75
Bibliografía	77

Índice de figuras

7.1. Diagrama de cajas negras de las mecánicas de interacción	39
7.2. Elementos dañados dentro de la escena	41
7.3. Funcionamiento del ciclo Awake	42
7.4. Flujo de procesamiento de sistema controlador de movimiento en el recorrido	44
7.5. Flujo de mecánica en primera persona.	46
7.6. Flujo de inicialización del script VRintroManager	48
7.7. Flujo de ciclo actualizador del script VRintroManager	49
7.8. Jerarquía de objetos en Unity	50
7.9. Bienvenida al entorno virtual como parte del ciclo de VRintroManager.cs	52
7.10. Elementos visuales y carteles dentro del recorrido guiado del entorno virtual	52
7.11. Elementos visuales de recorrido guiado	53
10.1. Implementación del escenario virtual con el participante.	73
10.2. Implementación del escenario virtual con el participante.	73

Índice de cuadros

7.1. Niveles de dolor reportados por P1 según momento del día	31
7.2. Análisis de características musicales de la salsa romántica	33
7.3. Matriz de selección para alternativa de entorno	37
7.4. Métodos públicos principales de PathControllerV2	43
7.5. Encuesta de percepción al paciente adaptando la escala NRS	54
7.6. Resultados preliminares obtenidos en las sesiones	57

Introducción

A nivel mundial, se ha emitido una alerta sobre el desafío inminente que representa la lucha contra el dolor crónico, considerado un problema complejo y multidimensional de salud pública que afecta significativamente la calidad de vida de millones de personas. Colombia no es ajena a esta realidad: un número creciente de individuos experimenta condiciones que generan sufrimiento persistente y discapacidad. Entre estas afecciones se destacan las enfermedades neurológicas y las lesiones medulares, las cuales interrumpen los mecanismos neurales normales y originan una condición particular conocida como **dolor neuropático central (DNC)**. Este tipo de dolor, común en pacientes con discapacidades motrices como cuadriplejía o paraplejía [1], se caracteriza por su resistencia a los tratamientos convencionales y su impacto negativo en la calidad de vida.

En el contexto colombiano, estudios epidemiológicos recientes estiman que entre el 20 % y el 40 % de las personas con lesiones medulares padecen DNC, lo que constituye un reto para la medicina actual, que aún desconoce por completo los mecanismos fisiopatológicos implicados y enfrenta la limitada efectividad de los métodos tradicionales de manejo. [2, 3]

Entre estos métodos se encuentra la fisioterapia, reconocida por su acción estimulante sobre los nervios que conducen a mejorar las funciones sensoriales y musculoesqueléticas. Sin embargo, la realización de esta terapia implica un esfuerzo físico y mental considerable para los pacientes, ya que suele generar dolor durante y después de las sesiones, prolongándose incluso por horas. Esta situación incrementa la tasa de deserción en los tratamientos, agravando el problema y generando un impacto socioeconómico y sanitario relevante que se calcula en aproximadamente 2.000 nuevos casos por año en el país.

Ante este panorama, surge la necesidad de incorporar nuevas tecnologías que respondan a las urgencias de las poblaciones más vulnerables. En este sentido, la RV se presenta como una alternativa innovadora, capaz de ofrecer entornos inmersivos que reducen la percepción del dolor mediante estimulación sensorial y cognitiva.

La RV ha emergido en el campo médico como una técnica no invasiva para el manejo del dolor, aprovechando su capacidad para redirigir la atención del paciente hacia estímulos agradables y absorbentes. Esta tecnología resulta especialmente prometedora en el tratamiento de pacientes con LME, al actuar como herramienta de apoyo que complementa las intervenciones físicas y contribuye a mejorar la experiencia terapéutica.[4, 5]

El presente proyecto explora la aplicación de la realidad virtual como estrategia para aliviar el dolor durante las sesiones de fisioterapia de un paciente cuadripléjico, con el objetivo de mejorar su bienestar y calidad de vida. Se analizarán los fundamentos teóricos y los mecanismos por los cuales la RV influye en la percepción del dolor, así como la evidencia clínica y experimental que respalda su efectividad. La metodología empleada para este proyecto corresponde a un estudio de

caso pre-experimental de tipo preprueba/posprueba. Este diseño establece un punto de referencia inicial en el que se observa qué nivel tenía el individuo antes del estímulo, en este contexto la RV; después se le administra el tratamiento bajo uso del estímulo y finalmente se le aplica una prueba posterior; de esta manera se obtiene un seguimiento de la evolución del sujeto. [6] Como base y prueba de medición de la percepción del dolor se utilizó un formato adaptado en la escala numérica de clasificación de dolor (NRS). [7]

Como resultado, se desarrolló un entorno virtual en forma de software, utilizando la plataforma Unity, el cual se personalizó en base a las características y necesidades del paciente en particular mediante una extensa revisión bibliográfica y realización de entrevistas semiestructuradas a los sujetos de interés del proyecto, como el paciente y fisioterapeuta. Este proyecto se enfocó en evaluar el potencial transformador de la RV en el manejo del dolor y en la mejora de la calidad de vida de pacientes con discapacidades motrices.

Este documento se distribuye de la siguiente manera: planteamiento del problema en el capítulo 2; la justificación en el capítulo 3; los objetivos en el capítulo 4; el marco de referencia en el capítulo 5, los materiales y métodos en el capítulo 6; los resultados y discusión en capítulo 7; las conclusiones en el capítulo 8; los trabajos futuros en el capítulo 9; y finalmente en el capítulo 10 se incluyen los anexos y la bibliografía.

Planteamiento del Problema

Según la Organización Mundial de la Salud, la discapacidad motriz se define como la alteración, secuela o malformación derivada de una afección en el sistema neuromuscular a nivel central o periférico, dando como resultado limitaciones en la capacidad y control de los movimientos; funciones como el desplazamiento, manipulación, la postura o la respiración se ven alterados debido a problemas en los músculos, nervios, o la comunicación entre los anteriores. [8] Dentro de estas discapacidades motrices se encuentra la cuadriplejía, esta es una condición que involucra una rigidez severa o parcial en las extremidades superiores, inferiores y el torso [9]; Esta condición se origina principalmente por lesiones medulares, las cuales se definen como afecciones en la médula espinal que interrumpen la comunicación entre el cerebro y diversas partes del cuerpo. Frecuentemente las lesiones medulares son causadas por situaciones prevenibles como accidentes automovilísticos, actos violentos y caídas. De acuerdo con el estudio epidemiológico sobre lesiones medulares realizado por la Universidad del Valle, entre el año 2009 a 2012 Colombia registró una incidencia de 56.27 casos nuevos por millón de habitantes, mientras que en Cali específicamente se documentaron 27.78 casos por millón de habitantes. En este contexto, la violencia interpersonal se destaca como la causa principal, representando el 47.25 % de los casos, seguida por caídas y otras condiciones como enfermedades autoinmunes que comprometen el sistema nervioso central. Las estadísticas indican que 1 de cada 40 pacientes que ingresan a las salas de emergencia en Colombia lo hace debido a lesiones medulares traumáticas, lo que resulta más preocupante aún es que las personas con discapacidades causadas por lesiones medulares presentan una tasa de mortalidad 2.5 veces mayor en comparación con la población general. [10]

Existen diversos factores que afectan la calidad de vida de los pacientes con lesiones medulares, desde aspectos psicosociales como ansiedad o depresión hasta complicaciones físicas con efectos multisistémicos [11]. Sin embargo, entre el 42 % y 60 % de las personas con lesiones medulares identifican el dolor como su principal problema y factor determinante en el deterioro de su bienestar. Asimismo, el Doctor Salinas, en su artículo "Dolor en la persona con lesión medular" publicado en la Revista Colombiana de Medicina Física y Rehabilitación, señala: "El dolor puede afectar entre el 60 % y 68 % de las personas luego de una lesión medular", a su vez explica que esta complicación puede tener orígenes musculoesqueléticos, viscerales o neuropáticos, que impactan considerablemente en el funcionamiento diario de quienes la padecen [12].

Dentro de esta última clasificación, el dolor crónico neuropático destaca; también llamado *Dolor neuropático de origen central*, que se presenta solo en pacientes con lesiones medulares y es descrito como una sensación aguda, punzante y ardiente; este dolor es el más debilitante ya que se presenta de manera espontánea, con incrementos y descensos del dolor, además puede aparecer como res-

puesta estímulos inocuos. Hasta la fecha los mecanismos fisiopatológicos implicados en el desarrollo de este dolor siguen siendo un misterio, explica el Profesor Radi Masri en su artículo “*Chronic pain following spinal cord injury*” [13].

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, el dolor en el lesionado medular adquiere importancia, porque además de interferir en su proceso de rehabilitación, lo hace en sus actividades diarias, su estado anímico y por consiguiente en su calidad de vida.

Los métodos convencionales para el manejo de este dolor en pacientes con lesiones medulares incluyen principalmente los tratamientos farmacológicos y la fisioterapia, siendo esta última considerada como la primera línea de tratamiento recomendada; debido a su efectividad para estimular las funciones sensoriales de los nervios, reducir la severidad del dolor y mejorar significativamente la condición física y mental de los pacientes [14]. Sin embargo, se reporta que el dolor neuropático crónico persiste a pesar del tratamiento impartido en aproximadamente el 61 % de los pacientes con lesión medular [15], representando uno de los síntomas más desafiantes en su rehabilitación. La complejidad de esta situación se incrementa debido a que la mayoría de estos pacientes presentan diagnósticos que alteran su funcionamiento musculoesquelético normal. Un ejemplo significativo es la espasticidad, condición que afecta el tono muscular normal haciendo que los músculos se contraigan excesivamente. Entre 65 % y 78 % de los pacientes con lesiones medulares tienen síntomas de espasticidad [16]. Si bien la fisioterapia busca contrarrestar esta condición, implica la realización de ejercicios que llevan al límite las capacidades físicas de los pacientes ocasionando dolor e incomodidad, con el propósito de reducir la espasticidad y otras alteraciones asociadas.[17]

Actualmente en Colombia no existen estudios que evalúen la deserción de estos pacientes en el tratamiento fisioterapéutico; sin embargo, de acuerdo con Roshan et al. [4] la tasa de abandono del tratamiento fisioterapéutico documentada oscila entre el 30 % y 60 %, principalmente debido a los efectos adversos experimentados durante y después de las sesiones, como son dolor agudo, enrojecimiento e hinchazón muscular, síntomas que pueden llegar a persistir durante horas o días. Además de esto, el 65 % de los pacientes que abandonan la fisioterapia citan el dolor postratamiento como la razón principal de su deserción, mientras que el resto menciona una combinación de dolor e inconvenientes logísticos y sus estados de ánimos como estrés o aburrimiento. Al ser la fisioterapia primera línea de acción posterior a las LME, que los pacientes generen rechazo hacia ella dificulta su evolución y los conduce a un estilo de vida sedentario donde problemas como: el aumento de la espasticidad, úlceras por presión, atrofia muscular, problemas respiratorios y disfunción del intestino y vejiga incrementan debido a la falta de movilidad. [4]

En síntesis, la especialidad que busca reducir el dolor neuropático, además de otras afecciones para estos pacientes se convierte a su vez en una causa más de dolor e incomodidad. Es bajo este contexto que surge la pregunta sobre: ¿cómo mejorar la experiencia durante las sesiones de fisioterapia para los pacientes cuadripléjicos?. Así las cosas, en cuestión a la solución del problema del dolor en lesionados medulares, se espera que de manera paulatina se desarrolle la tecnología necesaria para la intervención del dolor; y mientras esto sucede: ¿cómo se enfrentan y protegen estos pacientes ante este dolor constante y demás afecciones que deterioran su calidad de vida y su estabilidad tanto

física como mental?

Es importante destacar que uno de los retos de la salud a nivel mundial, es mejorar la calidad de vida de las personas en condición de discapacidad, aún más en países como Colombia donde su tejido social se encuentra deteriorado en materia de inclusión. Por lo tanto la investigación e innovación de tecnologías, métodos y técnicas que permitan la conexión y comodidad durante su rehabilitación determinan un avance clave para esta población olvidada que día a día crece más.

Justificación

La cuadriplejia, es una condición debilitante que es causada por lesiones en la médula espinal, esta trae consigo limitaciones físicas, psicológicas y sociales a quienes la padecen. La mayoría de los pacientes con LME sufren un dolor crónico insoportable, implacable y que en gran medida se resiste al tratamiento, conocido como dolor neuropático. Esta complicación afecta a un gran porcentaje de los pacientes. A pesar de los recientes avances en la investigación clínica, los mecanismos fisiopatológicos del DNC siguen siendo desconocidos [9]. Suponiendo un reto debido a varias razones: el pronóstico a largo plazo aún se encuentra inexplorado, esta condición suele empeorar con el tiempo y aumenta la discapacidad, reduciendo así las posibilidades de conseguir un control adecuado del mismo. [18] Tradicionalmente, las primeras opciones de tratamiento para pacientes que sufren DNC se limitan a tratamientos farmacológicos, se han utilizado anti-inflamatorios no esteroideos, opioides, antidepresivos, etc. Sin embargo, estos medicamentos rara vez son consistentemente efectivos y nunca se han establecido protocolos de tratamiento que produzcan un alivio completo y prolongado [13] [19]. Adicionalmente, los medicamentos con mayor evidencia de mejora en el manejo del DNC son aquellos con más efectos secundarios, tal como los opioides de quienes se registran altos índices de dependencia, por este motivo se usan bajo un contexto de terapia multimodal y multidisciplinaria, particularmente en compañía con la fisioterapia [20]

Como punto de abordaje del problema, durante las primeras etapas de rehabilitación posterior al trauma, los fisioterapeutas trabajan para mantener y fortalecer la función muscular y volver a desarrollar parte de su motricidad fina. Principalmente, el enfoque multifacético tiene como propósito enseñar a los pacientes maneras de adaptarse y realizar sus actividades cotidianas; Incluyendo herramientas y ejercicios personalizados como la técnica "*Brunnström*." o "*Kabat*", las cuales utilizan los patrones de movimiento involuntarios para recuperar gradualmente el movimiento voluntario o patrones de movimientos complejos y resistidos que fortalecen la musculatura, coordinación y equilibrio del paciente; ambas técnicas se enfocan en estimular el sistema nervioso con el propósito de recuperar la independencia del paciente. [18].

No obstante, el camino de la rehabilitación fisioterapéutica está cargado de desafíos que van más allá de la gravedad de la lesión inicial. El dolor durante y después de las intervenciones representa una limitante difícil de abordar en pacientes con alteraciones neurológicas, debido a que en muchas patologías el dolor se incrementa con la actividad física. En el caso específico de pacientes cuadripléjicos, el dolor neuropático puede ser especialmente intenso durante los ejercicios, manifestándose como sensaciones de quemazón, hormigueo o descargas eléctricas que se incrementan con el movimiento. Esta experiencia dolorosa resulta tan agobiante que muchos pacientes optan por abandonar el proceso de rehabilitación, afectando significativamente su recuperación funcional y adherencia al

tratamiento fisioterapéutico. [21]

Ante este desafío, surge la necesidad de explorar nuevas formas de ejecución que permitan mejorar la calidad de vida de estas personas; brindando a los fisioterapeutas herramientas efectivas y accesibles que sirvan de apoyo para complementar el manejo del dolor y la promoción de la rehabilitación. En este contexto se justifica plenamente el diseño e implementación de un prototipo de una experiencia de realidad virtual que haga uso de una narrativa inmersiva personalizada en un paciente en condición de cuadriplejía.

En relación con el contexto anterior, la elección de la realidad virtual como herramienta terapéutica se sustenta en investigaciones recientes que demuestran su efectividad en el manejo del dolor. Según Gupta et al. [22], la RV ha emergido como una herramienta prometedora para el alivio del dolor, capaz de desviar la atención del dolor físico hacia experiencias sensoriales placenteras. Esta capacidad se fundamenta en el principio de distracción cognitiva, extensamente estudiado por Johnson et al., quien indica que: *“participar en pensamientos o actividades que distraen la atención del dolor es una de las estrategias más utilizadas y más respaldadas para controlar el dolor. El proceso de distracción parece implicar una competencia por la atención entre una sensación muy destacada (dolor) y una atención dirigida conscientemente a alguna otra actividad de procesamiento de información.”* [23]. Con esto se refiere a que en el momento en el cual se está procesando el dolor si se tienen pensamientos o se realizan actividades que distraigan la atención del dolor, este disminuirá considerablemente. Esto se debe a que las señales que son enviadas al cerebro cuando se está concentrado o distraído bloquean las señales emitidas por el dolor; es entonces que la efectividad de esta distracción se basa en la capacidad limitada de atención del cerebro, donde las señales generadas durante estados de concentración o distracción pueden bloquear eficazmente las señales de dolor. [24]

Por otra parte, la implementación de una narrativa inmersiva personalizada en el prototipo se justifica por la necesidad de adaptar la experiencia a las características individuales del paciente. Esta personalización es crucial considerando que la efectividad de la distracción varía según factores individuales como los gustos y temas de interés, el estado de ánimo, la propensión a la ansiedad y la cronicidad del dolor [24]. La personalización del sistema permitirá ajustar la experiencia según las necesidades específicas y limitaciones motrices de cada paciente, maximizando así su potencial terapéutico.

Finalmente, se espera que el desarrollo de este entorno virtual beneficie como usuarios directos a los pacientes disminuyendo las sensaciones dolorosas que enfrentan en cada sesión, además, impactando de manera positiva su perspectiva ante la rehabilitación. Como segundo, los usuarios, este prototipo como tecnología de apoyo a la rehabilitación mejoraría las intervenciones de los fisioterapeutas, en materia de la frecuencia, presión y duración de los ejercicios, potenciando así su utilidad clínica en la calidad de vida de los pacientes.

El impacto potencial de esta investigación se extiende más allá de los beneficios directos al participante del estudio, alineándose con las recomendaciones dadas por la OMS en 2022 [5], la cual informa sobre la considerable desigualdad en el acceso a las tecnología de apoyo para los países menos desarrollados y subraya que es de carácter prioritario aumentar la sensibilización pública,

fomentar la investigación e innovación en este campo para crear entornos propicios y adecuados que beneficien a todas las personas en situación de discapacidad. Esta alineación con directrices internacionales refuerza la relevancia y pertinencia del proyecto en el contexto global de la salud y la rehabilitación.

Objetivos

4.1. Objetivo General

Implementar la tecnología de realidad virtual para reducir la percepción del dolor de un paciente cuadripléjico durante las sesiones de fisioterapia.

4.2. Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades específicas de un paciente con cuadriplejia con presencia de dolor neuropático para el uso personalizado de la realidad virtual.
- Diseñar un escenario inmersivo de realidad virtual de interacción pasiva que incorpore elementos de interfaz visuales y retroalimentación sonora con base a las preferencias de distracción identificadas en el paciente cuadripléjico participante de la investigación.
- Evaluar la efectividad del prototipo mediante un estudio pre-experimental perceptual al paciente usando la escala de clasificación numérica de dolor.

Marco de Referencia

5.1. Áreas Temáticas

A continuación se enlistan las áreas temáticas de importancia para el desarrollo de este proyecto, reflejando el carácter multidisciplinar del mismo, y que han sido referenciadas según la taxonomía IEEE

- Biomedical engineering - Rehabilitation engineering - Assistive technologies
- Engineering in medicine and biology - Biomedical computing
- Engineering in medicine and biology - Medical conditions - People with disabilities
- Electronic design automation and methodology - Graphics - Virtual Reality
- Computers and information processing - Computer graphics
- Systems, man, and cybernetics - Human computer interaction
- Systems, man, and cybernetics - Psychology - Mood

5.2. Marco Teórico

5.2.0.1. Lesiones de la medula espinal (LME)

Condiciones médicas complejas que resultan del daño o seccionamiento de médula espinal, a menudo debido a traumatismos como accidentes automovilísticos y caídas, así como a causas no traumáticas como enfermedades neurodegenerativas de alta malignidad. Estas lesiones tienen un índice de morbilidad significativo y a menudo resultan en una discapacidad permanente.

Los mecanismos patológicos se dividen en primarios y secundarios. La lesión primaria es el daño directo e irreversible a la médula espinal, mientras que la lesión secundaria es causada por cambios como la inflamación. La interrupción del axón nervioso provoca la pérdida de función motora y sensorial por debajo del nivel de la lesión. El diagnóstico se realiza mediante examen clínico y estudios de imagen. Los tratamientos incluyen métodos conservadores, quirúrgicos, de rehabilitación o una combinación de estos, y se están investigando nuevas intervenciones como la terapia con células madre. [1]

- La **cuadriplejia** se refiere a la parálisis parcial o completa de las cuatro extremidades y el torso. Este traumatismo se genera en la médula espinal cervical a nivel de las vértebras C1 a C7 causando la pérdida de las funciones de las extremidades superiores, así como la mayor parte de la musculatura de soporte postural de la espalda. [25]
- Los **traumas raquimedulares** son todas las lesiones traumáticas que afectan las estructuras óseas, ligamentosas, cartilaginosas y, crucialmente, medulares [?]. Esta lesión **a nivel C5-C6** implica un daño a la médula espinal a la altura de los segmentos cervicales 5 y 6; la fuerza, sensibilidad y funcionalidad de la musculatura por debajo de este nivel estarán alteradas o ausentes, con un impacto directo en la funcionalidad de las manos y el tronco. [26]
- Se define como **hipotonía** a la disminución del tono muscular o la resistencia al movimiento pasivo de una articulación. Es un síntoma neurológico que indica una disfunción en el arco reflejo, que puede originarse en el sistema nervioso central, el nervio periférico, la unión neuromuscular o el músculo mismo; una LME aguda puede producir una fase de shock medular caracterizada por hipotonía flácida por debajo del nivel de la lesión. [27]
- Según Bennett et al. [19], el **dolor neuropático crónico (DNC)**, especialmente de origen central, es una condición que surge en pacientes con LME se puede clasificar en tres categorías según la ubicación del dolor en relación con la lesión espinal: el primer, dolor por debajo del nivel de la lesión, que es difuso y se encuentra en áreas con interrupción sensitiva por debajo de la lesión; el segundo, dolor a nivel de la lesión, ubicado en el límite de la inervación sensorial normal y distribuido en una banda de 2 a 4 segmentos alrededor del nivel de la lesión; y por último dolor por encima del nivel de la lesión, en regiones con entradas sensoriales preservadas.

Generalmente, este dolor es resistente a los tratamientos farmacológicos convencionales, y los mecanismos fisiopatológicos detrás de su desarrollo aún no se comprenden completamente, lo que hace que los tratamientos eficaces sean escasos. Por ello, las investigaciones médicas han centrado su investigación crucial en estudiar los mecanismos patológicos del dolor y desarrollar tratamientos que reflejen las características clínicas de esta condición y permitan mejorar la calidad de vida de los pacientes que la padecen. [20]

- La **Clasificación de la Lesión Medular según la American Spinal Injury Association (ASIA)**, *por sus siglas en inglés*, es el estándar internacional para documentar el nivel y la extensión de la lesión. Se basa en la evaluación de la función motora y sensitiva; asimismo describe el grado de deterioro neurológico; comienza en el nivel A, que significa un nivel de lesión completa, y termina en el nivel E, que se describe como una función muscular normal. [28]
 - **Clasificación ASIA C:** Corresponde a una lesión incompleta donde existe alguna función sensitiva o motora preservada en los segmentos sacros S4-S5, sin embargo, más de la mitad de los músculos clave que se encuentran por debajo del nivel de la lesión tienen fuerza muscular menor a 3. El grado 3 significa que los músculos pueden moverse en contra de la gravedad, pero no cuando se les opone resistencia. Un balance de fuerza inferior

a 3 (0, 1 o 2) implica que el músculo tiene movimiento limitado o nulo y no puede vencer la gravedad. [28]

5.2.0.2. Rehabilitación

La OMS define el término rehabilitación como «un conjunto de intervenciones encaminadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud en la interacción con su entorno» [29]. En el ámbito de las LME, el objetivo principal es maximizar la independencia funcional y la calidad de vida del paciente utilizando un enfoque interdisciplinario para abarcar integralmente las distintas problemáticas de este padecimiento.

- Las **tecnologías de rehabilitación** actúan como extensiones personalizadas que ayudan a las personas a recuperar o mejorar sus funciones después de una lesión o una enfermedad. En el ámbito de la rehabilitación, estas tecnologías se han introducido como asistencia a las discapacidades y para mejorar la adherencia a las terapias, permitiendo a las personas superar barreras funcionales y participar plenamente en los diferentes espacios sociales, educativos y laborales. [5, 30]

5.2.0.3. Fisioterapia

Es la disciplina fundamental de la rehabilitación; tiene la finalidad de promover, desarrollar, mantener, prevenir y recuperar al máximo posible la función física del paciente a través del ejercicio terapéutico, la terapia manual y agentes físicos. Se estipula que el trabajo del fisioterapeuta debe centrarse en proveer servicios según las circunstancias particulares del paciente, como su capacidad de movimiento, las lesiones, enfermedades, factores ambientales y la amenaza de envejecimiento y deterioro muscular.

La fisioterapia posee la función de diagnosticar y gerenciar las disfunciones del movimiento, por lo tanto, en pacientes con LME, busca fortalecer la musculatura indemne, prevenir contracturas, mejorar el control postural y optimizar la movilidad funcional de los miembros residuales. En la práctica, se recomienda también a los profesionales desarrollar actividades para restaurar, mantener y promover no solo la función física óptima, sino también el bienestar y la calidad de vida óptima. Estos abordajes delimitan el espacio de acción de los profesionales y enmarcan el sentido de esta disciplina.[31]

- La **neuroplasticidad** es la capacidad intrínseca del sistema nervioso de modificar su organización estructural y funcional en respuesta a estímulos ambientales, lesiones o la experiencia. Este mecanismo es el pilar biológico que sustenta la recuperación de la función motora tras una LME, permitiendo que las neuronas compensen las lesiones reorganizando sus conexiones sinápticas. La rehabilitación, especialmente la intensiva y dirigida por tareas, busca activamente inducir cambios beneficiosos aplicados a este mecanismo. Bajo el mismo concepto, Melzack y Wall propusieron la teoría de la compuerta del dolor, la cual explica cómo los estímulos no dolorosos pueden modular la percepción del dolor.[32, 27]

5.2.0.4. Modelos de clasificación del dolor para la identificación en personas

Herramientas de clasificación jerárquicas que buscan categorizar las experiencias dolorosas para orientar el diagnóstico y el tratamiento. Estos modelos le permiten al personal clínico identificar, cuantificar y clasificar el dolor en un paciente. [33]

- La **escala de clasificación numérica (NRS)** es una herramienta para evaluar el dolor que se realiza mediante una escala numérica del 0 al 10, donde 0 representa “ningún dolor” y 10 como “ el peor dolor posible”. Esta es una versión modificada de la escala analógica visual, entre sus ventajas se encuentra que se puede aplicar de forma oral o escrita y se considera una medida válida, confiable y simple. [34]
- El **cuestionario del dolor de McGill** se enfoca en describir y reconocer que el dolor es una experiencia subjetiva y compleja que va más allá de la sensación física; se evalúa el dolor bajo 3 dominios; (1) sensorial, donde se identifica sensación física del dolor, incluyendo características como la intensidad, localización y cualidad del dolor; (2) afectivo, se evalúa la respuesta emocional al dolor; (3) evaluativo, el cual describe la gravedad del dolor. A través de descriptores de palabras agrupados en las categorías evalúa el dolor del paciente, permitiendo así cuantificar el dolor de manera cualitativa y cuantitativa. [35]

5.2.0.5. Realidad virtual

De acuerdo con Lowood [36], la realidad virtual (RV) es el uso de modelado y simulación por computadora que permite a una persona interactuar con un entorno artificial tridimensional (3D) visual u otros sensoriales. La RV sumerge al usuario en un entorno generado por computadora que simula la realidad implementando dispositivos de hardware interactivos. En un formato típico de RV, el usuario lleva un casco con una pantalla estereoscópica que muestra imágenes animadas de un entorno simulado. La sensación de presencia se logra mediante sensores de movimiento que detectan los movimientos del usuario y ajustan la vista en la pantalla, en consecuencia, generalmente en el momento en que ocurre el movimiento del usuario.

- **Inmersión sensorial**: son las propiedades técnicas objetivas del sistema de RV, por ejemplo, el campo de visión amplio, alta tasa de refresco, sonido espacializado que contribuyen a la fidelidad sensorial del entorno virtual. Un alto grado de inmersión sensorial es un requisito para que el usuario experimente la sensación de estar dentro del escenario. [37]
- **Interacción pasiva**: experiencia que se caracteriza porque el usuario actúa principalmente como un observador, recibiendo estímulos visuales y auditivos sin afectar significativamente ni interactuar activamente con el entorno virtual. En el contexto de la rehabilitación, se consolida como la visualización de movimiento sin una ejecución motora activa total o parcial por parte del paciente. [37]
- La **narrativa inmersiva** es una técnica implementada en tecnologías como la RV y la realidad aumentada para desarrollar entornos virtuales envolventes que tienen el objetivo de sustituir

la realidad, y con la cual es posible generar relatos que producen efectos físicos y sensoriales muy potentes en las experiencias de usuario. [38]

- **Unity** es un motor de desarrollo de videojuegos y entornos interactivos 3D/2D ampliamente utilizado para crear aplicaciones de Realidad Virtual, Realidad Aumentada y simulaciones. Proporciona una plataforma integrada con herramientas de renderizado, física, *scripting* (principalmente C#) y gestión de activos. [39]
 - Una **escena** es el espacio de trabajo principal dentro de Unity, análogo a un nivel o mundo en un videojuego. Contiene todos los objetos que componen un entorno específico, incluyendo modelos 3D, luces, cámaras, scripts y la interfaz de usuario. Es la unidad fundamental donde se organiza el contenido interactivo. [39]
 - Un **Render Pipeline** en Unity, es una tubería de procesamiento o *pipeline*, en inglés se refiere a la secuencia de pasos que toma los activos 3D (modelos, texturas, animaciones) y el código, y los transforma a datos en una imagen 2D en la pantalla, permitiendo a los desarrolladores personalizar y optimizar el proceso de transformación de los datos, es necesario un motor de renderizado para poder presentarlo como una imagen. En Unity son elementos clave porque cada uno contiene diferentes compromisos para el rendimiento y la fidelidad visual. [39]

5.2.1. Marco Ético Legal

- **Ley estatutaria 1618 de 2013:** Ley que busca garantizar y asegurar el ejercicio efectivo de los derechos de las personas con discapacidad, mediante la adopción de medidas de inclusión, acción afirmativa y ajustes razonables. Por medio de esta ley se fundamentan los proyectos de innovación tecnológica en rehabilitación, como es el caso de este estudio. [40]
- **Resolución 8430 de 1993:** Regula las normas científicas, técnicas y administrativas para investigación en salud específicamente en los aspectos éticos de la investigación biomédica, estableciendo los criterios para garantizar la seguridad de los participantes y la validez científica de estudios que involucran algún tipo de intervención humana. Bajo esta resolución este estudio se clasifica como “*investigación con riesgo mínimo*”, esta misma tiene como requisitos: contar con consentimiento informado detallado para el/los pacientes, proteger la privacidad del participante ante todo y contar con supervisión médica durante las intervenciones. [41]
- **Declaración de Helsinki:** Establece que la investigación médica debe respetar los derechos individuales y la salud de los seres humanos; además, dictamina que se debe tener especial cuidado con las poblaciones vulnerables. Teniendo en cuenta esta reglamentación, este estudio debe priorizar el bienestar del participante sobre los intereses de la investigación, asimismo debe realizar una evaluación previa de riesgos y beneficios a los que estaría expuesto el sujeto y respetar su autonomía para participar. [42]

- Principio de beneficencia: Implica actuar siempre en favor del participante, asegurando que la intervención propuesta tenga un propósito claro de generar bienestar en el participante.
 - Principio de no maleficencia: Obliga a minimizar cualquier riesgo potencial derivado del uso de la tecnología, garantizando que los procedimientos no causen daño físico o psicológico y que existan medidas para detener la intervención si el participante experimenta malestar.
 - Principio de justicia: Exige la selección equitativa de participantes, evitando cualquier forma de explotación, y asegurando que personas con discapacidades o vulnerabilidad tengan acceso a intervenciones seguras y potencialmente beneficiosas sin discriminación.
- **Pautas CIOMS:** Conjunto de principios éticos que se aplican a la investigación en seres humanos, elaborados en colaboración con la Organización Mundial de la Salud (OMS). Establece la necesidad de una justificación científica sólida, la selección equitativa de participantes y el monitoreo continuo de la seguridad de los mismos. Asimismo, las pautas enfatizan la importancia de obtener un consentimiento informado claro y comprensible, garantizar la confidencialidad de los datos recolectados y asegurar que los riesgos derivados de la intervención sean razonables y estén adecuadamente mitigados. En caso de que la población objetivo presente una condición de vulnerabilidad, se requieren medidas adicionales de protección y supervisión, asegurando que el participante reciba un trato justo y que su bienestar prevalezca sobre cualquier objetivo investigativo. [43]

5.3. Trabajos Relacionados

Feasibility and potential effect of a low-cost virtual reality system on reducing pain and anxiety in adult burn injury patients during physiotherapy in a developing country [44]

El uso de un sistema de RV de bajo costo para controlar el dolor y la ansiedad en pacientes con quemaduras que se someten a fisioterapia en países en desarrollo se presenta como una alternativa innovadora. Los participantes se sometieron a dos sesiones de fisioterapia, una con RV y otra sin ella, y se evaluó el dolor y la ansiedad mediante escalas estandarizadas.

El estudio encontró que el sistema de RV era factible de usar en un entorno de país en desarrollo. Sin embargo, los resultados mostraron una reducción estadísticamente poco significativa del dolor o la ansiedad con la intervención de RV en comparación con la atención estándar. Estos resultados se atribuyeron a factores como el pequeño tamaño de la muestra y el uso de un sistema de costo relativamente bajo. Sin embargo, el estudio sugiere que la RV puede tener potencial como una herramienta no farmacológica para el manejo del dolor en pacientes con quemaduras. Los autores recomiendan realizar más investigaciones con muestras de mayor tamaño y sistemas de RV más sofisticados para confirmar su eficacia.

The Effect of Virtual Reality on Pain and Range of Motion in Adults With Burn Injuries [45]

La urgencia de métodos no farmacológicos accesibles que disminuyan la elevada carga de dolor asociada a procedimientos de rehabilitación física en contextos con recursos limitados conlleva a la evaluación de la factibilidad y el impacto de un sistema de RV de bajo costo para reducir dolor y ansiedad durante sesiones de fisioterapia en pacientes adultos con quemaduras en un país en desarrollo. Mediante un diseño experimental preliminar, implementaron un sistema RV económico durante sesiones de movilización y estiramiento, comparando niveles de dolor y ansiedad con fisioterapia convencional. Se evidenció una disminución clínicamente relevante de dolor (37%) y del malestar emocional (31%) durante el uso de RV, así como alta aceptabilidad por parte de los pacientes a pesar de que el 97% informaron náuseas leves; se concluyó que las soluciones inmersivas de bajo costo pueden ser una alternativa viable y eficaz para este contexto fisioterapéutico. La aplicación de RV en el área de fisioterapia puede conducir a resultados prometedores; aunque durante el estudio no se explora el uso de personalización emocional, ni su aplicación en poblaciones distintas debido a que se requieren estrategias de diseño diferentes, proponer una experiencia RV orientada no solo a la distracción sino también a la evocación de emociones positivas podría ser una opción útil para controlar el dolor en la terapia física postquemaduras.

Customized virtual reality naturalistic scenarios promoting engagement and relaxation in patients with cognitive impairment: a proof-of-concept mixed-methods study [46]

La necesidad creciente de intervenciones y aplicaciones no farmacológicas que reduzcan ansiedad, agitación y malestar emocional en pacientes con deterioro neurocognitivo y discapacidades motrices. Para ello, planteó el uso de RV terapéutica y se desarrollaron escenarios basados en preferencias personales (como paisajes específicos, sonidos familiarmente agradables y ambientes calmados) y se aplicó un protocolo experimental con mediciones del nivel de compromiso con el entorno, presencia, afecto y relajación. Los resultados evidenciaron que la personalización aumenta significativamente la sensación de presencia y mejora los indicadores de relajación, sugiriendo que los entornos diseñados con significado emocional personal generan mayor impacto psicológico que los entornos estándar. Este estudio valida la importancia de la personalización; sin embargo, no se incluyeron pacientes con LME ni se aborda su posible intervención en el manejo del DNC. Extender la personalización emocional y autobiográfica de entornos RV para grupos clínicos distintos permitiría expandir los hallazgos del estudio hacia contextos donde la literatura aún es escasa.

Immersive virtual reality for chronic neuropathic pain after spinal cord injury: a pilot, randomized, controlled trial[47]

En gran parte de los pacientes con LME ha sido documentada la problemática sobre la presencia de dolor resistente al tratamiento farmacológico, es aquí donde se debe evaluar el uso de intervenciones analgésicas distintas. El estudio evalúa la eficacia de la RV inmersiva como solución en pacientes con DNC posterior a una LME. Para ello, se implementó un protocolo experimental en el que las personas con LME interactuaban con entornos RV inmersivos durante sesiones controladas, midiendo cambios en intensidad de dolor, afecto y biomarcadores fisiológicos. Los resultados muestran

reducciones significativas en dolor percibido durante y después de la exposición, así como mejoras en bienestar emocional, sugiriendo que la RV puede modular mecanismos cognitivo-atencionales y afectivos implicados en el dolor neuropático. A pesar de su relevancia, dentro del estudio se implementaron entornos genéricos de RV, haciendo a un lado las necesidades particulares y la identidad de los pacientes; utilizar entornos con características personales podría evocar recuerdos de funcionalidad previa y emociones positivas, potenciando así aún más la modulación del dolor.

Materiales y Métodos

6.0.1. Tipo de estudio

El proyecto se llevó a cabo bajo la metodología de investigación estudio de caso pre-experimental perceptual, basado en un diseño de preprueba/posprueba. El caso de estudio es la reducción de la percepción del dolor durante las sesiones de fisioterapia mediante la implementación de RV en el participante, un paciente cuadripléjico. El diseño preprueba/posprueba constó de (2) fases como su nombre lo indica. Durante la fase de preprueba se estableció el punto de referencia inicial con respecto al dolor, donde el sujeto de estudio que recibe las terapias físicas rutinariamente indicó el nivel de dolor durante la terapia física y su diario vivir, adicionalmente se realizó el registro de los elementos de personificación y distracción que luego fueron ejecutados en el entorno RV. La fase de posprueba comprendió la implementación del entorno inmersivo en las sesiones de fisioterapia del participante, para la evaluación del mismo se utilizó la escala NRS, con el fin de comparar la percepción del dolor e identificar la evolución del paciente. Es importante destacar que para efectos de seguimiento se registró el nivel de dolor al iniciar cada una de las sesiones de evaluación con el paciente.

Los siguientes instrumentos de recolección de información fueron utilizados durante la fase de preprueba y posterior caracterización de las preferencias del participante, asimismo para la evaluación de entorno RV:

- Entrevistas semiestructuradas al paciente y fisioterapeuta
- Encuestas de percepción del dolor con base en la escala NRS
- Encuesta de utilidad al fisioterapeuta

Es importante destacar que el desarrollo de este proyecto requirió una búsqueda y revisión de literatura extensa, dado que el uso de la RV como técnica de asistencia al manejo del dolor aún se encuentra en investigación; especialmente la bibliografía existente donde se incluyen pacientes con LME es poca. Dentro de la implementación del entorno simulado, se emplearon recursos de código abierto (open source); asimismo, fue necesario adaptar algunos recursos para su uso en el entorno. Finalmente, la funcionalidad del escenario fue evaluada bajo los mecanismos ya mencionados.

El proyecto garantizó el componente ético dentro de la aplicación de la metodología mediante:

- Aplicación del consentimiento informado escrito y verbalizado, donde se detallan los objetivos, protocolos, riesgos mínimos y beneficios para el participante.

- Protección a la confidencialidad mediante la anonimización de todo el material recolectado y asignación de códigos alias para el participante. Adicionalmente, los datos recolectados durante entrevistas y encuestas fueron almacenados con acceso exclusivo para el equipo investigador. En ningún momento se divulgaron datos personales o identificables del participante en informes, presentaciones ni otro tipo de difusión externa relacionada con el proyecto.
- Ejecución de los conceptos, protocolos y reglas aplicables en la Resolución 8430 de 1993 y la Declaración de Helsinki confirmando que el estudio corresponde a un estudio de riesgo mínimo según el Artículo 11 de la Resolución 8430.
- Comunicación clara y constante con el participante y fisioterapeuta durante todas las fases del proyecto facilitando las vías para resolver dudas o manifestar las inquietudes mediante el contacto directo con los investigadores y el comité de ética institucional de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

El riesgo mínimo identificado en este estudio se relacionó con las posibles molestias emocionales menores, como ansiedad o tristeza leve derivadas de la incorporación de narrativa inmersiva, para mitigar dichas molestias se optó por el uso de narrativa sin alta carga cognitiva, asegurando evitar temas sensibles o de carga emocional. Asimismo, se consideraron los efectos derivados del uso de la RV, tales como fatiga visual, ligera desorientación o mareo leves; estos riesgos se disminuyeron haciendo uso de mecánicas de RV que suavizan estos síntomas, además se le permitió al participante tomar descansos o suspender la sesión en cualquier momento en caso de presentar incomodidad. Todas las sesiones fueron supervisadas permanentemente por los miembros del equipo investigador y los profesionales de salud responsables del participante.

6.0.2. Actividades

Según los objetivos específicos planteados, se desarrollaron las siguientes actividades durante la elaboración del proyecto:

1. Identificar las necesidades específicas de un paciente con cuadriplejia con presencia de dolor neuropático para el uso personalizado de la realidad virtual.

- Se realizó una revisión sistemática de literatura en bases de datos académicas (PubMed, IEEE Xplore, Scopus) sobre la implementación de RV en ambientes clínicos.
- Se analizaron los artículos relevantes que abordan temáticas sobre los protocolos sobre el manejo del dolor con RV y los desafíos de su implementación en pacientes con cuadriplejia.
- Se elaboró y sometió el protocolo de investigación al Comité de Ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, en conformidad con los lineamientos de la Resolución 8430 de 1993, la Declaración de Helsinki y las Pautas CIOMS, obteniendo su aprobación.

-
- Se diseñaron y aplicaron entrevistas semiestructuradas al paciente participante y al fisioterapeuta tratante. Estas fueron realizadas de manera presencial contando con consentimiento informado y grabación autorizada.
 - Se realizó observación directa sin participación en dos sesiones de fisioterapia convencional, documentando ejercicios realizados, expresiones de dolor y estrategias de apoyo al dolor.
 - Se establecieron los criterios de diseño del entorno virtual centrados en el paciente considerando: elementos narrativos, nivel de interactividad compatible con capacidades motrices residuales, estimulación sensorial y duración óptima de exposición.

2. Diseñar un escenario inmersivo de realidad virtual de interacción pasiva que incorpore elementos de interfaz visuales y retroalimentación sonora con base en las preferencias de distracción identificadas en el paciente cuadripléjico participante de la investigación.

- Se elaboró la matriz cuantitativa de selección adaptando otros modelos, utilizando como base los criterios de diseño.
- Se seleccionó la alternativa final del entorno a través de la matriz cuantitativa.
- Se diseñó un escenario inmersivo de realidad virtual, utilizando el motor Unity, haciendo uso de las preferencias identificadas incorporando elementos visuales, sonoros e interactivos adaptados al paciente.
- Se optimizaron todas las funciones del entorno para su visualización en el visor de RV.

3. Evaluar la efectividad del prototipo mediante un estudio pre-experimental perceptual al paciente usando la escala de clasificación numérica de dolor.

- Se diseñó el protocolo de evaluación y la encuesta de percepción al paciente, adaptando la escala NRS. Adicionalmente, se diseñó una encuesta dirigida al fisioterapeuta preguntando sobre la utilidad de la RV en el contexto clínico.
- Se evaluó la efectividad del entorno mediante su implementación en las sesiones habituales de fisioterapia del participante.
- Se documentaron y analizaron las mediciones de dolor obtenidas y encuestas de percepción.

6.0.3. Materiales

- **Gafas de realidad virtual:** Se utilizaron las gafas **Meta Quest 3S** que fueron facilitadas por el Laboratorio de Electrónica. El uso de este dispositivo permitió crear una experiencia totalmente inmersiva para el paciente sin hacer uso de otros dispositivos.

- **Equipo de cómputo:** El escenario fue desarrollado e implementado mediante un equipo de cómputo con procesador operativo **Intel Core i5** y tarjeta gráfica **NVIDIA GEFORCE** garantizando la fluidez del entorno y buena calidad gráfica.
- **Software de desarrollo:** La programación y desarrollo del entorno se realizaron utilizando el motor Unity en la versión **2022.3.62f2 LTS** que utiliza el lenguaje de programación **C#** para la implementación de la lógica de las interacciones y funciones presentadas en la escena, adicionalmente se emplearon los paquetes **XR Interaction Toolkit** y **OpenXR Plugin**, proporcionados por Unity Core RV.
- **Recursos gráficos:** Se integraron recursos gráficos y modelos 3D del proyecto “Park with pond” de la plataforma TurboSquid, “Realistic Pine Tree Pack”, “European Forests” y “Skybox Series Free” de la Unity Asset Store, adaptados correctamente en el escenario virtual.
- **Recursos sonoros:** Se empleó la canción “*Pesadilla*” del grupo Ocho y Media únicamente con fines educativos y sin fines de difusión, por lo cual solo se usa en la versión de demostración del software ante los jurados del presente proyecto, debido a restricciones de derechos de autor. Adicionalmente, se integraron sonidos ambientales de aves como *Pitangus sulphuratus* [48], *Sicalis flaveola* [49] y *Penelope perspicax* [50], obtenidos desde la plataforma **Xeno-Canto**[51], cuyos audios se utilizaron respetando las licencias *Creative Commons* específicas de cada grabación.

Resultados y Discusión

7.1. Identificación de las necesidades específicas de paciente con cuadriplejia con presencia de dolor neuropático para personalización de RV

Inicialmente se implementó un abordaje metodológico mixto dividido en dos fases: (1) La primera fase consistió en la revisión y análisis sistemático de literatura a través de la búsqueda sistemática de bibliografía, con el objetivo de establecer el marco de referencia conceptual y metodológico, el cual es esencial para la implementación de la RV en un paciente en condición de cuadriplejia. (2) La segunda fase consta de la caracterización del paciente, realizada mediante entrevistas semiestructuradas a los sujetos de interés (paciente y fisioterapeuta) para identificar las necesidades y requerimientos individuales que guiarían la personalización del sistema de RV.

Se realizó la búsqueda sistemática en las bases de datos PubMed, IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar en un período comprendido entre enero y abril de 2025. Los términos de búsqueda combinaron descriptores relacionados con: tecnología de RV, tratamientos de manejo del dolor crónico con RV, lesiones medulares y cuadriplejia, fisioterapia y rehabilitación, y protocolos de seguridad para tecnologías inmersivas, investigaciones sobre la implementación de RV como tratamiento del dolor tanto en pacientes cuadriplejicos o con padecimientos similares como en personas sanas.

Para la selección, se incluyeron artículos publicados entre 2010 y 2025, estudios con validación clínica e investigaciones sobre mecanismos neurofisiológicos de la distracción cognitiva, y cuyas poblaciones de estudio presentarían limitaciones motrices severas. Se excluyeron estudios pediátricos, aplicaciones de realidad aumentada no inmersiva y revisiones que no presentarían datos primarios.

Este análisis de artículos permitió la identificación de los ejes conceptuales y metodológicos iniciales para el desarrollo de este proyecto.

7.1.1. Búsqueda sistemática y análisis de crítico de los artículos

La incorporación de la RV en entornos clínicos ha emergido como una estrategia terapéutica innovadora que combina los principios de la neurorehabilitación con la inmersión multisensorial. Diversos estudios, como los de Carrougner et al. [45] y Morris et al. [44], demuestran que la RV tiene el potencial de reducir el dolor y la ansiedad durante procedimientos fisioterapéuticos, actuando como un distractor cognitivo y emocional. En el ámbito neuromotor, Im et al. (2016) evidenciaron

que la integración de la imagen motora guiada por RV aumenta la excitabilidad corticomotora en pacientes con accidente cerebrovascular, favoreciendo la neuroplasticidad y la recuperación de funciones motoras.

Las revisiones sistemáticas más recientes, como la publicada en 2025 [52] sobre rehabilitación de la función motora, consolidan la eficacia de la RV en la mejora de la movilidad de las extremidades superiores y en el incremento de la adherencia terapéutica. Sin embargo, estudios como el de Laver et al. [53] advierten que una alta carga cognitiva en entornos de RV puede disminuir la retención de la actividad en rehabilitación a largo plazo, lo que sugiere la necesidad de equilibrar la estimulación sensorial con la simplicidad del diseño terapéutico.

En conjunto, la evidencia científica respalda que la RV es una herramienta viable y no invasiva para complementar los tratamientos fisioterapéuticos, particularmente en poblaciones con dolor crónico o lesiones neuromotoras. Su efectividad depende de una adecuada personalización de los escenarios, la compatibilidad con los objetivos clínicos y la supervisión profesional constante para garantizar seguridad y eficacia.

7.1.1.1. Manejo del dolor con RV

Abordar el manejo del dolor, tanto agudo como crónico, mediante la RV (una intervención no farmacológica eficaz y sólidamente respaldada) ha supuesto un reto para los investigadores. Este enfoque innovador aprovecha la inmersión sensorial, la distracción cognitiva y la modulación de estados anímicos para mitigar las molestias. Sin embargo, al tratarse de una tecnología de asistencia que se encuentra en crecimiento, carece de protocolos estandarizados para su implementación. Adicionalmente, su aplicación debe variar dependiendo del paciente, del procedimiento médico y de los objetivos terapéuticos específicos que se persigan.

La evidencia experimental demuestra que la RV reduce la intensidad y las sensaciones desagradables del dolor mediante dos mecanismos complementarios clave. En primer lugar, opera a través de la competencia atencional, donde la experiencia inmersiva consume recursos cognitivos, limitando la capacidad del cerebro para procesar señales nociceptivas. En segundo lugar, facilita la activación de redes de control cortical, específicamente en regiones ejecutivas como la corteza dorsolateral prefrontal y áreas parietales, cuya actividad aumentada ejerce efectos inhibitorios sobre regiones interoceptivas como la ínsula, modulando directamente la experiencia del dolor [54, 55]. Los estudios han subrayado que la magnitud de la distracción, determinada por la carga cognitiva y la interactividad del entorno virtual, es crucial para el efecto analgésico, y no solo la exposición pasiva a la tecnología [56]. La implementación de esta tecnología presenta diversas consideraciones prácticas y teóricas que merecen un análisis detallado. A continuación, se exploran conceptos específicos de la RV que al ser aplicados en la integración de los protocolos de tratamiento del dolor mejoran significativamente su la efectividad en estos casos:

- **Presencia Virtual**

Sense of Presence or *Telepresence* en inglés, fue definida por Slater et al. [57] como la sensación de estar en un ambiente mediado o generado por computador, como es el caso de la RV. De

esta definición se derivan dos conceptos alternativos, (1) La presencia como la sensación de "estar ahí" que sucede como una ilusión en la cual la persona no puede percibir el entorno mediático como si estuviera siendo presentado por un dispositivo multimedia; en este caso el cerebro reacciona automáticamente y extremadamente rápido al contenido presentado en RV, es decir, no requiere de un procesamiento cognitivo de orden superior. El segundo concepto (2), la presencia como el realismo percibido, en este utiliza un entorno virtual altamente realista donde se bloquean todos los estímulos externos y se expone al usuario a una entrada visual dada desde un HMD (*Head-Mounted Display - dispositivo montado en cabeza*). En resumen, el realismo percibido se basa en ofrecerle al usuario una fuente dominante de información sensorial que sea coherente y altamente creíble para que se integre con las expectativas individuales del usuario. [58]

La presencia se correlaciona directamente con la efectividad analgésica y se potencia mediante la sincronización visual-auditiva precisa; esto indica que el usuario obtenga una retroalimentación auditiva de lo que está viendo dentro del entorno, con un campo de visión amplio entre 100° en el campo de visión (FOV) y 110° FOV. La calidad gráfica mejora la sensación de presencia porque incrementa la conexión entre usuario y entorno. [59]

▪ Personalización Terapéutica

En el contexto de la RV, la personalización terapéutica es un enfoque fundamental que adapta dinámicamente el *software* y la experiencia inmersiva para que coincidan con las necesidades, preferencias, condiciones médicas y respuestas fisiológicas específicas del individuo. Este concepto va más allá de los protocolos estándar, con el fin de optimizar los resultados y la satisfacción individual.

Según Baños et al. Las experiencias personalizadas según preferencias individuales (ambientes, narrativas, elementos sonoros) producen reducción adicional del 24 % en dolor percibido vs. entornos genéricos. La personalización es crítica en poblaciones con dolor crónico donde factores emocionales modulan significativamente la nocicepción. [60]

Al permitir que el paciente elija o cocree su entorno virtual, se potencia el sentido de control y la inmersión, lo que a su vez optimiza la distracción cognitiva y los mecanismos inhibitorios del dolor a nivel cortical, resultando en un alivio más sustancial y duradero. Futuros estudios continúan explorando cómo las intervenciones de RV personalizadas pueden integrarse de manera óptima en los planes de tratamiento existentes, enfatizando la importancia de un enfoque centrado en el paciente para abordar la compleja naturaleza del dolor crónico. [61]

7.1.1.2. Mecanismos de distracción cognitiva

El cerebro humano tiene una capacidad limitada para procesar información al mismo tiempo; es por esto que hay mecanismos que aprovechan esta capacidad limitada para desviar la atención de un estímulo central, en este caso el dolor, hacia otras actividades o estímulos menos aversivos. Este principio se conoce como distracción cognitiva; dentro de la tecnología RV existen diferentes metodologías y conceptos que describen y aplican este concepto, para el presente proyecto es necesario destacar las siguientes:

■ Teoría Puerta de control del dolor

La teoría de la compuerta del dolor establece que la médula espinal contiene un sistema de “compuertas” que modulan el envío de señales de dolor al cerebro, y que la percepción del dolor puede ser afectada por estímulos no dolorosos como el tacto y la presión. Factores como la atención, el estrés y las emociones pueden influir en si estas compuertas están abiertas o cerradas, lo que afecta directamente la intensidad del dolor percibido. [62]

■ Procedimientos Inductores de Emociones (MIP) en RV

Los MIP, (por sus siglas en inglés *Mood Induction Procedures*) constituyen una metodología empleada en ciencias cognitivas y clínicas para generar estados emocionales controlados que influyen en la percepción, el comportamiento y la respuesta fisiológica. En los últimos años, la RV ha adquirido un rol protagónico en este campo gracias a su capacidad para generar experiencias inmersivas que reproducen estímulos realistas y emocionalmente significativos.

Estos permiten crear contextos afectivos que inducen emociones específicas y medibles, a su vez, Li et al. mostraron que mediante el uso de electroencefalografía (EEG), los entornos virtuales pueden provocar respuestas emocionales congruentes con las narrativas inmersivas diseñadas, evidenciando cambios en la actividad cortical y en las autoevaluaciones subjetivas de emoción. [63]

Las experiencias de RV orientadas a la inducción emocional tienden a generar una respuesta fisiológica más intensa que los métodos tradicionales (como videos o música), debido a la sensación de presencia y agencia del usuario. En el contexto clínico, estas propiedades pueden aprovecharse para mejorar la motivación del paciente, reducir la ansiedad preprocedimiento y fortalecer la adherencia terapéutica. [60]

En síntesis, los MIP basados en RV ofrecen una oportunidad única para integrar la regulación emocional en las intervenciones médicas y de rehabilitación. En casos de pacientes con DNC o cuadriplejia, la evocación de emociones positivas o relajantes puede atenuar la percepción del dolor y aumentar la tolerancia a la terapia, reforzando la conexión entre bienestar emocional y recuperación física. Bajo este contexto se destacan los siguientes conceptos para aplicar los MIP correctamente en el área de la RV:

- Temática del entorno: Según el análisis de Pavic et al. donde se busca explorar cómo la RV puede inducir emociones positivas, específicamente felicidad; se determinó que efectivamente puede inducir alegría y bienestar pero que el efecto se potencia cuando se trata de entornos lúdicos, escenario de tipo natural, como la playa, bosques y ríos evocan momentos y emociones de felicidad, paz y tranquilidad. [64]
- Audio: La influencia de la música y los paisajes sonoros fomenta la sensación de presencia y las emociones experimentadas en un escenario de RV, según Kern et al. adentrar al usuario en un entorno totalmente silencioso reduce las emociones experimentadas; sin embargo, bajo ciertas circunstancias como en los entornos nocturnos el uso de sonidos ambientales puede generar emociones desagradables. [65]

- Inmersividad: Toma un papel más relevante en entornos neutros o de poca interacción por parte del usuario porque de esta se deriva que tanta presencia siente el usuario, sin embargo, cuando se usan entornos MIP su relevancia disminuye y es necesario incrementar estrategias para evitar el mareo por RV. [66]

7.1.2. Realización de entrevistas semiestructuras a sujetos de interés

La entrevista semiestructurada se realizó el 28 de septiembre del año presente, 2025, tuvo una duración aproximada de 45 minutos. El protocolo fue aprobado por el Comité de Ética de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La sesión se desarrolló en el domicilio del paciente, garantizando un ambiente familiar que favoreciera respuestas espontáneas. Se obtuvo consentimiento informado verbal y escrito, incluyendo autorización para grabación de audio con fines de transcripción y análisis. La entrevista se estructuró en cinco dimensiones: (1) Caracterización del paciente y perfil clínico, (2) Documentación de dolor neuropático, (3) Tratamiento fisioterapéutico y perfil funcional, (4) preferencias sensoriales, y (5) expectativas sobre la intervención con RV; Adicionalmente se realizaron dos sesiones de observación sin intervención con el fin de documentar las sesiones del paciente habituales e identificar patrones de dolor durante estas. Estas entrevistas sirvieron como eje principal para la identificación de los elementos de distracción del participante y sus limitaciones motoras.

Para efectos de anonimización se tomaron las siguientes medidas de identificación:

P1	Paciente participante del estudio
ENT	Investigador Principal (Angela María Aguilar Perea)
F1	Fisioterapeuta tratante

1. Caracterización del paciente y perfil clínico:

El participante P1 es un hombre entre los (40-45) años con diagnóstico de cuadriplejia incompleta secundaria debido a un trauma raquímedular en nivel C5-C6, ocurrido hace 16 años producto de un proyectil de arma de fuego disparado no intencionalmente hacia él. Según la clasificación ASIA, presenta una puntuación ASIA C, lo que indica preservación parcial de la función motora por debajo del nivel neurológico. A nivel de la función muscular, esta lesión tiene implicaciones relacionadas directamente con el control de la abducción del hombro, flexión de codo y brazo, y extensión de la muñeca, asimismo, la pérdida total de funcionalidad en los miembros inferiores. Por otra parte, la lesión compromete la función del tono muscular generando disminución, pérdida y debilidad en los músculos, cuya condición se conoce como flacidez. Algunas consecuencias derivadas de esta lesión y que hacen parte del diagnóstico de P1 son problemas vesicales e intestinales, dificultad en el sistema respiratorio debido a la debilidad de los músculos relacionados con este, entumecimiento y calambres.

Actualmente, P1 conserva movilidad limitada en miembros superiores con debilidad muscular grado 3/5 en flexión de codo bilateral y ausencia de función manual fina. Requiere asistencia completa para actividades de la vida diaria (AVD) debido a la falta de tono muscular y debilidad de su cuerpo. Se desplaza en silla de ruedas eléctrica y cuenta con servicio de hospital en casa conocido como "*Home*

Care" efectuado por un profesional auxiliar en enfermería las 24 horas del día.

2. Documentación de dolor neuropático:

Para los pacientes con LME el dolor neuropático es común en sus AVD y usualmente tiene un impacto profundo en su calidad de vida, ya que este persiste durante muchos años incluso después de la lesión. Actualmente liberarse por completo del dolor no es un escenario realista para los pacientes con LME; mientras que la modulación y tratamiento del mismo se ha convertido en un objetivo alcanzable; este aspecto el tratamiento farmacológico se ha convertido en el mejor aliado de estos pacientes, a pesar de que su utilidad, efectividad y efectos a largo plazo no han sido comprobados. [67] En concordancia con lo anterior, durante la entrevista P1 reportó:

P1: “ Sí, pues como te decía no es un dolor en una zona específica, es un dolor intenso en todo el cuerpo en la mañana es cuando más me duele [...] Me dan muchos calambres en las piernas y brazos”

Esta descripción de P1 se alinea al dolor difuso por debajo y a nivel de la lesión que fue clasificado y descrito como dolor neuropático central tipo “at-level” y “below-level”, el cual se caracteriza por su naturaleza ardiente, punzante y un componente de espasticidad que produce calambres.[68] Adicionalmente, P1 reportó que el nivel de dolor en reposo es de 8 a 9 según la escala NRS, cuando tiene movilización pasiva por parte del fisioterapeuta el dolor se mantiene igual; expresa que el manejo del dolor con medicamentos (*Dosis de Pregabalina de 300 mg*) genera una reducción mínima del dolor, sin embargo no es continua ni consistente; P1 indica el efecto de la medicación reduce el dolor a 6 en la escala NRS, destaca que el dolor se mantiene constante a pesar de los medicamentos.

P1: “Pues a mi me dan pastas para el dolor, tomé Pregabalina de 300mg en la mañana y tarde, en la noche tomo 600 mg pero realmente no me ayuda, son muy raras las veces cuando me baja el dolor, en la mañana y tarde es más intenso que cuando no me hacen efecto las pastas, yo le pondría entre 8- 9 y ya cuando cae la noche a veces me hace efecto las pastas yo diría que 6 pero el dolor nunca para, siempre está ahí”

Este fenómeno de resistencia al tratamiento farmacológico está documentado en aproximadamente (60-70) % de pacientes con dolor neuropático central posterior a una LME. [69]. Según ensayos clínicos controlados, solo (30-40) % de pacientes logran una reducción mayor o igual al 50 % del dolor con el uso de Pregabalina o anticonvulsivos similares. [68]

Tras conocer esta medicación se consideraron pautas de seguridad a tener en cuenta al momento de las sesiones de RV, debido a altas de Pregabalina se asocian con efectos adversos como somnolencia y mareo y edema periférico. Estos efectos podrían potenciarse con el uso de RV, aumentando el riesgo de cinetosis. Durante el protocolo experimental, será crítico monitorear:

- Mecánicas de interacción que disminuyan el riesgo de cinetosis.
- Evaluar el estado de alerta del paciente antes de cada sesión.

- Ajuste en la duración de las sesiones, preferiblemente menor a 10 minutos.

Período	NRS	Observaciones
Matutino (6:00-12:00)	8-9/10	Mayor intensidad. Medicación con efecto limitado
Vespertino (12:00-18:00)	8-9/10	Mantiene intensidad alta
Nocturno (18:00-6:00)	6/10	Reducción ocasional cuando la medicación es efectiva y nivel de dolor mínimo.
Promedio diario	8/10	El dolor es persistente e intenso durante todo el día

Cuadro 7.1: Niveles de dolor reportados por P1 según momento del día

Es importante destacar que los niveles de dolor registrados en el cuadro 7.1 y las observaciones realizadas por P1 se alinean con lo encontrado en la literatura; puntualmente la información sobre la persistencia del dolor y la reducción ocasional por parte del tratamiento farmacológico. [67]

3. Tratamiento fisioterapéutico y perfil funcional:

P1 presenta preservación parcial de miembros superiores, con fuerza en bíceps bilateral de 3/5, la cual le permite un rango de movimiento de la articulación del codo entre 90° y 80°, presenta ausencia de función manual fina, sin embargo, cuenta como movimiento parcial en la muñeca, en estado de supinación. Adicionalmente, tiene parálisis total de miembros inferiores.

P1 recibe sesiones de fisioterapia en su domicilio 2 veces a la semana dichas tienen una duración de (35- 40) minutos, donde se sigue el siguiente protocolo:

1. Movilización pasiva de miembros inferiores durante (8-10) minutos: Estos ejercicios previenen contracturas articulares y estimulan la propiocepción residual.
2. Estiramientos para prevención de contracturas durante 10 minutos: Se enfocan principalmente en la musculatura de los miembros inferiores y el tronco.
3. Fortalecimiento de musculatura residual de miembros superiores durante 10 minutos: Ejercicios para mejorar la resistencia y fuerza de los bíceps y deltoides.
4. Fortalecimiento de musculatura residual de espalda durante 5 minutos: Intentos de activación de los músculos erectores espinales con asistencia del fisioterapeuta.

Se registró durante las sesiones de observación que P1 manifestó expresiones verbales de dolor (quejidos y solicitudes de pausa) en promedio cada (3-5) minutos, específicamente durante el fortalecimiento de la musculatura residual de los miembros superiores y de la espalda.

En la entrevista, el fisioterapeuta destaca que la rehabilitación de P1 se ve significativamente deteriorada debido a la falta de terapia física durante los primeros (7) años posteriores a la lesión. Iyer

et al. [70] demostraron que aquellos individuos con LME que iniciaron su proceso de rehabilitación física en un período menor a 2 semanas reportan mayor independencia y un mejor estado psicológico, esta idea se refuerza al saber que a partir de las 6 semanas existe una pérdida significativa de masa muscular, lo que incrementa la necesidad de movilización temprana.

F1: *"Él es un paciente con el que se empezaron las terapias después de 7 años del trauma, por lo tanto su pronóstico no es bueno, durante estos años su evolución ha sido mínima, tanto así, que yo lo he tratado de llevar a ejercicios de sedestación y bipedestación asistidos pero su musculatura se encuentra muy débil y es una persona que pesa mucho, de la única manera que se puede realizar sedestación es con la ayuda de la cama y el uso de varias almohadas."*

Un hallazgo relevante fue la percepción negativa que tiene P1 sobre los beneficios de la fisioterapia. Se evidencia que existe una discrepancia entre objetivos de la rehabilitación, que vendrían siendo mantenimiento funcional de los miembros residuales, y expectativas del paciente que son el alivio del dolor. Según Roshan et al. [4], esta desconexión es uno de los predictores más fuertes de abandono del tratamiento en pacientes con LME.

P1: *"Realmente la terapia no me ayuda mucho, me mantengo con dolor, a mí me movilizan los brazos porque me dan muchos calambres y en las piernas también, entonces ahí el dolor es intenso."*

4. Preferencias sensoriales:

La determinación de las preferencias de P1 se abarcó desde 3 dimensiones sensoriales: Visual, Auditiva y Presencia Virtual; cada componente exploró una base fundamental para garantizar la inmersión en el entorno simulado, la personificación del mismo y la protección ante riesgos emocionales.

▪ Dimensión visual:

Este componente abarcó los escenarios preferidos del participante, durante la entrevista se le preguntó sobre lugares o paisajes que considera relajantes, P1 identificó:

P1: *"Sí, pues lugares donde estuve antes... pues del accidente como el Lago Calima o Buga."*

La especificación *"antes del accidente"* indica que estos lugares tienen una importancia altamente significativa para el participante. Desde la perspectiva del tratamiento psicológico de pacientes con LME[71], P1 asocia estos lugares con recuerdos de su funcionalidad motora, es decir, que relaciona estos lugares con momentos de bienestar previos al trauma, asimismo encuentra en ellos una conexión con su "Yo" anterior.

Según la literatura sobre el uso de RV terapéutica, entornos con cierto significado personal generan mayor activación emocional positiva y compromiso que al utilizar escenarios genéricos [60].

Deng et al. [72] demostraron que la evocación de memorias positivas a través de RV puede modular la respuesta al dolor mediante la activación del sistema de recompensa cerebral y la liberación de opioides endógenos. Algunas características de los espacios descritos por P1 son: lugares con cuerpo de agua, paisajes naturales, espacios abiertos, contextos urbanos y religiosos (referentes a la Basílica del Señor de los Milagros), arquitectura colonial, plaza central; es posible que asocie estos lugares con actividades recreativas y de esparcimiento.

Adicionalmente, P1 coincidió con estas características visuales al extender sus preferencias:

P1: *“Pues yo friego mucho para entretenerme y que se me olvida por ratos el dolor. Pogustanmplo, me gustan mucho los paisajes, yo veo muchas cosas así como parques, ver animales y cosas así.”*

▪ **Dimensión auditiva**

Este componente investigó los sonidos y la música preferida del participante, asegurando que sean favorables para la implementación. Sobre las preferencias auditivas, P1 expresó lo siguiente:

P1: *“Sí, por ahí. La salsa. Muy variada la salsa, de tipo de salsa. Romántica.”*

La salsa romántica presenta características rítmicas que requieren una evaluación cuidadosa para su uso terapéutico:

Parámetro	Salsa romántica	Consideración para dolor
Tempo (BPM)	90-110	Moderado-rápido. Posible aumento del estado de alerta.
Complejidad rítmica	Alta, posee elementos como clave y tumbao	Induce una alta carga cognitiva
Importancia emocional	Positiva	Favorable para modulación de dolor
Instrumentación	Percusión prominente	Puede ser distractora o irritante según sensibilidad

Cuadro 7.2: Análisis de características musicales de la salsa romántica

El ritmo cardíaco en reposo se encuentra entre 60 y 80 latidos por minuto (BPM); por lo tanto, la música con baja complejidad armónica en tempos lentos es más efectiva para la reducción del dolor; esta produce la liberación de endorfinas y analgésicos naturales que relajan los músculos y disminuyen la presión arterial. Sin embargo, el principio de personalización terapéutica indica que la música familiar y emocionalmente significativa para el paciente puede ser más efectiva que la música "óptima" según parámetros acústicos. [73]

▪ **Dimensión presencia virtual**

La dimensión de presencia virtual buscaba explorar situaciones o experiencias relacionadas directamente con las mecánicas de inmersión con el entorno. Durante la entrevista P1 no expresó concretamente ninguna experiencia particular que le gustaría probar a través de la RV adicional a la experiencia de visualizar paisajes y espacios naturales; sin embargo durante la entrevista el fisioterapeuta F1 aportó una observación clínica crucial para esta dimensión:

F1: “Sería *chévere* ver si la experiencia podría tener alguna interacción de bipedestación, porque una de las cosas que más me cuenta él (P1) es que el tiene sueños caminando, corriendo, saltando y todas esas cosas, entonces sería bueno para él experimentar algo así al menos dentro de la realidad virtual, para ver si le estimula un poco la parte de la neuroplasticidad.”

Esta información indica que existe preservación de la representación motora cortical, esto quiere decir que la corteza motora de P1 aún mantiene mapas neuronales de movimiento, mas existe una incongruencia entre imagen corporal mental y la retroalimentación sensorial real (el movimiento de su cuerpo). En adición, significa que hay un deseo psicológico profundo de recuperación de movilidad.

Según estudios, el dolor crónico posterior a una LME puede perpetuarse por la desconexión entre la representación cortical del cuerpo y la señal corporal real; esta incongruencia genera una señal de error que el cerebro interpreta como dolor [74]. Utilizar la RV para crear representación de movilidad virtual podría:

- Reducir esta incongruencia mediante retroalimentación visual de movimiento.
- Activar áreas corticales motoras incrementando la neuroplasticidad.
- Modular la percepción del dolor a través de mecanismos descendentes. [75]

5. Expectativas sobre la intervención con RV:

Antes de la intervención con RV, era importante saber si P1 anteriormente había explorado otras estrategias diferentes a las fármaco-dependientes que actualmente emplea para manejar el dolor; Cuando se exploró este tema, P1 respondió:

P1: “Mira que yo he buscado y buscado esa estrategia como decís vos pero no, no me ayuda casi nada. Ahora que estamos aquí en la charla pues uno se distrae, pero el dolor sigue ahí, ahora mismo lo siento mucho en las piernas y brazos.”

Esta respuesta reveló que P1 no cuenta con técnicas de distracción cognitiva, relajación o atención plena (*mindfulness*) implementadas formalmente, sin embargo, reconoce que existe un efecto de alivio gracias a la distracción, no obstante la señal nociceptiva de dolor está presente. Es importante destacar que la RV inmersiva, por su naturaleza multisensorial y su capacidad de generar presencia virtual, representa un estímulo de carga cognitiva sustancialmente mayor que una conversación, con potencial de competir más efectivamente con la señal de dolor.[22].

7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente. 35

La motivación y disposición por parte del participante es importante para cualquier tratamiento, de esto puede depender que tan efectivo este, con respecto a la disposición P1 expresó:

P1: *“Pues mira que no la conocía, antes que me contaras no la conocía, pero sería bueno, pues para uno ensayar a ver qué tal.”*

Esto implica que P1 no tiene expectativas preconcebidas sobre la RV que puedan crear un sesgo ante su inclusión en el tratamiento, no obstante, por esta razón es necesaria una etapa de familiarización gradual con la tecnología. También se señala la actitud positiva de P1 ante la RV, ya que expresó no tener miedos o ideas negativas ante esta tras la explicación sobre esta:

ENT: *“¿Tiene alguna preocupación o temor sobre usar la realidad virtual?”*

P1: *“Pues la verdad no, ya con lo que me contaste, no.”*

7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente.

7.2.1. Requisitos del entorno derivados de la caracterización y selección cuantitativa del diseño

Basándose en el análisis exhaustivo de la entrevista, se establecen los siguientes requisitos funcionales que debe contener cualquier alternativa de diseño del entorno RV:

1. Temática: en este requisito se describe qué tipo de escenario natural se presenta en la experiencia.
2. Narrativa: describe la historia que sigue el escenario, donde se integren elementos visuales y sonoros para acompañar lo que está en pantalla.
3. Interacción: esta característica funcional es crítica para determinar la presencia del escenario, debido a la ausencia de función manual fina se debe descartar el uso de controladores tradicionales (*joysticks*) de RV. Por lo tanto, se requiere una experiencia guiada por donde la sea por control por seguimiento cefálico (*head tracking*)
4. Duración: el tiempo que dura en terminar la experiencia.
5. Estimulación sensorial: estrategias que se utilizan en los elementos visuales y sonoros para potenciar la experiencia.
6. Ritmo: define la velocidad en la que son presentados los elementos visuales y sonoros.
7. Sensación presencia: la sensación de presencia esperada y posible para el escenario

7.2.1.1. Alternativas de escenario virtual

Estas alternativas surgen de integrar los conceptos teóricos de la búsqueda sistemática y el perfil del paciente, buscan generar una experiencia entretenida y tranquila.

Alternativa 1 - Inmersión en ecosistema marino:

Este escenario presenta una temática de entorno subacuático confinado tipo acuario, caracterizado por una atmósfera de baja luminosidad u oscuridad predominante. La experiencia sigue una narrativa educativa lineal, apoyada por una guía de voz en *off* que describe las características biológicas de la fauna presente. En términos de interacción, y dada la restricción de motricidad fina, se implementa un sistema de navegación pasiva que simula una caminata automática; el usuario interactúa con el entorno exclusivamente mediante el *head tracking* para dirigir la atención visual. La estimulación sensorial se construye a partir de un diseño sonoro inmersivo con vocalizaciones de cetáceos y sin música acústica para mantener un ritmo lento y fluido que emula la ingravidez del agua para maximizar la sensación de presencia y aislamiento sensorial. Se aproxima que tendrá una duración entre (15-20) minutos.

Alternativa 2 - Sendero cultural lago Calima:

Esta propuesta recrea técnicamente un bioma de bosque de niebla andino con cuerpos de agua que simulan la geografía del Lago Calima, bajo condiciones de iluminación diurna. La narrativa integra componentes históricos sobre la cultura indígena Calima, los cuales se despliegan conforme avanza el usuario. La interacción se define como un recorrido guiado en primera persona donde el desplazamiento es automático, permitiendo al usuario explorar el paisaje mediante el movimiento natural de la cabeza. Para la estimulación sensorial, se emplea un paisaje sonoro de alta fidelidad que incluye avifauna endémica y canciones de tempos reducidos del género bolero, el cual es perteneciente a la salsa pero con un tempo más reducido, estableciendo un ritmo pausado y contemplativo que facilita la asimilación cultural. Se asume una duración aproximada entre (8-10) minutos.

Alternativa 3 - Simulación de Movilidad Urbana en Buga

El tercer entorno virtual modela el Parque Municipal de Buga, ofreciendo una temática de recreación urbana centrada en la dinámica social de fin de semana. La narrativa es de carácter ambiental y religioso, estructurada auditivamente alrededor de la transmisión de una misa dominical mezclada con sonidos de transeúntes y aves locales. La interacción simula un desplazamiento vehicular en bicicleta sobre una trayectoria predefinida y continua, prescindiendo de controladores manuales y confiando la visualización al seguimiento cefálico. Este diseño impone un ritmo dinámico y constante acorde al pedaleo, generando una sensación de presencia social mediante la familiaridad de los estímulos auditivos y visuales del entorno municipal. Como una misa dominical suele durar entre (30-40) minutos, se busca una experiencia similar.

7.2.1.2. Elaboración de matriz cuantitativa con base en los criterios de diseños

Para la selección de la alternativa de diseño adecuada se adaptó la Matriz de Ponderación de Criterios del método Kepner-Tregoe; esta es una herramienta de toma de decisiones utilizada para seleccionar la alternativa más adecuada cuando se deben comparar varias opciones bajo criterios

7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente. 37

múltiples. La metodología propone identificar primero los criterios relevantes para el objetivo del proyecto y asignarles un peso según su importancia relativa. Posteriormente, cada alternativa se califica en función de qué tan bien cumple con cada criterio. Finalmente, se calcula la contribución ponderada multiplicando el peso por la calificación y se obtiene un puntaje total que permite comparar objetivamente las distintas opciones. Esta técnica es ampliamente utilizada en procesos de diseño, ingeniería y selección de soluciones, ya que ofrece un método sistemático, cuantitativo y justificable para respaldar la decisión final.

En el contexto de este proyecto de grado, la matriz se aplicó para seleccionar el entorno de RV más adecuado entre tres alternativas. Los criterios definidos como temática, narrativa, interacción, duración de la experiencia, estimulación sensorial, ritmo y sensación de presencia representan factores esenciales para una experiencia RV terapéutica efectiva, especialmente en aplicaciones orientadas a la evocación emocional positiva. A cada criterio se le asignó un peso proporcional a su relevancia, de manera que aquellos con mayor impacto en la experiencia del participante contribuyeran más al resultado final; el criterio con mayor impacto fue la interacción o el modo de interacción, ya que al no contar con movilidad, es necesario incluir al paciente de otra manera.

Una vez establecidos los pesos, se evaluó cada alternativa, abreviada como (**Alt. N**) mediante una escala de calificación del 1 al 5. Posteriormente, se calculó la contribución ponderada, que se abrevió como (**Ctb.**) multiplicando el peso por la calificación correspondiente a cada criterio. La suma de estas contribuciones produjo un puntaje total por alternativa, lo que permitió identificar la opción con el mayor valor agregado en términos de diseño emocional, calidad sensorial e interacción.

Criterio	Importancia	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Ctb. de Alt. 1	Ctb. de Alt. 2	Ctb. de Alt. 3
Temática	0,15	4	4	4	0,6	0,6	0,6
Narrativa	0,15	4	4	3	0,6	0,6	0,45
Interacción	0,2	3	4	2	0,6	0,8	0,4
Duración	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
Estimulación sensorial	0,15	4	4	3	0,6	0,6	0,45
Ritmo	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
Sensación presencia	0,15	4	4	3	0,6	0,6	0,45
TOTAL	1				3,7	4,1	3,05

Cuadro 7.3: Matriz de selección para alternativa de entorno

De acuerdo con los resultados obtenidos en 7.3, la alternativa 2 obtuvo el puntaje más alto, convirtiéndose en la opción seleccionada para el desarrollo del entorno RV. Especialmente porque se fundamenta en los siguientes pilares:

- **Perspectiva en primera persona:** El paciente “verá” su cuerpo virtual caminando
- **Animación de caminata a lo largo del lago:** Un movimiento pasivo que simula la bipedestación.

El uso de la matriz Kepner–Tregoe permitió fundamentar la selección del entorno de manera objetiva, transparente y cuantificable. Además, garantizó que la decisión estuviera alineada con los objetivos terapéuticos del proyecto, priorizando características que favorecen la presencia, la significación emocional y la estimulación sensorial adecuada para un paciente con cuadriplejía. De esta forma, la metodología asegura que la elección de la escena no sea arbitraria, sino resultado de un proceso estructurado que considera tanto las necesidades del usuario como los requisitos técnicos y emocionales de la intervención.

7.2.2. Diseño del escenario inmersivo de RV incorporando elementos visuales, sonoros e interactivos personalizados al paciente.

7.2.2.1. Identificación de mecánicas de interacción adaptables a la condición del paciente:

En el contexto del desarrollo de experiencias interactivas, las mecánicas se definen como las acciones, comportamientos y controles que el usuario puede ejecutar dentro del sistema, constituyen los componentes concretos con los cuales el usuario interactúa directamente; sin embargo, dadas las limitaciones motrices del participante P1, no resulta viable la interacción con los elementos hardware y software de locomoción convencionales implementados en Unity, tales como controladores manuales o sistemas de teleportación por botones. En consecuencia, se diseñaron mecánicas de interacción alternativas compatibles con el perfil funcional del participante:

- **Mecánica de primera persona:** Le permite al usuario estar presente en el escenario con un avatar virtual, en otras palabras, en primera persona, haciendo uso del sistema de seguimiento cefálico.
- **Mecánica de recorrido guía:** Le permite al usuario moverse a través del escenario virtual sin utilizar controladores hardware o movimientos físicos; esto se realiza moviendo la cámara que permite la visualización dentro del entorno virtual.

7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente. 39

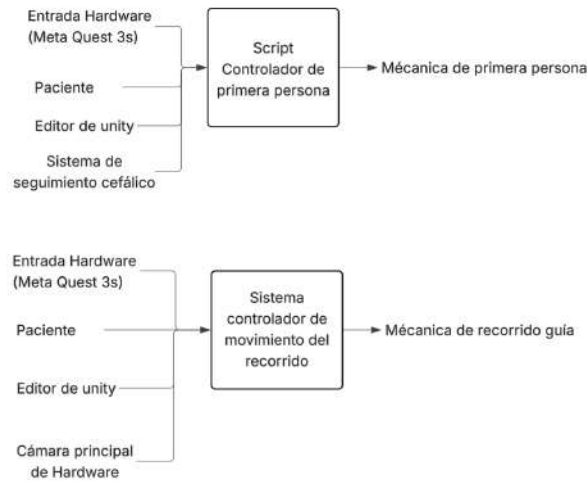


Figura 7.1: Diagrama de cajas negras de las mecánicas de interacción

Durante esta fase se definieron tres componentes de la dimensión auditiva que se relatan en la alternativa: música ambiental, paisaje sonoro natural y narración contextual.

Paisaje sonoro natural: Se integraron grabaciones de aves endémicas de la región del Calima y Yotoco, específicamente la pava caucana (*Penelope perspicax*), el bichofué (*Pitangus sulphuratus*), y el canario común (*Sicalis flaveola*). Estas especies trinatoras fueron seleccionadas por su autenticidad biogeográfica con el fin de reforzar la sensación de presencia en un entorno natural.

Música ambiental: Se seleccionó la canción "Pesadilla" del grupo Ocho y Media, la cual fusiona elementos de bolero y salsa romántica. Esta elección se fundamentó en las preferencias musicales identificadas durante la caracterización del participante P1, quien expresó afinidad por la salsa romántica como género de su agrado, pero manteniendo el componente de relajación con una canción de bajo tempo.

Narración contextual: Se desarrolló un cuento corto narrado que es inspirado en las tradiciones de la cultura Calima precolombina, esta civilización habitó la región del Valle del Cauca entre los años 1600 a.C. y 1600 d.C. La narrativa integra elementos documentados de su organización social como cacicazgos con herencia matrilineal; prácticas económicas, como la pesca en el lago, orfebrería especializada, comercio regional; y su cosmovisión, donde se consideraba al lago como entidad sagrada proveedora de vida. [76] El cuento tiene la siguiente narrativa:

“Hace muchos siglos, el pueblo Calima vivía en estas tierras. Desde sus bohíos en las colinas, los guarrones, líderes que cuidaban del lago sagrado.

El lago no era solo agua: era el espíritu de la tierra. De él sacaban pescado dorado, cuyo aceite alimentaba a su pueblo, y comerciaban con sus vecinos.

El cacique Calima portaba un pectoral de oro en forma de corazón sobre su pecho. Fue forjado con la técnica de la cera perdida, arte que solo los orfebres Calima dominaban.

Una mañana, mientras caminaba por la orilla, escuchó el canto de las aves. Supo que los espíritus estaban contentos.

Se arrodilló y tomó agua con sus manos. "Lago sagrado," susurró, "tú que nos das la vida... permítenos vivir para siempre entre estas montañas". Esa noche, junto al fuego, Calima les dijo a sus hijos: "Hijos míos, cuiden el lago, porque cuando el agua deje de fluir, cuando el pescado deje de nadar, cuando las aves dejen de cantar, ese día nuestro pueblo dejará de existir".

Y así fue. Generación tras generación cuidaron el lago, trabajaron el oro, honraron a sus ancestros. Sin embargo, hoy, el lago permanece, pero su comunidad, no. Guarda en sus aguas los secretos de los guarrones, esperando a ser encontrados y con ellos la reverencia hacia el lago."

7.2.2.2. Diseño de la escena y componentes de retroalimentación visual y sonora

La implementación del prototipo RV siguió una metodología sistemática e iterativa que integró: modelado 3D del entorno natural, incorporación de assets, programación de scripts de control (PathController, FirstPersonBodyController, VRIntroManager, Waypoint) y optimización para Meta Quest 3S. Las siguientes subsecciones detallan las fases de desarrollo y las decisiones técnicas adoptadas.

1. Selección de recursos open source e Integración en Unity:

La selección de recursos 3D priorizó tres criterios fundamentales: compatibilidad con dispositivos de realidad virtual de gama media (Meta Quest 3S), coherencia visual con las preferencias identificadas en el paciente (espacios naturales, lago, vegetación). En esta etapa consistió en la recopilación y adaptación de todos los elementos 3D necesarios para la simulación. El recurso open source crítico fue la escena principal, la cual se extrajo del modelo "Park with a pond" [77]. Entre los recursos empleados, se destacan: los árboles tipo realista [78, 79], estos reemplazaron a los que se encontraban en el modelo principal, los elementos de las texturas del cielo y lago [80, 81] y el diseño del personaje principal. [82]

Con los modelos preparados, se procedió al montaje de la escena principal en Unity. Inicialmente se configuró el sistema XR Rig, componente que transforma la cámara principal en la estructura base para la visualización en dispositivos de realidad virtual. A partir de esta configuración, se incorporó la escena principal del parque, se estableció el sistema de iluminación y se ajustaron los elementos prefabricados importados.

Dado que la escena original funcionaba con el motor de renderizado "Universal Render Pipeline" (URP), cuyo procesamiento resultaba obsoleto para los requerimientos del proyecto, se realizó una migración completa al motor "Built-In Render Pipeline". Durante este proceso de actualización, varios elementos quedaron incompatibles o dañados, siendo necesario reemplazarlos con versiones actualizadas compatibles con el nuevo motor. Entre los elementos afectados se identificaron: el material del cielo (skybox), el material principal de los árboles originales y el material del cuerpo de agua del lago. Cada uno de estos componentes fue sustituido por alternativas funcionales que

garantizaron la integridad visual del entorno.

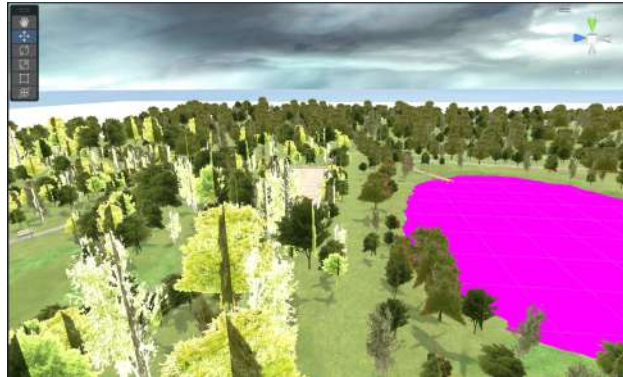


Figura 7.2: Elementos dañados dentro de la escena

En la Figura 7.2 se ilustran los elementos que presentaron incompatibilidad tras la migración y actualización del motor de renderizado.

2. Programación y desarrollo de scripts:

El desarrollo de la lógica funcional se implementó utilizando *scripts* en C#, adhiriéndose a una estructura modular y orientada a objetos. Para optimizar el flujo de trabajo, el proceso se ejecutó siguiendo este orden:

- **WaypointContextual.cs:**

El script *Waypoint.cs* permite configurar puntos de interés específicos a lo largo del recorrido virtual. Cada waypoint se identifica mediante un nombre descriptivo y un índice secuencial que define su posición en la ruta. El diseño "contextual" se refiere a la capacidad de personalizar cada punto con configuraciones únicas: tiempo de pausa al llegar (*pauseDuration*), velocidad de aproximación personalizada (*customSpeed*) y reproducción de audio ambiental con control sobre si debe esperarse a que termine antes de continuar (*pauseWhileAudio*).

El funcionamiento interno se basa en métodos que gestionan el ciclo de vida del waypoint: *Awake()* inicializa el componente *AudioSource* si hay audio configurado, *OnWaypointReached()* se ejecuta al llegar y puede desencadenar eventos personalizados, *PlayAudio()/StopAudio()* controlan la reproducción sonora, y *GetTotalPauseDuration()* calcula dinámicamente el tiempo total de detención sumando la duración del audio (si aplica) más el tiempo de pausa manual. La integración con *PathController* es directa: al detectar llegada al waypoint (distancia $<1m$), el *PathController* consulta el tiempo de pausa, ejecuta una espera asíncrona, y continúa al siguiente waypoint. Esta arquitectura modular permite crear recorridos complejos sin modificar código, simplemente configurando propiedades en el editor de Unity.

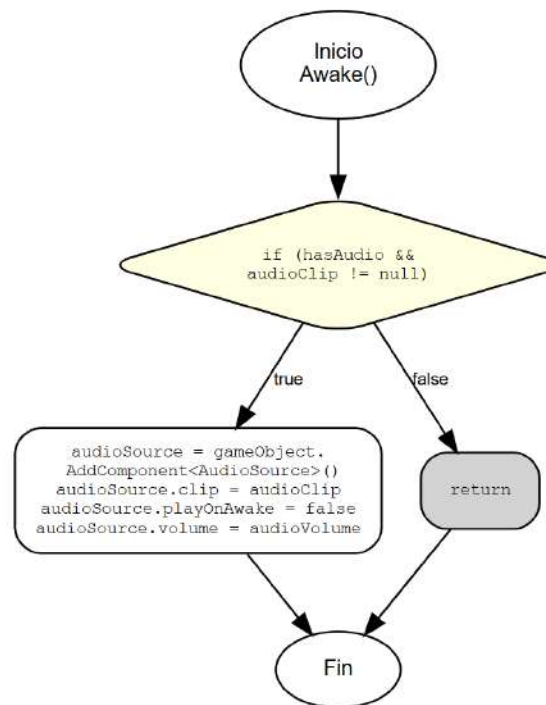


Figura 7.3: Funcionamiento del ciclo Awake

- **PathControllerV2.cs:**

Este componente central gestiona el desplazamiento automático del XR Rig a través de waypoints. La lógica se estructura mediante una máquina de estados finitos con cuatro estados: Idle (inactivo), Moving (en movimiento), Paused (pausado) y Completed (finalizado).

El algoritmo principal implementa un loop de navegación donde, para cada waypoint, se ejecuta: (1) desplazamiento suavizado hacia la posición objetivo mediante interpolación SmoothDamp, (2) activación del evento de llegada al waypoint, y (3) pausa configurable antes de continuar. La interpolación SmoothDamp fue seleccionada sobre Lerp por su aceleración y desaceleración gradual, reduciendo el riesgo de cinetosis. La rotación del XR Rig se gestiona independientemente, calculando la dirección hacia el waypoint objetivo y aplicando rotación mediante Quaternion.Lerp únicamente sobre el eje Y (rotación horizontal), manteniendo fijos los ejes X y Z para evitar inclinación de cámara.

Método	Funcionalidad
StartPath()	Inicia el recorrido desde el primer waypoint
PausePath()	Pausa el movimiento sin perder progreso
ResumePath()	Reanuda el movimiento desde punto pausado
StopPath()	Detiene completamente y resetea a Idle
IsMoving()	Retorna verdadero si está en movimiento
GetCurrentWaypointIndex()	Retorna índice del waypoint actual

Cuadro 7.4: Métodos públicos principales de PathControllerV2

El script 7.4 constituye un componente crítico para la mecánica de recorrido guiado, integrando todos los elementos necesarios para gestionar autónomamente el movimiento del XR Rig. Esta automatización genera en el usuario la sensación de recorrer libremente el parque sin requerir la manipulación de controladores externos, facilitando así una experiencia de interacción pasiva.

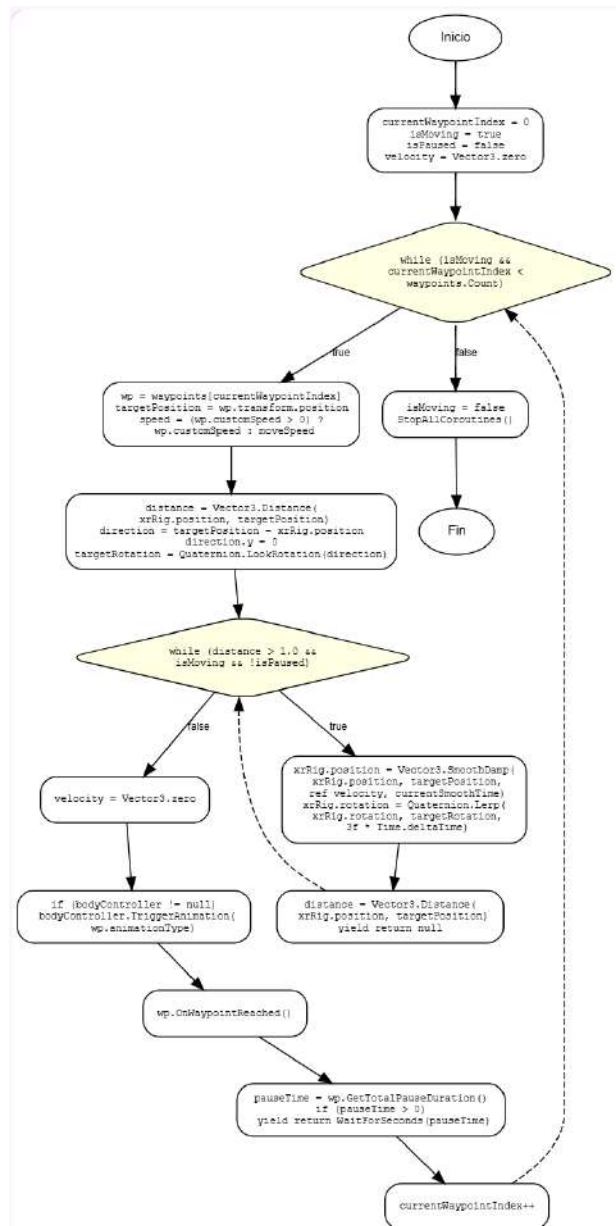


Figura 7.4: Flujo de procesamiento de sistema controlador de movimiento en el recorrido

■ FirstPersonBodyController.cs

Este script es la base de la mecánica de primera persona, gestiona la representación visual del cuerpo del usuario desde la perspectiva de primera persona, sincronizando continuamente la posición y rotación del modelo 3D del avatar con el XR Rig. La sincronización opera en cada frame para garantizar alineación perfecta.

La posición del avatar se calcula sumando un vector de offset al transform de la cámara RV. Este

7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente. 45

offset, configurable mediante el Inspector, permite ajustar la altura relativa del cuerpo. El valor predeterminado de (0, -0.9, 0) en los ejes XYZ posiciona el avatar 90 centímetros por debajo de la cámara, resultando en una vista donde el usuario percibe su torso y extremidades superiores. El sistema de animación se controla mediante dos parámetros: "IsWalking", el cual recibe un valor de tipo booleano, este indica si debe reproducir animación de caminar, y "Speed" de tipo numérico float que controla la velocidad de dicha animación. La detección del estado de caminar implementa doble validación: verifica tanto la velocidad calculada localmente como el estado del PathController, garantizando activación incluso en momentos finales de aproximación donde la velocidad puede caer.

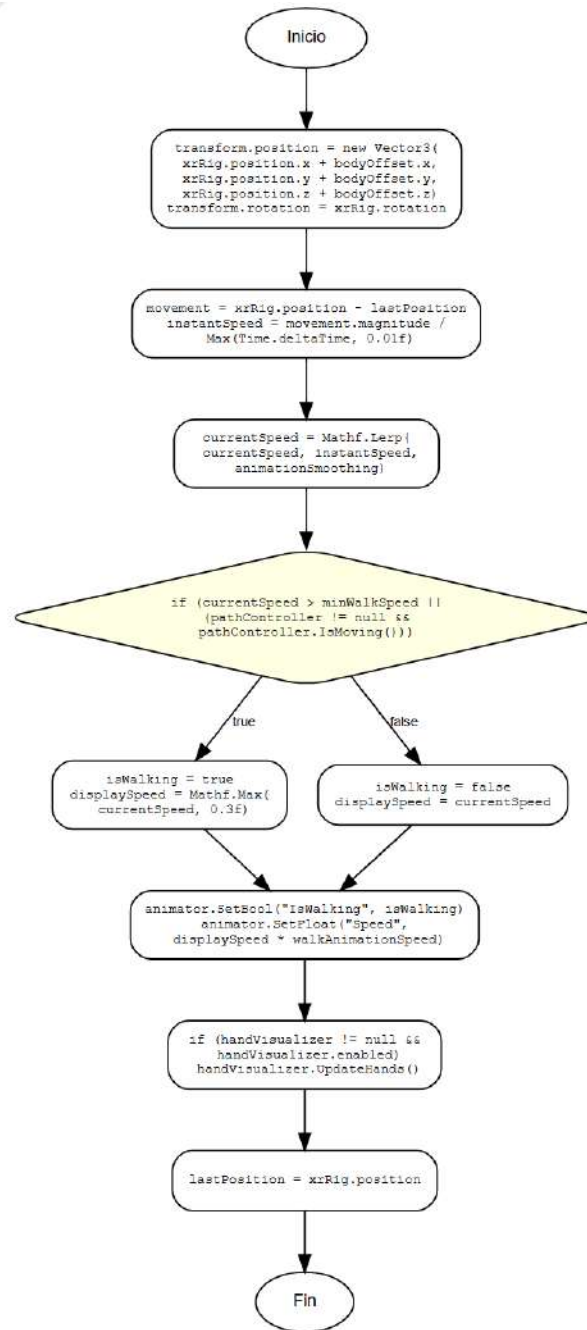


Figura 7.5: Flujo de mecánica en primera persona.

■ VRIntroManager.cs

Este script orquesta la secuencia temporal de la experiencia, gestionando la transición entre tres

7.2. Diseño de un escenario inmersivo de RV de interacción pasiva con elementos de retroalimentación con base en los elementos de personificación del paciente. 47

fases: introducción, recorrido activo y cierre. La lógica se estructura en dos métodos: Start() para inicialización y Update() para monitoreo continuo.

En la fase de inicialización, el script realiza: (1) validación de referencias, (2) cálculo del índice del último waypoint, (3) desactivación temporal del PathController, (4) activación del Canvas de introducción, (5) desactivación del Canvas de cierre y (6) inicio de la rutina temporizadora. La rutina implementa una pausa bloqueante al inicio del recorrido de 25 segundos, siendo configurable. Al finalizar el tiempo, oculta el Canvas de introducción, activa el PathController e invoca StartPath() para iniciar el recorrido automático. El método Update() monitorea dos condiciones para detectar finalización: el índice debe ser mayor o igual al último waypoint y el PathController debe reportar no-movimiento.

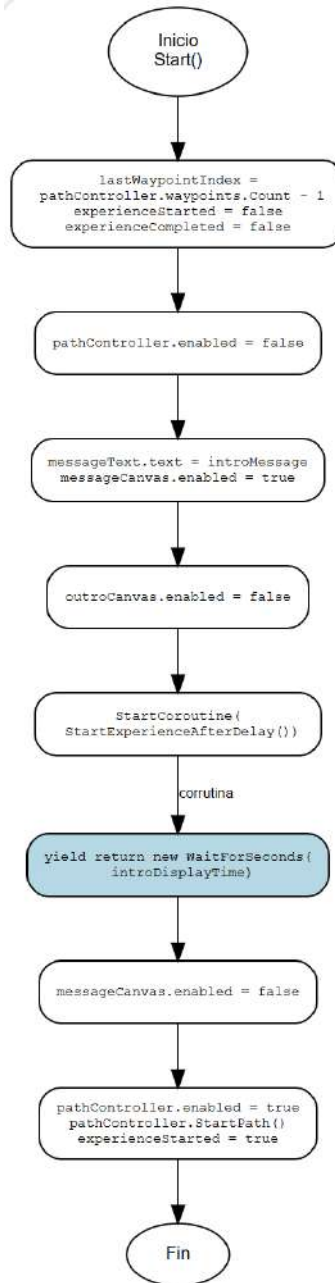


Figura 7.6: Flujo de inicialización del script VRintroManager

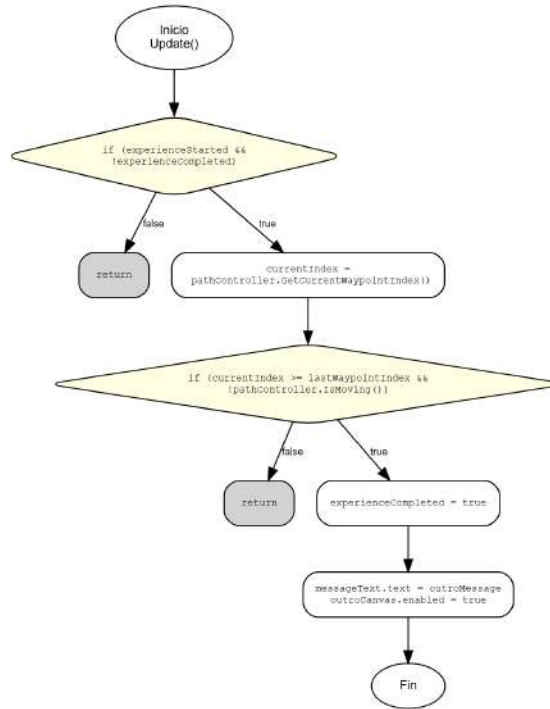


Figura 7.7: Flujo de ciclo actualizador del script VRintroManager

3. Integración de lógica del entorno y diagramas de flujo de los scripts

La comunicación entre scripts se implementó mediante referencias directas, invocación de métodos públicos en los scripts y sistema de eventos. El flujo de ejecución típico durante una sesión se ejecuta de la siguiente manera: VRIntroManager inicia mostrando Canvas de introducción y desactivando PathControllerV2; después de 25 segundos, VRIntroManager oculta Canvas y activa PathControllerV2 invocando StartPath(), posteriormente PathControllerV2 inicia el loop de waypoints, moviendo el XR Rig hacia cada objetivo.

En cada frame, FirstPersonBodyController sincroniza el avatar con XR Rig y actualiza el Animator; al llegar a waypoint, PathControllerV2 invoca WaypointContextual.OnWaypointReached(), la cual indica que el movimiento del XR rig ha llegado al siguiente waypoint; WaypointContextual, comunica a FirstPersonBodyController el tipo de animación contextual que se debe realizar en el waypoint en caso de ser aplicable; de ser así, PathControllerV2 pausa el recorrido según la configuración del waypoint antes de continuar.

Al alcanzar el último waypoint, VRIntroManager detecta y activa Canvas de cierre. La función de SimpleHandVisualizer opera en paralelo actualizando continuamente la visualización y el seguimiento de las manos.

Arquitectura de componentes:

La arquitectura del sistema sigue un patrón de composición jerárquica donde componentes espe-

cializados se comunican mediante referencias explícitas y eventos. Esta estructura modular facilita el mantenimiento, testing y extensión de funcionalidades. En Unity la jerarquía de los *GameObjects* esta de la siguiente manera:

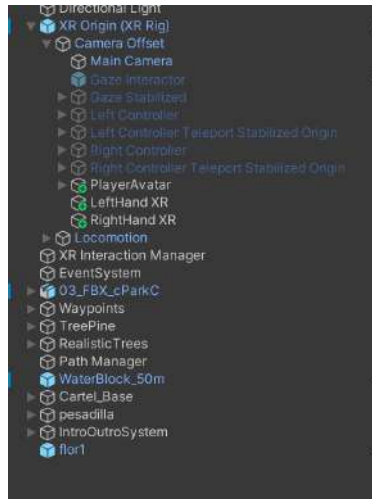


Figura 7.8: Jerarquía de objetos en Unity

4. Validación funcional y pruebas:

Cada script se validó independientemente en Unity Editor mediante *modo Play* antes de la integración final y optimización; las pruebas unitarias verificaron comportamiento de métodos públicos y robustez ante condiciones límite. Durante testing se identificaron y corrigieron tres bugs críticos:

- Bug 1: Animación no se detenía en último waypoint

La causa era que solo verificaba `IsMoving() == false`, no el índice del waypoint. Para solucionarlo se agregó la verificación `currentWaypointIndex >= lastWaypointIndex`, la cual indica que el índice del waypoint final debe ser mayor al del anterior.

- Bug 2: Canvas de outro aparecía prematuramente

El canvas se activaba cuando `IsMoving()` era falso, haciendo incluir pausas intermedias. Para solucionarlo se modificó el `VRIntroManager.Update()` para verificar ambas condiciones simultáneamente; además de que se utilizó un canvas para intro y otro para outro.

- Bug 3: Avatar se teletransportaba ocasionalmente

La causa era que cuando la frecuencia con la que se muestran los fotogramas por segundo caía por debajo de 30 FPS (*Frames Per Second*), `SmoothDamp` acumulaba velocidad excesiva. Solución: Limitar `Time.deltaTime` a un máximo de 0.05 segundos en el cálculo de velocidad.

5. Optimización del entorno inmersivo

Se realizaron ajustes de optimización al entorno, con el objetivo de reducir el uso de memoria GPU:

El *lightmapping* con el cual se precálculan sombras y luz indirecta en las texturas de los objetos 3D durante diseño, eliminando cálculos de iluminación en el tiempo de juego. Para este proceso se marcan los objetos estáticos (terreno, árboles, rocas) con el indicador "Static", se configura la *Directional Light* en modo "Mixed", esto reduce las sombras que se calculan mientras el usuario no está viendo la zona.

Adicionalmente, se realizó una compresión de assets y texturas, utilizando las configuraciones de Unity como "Mesh compression" en el nivel medio sin comprometer la calidad visual y "Optimize Mesh" que se encarga de reorganizar el caché de los polígonos.

Producto final El diseño resultó en un entorno RV inmersivo funcional, compilado como aplicación Android (APK) de 145 MB, instalable en Meta Quest 3/3S. Este sistema integra un recorrido guiado pasivo adaptado a limitaciones motrices de cuádruplejía, con un sistema de animaciones contextuales sincronizadas según la posición del usuario y una interfaz de mensajes temporales sin requerimiento de interacción manual, que permite al paciente disfrutar de una experiencia tranquila e inmersiva durante el proceso de fisioterapia; por otra parte se alinea con los ejercicios propuestos por el fisioterapeuta, originando confort y dinamismo a la terapia.

Adicionalmente se incluyó la visualización del seguimiento de mano mediante los paquetes de Unity XR Hands Subsystem.

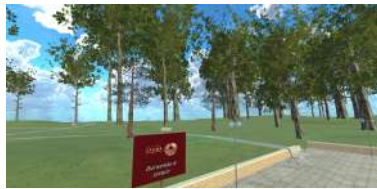
Se realizaron pruebas exitosas en Unity Editor y deployment a Meta Quest 3S, confirmando estabilidad del sistema y ausencia de errores críticos en tiempo de ejecución. Como complemento al objetivo de diseño, con el propósito de documentar visualmente el prototipo desarrollado, se presentan a continuación capturas del entorno virtual del basado en el Lago Calima implementado en Unity. Estas imágenes ilustran el nivel de detalle gráfico alcanzado en el paisaje natural, la sincronización del avatar visible con la perspectiva en primera persona, la distribución de vegetación y cuerpos de agua, y la integración de elementos visuales contextuales que conforman la experiencia inmersiva personalizada para el participante P1.

Inicialmente en la figura 7.9 es posible visualizar la introducción al ciclo de **VRintroManager.cs** en el cual se le da la bienvenida a la experiencia a participante.



Figura 7.9: Bienvenida al entorno virtual como parte del ciclo de VRintroManager.cs

En las siguientes imágenes, 7.10 se evidencia que el escenario incluye elementos naturales y arquitectónicos como árboles, mobiliario y caminos que guían el desplazamiento del usuario, diseñados para generar sensaciones de paz y relajación. Se evitó la sobrecarga de texto escrito que requiera lectura prolongada, dado que esta actividad demanda recursos cognitivos que competirían con el efecto analgésico de la distracción. En su lugar, se priorizó el audio como medio principal de distracción como la música, narración y los sonidos ambientales. Los mensajes textuales necesarios se presentan acompañados de elementos visuales ilustrativos para facilitar su comprensión.



(a) Cartel de “Bienvenido al parque” con logo cultural de Calima



(b) Cartel sobre la cultura Calima donde inicia la narrativa



(c) Cartel donde inicia la canción "Pesadilla" que acompaña el final del recorrido

Figura 7.10: Elementos visuales y carteles dentro del recorrido guiado del entorno virtual

En la figura ?? se observa parte del recorrido que realiza el participante dentro del entorno, adicionalmente, se observa con una línea verde el recorrido a seguir y los waypoints contextuales.



Figura 7.11: Elementos visuales de recorrido guiado

7.3. Evaluación de la efectividad del entorno virtual mediante un estudio pre-experimental al paciente usando la escala de NRS.

7.3.1. Diseño de protocolo de evaluación y encuestas de percepción a sujetos de interés

Para la implementación y evaluación del entorno se diseñaron 2 elementos de recolección principales: la encuesta de percepción de dolor con base en la escala NRS al paciente y la encuesta de percepción al fisioterapeuta.

Teniendo en cuenta lo anterior, la encuesta de percepción de dolor del paciente se realizó con base en la Escala de Clasificación NRS, la cual es una herramienta validada para la medición de dolor, de forma cuantitativa donde 0 representa “ningún dolor” y 10 “el peor dolor imaginable”; para los números intermedios se utilizaron descriptores de palabras con el fin de abarcar de una manera multidimensional la subjetividad del dolor.

El instrumento de recolección de datos para el paciente consta de 3 momentos; Pre prueba, donde el participante indica el nivel de dolor que siente antes de iniciar la intervención; Post prueba, en donde se indica el dolor (5-10) minutos después de terminar la sesión; y promedio durante la sesión, el participante determina el nivel promedio de dolor que sintió durante la sesión, este momento también se hizo al final de la sesión para evitar perturbar el estado de inmersividad y presencia del participante durante la sesión.

Marque con una X en el recuadro correspondiente al número.	
0	0 representa "Ningún dolor"
1	representa "Dolor muy mínimo, casi no se siente"
2	representa "Dolor suave. Apenas perceptible, como un ligero malestar de fondo"
3	representa "Dolor leve. Molestia ocasional que no interfiere con las actividades"
4	representa "Dolor moderado-leve. Presente pero manejable, no bloquea completamente la concentración."
5	representa "Dolor moderado. Molestia constante que dificulta levemente la concentración"
6	representa "Dolor moderado-intenso. Dolor constante que interrumpe parcialmente la concentración."
7	representa "Dolor intenso. Muy molesto, dificulta significativamente realizar actividades."
8	representa "Dolor muy intenso. Dolor que domina los pensamientos y casi imposibilita cualquier actividad."
9	representa "Dolor extremadamente intenso. Dolor casi insoportable que consume toda la atención."
10	representa "Peor dolor imaginable. Dolor tan severo que provoca sufrimiento extremo e incapacitación total."

Cuadro 7.5: Encuesta de percepción al paciente adaptando la escala NRS

En el cuadro 7.5 se encuentra la adaptación de la escala NRS que fue presentada al paciente, donde se incluyen descriptores de palabras específicos según el número. Es necesario resaltar que bajo esta misma escala se calificaron los 3 momentos (preprueba, posprueba y promedio durante la sesión).

Para la recolección de los datos por parte del fisioterapeuta se diseñó una encuesta de satisfacción sobre la utilidad del entorno virtual, mediante preguntas cerradas y un espacio para observaciones, sugerencias o quejas. La estructura de la encuesta es la siguiente:

Evaluación del entorno - Encuesta de percepción de utilidad al fisioterapeuta tratante

1. Relevancia terapéutica:

- El entorno virtual ayuda a desarrollar los objetivos de rehabilitación:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

- La utilización del entorno virtual mejora la experiencia durante las fisioterapias:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

- La utilización del entorno virtual dificulta la realización de los ejercicios de fisioterapia implementados por el fisioterapeuta:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

2. Impacto en el paciente:

- Se observa una mejora en la motivación del paciente a realizar las fisioterapias:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

3. Comentarios adicionales:

Observaciones, sugerencias o aspectos a mejorar:

7.3.1.1. Protocolo de evaluación pre-experimental

Se implementó un diseño pre-experimental de preprueba/posprueba con mediciones repetidas para evaluar el efecto del prototipo RV sobre la percepción del dolor. El protocolo se estructuró en tres fases temporales:

- Fase 1 - Preintervención: Se documentó el nivel de dolor habitual del paciente mediante el primer momento de la encuesta previo al uso de la tecnología. Esta fase estableció el punto de referencia para la comparación.
- Fase 2 - Intervención: Se realizaron sesiones de fisioterapia con el prototipo RV implementado, midiendo la percepción del dolor antes, durante y después de cada sesión. La duración de cada sesión fue de aproximadamente (25-35) minutos, coincidiendo con la duración habitual de las terapias del participante.
- Fase 3 - Evaluación cualitativa: Se recopilaron observaciones del paciente y del fisioterapeuta sobre la experiencia, usabilidad del sistema y percepción subjetiva de beneficio terapéutico.

7.3.2. Implementación y evaluación del entorno virtual mediante el uso de encuestas de percepción.

El entorno RV se implementó utilizando las gafas Meta Quest 3S proporcionadas por el Laboratorio de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La experiencia inmersiva se ejecutó en el dispositivo usando conexión a computador.

Todas las sesiones se realizaron en el domicilio del participante bajo supervisión del fisioterapeuta tratante y su cuidador responsable, contando con la presencia del equipo investigador. Se le recordó el consentimiento informado verbal y escrito previo a cada sesión, enfatizando el derecho del participante a suspender la experiencia en cualquier momento sin consecuencias.

Es necesario precisar que antes de iniciar la primera sesión el fisioterapeuta probó el entorno virtual para corroborar las interacciones dentro.

La secuencia de cada sesión con RV siguió el siguiente ruta:

1.Preparación: El paciente fue posicionado en su cama médica en la postura habitual para la fisioterapia. Se colocaron las gafas Meta Quest 3S, ajustando las correas de sujeción y verificando el campo visual. Se explicó al participante que durante la experiencia observaría un recorrido virtual mientras el fisioterapeuta realizaba los ejercicios habituales y mientras el mismo le daba instrucciones de ejercicios autónomos para realizar. Este momento duró alrededor de (3-5) minutos.

2. Introducción RV: Al iniciar la aplicación, aparecía un Canvas con el mensaje de bienvenida: "Bienvenido a tu primera experiencia de realidad virtual. A continuación vas a tener la posibilidad de realizar un recorrido a través de este parque. Disfruta de la experiencia". Este mensaje permanecía visible durante 25 segundos, tiempo suficiente para que el participante se familiarizara con el entorno virtual.

3. Recorrido inmersivo: Tras el mensaje introductorio, el sistema activaba automáticamente el PathController que iniciaba el recorrido virtual por el parque del Lago Calima. El participante observaba el paisaje natural desde una perspectiva en primera persona con un avatar visible (brazos y torso). Durante este tiempo, se reproducía música de salsa romántica personalizada en algunos tramos del recorrido y la narración del cuento se hizo de manera espaciada, para mantener la intriga de continuar al paciente. Simultáneamente, el fisioterapeuta ejecutaba los ejercicios programados: movilización pasiva de miembros inferiores durante (8-10) minutos, estiramientos durante (6-7) minutos y fortalecimiento de musculatura residual de miembros superiores y espalda durante 10 minutos; en este momento el fisioterapeuta le indica a P1 realizar de manera autónoma algunos ejercicios, guiándolo a través del entorno.

4. Cierre de experiencia: Al completar el recorrido por todos los waypoints configurados, el sistema mostraba automáticamente el mensaje final: "Gracias por participar de esta experiencia. Pide que te retiren las gafas". El fisioterapeuta procedía a retirar el HMD una vez finalizado el mensaje.

5. Evaluación post-sesión: Después de retirar las gafas, se esperaba entre (3-5) minutos y se aplicaba nuevamente la escala NRS, recopilando comentarios cualitativos del paciente sobre la experiencia.

El participante permaneció en posición sentada en cama médica durante toda la sesión. No fue necesario realizar adaptaciones técnicas significativas al prototipo durante las sesiones, lo que evidencia la adecuada optimización del sistema para el perfil del usuario.

7.3.3. Documentación y análisis de las mediciones de dolor obtenidas

Se realizaron un total de 6 sesiones de evaluación con el entorno RV. Los datos de percepción del dolor fueron registrados en 2 momentos: antes de iniciar la sesión y (5-10) minutos después de finalizar la sesión de fisioterapia.

Sesión	Dolor previo al uso RV	Dolor posterior al uso de RV	Dolor promedio durante el uso	Reducción (%)
1	10	8	8	20
2	10	7	7	30
3	10	9	8	15
4	10	7	7	30
5	10	8	7	25
6	10	8	7	25
Promedio	10	7,8	7,3	24,1

Cuadro 7.6: Resultados preliminares obtenidos en las sesiones

Los resultados preliminares mostraron una reducción promedio del 24% en la percepción del dolor durante las sesiones con RV comparado con el nivel de dolor basal previo a la intervención con RV; esto fue registrado en la tabla. 7.6 . El participante P1 reportó niveles de dolor de 10 en la escala NRS antes de iniciar las sesiones, valores que disminuyeron a un rango de (9-7) durante la experiencia RV. Posterior a la sesión, se observó un ligero incremento del dolor a niveles en algunas sesiones, aunque estos se mantuvieron por debajo del valor inicial.

Es importante destacar que la reducción del dolor fue consistente en todas las sesiones evaluadas, lo que sugiere que el efecto no fue producto del azar o de un factor externo aislado. El participante no reportó habituación o disminución del efecto tras la exposición repetida al entorno virtual.

Según la literatura, una reducción del 20% o más en la escala NRS se considera clínicamente significativa para pacientes con dolor crónico. Los resultados obtenidos superan este umbral, sugiriendo que el escenario virtual tiene un efecto terapéutico relevante en el contexto del manejo del dolor durante la fisioterapia. [22, 56]

7.3.3.1. Retroalimentación cualitativa del participante y fisioterapeuta

Adicionalmente, se recopilaron observaciones cualitativas del participante P1 y su fisioterapeuta F1 sobre su experiencia con el escenario de RV. Estas observaciones enmarcan un contexto valioso para interpretar y validar los resultados numéricos.

El participante manifestó en la primera sesión:

P1: *“La verdad esas cosas están chévere, uno se distrae bastante con esa vaina. Me gustaría comprarme unas.”*

El comentario sobre adquirir unas gafas de RV sugiere que existe un alto interés en disfrutar de la RV en contextos diferentes al terapéutico o clínico. Además, el participante infirió que la sensación de presencia en el entorno virtual fue convincente, posiblemente acerca de la ilusión de movimiento generada por el avatar en primera persona. P1 expresó que:

P1: *“Me gustó mucho, pues que se ve así bien... pues fluido y es entretenido, y pues me veo aquí como en el parque chevere”*

En cuanto a efectos adversos, no se reportaron síntomas de náuseas, mareo, o desorientación durante ninguna de las sesiones. El participante toleró bien el uso prolongado del HMD sin manifestar fatiga visual o incomodidad física significativa. Esto se atribuye a las mecánicas y optimizaciones implementadas para reducir dichos síntomas como: 90 fps estables, movimiento suave mediante SmoothDamp y ausencia de rotaciones bruscas.

En cuanto a la experiencia del fisioterapeuta, F1 quien ha tratado al paciente P1 durante varios años, proporcionó sus observaciones clínicas sobre la implementación y positivamente el potencial de la RV como herramienta asistencial, señalando que:

F1: *“La implementación de un entorno virtual en el ámbito de la rehabilitación es de gran aporte en el ámbito clínico pues nos permite extender nuestro planteamiento hacia acciones donde la realidad presente limita el alcance terapéutico. Un entorno virtual como herramienta adicional al proceso de rehabilitación nos permite poder alcanzar unos objetivos y unas metas más allá en pro del paciente desde el punto de vista de la neuroplasticidad.”*

En la encuesta de utilidad F1 destacó que durante las sesiones con RV, P1 mostró mayor motivación comparadas con sesiones previas sin tecnología. Debido a que en la encuesta en la sección **Impacto en el paciente**, respondió “Totalmente de acuerdo”

Al comparar las sesiones de fisioterapia con el prototipo RV versus las sesiones convencionales documentadas en la línea base, se identificó que existe una mejor disposición anímica durante las sesiones con RV, lo cual contrasta con la ansiedad anticipatoria que usualmente experimenta antes de la fisioterapia. Aunque el dolor incrementó levemente después de finalizar la experiencia RV, se mantuvo por debajo del nivel inicial, sugiriendo un efecto residual de corta duración.

No obstante, es importante entender las limitaciones del presente estudio. Al tratarse de un estudio de caso único (n=1), los resultados no son generalizables a la población de pacientes cuatripléjicos. Se requieren estudios con muestras más grandes para validar la efectividad de la RV. Adicionalmente, por cuestiones de tiempo y recursos el diseño pre-experimental no incluyó un grupo control con placebo o distracción no inmersiva, lo que limita la capacidad de atribuir el efecto único y específicamente a la inmersión RV versus cualquier tipo de distracción. El estudio evaluó efectos inmediatos y a corto plazo (durante y post-sesión), pero no se realizó seguimiento longitudinal para determinar si el uso regular de RV produce cambios sostenidos en la percepción del dolor; para añadir un punto más aunque la escala NRS es validada, se basa en reporte subjetivo del paciente, para estudios futuros se recomienda la inclusión de medidas fisiológicas objetivas como la frecuencia cardíaca o conductancia de piel con el fin de fortalecer la evidencia. Por último, no se puede descartar completamente la influencia del efecto placebo o de la novedad de la tecnología en los resultados obtenidos,

A pesar de estas limitaciones, los resultados preliminares son prometedores y justifican la realización de estudios más rigurosos como ensayos clínicos controlados aleatorizados para validar la efectividad de la RV personalizada en el manejo del dolor neuropático en pacientes con LME.

Conclusiones

El presente proyecto abordó el desafío terapéutico del dolor neuropático crónico en pacientes cuadripléjicos durante la fisioterapia, el cual afecta al 42-60 % de esta población y constituye así la principal causa de abandono de la fisioterapia, mediante el desarrollo e implementación de un prototipo de realidad virtual inmersiva personalizada como herramienta asistencial para el manejo del dolor durante fisioterapia en un paciente cuadripléjico, haciendo uso de la metodología pre-experimental de caso estudio de caso único estructurada en tres fases: caracterización exhaustiva del participante mediante revisión literatura y entrevistas semiestructuradas; desarrollo del escenario virtual basado Lago Calima en Unity optimizado para Meta Quest 3S, y evaluación del entorno mediante encuestas perceptuales con escala NRS durante seis sesiones. Los resultados obtenidos sugieren que existe una viabilidad técnica y clínica para hacer uso de la RV personalizada, mostrando una reducción del dolor en 24,1 % .

Se identificaron las necesidades de P1 revelando un perfil clínico crítico: cuadriplejia ASIA C (C5-C6, 16 años de evolución), dolor neuropático 8-9/10 resistente a Pregabalina 900 mg/día, movilidad parcial en miembros superiores sin función manual fina; asimismo se identificaron las preferencias documentadas, como la significancia personal del Lago Calima, salsa romántica y sus sueños recurrentes realizando actividad física. Se determinaron así los requisitos de diseño: entorno natural personalizado, música de tempo moderado; las interacciones de una experiencia en primera persona y navegación automática sin controladores, mecánicas reductoras de mareo. La caracterización demostró que la necesidad de realizar un diseño personalizado basado en preferencias individuales documentadas, más allá de parámetros genéricos, es determinante en aceptación y efectividad de RV como estrategia terapéutica.

Se diseñó un escenario virtual basado en el Lago Calima resultando en un prototipo funcional de 90 FPS optimizado para Meta Quest 3S que integra paisaje natural con vegetación regional y cuerpo de agua, sistema waypoints contextual que permiten posicionar la visualización del participante en un punto específico, un avatar sincronizado primera persona, paisaje sonoro aves endémicas, música personalizada, y narración cultural Calima. La arquitectura técnica se desarrolló bajo los siguientes scripts: PathController, FirstPersonBodyController, VRIntroManager, Waypoint. Los scripts de optimización diseñados por Unity permitieron alcanzar un rendimiento estable mediante lighting mapping y compresión de texturas.

Se evaluó el prototipo donde se documentó una reducción 24.1 % del dolor, tras pasar de un dolor registrado 10/10 a 7.3/10 durante la intervención RV, y 7.8/10 posterior a esta en seis sesiones sin habituación ni efectos adversos. Superar el umbral 20 % es clínicamente significativo alineándose según rangos de la literatura sobre dolor crónico [56]. Significancia que aumenta al contextualizar con las circunstancias de P1, las cuales ocasionaron resistencia a los tratamientos farmacológicos e

inconsistencias. La retroalimentación cualitativa sugiere que se logró motivar a P1 al cumplimiento de sus responsabilidades clínicas terapéuticas, además, infiere que la RV es una herramienta que permite orientar las terapias físicas al aspecto de la neuroplasticidad.

Es importante denotar las limitaciones de este estudio: el diseño de caso único ($n=1$) constituye la principal limitación metodológica del estudio, restringiendo severamente la capacidad de establecer inferencias causales definitivas y generalización poblacional de los hallazgos. Adicionalmente, la ausencia de grupo control impide descartar efectos placebo, expectativa o sesgo de deseabilidad social, donde el participante podría reportar mejoras influenciadas por el conocimiento de estar recibiendo una intervención novedosa o por el deseo de complacer a los investigadores. Asimismo, no es posible controlar la falta de variables externas que podrían explicar parcialmente la reducción del dolor observada, tales como variaciones naturales en la intensidad del dolor a lo largo del día, efectos acumulativos del tratamiento fisioterapéutico convencional, o cambios en el estado emocional del participante.

La dependencia exclusiva de la escala NRS como medida de resultado introduce subjetividad significativa, dado que la percepción del dolor es inherentemente subjetiva y susceptible a influencias cognitivas, emocionales y contextuales. La ausencia de medidas fisiológicas objetivas limita la capacidad de corroborar las reducciones reportadas con cambios en marcadores biológicos asociados al estrés y al dolor.

En síntesis, los resultados alcanzados respaldan la factibilidad técnica y clínica de los objetivos planteados, confirmando que el prototipo de RV constituye una herramienta de asistencia viable para complementar el tratamiento fisioterapéutico de pacientes con DNC. Además, el proyecto demuestra el potencial de la RV inmersiva y la personalización basada en caracterización exhaustiva del paciente como estrategias innovadoras y efectivas para el manejo no farmacológico del dolor crónico en rehabilitación de personas con LME.

Trabajos futuros

El desarrollo de este entorno constituye una base para implementar la RV en tratamientos de pacientes con LME; es por esto que inicialmente se propone la replicación y adaptación del estudio con un tamaño de muestra mayor incluyendo mediciones fisiológicas como: electrocardiografía, presión arterial no invasiva o alguna otra bioseñal que sea determinada por marcadores biológicos de emociones.

Adicionalmente, se propone la inclusión de sistemas como Eye tracking con el fin de analizar hacia dónde se dirige la atención visual del participante. Otra línea de trabajo es el uso de técnica **Motor Imagery** que permite al participante practicar un movimiento específico mentalmente al concentrarse en los detalles del movimiento; como las sensaciones de este y la secuencia del movimiento; la RV puede proporcionar entorno para guiar estas imágenes motoras mediante la retroalimentación visual y auditiva; proporcionando la sensación de presencia, ayudando al cerebro a procesar mejor el movimiento previsto; estimulando así la neuroplasticidad del participante llevándolo a crear conexiones neuronales para adaptarse al movimiento que se está proyectando. El apoyo de esta técnica en este estudio podría abarcarse desde el aspecto de que el participante pueda mover un avatar según su preferencia. La mayoría de los pacientes con LME no tienen control motor de sus miembros superiores, por lo tanto está limitado a sistemas de locomoción que no son inclusivos para su condición.

CAPÍTULO 10

Anexos

Anexo 1 – Entrevistas a sujetos de interés

Entrevista semiestructura a paciente

P1: Sujeto paciente de estudio

ENT: Entrevistador (Investigador principal)

FIS1: Fisioterapeuta 1

ENT: *“Esta es la primera grabación con el P1, se comienza la entrevista a las 4:28 de la tarde. Bueno, primeramente, como me presenté, Mi nombre es Angela María Aguilar, soy estudiante de la universidad Javeriana cali y estudiante de ingeniería biomédica.”*

1. Datos Personales

- Nombre (opcional): P1
- Edad (opcional): entre 40 y 45 años
- Tiempo de condición de cuádrupleja: 16 años

2. Intereses Personales

¿Ha realizado o actualmente realiza algún tipo de terapia física? ¿de qué tipo?

ENT: *“¿realiza algún tipo de terapia física, es acompañada y más o menos si me puede explicar qué tipo de ejercicio realiza?”*

P1: *“Pues la verdad, pues me hacen movilizaciones de las piernas, brazos. Sí, como pues para el mantenimiento, y pues uno que otro ejercicio como para abdominales y cosas así.”*

¿Realiza alguna actividad diferente a la terapia física adicional? ¿cuál?

ENT: *“Ok, además de esa terapia física, ¿realiza otro tipo de terapia física o de actividad física?”*

P1: *“No, en este momento no.”*

¿Tiene algún lugar o paisaje que considera relajante y cómodo?

P1: *“Sí, pues lugares donde estuve antes del accidente como el Lago Calima o Buga”*

¿Qué tipo de música o sonidos le resultan más reconfortantes?

ENT: *“Sí, tiene música que disfrute, especialmente que le guste para relajarse. O algo así por el estilo.”*

P1: *“Sí, por ahí que... La salsa muy variada, pero por ahí la salsa de tipo romántica”*

3. Experiencia con dolor:

¿Presenta dolor general y persistente?

P1: *“Sí, pues como te decía no es un dolor en una zona específica, es un dolor intenso en todo el cuerpo en la mañana es cuando más me duele, ya luego en la tarde es cuando me siento un poco mas tranquilo porque baja un poco”*

Durante la terapia física, ¿sientes que el dolor persiste, se incrementa o se mantiene igual al dolor que padeces normalmente?

P1: *“Realmente la terapia no me ayuda mucho, me mantengo con dolor, a mi me movilizan los brazos porque me dan muchos calambres y en las piernas también, entonces ahí el dolor es intenso”*

En una escala del 1 al 10, ¿dónde se ubicaría su nivel de dolor habitual antes de la terapia física o en condiciones normales?

P1: *“Pues a mi me dan pastas para el dolor, tomé Pregabalina de 300mg en la mañana y tarde, en la noche tomo 600 pero realmente no me ayuda, son muy raras las veces cuando me baja el dolor, en la mañana y tarde es más intenso que cuando no me hacen efecto las pastas, yo le pondría entre 8- 9 y ya cuando cae la noche a veces me hace efecto las pastas yo diría que 6 pero el dolor nunca para, siempre está ahí”*

¿Qué estrategias ha encontrado útiles para manejar el dolor?

P1: *“Mira que yo he buscado y buscado esa estrategia como decís vos pero no, no me ayuda casi nada, ahora que estamos aquí en la charla pues uno se distrae, pero el dolor sigue ahí, ahora mismo lo siento mucho en la piernas y brazos”*

4. Expectativas de la Realidad Virtual:

¿Conoce lo que significa la realidad virtual y cómo funciona?

P1: *“Pues mira que no la conocía, antes que me contaras no la conocía, pero sería bueno, pues para uno ensayar a ver que tal”*

¿Qué le gustaría experimentar o lograr a través de esta tecnología?

P1: *“Pues yo friego mucho para entretenerme y que se me olvida por ratos el dolor. Por ejemplo, me gusta mucho los paisajes, yo veo muchas cosas así como parques, ver animales y cosas así”*

¿Tiene alguna preocupación o temor sobre usar realidad virtual?

P1: *“Pues la verdad no, ya con lo que me contaste no”*

Entrevista semiestructura a fisioterapeuta

1. Perfil Profesional

- Nombre (opcional):
- Años de experiencia: 10 años
- Especialidad: área de rehabilitación osteomuscular, ortopédica y deportiva.

2. Evaluación Clínica del Paciente

¿Cuáles son los principales objetivos de rehabilitación para este paciente?

FS1: *“Él es un paciente con el que se empezaron las terapias después de 7 años del trauma, por lo tanto su pronóstico no es bueno, durante estos años su evolución ha sido mínima, tanto así, que yo lo he tratado de llevar a ejercicios de sedestación y bipedestación asistidos pero su musculatura se encuentra muy débil y es una persona que pesa mucho, de la única manera que se puede realizar sedestación en con la ayuda de la cama y el uso de varias almohadas.”*

¿Qué limitaciones específicas observa que podrían ser abordadas con realidad virtual?

FS1: *“Sería chévere ver si la experiencia podría tener alguna interacción de bipedestación, porque una de las cosas que más me cuenta él es que él se sueña caminando, corriendo, saltando y todas esas cosas, entonces sería bueno para él experimentar algo así al menos dentro de la realidad virtual, para ver si le estimula un poco la parte de la neuroplasticidad”*

3. Personalización Terapéutica:

¿Qué tipos de ejercicios o estímulos considera más adecuados para este paciente?

FS1: *“Yo le hago mucho estiramiento, pues para mantenerle la función que ya tiene, usualmente le hago estiramiento de los músculos del glúteo y aductores; además pues le movilizo los brazos y las piernas, como para que él no se estanque”*

¿Hay alguna restricción o precaución a nivel cervical que se deba tener en cuenta?

FS1: *“Afortunadamente, él tiene la función del cuello completa, incluso algunos de los músculos de la espalda son funcionales, son los que yo trato de mantenerle.”*

¿Considera que existen otras limitaciones funcionales?

FS1: *“Pues, él no tiene función de muñecas completas, él puede hacer los movimientos en prono, más no puede hacer la parte de supinación y pues como puedes ver él no tiene nada de movilidad en los dedos”*

4. Expectativas Tecnológicas ¿Qué beneficios espera de la implementación de realidad virtual?

FS1: *“Principalmente, la neuroplasticidad y la parte de verse en bípedo porque pues yo he tratado de llevarlo a esas experiencias pero no se puede, él (P1) es una persona demasiado pesada, me tocaría hacerlo con 3 personas y realmente no rendiría.”*

Anexo 2 – Encuesta perceptual de utilidad a fisioterapeuta tratante

Evaluación del entorno - Encuesta de percepción de utilidad al fisioterapeuta tratante

1. Relevancia terapéutica:

- El entorno virtual ayuda a desarrollar los objetivos de rehabilitación:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

- La utilización del entorno virtual mejora la experiencia durante las fisioterapias:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

- La utilización del entorno virtual dificulta la realización de los ejercicios de fisioterapia implementados por el fisioterapeuta:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

2. Impacto en el paciente:

- Se observa una mejora en la motivación del paciente a realizar las fisioterapias:

- Totalmente de acuerdo
- De acuerdo
- Neutral
- En desacuerdo
- Totalmente en desacuerdo

Evaluación del entorno - Encuesta de percepción de utilidad al fisioterapeuta tratante

3. Comentarios adicionales: Observaciones, sugerencias o aspectos a mejorar

F1: *“la implementación de un entorno virtual en el ámbito de la rehabilitación es de gran aporte en el ámbito clínico pues nos permite extender nuestro planteamiento hacia acciones donde la realidad presente limita el alcance terapéutico. Un entorno virtual como herramienta adicional al proceso de rehabilitación nos permite poder alcanzar unos objetivos y unas metas más allá en pro del paciente desde el punto de la neuroplasticidad. Dentro de la implementación del piloto se presentó una que otra falla mínima pero es de entenderse pues se está tratando con dispositivos tecnológicos. Por lo demás, no existe ninguna otra observación, sugerencia o recomendación”*

Anexo 3 – Fotografías de sesiones con el paciente

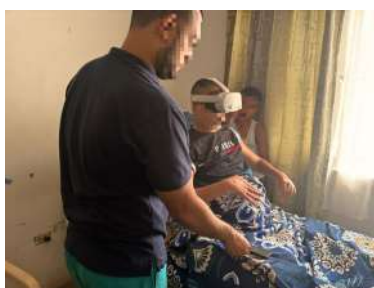


Figura 10.1: Implementación del escenario virtual con el participante.



Figura 10.2: Implementación del escenario virtual con el participante.

Anexo 4 – Scripts completos utilizados en el proyecto

Los scripts completos y descargables para su análisis se pueden encontrar en el proyecto de GitHub “Uso de realidad virtual en fisioterapia de paciente cuadriplejico: estudio de caso” [83]

Bibliografía

- [1] W. H. O. (WHO). (2013) Lesiones medulares. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>
- [2] A. R.-S. et al, “Epidemiological profile of spinal cord injury in colombia: A systematic review,” *Spinal Cord*, vol. 58, pp. 321–330, 2020.
- [3] J. C.-G. et al, “Burden of chronic pain in latin america: A systematic review,” *Pain Research and Management*, vol. 2020, pp. 1–12, 2020.
- [4] R. J. Chugh, R. Roshan and D. Alagundagi, “Factors influencing adherence to home-based rehabilitation in individuals with spinal cord injury: A cross-sectional study,” *Indian Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, no. 3, pp. 223–227, 2024.
- [5] W. H. Organization. (2024) Tecnología de apoyo. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/assistive-technology>
- [6] R. Hernandez-Sampieri, “Hacia una definición del estudio de caso,” in *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill Education, 2018, ch. 4. [Online]. Available: <https://highereducation.com/sites/dl/free/1456223968/1058642/CAPITULO04.pdf>
- [7] M. Teófila, S. D. Bueno, F. B. Moyá, V. Ramírez, and L. C. García, “Valoración del dolor. revisión comparativa de escalas y cuestionarios,” *Revista de la Sociedad Española del Dolor*, 2018.
- [8] W. H. O. (WHO). (2024) Discapacidad. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health>
- [9] C. Clinic. (2022) Quadriplegia (tetraplegia): Definition, causes types. [Online]. Available: <https://my.clevelandclinic.org/health/symptoms/23974-quadriplegia-tetraplegia>
- [10] M. A. T.-S. A. A. K. S. G. P.-Q. Y. A. Giraldo, J. L. Castro and F. J. Bonilla-Escobar, “Epidemiological profile of spinal cord injury in colombia: A systematic review,” *Spinal Cord Ser Cases*, no. 3, pp. 321–330, 2020.
- [11] K. Agudelo. (2018) Percepción de la calidad de vida en las personas con lesión medular de un centro de rehabilitación ubicado en el municipio de envigado. [Online]. Available: <https://repository.ces.edu.co/bitstream/handle/10946/3859/Trabajo%20de%20grado?sequence=2&isAllowed=y>
- [12] F. S. Durán. (2022) Dolor en la persona con lesión medular. [Online]. Available: <https://revistacmfr.org/index.php/rcmfr/article/view/369>

- [13] K. A. Masri R, "Chronic pain following spinal cord injury," *Adv Exp Med Biol.*, pp. 74–88, 2012.
- [14] L. A. Harvey, "Physiotherapy rehabilitation for people with spinal cord injuries," *Journal of physiotherapy*, no. 1, pp. 4–11, 2015.
- [15] D. S. D. Burke, B. M. Fullen and O. Lennon, "Neuropathic pain prevalence following spinal cord injury: A systematic review and meta-analysis," *European Journal of Pain*, no. 1, pp. 29–44, 2016.
- [16] M. M. Adams and A. L. Hicks, "Spasticity after spinal cord injury," *Spinal Cord*, no. 10, pp. 577–586, 2005.
- [17] A. M. H. Z. J. Billington and D. R. Gater, "Spasticity management after spinal cord injury: The here and now," *Journal of Personalized Medicine*, no. 5, p. 808, 2022.
- [18] A. A. Montero and A. González Curado, "Manejo del dolor neuropático después de una lesión de la médula espinal: recomendaciones para el tratamiento," *Revista de la Sociedad Española del Dolor*, 2016.
- [19] J. Bennett, J. Das, and P. Emmady. (2024) Spinal cord injuries. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560721/>
- [20] V. M. Velasco, "Dolor neuropático," *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 25, no. 4, pp. 625–634, 2014.
- [21] E. Ataoğlu, T. Tiftik, M. Kara, H. Tunç, M. Ersöz, and S. Akkuş, "Effects of chronic pain on quality of life and depression in patients with spinal cord injury," *Spinal Cord*, vol. 51, no. 1, pp. 23–26, 2012.
- [22] A. Gupta, K. Scott, and M. Dukewich. (2018) Innovative technology using virtual reality in the treatment of pain: Does it reduce pain via distraction, or is there more to it?
- [23] M. Johnson. (2005) How does distraction work in the management of pain?
- [24] K. Keane. (2024) Distraction therapy for pain. [Online]. Available: <https://www.arthritisnsw.org.au/what-is-distraction-therapy-for-pain/>
- [25] M. V. Wohlauer, Andrew, and K. M. Beauchamp, "Quadriplegia," in *Encyclopedia of Intensive Care Medicine*. Springer, 2012, pp. 1939–1943.
- [26] CTI - Hospital de Clínicas Dr. Manuel Quintela, "Trauma raquimedular Lesión medular traumática," *Cuadernos de Traumatología del CTI*, 2022. [Online]. Available: https://www.cti.hc.edu.uy/images/Trauma_raquimedular.pdf
- [27] A. H. Ropper and M. A. Samuels, *Adams and Victor's Principles of Neurology*. McGraw-Hill Education, 2014.

- [28] S. C. Kirshblum, D. P. Lammertse, R. J. Marino, and W. P. Waring, “International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury (ISNCSCI): What’s New in the 2019 Revision,” *Spinal Cord*, vol. 57, no. 12, pp. 1050–1056, 2019.
- [29] World, “Rehabilitación,” Apr 2024. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>
- [30] P. Alvial, “Uso de tecnología en rehabilitación,” *Revista Hospital Clínico Universidad De Chile*, 2018. [Online]. Available: <https://www.redclinica.cl/Portals/0/Users/014/14/14/1383.pdf>
- [31] J. P. Bispo Júnior, “La fisioterapia en los sistemas de salud: marco teórico y fundamentos para una práctica integral,” *Salud colectiva*, vol. 17, p. e3709, 2022.
- [32] T. P. Pons, P. E. Garraghty, A. K. Ommaya, J. H. Kaas, E. Taub, and M. Mishkin, “Physiological correlates of structural reorganization in somatosensory cortex of adult primates after peripheral nerve injury,” *Science*, vol. 252, no. 5005, pp. 1857–1860, 1991.
- [33] E. Widerström-Noga, F. Biering-Sørensen, T. N. Bryce, D. D. Cardenas, N. B. Finnerup, M. P. Jensen, J. S. Richards, and P. J. Siddall, “The international spinal cord injury pain basic data set (version 2.0),” *Spinal Cord*, vol. 52, no. 4, p. 282–286, Jan 2014. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/sc20144>
- [34] D. J. Correll, “The measurement of pain: Objectifying the subjective,” in *Pain Management*. Elsevier, 2011, pp. 191–201.
- [35] G. J. Boyle, E. Fernández, and G. Ortet, “El cuestionario de dolor de mcgill (mcgill pain questionnaire-mpq): consideraciones lingüísticas y estadísticas,” *Revista de psicología*, vol. 12, no. 1, pp. 111–119, 2003.
- [36] E. H. Lowood. (2024) virtual reality. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/virtual-reality>
- [37] M. Slater, “Place illusion and plausibility in immersive virtual environments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1535, pp. 3549–3557, 2009.
- [38] F. G. Irigaray, L. Edith, M. G. Moreno, A. M. Lovato, and P. Irisarri, “Narrativas inmersivas: realidad virtual y realidad aumentada en relatos de no ficción,” Universidad Nacional de Rosario, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://rehip.unr.edu.ar/items/9e3862ea-d887-4fed-b4e2-8bf8046080ca>
- [39] Unity Technologies, “Unity Manuals and Documentation,” <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>, Accedido el 1 de Diciembre de 2025.
- [40] Ministerio De Salud De Colombia, “Balance proceso reglamentario ley estatutaria 1618 de 2013,” Ministerio De Salud De Colombia, Technical Report, 2017. [Online]. Available:

- <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/PS/documento-balance-1618-2013-240517.pdf>
- [41] —, “Resolución numero 8430 de 1993,” Ministerio De Salud De Colombia, Resolution, October 1993. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/RESOLUCION-8430-DE-1993.PDF>
- [42] Asociación Médica Mundial, “Declaración de helsinki,” Ministerio De Ciencias De Colombia, Declaration, May 2015. [Online]. Available: https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/6.pdf
- [43] Consejo de Organizaciones Internacionales de las Ciencias Médicas, “Pautas Éticas internacionales para la investigación relacionada con la salud con seres humanos en colaboración con la oms,” CIOMS, Guidelines, December 2017. [Online]. Available: https://cioms.ch/wp-content/uploads/2017/12/CIOMS-EthicalGuideline_SP_INTERIOR-FINAL.pdf
- [44] L. D. Morris, Q. A. Louw, and L. C. Crous, “Feasibility and potential effect of a low-cost virtual reality system on reducing pain and anxiety in adult burn injury patients during physiotherapy in a developing country,” *Burns*, vol. 36, no. 5, pp. 659–664, 2010.
- [45] G. J. Carrougher, H. G. Hoffman, D. Nakamura, D. Lezotte, M. Soltani, L. Leahy, L. H. Engrav, and D. R. Patterson, “The effect of virtual reality on pain and range of motion in adults with burn injuries,” *Journal of Burn Care Research*, vol. 30, no. 5, p. 785–791, 2009.
- [46] S. Pardini, S. Gabrielli, L. Gios, M. Dianti, O. Mayora-Ibarra, L. Appel, S. Olivetto, A. Torres, P. Rigatti, E. Trentini *et al.*, “Customized virtual reality naturalistic scenarios promoting engagement and relaxation in patients with cognitive impairment: a proof-of-concept mixed-methods study,” *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 20516, 2023.
- [47] T. L. S. S. B. E. N. L. D. S. A. A. C. A. K. M. C. M. F. A. W. J. P. D, “Immersive virtual reality for chronic neuropathic pain after spinal cord injury: a pilot, randomized, controlled trial,” *Pain reports*, vol. 9, no. 6, 2024. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39391768/>
- [48] B. Edmonston, “Bienteveo común, pitangus sulphuratus derbianus,” 2025. [Online]. Available: <https://xeno-canto.org/1001198>
- [49] F. Grigolin, “Chirigüe azafranado, sicalis flaveola,” 2025. [Online]. Available: <https://xeno-canto.org/1053969>
- [50] M. McCloy, “Pava del cauca, penelope perspicax,” 2016. [Online]. Available: <https://xeno-canto.org/356203>
- [51] “Xeno-canto, wildlife sounds,” 2025. [Online]. Available: <https://xeno-canto.org/>
- [52] R. Villarroel, B. R. García-Ramos, J. L. González-Mora, and C. Modroño, “Virtual reality therapy for upper limb motor impairments in patients with stroke: A systematic review and meta-analysis,” *Physiotherapy Research International*, vol. 30, no. 2, p. e70040, 2025.

- [53] K. E. Laver, B. Lange, S. George, J. E. Deutsch, G. Saposnik, M. Chapman, and M. Crotty, “Virtual reality for stroke rehabilitation,” *Cochrane database of systematic reviews*, no. 6, 2025.
- [54] S. Ayeh, E.-K. Han, and M.-J. Kim, “Virtual reality-based therapy for pain management: A scoping review,” *Healthcare*, vol. 9, no. 12, p. 1668, 2021.
- [55] V. C. Tashjian, S. Mosadeghi, A. R. Howard, U. J. Hwang, M. A. Hunt, B. M. Spiegel, and K. Reid, “Virtual reality for acute pain reduction in adults: Comprehensive systematic review and meta-analysis,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 23, no. 5, p. e27932, 2021.
- [56] P. Mallari, G. Hon, L. H. Soo, and I. Popovic, “Virtual reality as an analgesic for acute and chronic pain: A systematic review and meta-analysis,” *Journal of Pain Research*, vol. 14, pp. 1851–1875, 2021.
- [57] M. Slater, “Immersion and the illusion of presence in virtual reality,” *British Journal of Psychology*, vol. 109, no. 3, p. 431–433, May 2018. [Online]. Available: <https://bpspsychub.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bjop.12305>
- [58] S. Weber, D. Weibel, and F. W. Mast, “How to get there when you are there already? defining presence in virtual reality and the importance of perceived realism,” *Frontiers in Psychology*, vol. 12, p. 628298–628298, May 2021. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2021.628298/full#B14>
- [59] H. G. Hoffman, A. Garcia-Palacios, D. R. Patterson, M. Jensen, T. Furness, and W. F. Ammons, “The effectiveness of virtual reality for dental pain control: A case study,” *CyberPsychology & Behavior*, vol. 4, no. 4, pp. 527–535, August 2001.
- [60] R. M. Baños, A. Carrillo, E. Etchemendy, and C. Botella, “Positive technologies for understanding and promoting positive emotions,” *The Spanish Journal of Psychology*, vol. 20, p. E50, 2017.
- [61] A. C. Borja, “El impacto de la tecnología en la atención personalizada de los pacientes,” Aug 2024. [Online]. Available: <https://www.tresastronautas.com/es/blog/the-impact-of-technology-on-personalized-care-for-patients#:~:text=AI%20aprovechar%20estos%20avances%20tecno1%C3%B3gicos,las%20necesidades%20de%20cada%20paciente>.
- [62] *British Medical Journal*, vol. 2, no. 6137, p. 586, Aug 1978. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1607474/>
- [63] M. Li, J. Pan, Y. Gao, Y. Shen, F. Luo, J. Dai, A. Hao, and H. Qin, “Neurophysiological and subjective analysis of vr emotion induction paradigm,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, no. 11, p. 3832–3842, Nov 2022.
- [64] K. Pavić, D. Vergilino-Pérez, T. Gricourt, and L. Chaby, “Because i’m happy — an overview on fostering positive emotions through virtual reality,” *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 3, 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2022.788820/full>

- [65] A. C. Kern, W. Ellermeier, and L. Jost, “The influence of mood induction by music or a soundscape on presence and emotions in a virtual reality park scenario,” p. 233–236, Sep 2020. [Online]. Available: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3411109.3411129>
- [66] R. Baños, C. Botella, M. Alcañiz, V. Liaño, B. Guerrero, and B. Rey, “Immersion and emotion: Their impact on the sense of presence,” *CyberPsychology Behavior*, vol. 7, no. 6, p. 734–741, Dec 2004. [Online]. Available: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/cpb.2004.7.734>
- [67] E. M. Hagen and T. Rekand, “Management of neuropathic pain associated with spinal cord injury,” *Pain and therapy*, vol. 4, no. 1, pp. 51–65, 2015.
- [68] P. Siddall, M. Cousins, A. Otte, T. Griesing, R. Chambers, and T. Murphy, “Pregabalin in central neuropathic pain associated with spinal cord injury: a placebo-controlled trial,” *Neurology*, vol. 67, no. 10, pp. 1792–1800, 2006.
- [69] N. B. Finnerup and T. S. Jensen, “Clinical use of pregabalin in the management of central neuropathic pain,” *Neuropsychiatric disease and treatment*, vol. 3, no. 6, pp. 885–891, 2007.
- [70] R. D. Iyer, P. Palaninathan, P. B. Suresh, V. Gunasekaran, S. Periyaswamy, A. P. Shetty, S. V. KS, R. M. Kanna, and R. Shanmuganathan, “Effect of rehabilitation timing on the functional, vocational, and psychological outcomes in patients with paraplegia secondary to traumatic spinal cord injury: a retrospective cohort study,” *Asian Spine Journal*, 2025.
- [71] G. Smith, A. R. Thompson, A. McCulloch, and J. Moses, “Post-traumatic growth following spinal cord injury: a systematic review and meta-ethnography,” *Disability and Rehabilitation*, pp. 1–13, 2025.
- [72] X. Deng, C. Jian, Q. Yang, N. Jiang, Z. Huang, and S. Zhao, “The analgesic effect of different interactive modes of virtual reality: a prospective functional near-infrared spectroscopy (fnirs) study,” *Frontiers in Neuroscience*, vol. 16, p. 1033155, 2022.
- [73] S. Chen, Q. Yuan, C. Wang, J. Ye, and L. Yang, “The effect of music therapy for patients with chronic pain: systematic review and meta-analysis,” *BMC psychology*, vol. 13, no. 1, p. 455, 2025.
- [74] Q. Li, X. Du, D. Zhao, S. Zhang, M. Liu, N. Ding, Y. Li, Z. Xing, X. Chu, and L. Chen, “Virtual reality interventions for spinal cord injury-related neuropathic pain: A comprehensive scoping review of multidimensional outcomes,” *Journal of Pain Research*, pp. 5175–5190, 2025.
- [75] T. Zhang, X. Li, X. Zhou, L. Zhan, F. Wu, Z. Huang, Y. Sun, Y. Feng, and Q. Du, “Virtual reality therapy for the management of chronic spinal pain: systematic review and meta-analysis,” *JMIR Serious Games*, vol. 12, p. e50089, 2024.
- [76] 2025. [Online]. Available: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/kogoro/article/view/344471/20804115>

-
- [77] del, “modelo 3d Árboles del bosque parque estanque - turbosquid 768957,” Sep 2013. [Online]. Available: https://www.turbosquid.com/es/3d-models/park-pond-trees-max/768957?dd_referrer=
- [78] 2024. [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/vegetation/trees/realistic-pine-tree-pack-232166>
- [79] 2025. [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/vegetation/trees/european-forests-realistic-trees-229716>
- [80] 2017. [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/2d/textures-materials/sky/skybox-series-free-103633>
- [81] 2021. [Online]. Available: <https://assetstore.unity.com/packages/2d/textures-materials/water/simple-water-shader-urp-191449>
- [82] 2025. [Online]. Available: <https://www.mixamo.com/#/?page=1&type=Character>
- [83] 2025. [Online]. Available: <https://github.com/angeeelilla/Uso-de-realidad-virtual-en-fisioterapia-de-paciente-cuadriplejico-estudio-de-caso>