

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN BIOTECNOLOGÍA Y BIOINGENIERÍA

CURSO 2020-21

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

**DESARROLLO DE UNA NUEVA HERRAMIENTA PARA
LA EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD Y DE LA
ORIENTACIÓN EN UNA CUEVA DE ENTORNOS
VIRTUALES ENFOCADA A LA REHABILITACIÓN DE
DISCAPACIDADES VISUALES**

Autor: Cristina García Miralles

Tutor académico: Eduardo Fernández Jover

Co-tutor: Roberto Morollón Ruiz

D. EDUARDO FERNÁNDEZ JOVER, Catedrático de Biología Celular, presidente del Departamento de Histología y Anatomía de la Universidad Miguel Hernández y director de la Unidad de Neuroingeniería y Neuroprótesis del Instituto de Bioingeniería.

CERTIFICA

Que el presente trabajo titulado:

“DESARROLLO DE UNA NUEVA HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD Y DE LA ORIENTACIÓN EN UNA CUEVA DE ENTORNOS VIRTUALES ENFOCADA A LA REHABILITACIÓN DE DISCAPACIDADES VISUALES”

y que constituye la Memoria del Trabajo Fin de Máster en Biotecnología y Bioingeniería, que presenta:

CRISTINA GARCÍA MIRALLES

ha sido realizado bajo su supervisión en el Instituto de Bioingeniería, cumpliendo todos los requisitos necesarios.

Y para que así conste, se expide y firma el presente certificado en Elche a 21 de junio de 2021.

Fdo.: Prof. Eduardo Fernández Jover

Índice

1. Resumen	5
2. Abstract.....	6
3. Introducción.....	7
3.1 Discapacidad visual.....	7
3.2 Orientación y movilidad en sujetos con discapacidad visual.....	8
3.3 Rehabilitación mediante entornos virtuales.....	10
3.4 Planteamiento del experimento y justificación	11
4. Objetivos	13
5. Material y métodos.....	14
5.1 Descripción de la estructura de Nemty	14
5.2 Elementos principales de Nemty.....	15
5.3 Desarrollo del entorno virtual BlockCity.....	18
5.4 Sujetos de estudio y protocolo experimental.....	19
5.5 Análisis de datos.....	19
6. Resultados.....	20
6.1 Relación de las modalidades de uso respecto a la velocidad media y los errores cometidos en el entorno BlockCity	21
6.2 Análisis de la evolución de la velocidad media y de los errores cometidos en el entorno BlockCity respecto a cada modalidad de uso.....	23
6.3 Análisis de las diferencias entre las simulaciones de las discapacidades visuales en el entorno BlockCity.....	26
7. Discusión	28
8. Conclusiones	30
9. Agradecimientos	31
10. Referencias.....	32

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1: Porcentaje de causa de ceguera y deficiencia visual en el año 2020.....	7
Figura 2. Diseño de las tres evaluaciones de movilidad de Neruban.....	9
Figura 3: Entorno virtual utilizado por Faria para la rehabilitación.....	11
Figura 4: Esquema de una cueva de realidad virtual	12
Figura 5: Modalidades de uso en la cueva Nemty.	14
Figura 6: Imagen que presentan los sensores infrarrojos.....	15
Figura 7: Vista del entorno virtual BlockCity desde el ordenador.....	16
Figura 8: Gafas de realidad virtual HTC VIVE.....	17
Figura 9: Pantallas HD en el interior de la cueva Nemty.....	17
Figura 10: Esquema en 3D de la cueva Nemty.....	18
Figura 11: Simulaciones en el entorno BlockCity	20
Figura 12: Diagrama de cajas y bigotes: a) Velocidad media, b) Errores.. ..	22
Figura 13: Gráfico de evolución por modo: a) Velocidad media, b) Errores	25
Figura 14: Diagrama de barras: a) Velocidad media, b) Errores	27
Tabla 1: Se muestran los resultados de la prueba Mann, Whitney y Wilcoxon en el que se comparan los modos de uso en la cueva día a día.....	21

1. Resumen

Objetivo: Análisis de la movilidad y de la orientación en una cueva virtual (Cave Automatic Virtual Environment - CAVE), para que sirva como referencia a futuros estudios enfocados a la rehabilitación de personas con deterioro de la visión mediante uso de entornos virtuales.

Material y métodos: Se ha utilizado la plataforma comercial de cueva virtual Nemty, desarrollada por la Empresa Instead Technologies SL. Para el estudio, se ha utilizado la cueva mediante las pantallas internas del simulador y mediante gafas de realidad virtual (gafas RV), utilizando en ambos casos un único entorno. El entorno virtual BlockCity ha sido desarrollado específicamente para la evaluación de la movilidad y la orientación de los sujetos y consta de una calle de 48 metros donde se generan obstáculos de forma aleatoria.

En el experimento se han recogido los datos de velocidad media y de errores en ocho sujetos durante diez días. Cada día, cada uno de los usuarios ha realizado cuatro pruebas esquivando los obstáculos, en las cuales se han simulado diversos deterioros de visión en el entorno BlockCity.

Resultados: Los datos de los recorridos realizados en el entorno BlockCity, han mostrado una diferencia significativa entre las dos modalidades de uso en la cueva y se ha registrado una mejora tanto en velocidad como en errores cometidos. Además, en cuanto a las discapacidades visuales simuladas, se han registrado diferencias significativas en la velocidad media solo en una de las simulaciones.

Conclusiones: En primer lugar, se ha conseguido desarrollar un entorno virtual para la evaluación de la movilidad de los sujetos. Al comparar la utilización de las pantallas frente a la utilización de las gafas de realidad virtual se han presentado diferencias significativas tanto en la velocidad media como en los errores cometidos. Por otro lado, se ha demostrado que existe una mejora a lo largo del experimento, pero en estos diez días no se ha llegado a mantener una velocidad media constante, así pues, queda pendiente para un futuro estudio establecer por completo la curva de aprendizaje. Por último, los datos muestran que solo existen diferencias significativas en la velocidad media de una de las patologías simuladas, mientras que, para los errores cometidos, la diferencia significativa entre las simulaciones es nula.

Palabras clave: Movilidad y orientación. Entorno virtual. Rehabilitación. Cueva de entornos virtuales. Discapacidad visual.

2. Abstract

Objective: Movement and orientation análisis in a virtual cave (Cave Automatic Virtual Environment - CAVE) so it can be used as reference for future studies focused on rehabilitation of people with visual deterioration through the usage of virtual environments.

Materials and methods: The commercial platform of virtual cave Nemty has been used, developed by the company Insead Technologies SL. For this study the cave is being used through the inner screens of the simulator and through the Virtual Reality Glasses (VR glasses), using in both cases only one environment. The virtual environment BlockCity has been developed specifically for the mobility and orientation evaluation of the subjects and it is formed by a 48 meters Street where random obstacles are generated.

In the experiment data about the mean velocity and the errors of eight subjects during ten days has been taken. Each day, each of the users has performed four trials avoiding the obstacles, in which it has been simulated diferente deterioration of the visión in the BlockCity environment.

Results: The data of the paths done in the BlockCity environment, has shown a significant difference among both use modes in the cave and an improvement has been registered, both in velocity and in errors made. Also, in the simulated visual disabilities significant differences in only one of the simulations has been registered.

Conclusions: First, develop a virtual environment for the evaluation of subjects mobility has been achieved. When the use of screens and virtual reality glasses are compared, significant differences are presented, both in mean velocity as in errors made. On the other hand, it is proved that an improvement along the experiment exists, so, in a future study Will be possible to completely establish the learning curve. Lastly, data show that significant differences exist in mean velocity in one of the simulated pathologies, meanwhile, for the errors made, the significant differences among simulations are null.

Keywords: Mobility and orientation. Virtual environment. Rehabilitation. Virtual environment cave. Visual disability.

3. Introducción

3.1 Discapacidad visual

La discapacidad visual considerada como la más grave es la ceguera, pero existen diversos grados en el deterioro de la visión que también presentan muchas limitaciones a la hora de realizar tanto actividades diarias, como cualquier otro tipo de tarea.

En el año 2018 la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE - 11) realizó una clasificación en cuanto a discapacidades visuales y dividió por categorías el deterioro de la visión en dos grupos. El primer grupo es el que corresponde al deterioro de la visión distante, formado por los siguientes grados: leve, moderado, grave y ceguera. Mientras que el segundo es el grupo que corresponde al deterioro de la visión cercana.

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) relacionados con discapacidad visual, en el mundo existen 2200 millones de personas que sufren deterioro de la visión y más de la mitad de ese número corresponde a personas en las cuales podría haberse evitado tanto el deterioro de la visión distante como el deterioro de la visión cercana [1].

Las principales causas a nivel mundial del deterioro de la visión son; errores de refracción no corregidos, cataratas, degeneración macular relacionada con la edad, glaucoma y retinopatía diabética (Figura 1).

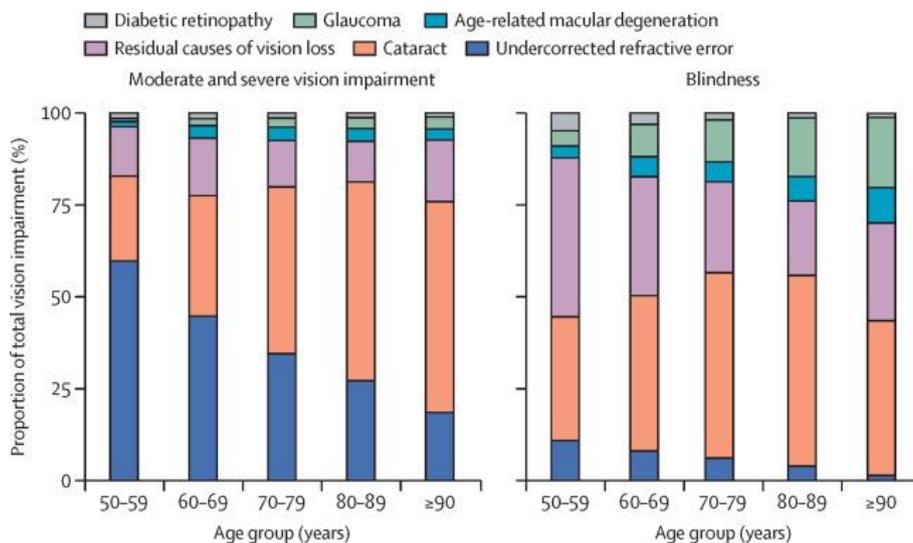


Figura 1: Porcentaje de causa de ceguera y deficiencia visual en el año 2020 por grupos de edad [1].

Respecto a las causas, diversos estudios muestran que existen diferencias regionales significativas en cuanto a los datos. Las principales diferencias están relacionadas con la disponibilidad de servicios, asequibilidad y los conocimientos en materia. Las cataratas, por ejemplo, tiene una proporción en el deterioro de la visión mucho mayor en los países de ingresos bajos y medianos que en los de ingresos altos. Y en estos últimos, los países

más desarrollados, son frecuentes las enfermedades como la retinopatía diabética, el glaucoma y la degeneración macular relacionada con la edad [2].

Así pues, hay que tener presente que a cada afección ocular le corresponde una respuesta diferente, que puede ser tratamiento preventivo, intervención y/ o rehabilitación. Siendo esta última opción muy eficaz para mejorar la movilidad de las personas con un deterioro irreversible de la visión que puede estar causado por la retinopatía diabética, el glaucoma, las consecuencias de un traumatismo o la degeneración macular relacionada con la edad [3].

3.2 Orientación y movilidad en sujetos con discapacidad visual

De acuerdo con diversos autores, la movilidad guiada por la visión es un área de interés y puede definirse como la capacidad de usar la vista para moverse por el entorno de forma segura y eficiente.

Muchos estudios se han dedicado a evaluar la movilidad y la orientación en personas con discapacidad visual, esto ha llevado a un aumento de interés para desarrollar evaluaciones estandarizadas dedicadas a la función visual.

El estudio que dio impulso a esta temática fue el de Marron y Bailey [4] en 1982, en el que se realizó una evaluación de la movilidad en 19 sujetos con discapacidad visual. El objetivo del estudio era relacionar la sensibilidad de contraste (Contrast Sensivity - CS), conservación del campo (Visual Field - VF) y agudeza visual (Visual Acuity - VA) con la movilidad y orientación de los sujetos que presentaban deterioro de la visión en los grados más elevados. En cuanto a la metodología del experimento, se diseñaron dos recorridos, uno interior y otro al aire libre, en los cuales se colocaron obstáculos que debían ser evitados por los sujetos. Los resultados del estudio concretaron una relación entre sensibilidad de contraste y conservación del campo visual.

Estudios posteriores confirmaron los resultados de Marron y Bailey, reafirmando que el rendimiento de movilidad y de orientación estaba directamente relacionado con el campo visual y era totalmente independiente a la agudeza visual de los sujetos [5][6].

En 2014 Nau [7] describe una evaluación en cuanto a la movilidad para personas con muy baja visión. El estudio consistía en evaluar a 42 sujetos, de los cuales 6 eran videntes y 36 invidentes. El método consistía en realizar tres recorridos con la intención de evitar los obstáculos propuestos. Además, se introdujo la tecnología Brainport, un dispositivo oral no invasivo que funciona por medio de estímulos electrotáctiles, diseñado para ayudar a las personas ciegas en la orientación, la movilidad y el reconocimiento. Con los datos recogidos en el experimento, se calculó el porcentaje de errores y se realizó el cálculo del porcentaje de la velocidad más cómoda al caminar (Percentage Preferred Walking Speed - PPWS), que se define como el tiempo en caminar por un recorrido con obstáculos, dividido por el tiempo que se tarda en caminar por ese mismo recorrido sin obstáculos. En este estudio, se demostró que el circuito era una forma viable de evaluar la movilidad

en los sujetos y el análisis de los datos mostró que tanto el porcentaje de errores como el porcentaje de velocidad resultaban distintos para cada recorrido.

Años más tarde, en 2017 Chung [8] propuso una nueva prueba de movilidad para la evaluación de la función visual en pacientes con distrofias retinianas hereditarias. El objetivo era determinar si la prueba de movilidad de luminancia múltiple (Multi Luminance Mobility Test - MLMT) podía detectar cambios en la función de la visión a lo largo del tiempo. En cuanto a la metodología, los sujetos realizaron el recorrido MLMT tres veces durante un año, con nueve niveles distintos de luz. De los resultados se expuso que la prueba MLMT diferenciaba a los sujetos con discapacidad visual de los sujetos control y que, además, el rendimiento registrado disminuía con el tiempo.

Un estudio reciente de Neruban Kuraman [9] en 2020, propone realizar una evaluación de la movilidad en personas afectadas por distrofia retiniana. El método utilizado en el estudio era comparativo, utilizaba 10 sujetos con visión normal y 19 sujetos con distrofia retiniana, a los que se proponía realizar tres evaluaciones de movilidad (Figura 2); seguir una línea recta, un laberinto simple y pasar encima de un bordillo, en estas tres evaluaciones se midió el efecto de la iluminación sobre la movilidad.

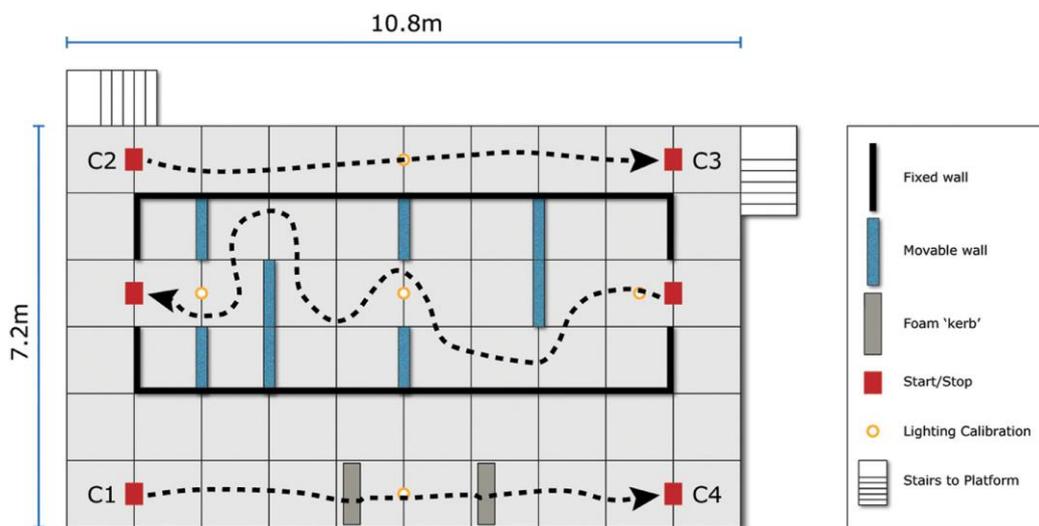


Figura 2. Esquema del diseño de las tres evaluaciones de movilidad utilizados en el estudio de Neruban [9].

En el experimento de Neruban, se recogieron datos de tiempo necesario para realizar el recorrido, número de errores, velocidad al caminar y PPWS. La evaluación derivó a la conclusión de que las personas con discapacidad respecto a los sujetos control presentan una movilidad más pobre a niveles de iluminación más bajos.

Muchos más estudios han diseñado recorridos, han evaluado las funciones visuales e incluso han intentado generalizar unas pautas para estandarizar los resultados [10], pero depende de muchos factores y todavía está en desarrollo esta línea de investigación.

3.3 Rehabilitación mediante entornos virtuales

La realidad virtual (Virtual Reality - VR) se caracteriza porque puede llegar a crear entornos donde los objetos y eventos simulados poseen una apariencia totalmente real e inmersiva, donde el usuario es capaz de interactuar libremente por cualquiera de las escenas.

Esta herramienta tecnológica tiene infinidad de aplicaciones y uno de los sectores en los que aún está en desarrollo es el de la medicina, más en concreto, nos centramos en el sector de la rehabilitación y en el campo de la discapacidad, donde los científicos prefieren el termino de entorno virtual (Virtual Environment - VE) [11].

Paul N.Wilson [12] en 1996 realizó uno de los primeros estudios con entornos virtuales, en el que evaluó la transferencia de información espacial de un entorno virtual a uno real en niños con discapacidades físicas. Los datos recogidos en el experimento demostraron que la información espacial transferida en los entornos virtuales era clara y podía servir para reproducir cualquier "realidad" dando libertad al paciente con todas las medidas de seguridad.

Posteriormente, más estudios demostraron que los conocimientos y habilidades adquiridos por las personas discapacitadas en los entornos virtuales, podían transferirse al mundo real [13][14].

En 1999 Cunningham [15] evaluaba la efectividad de los entornos virtuales en la disfunción cognitiva y perceptiva. Otro de sus estudios, se basaba en mostrar como la utilización de la realidad virtual mejoraba el equilibrio en pacientes geriátricos y describía los beneficios de esta herramienta tecnológica [16]. Además, tanto Cunningham como anteriormente Wilson, hicieron hincapié en que resulta de vital importancia la simultaneidad a la hora de abordar los sistemas visual y motor para lograr la máxima eficiencia en la rehabilitación de los pacientes y no llegar a ser molesto a la hora del uso.

En 2016 Faria [17], realizó un estudio que consistió en utilizar un entorno de realidad virtual simulando una ciudad en la cual se tenían que desarrollar varias rutinas diarias, variando el entorno con diversos grados de dificultad (Figura 3).

A los sujetos de este estudio a los que se aplicaba la rehabilitación eran pacientes que habían sufrido accidentes cerebrovasculares, el grupo de control solo estaba expuesto a la rehabilitación tradicional, mientras que a los restantes sujetos se les aplicaba la rehabilitación mediante simulación. Los datos recogidos formaban parte de las evaluaciones realizadas a los sujetos, una previa y otra posterior a la correspondiente rehabilitación. Los análisis utilizados para comparar los dos grupos mostraron mejoras significativamente mayores en el funcionamiento cognitivo global, la atención y las funciones ejecutivas en las personas que se habían expuesto a la rehabilitación mediante entornos virtuales.



Figura 3: Entorno virtual utilizado por Faria [17] para la rehabilitación de personas que habían sufrido accidentes cerebrovasculares.

Generalmente a lo largo del tiempo, los estudios realizados en este campo respaldan la utilización de entornos virtuales simulados como medio alternativo o complementario para la rehabilitación tanto cognitiva como perceptiva frente a las técnicas convencionales.

3.4 Planteamiento del experimento y justificación

Como ya se ha comentado en el apartado de movilidad y orientación, los estudios que se realizan para este tipo de análisis necesitan diseños y espacios grandes, los cuales generalmente son muy limitados. En este estudio, se propone la utilización de la cueva de entornos virtuales Nemty que resuelve el problema de la limitación del espacio y los entornos, ya que el simulador permite la inmersión total en cualquier entorno deseado, y además ha sido creada con la tecnología más avanzada para la total adaptación del sujeto.

¿Qué es una cueva de realidad virtual?

El nombre CAVE tiene dos significados, el primero es un acrónimo (CAVE Automatic Virtual Environment) y el segundo es una referencia a la alegoría de la caverna de Platón, en la que el filósofo discute sobre la realidad y las proyecciones en la pared de una cueva en el libro República [18].

CAVE es un dispositivo donde se proyectan imágenes en pantallas y así se crea una experiencia de inmersión en realidad virtual (Figura 4). Este dispositivo fue diseñado e implementado por primera vez en 1991 en el Electronic Visualization Laboratory (EVL) de la Universidad de Illinois en Chicago.



Figura 4: Esquema de una cueva de realidad virtual con uso de proyectores [18].

¿Qué es Nemty?

El desarrollo de la cueva Nemty ha tenido como principal objetivo la mejora en la rehabilitación de pacientes con discapacidades tanto perceptivas como cognitivas, permitiendo a su vez una evaluación de la movilidad y la orientación de los sujetos.

Además, Nemty está formado por una plataforma móvil adaptable a la velocidad de paso de cada usuario, para ello se utilizan sensores, desarrolladores de software y dispositivos de alta tecnología, que cumplen con la seguridad de los sujetos en todo momento.

4. Objetivos

El principal objetivo del presente estudio es desarrollar una nueva plataforma y entorno de trabajo para evaluar la movilidad y la orientación en personas con diferentes discapacidades visuales utilizando la cueva virtual Nemty. Nuestro objetivo a largo plazo es contribuir a que esta plataforma de trabajo pueda servir como referencia a futuros estudios enfocados a la rehabilitación de personas con deterioro de la visión mediante el uso de entornos virtuales avanzados.

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Desarrollar un entorno virtual sencillo que pueda ser utilizado para evaluar la movilidad en personas con diferentes patologías visuales.
- Analizar cómo influye la presentación de la información visual (utilizando grandes pantallas o gafas de realidad virtual) en los estudios de movilidad.
- Evaluar las dificultades asociadas a la simulación de diferentes patologías visuales

5. Material y métodos

5.1 Descripción de la estructura de Nemty

Nemty es una plataforma comercial de cueva virtual, desarrollada por la Empresa Instead Technologies SL. La cueva se encuentra en las instalaciones de la unidad de Neuroprótesis y Rehabilitación Visual del Instituto de Bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Una de las características principales de la cueva virtual es su adaptación completa al usuario, ya que, mediante sensores y kits de desarrollo de software, el funcionamiento de la plataforma se regula de forma automática e inmediata al caminar y a los movimientos del sujeto.

Para el actual estudio se han utilizado las dos modalidades de uso de la cueva, el primer uso es mediante las mismas pantallas de la cueva, generando una sensación de inmersión en el sujeto. Y el segundo modo de uso es mediante gafas de realidad virtual (gafas RV), en el que la persona lleva una antena Wireless, que comunica de forma inalámbrica con el ordenador que procesa el entorno diseñado. Además, por seguridad, la persona va anclada a la viga superior de la cueva mediante un arnés de seguridad (Figura 5).

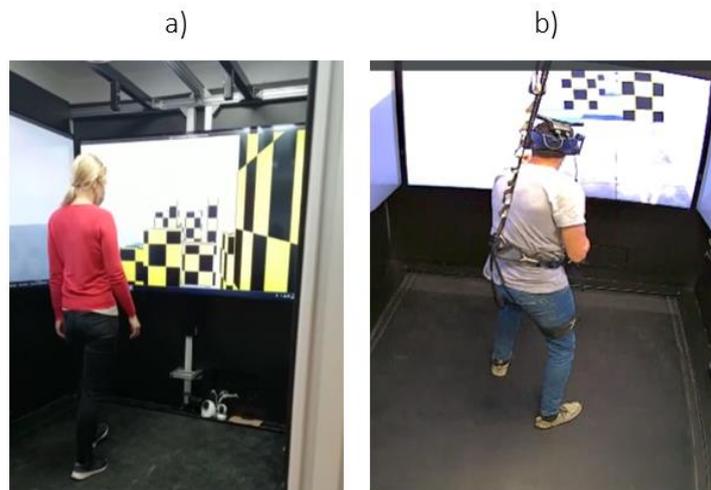


Figura 5: a) Utilización de Nemty mediante las pantallas de la cueva, b) Utilización de Nemty mediante gafas de realidad virtual.

La base de la estructura de la cueva es una cinta industrial mecanizada, cuyo funcionamiento está guiado por un variador de frecuencia. La cinta tiene como dimensiones 2.5 metros de ancho y 3 metros de largo.

Las pantallas HD están colocadas sobre soportes automáticos, adaptables a la altura de la persona que vaya a dar uso a la cueva. Las pantallas poseen tecnología NanoCell 4K y unas dimensiones de 86" cada una, para crear una sensación inmersiva en el interior del módulo.

5.2 Elementos principales de Nemty

En este apartado se describen las partes más importantes del módulo, entre los componentes principales de la cueva se encuentra; los sensores infrarrojos, el ordenador que procesa el software y los datos, el variador de frecuencia de la cinta industrial controlado mediante un microprocesador y el entorno virtual. Por otra parte, relacionado con la modalidad de uso, se encuentran; las gafas de realidad virtual que funcionan de forma inalámbrica desde la cueva y las pantallas descritas en el apartado anterior.

○ Dispositivo con sensores infrarrojos para el movimiento

Nemty incorpora un dispositivo de software libre que posee un sensor de profundidad, una matriz de micrófonos espaciales con cámara de video y un sensor de orientación. Este dispositivo dispone de un kit de desarrollo software (Software Development Kit - SDK), que funciona mediante sensores de inteligencia artificial avanzados, los cuales son capaces de proporcionar modelos de voz y modelos de visión artificial (Figura 6).

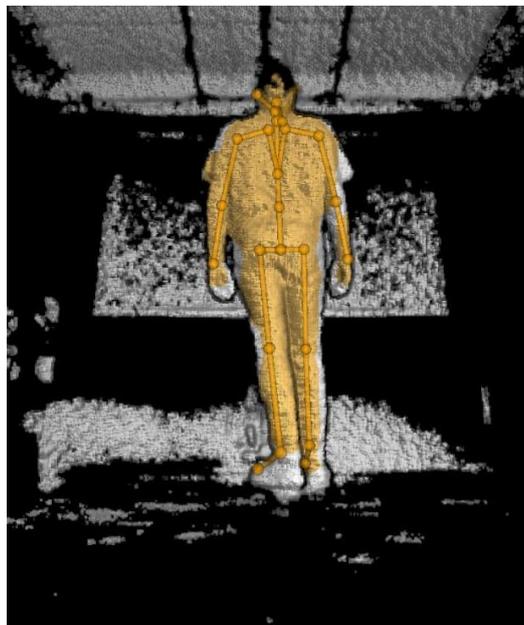


Figura 6: Imagen que presentan los sensores infrarrojos en el kit de desarrollo de software.

○ Ordenador

El ordenador que controla el módulo es el responsable de que el software funcione correctamente y del almacenamiento de los datos (Figura 7). Las funciones que realiza el ordenador se pueden dividir en:

- Generación de la velocidad de la cinta: Mediante unas instrucciones de software, se calcula la velocidad del movimiento que captan los sensores infrarrojos, esta

velocidad de movimiento o de parada, corresponde con la velocidad a la que está caminando el usuario encima de la cinta.

La velocidad calculada es comunicada de forma constante a un microprocesador conectado al variador de frecuencia de la cinta. Este proceso es realizado de manera continua, es decir, que la velocidad de la cinta se adapta de forma instantánea a la velocidad del usuario.

- Entorno de realidad virtual: Desde el ordenador es necesario ejecutar el entorno que se visualiza tanto en las pantallas como en las gafas, dependiendo del modo.

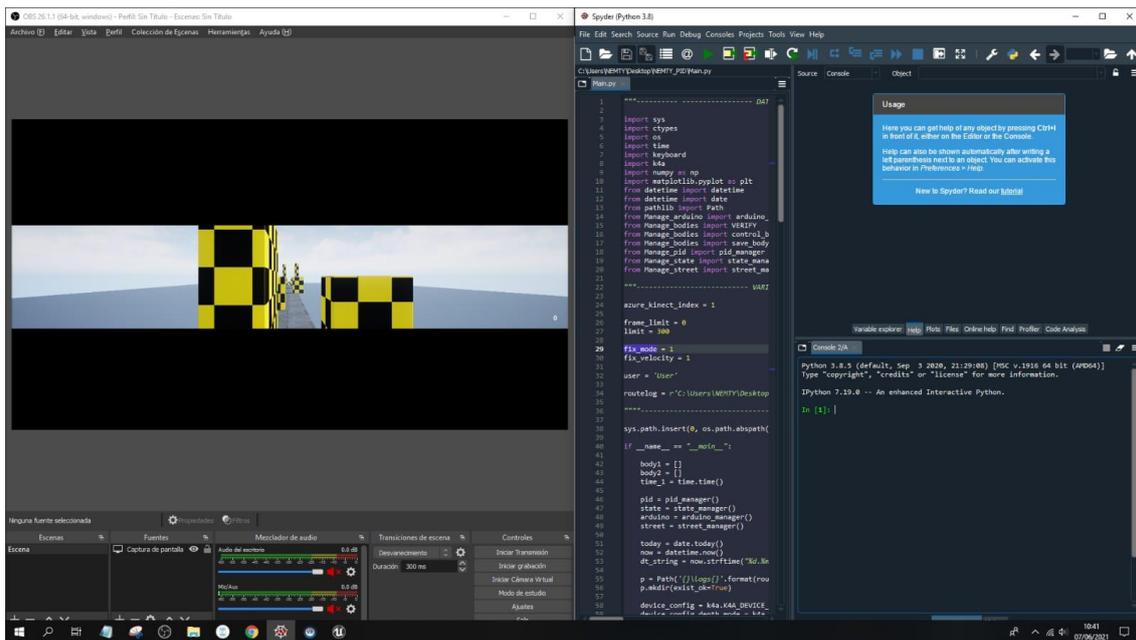


Figura 7: Vista del entorno virtual BlockCity desde el ordenador.

- Almacenamiento de datos: el ordenador guarda los datos de cada prueba, permite la grabación del proceso y es capaz de crear registros específicos para cada usuario. La recogida de los datos, como por ejemplo posición, velocidad, orientación y tiempo, está ligada a cada experimento, pudiendo modificar los parámetros necesarios para adaptar la recogida de resultados al estudio que se desee realizar. También permite la modificación de variables para una óptima adaptación a cada paciente de acuerdo con los puntos esenciales fisiológicos del cuerpo y, a partir de ello, concretar un tratamiento o una rehabilitación específica.

- o **Gafas de realidad virtual HTC VIVE**

Las gafas de realidad virtual (Figura 8) poseen una antena inalámbrica Wireless que comunica directamente con el ordenador y dos sensores de posición colocados en la cueva. Estos dos sensores son necesarios para que los movimientos que realice el sujeto respecto a las gafas se generen también en el entorno.



Figura 8: Gafas de realidad virtual HTC VIVE.

- **Pantallas HD**

Las pantallas están colocadas en el interior de la plataforma de manera que maximicen todo lo posible la sensación de inmersión en el simulador (Figura 9). Además, se encuentran sobre soportes adaptables que permiten regular el centro de los monitores en función a la altura de la persona.



Figura 9: Pantallas HD en el interior de la cueva Nemty.

Finalizado el apartado de componentes, en la siguiente Figura se ha representado en 3D los componentes descritos y su localización dentro de Nemty (Figura 10).

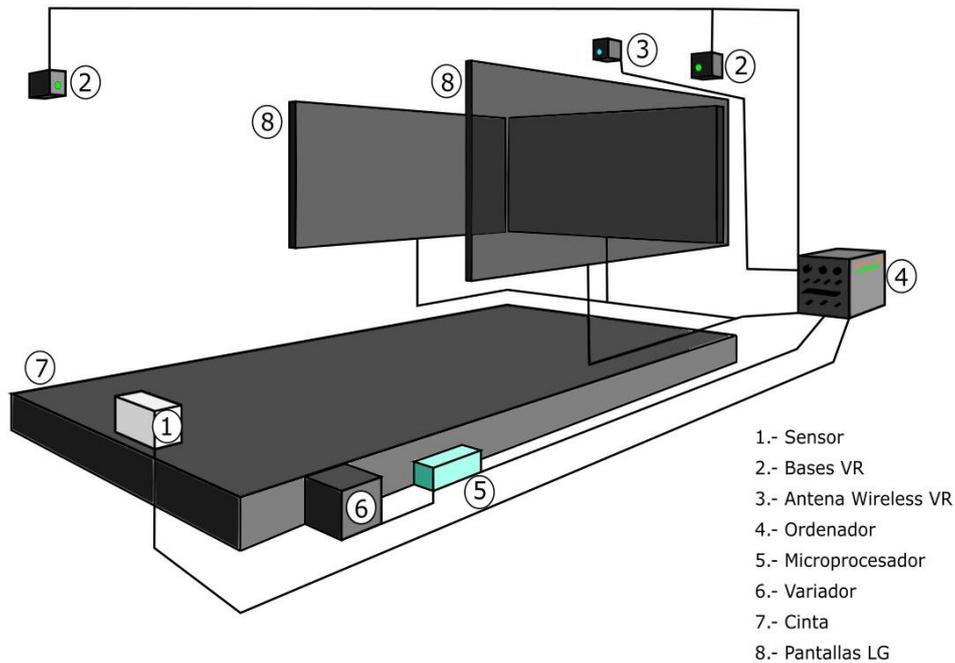


Figura 10: Esquema en 3D de la cueva Nemty realizado mediante el programa InkScape.

5.3 Desarrollo del entorno virtual BlockCity

Para este estudio hemos desarrollado un entorno específico para la evaluación de la movilidad y la orientación de los sujetos. Además, hemos integrado simulaciones de diversos deterioros de la visión para analizar como los sujetos expuestos a estas simulaciones percibían dichas dificultades.

Para el desarrollo del entorno se ha utilizado el programa de diseño Unreal Engine, que es una herramienta que permite la creación y el desarrollo de multitud de entornos virtuales adaptados a cualquier campo de estudio, como arquitectura, ingeniería, simuladores y medicina.

El entorno BlockCity ha sido diseñado para simular una calle de ciudad en la que el sujeto va encontrándose obstáculos al caminar, los cuales debe evitar en todo lo posible. Estos obstáculos son generados de manera aleatoria cuando se inicia el entorno y los errores cometidos por cada sujeto son registrados al finalizar el recorrido. Por otro lado, BlockCity ha sido programado para que el número de obstáculos ronde entre diez y doce por cada recorrido.

El entorno se ha diseñado con unas dimensiones de 48 metros de longitud y un ancho de 2.5 metros, que corresponde a la anchura de la cueva Nemty. Esta forma de diseño permite a los sujetos evitar los obstáculos propuestos desplazándose sobre el ancho de la cinta de Nemty sin que exista una distorsión entre la realidad y el entorno.

Para el diseño de las discapacidades visuales se han utilizado diversos filtros, pero utilizando siempre el mismo entorno. Cada uno de los filtros ha sido incorporado al entorno en vista normal y se han introducido tres modelos de discapacidades visuales: cataratas, desprendimiento de retina y degeneración macular.

5.4 Sujetos de estudio y protocolo experimental

Para evaluar la utilidad del nuevo entorno BlockCity seleccionamos 8 sujetos con visión normal y sin discapacidades visuales. El grupo estuvo formado por 4 hombres y 4 mujeres, con edades comprendidas entre 20 y 40 años.

Los experimentos se realizaron turnando los dos modos de uso de la cueva Nemty, pero siempre utilizando el entorno BlockCity. Se alternaron los días en relación con los modos de uso de la cueva, un día mediante pantallas HD y al día siguiente mediante gafas de realidad virtual, de forma constante hasta finalizar la recogida de los datos.

Los usuarios tenían que realizar cuatro pruebas diarias, cada una de las pruebas correspondía a un modelo de simulación, utilizando siempre el mismo orden. Los filtros de simulación utilizados fueron: (1) Visión control, (2) cataratas, (3) desprendimiento de retina y (4) degeneración macular asociada a la edad.

Cada prueba era un recorrido de 48 metros de longitud, donde aparecían de forma aleatoria diferentes obstáculos que los sujetos debían esquivar mientras caminaban por la cinta. El primer día de las pruebas correspondía al uso con pantallas, y a los voluntarios se les daba las siguientes instrucciones:

- Se debe comenzar a andar cuando el responsable dé la señal y durante el recorrido mantenerse en el centro de la cinta todo lo posible.
- Durante el recorrido se debe esquivar los obstáculos que propone el entorno.
- Una vez terminado el recorrido, aparece en el entorno “recorrido finalizado” y el usuario debe pararse, la cinta se parará de forma automática.

El segundo día de las pruebas, correspondiente a la utilización de las gafas de realidad virtual, los usuarios debían ponerse el arnés de seguridad antes de subir a la cinta. Después, el usuario se coloca las gafas HTC VIVE conectadas a la antena Wireless y se le recordaba las instrucciones anteriores.

5.5 Análisis de datos

Todos los datos se registraron por el sistema y se trasladaron a una base de datos Excel. Para el análisis de los datos se ha utilizado la herramienta de cálculo Excel, con la extensión Real Statistics. Se han calculado los valores a las pruebas correspondientes de Shapiro Wilk para la normalidad y las pruebas para distribuciones no paramétricas como Friedman y Mann, Whitney y Wilcoxon.

6. Resultados

En este apartado se han analizado los datos de velocidad media y de errores cometidos por los sujetos en el entorno virtual BlockCity.

El entorno virtual BlockCity, ha sido desarrollado en la plataforma Unreal Engine y se ha creado específicamente para la evaluación de la movilidad y la orientación de los sujetos. En este caso, se ha integrado en el diseño del entorno simulaciones de discapacidades visuales para poder analizar las dificultades que las patologías presentaban en los sujetos.

El entorno ha sido evaluado durante diez días en la cueva virtual comercial Nemty. En la que el sujeto se ha sometido a las dos modalidades de uso dentro de la cueva, uno por pantallas y otro mediante gafas de realidad virtual (gafas RV). Los modos han sido utilizados de forma alterna cada día del experimento.

El diseño del entorno ha consistido en una calle de 48 metros de largo y 2.5 metros de ancho, en la cual, se generan obstáculos de forma aleatoria al iniciar el entorno. Los obstáculos aparecen como bloques de diversos tamaños, los cuales están señalizados de color negro y amarillo. Durante el experimento, si un usuario cometía un error y no conseguía evitar un obstáculo mientras iba caminando, el entorno posee un contador donde se iban sumando los errores cometidos.

El entorno ha sido diseñado para simular tres discapacidades relacionadas con el deterioro de la visión (Figura 11). Para realizar este estudio, se han utilizado simuladores de cataratas, desprendimiento de retina y degeneración macular asociado a la edad. Para las pruebas realizadas a los sujetos, a cada día le correspondían cuatro recorridos siempre en orden, los cuales eran visión control, cataratas, desprendimiento de retina y degeneración macular.

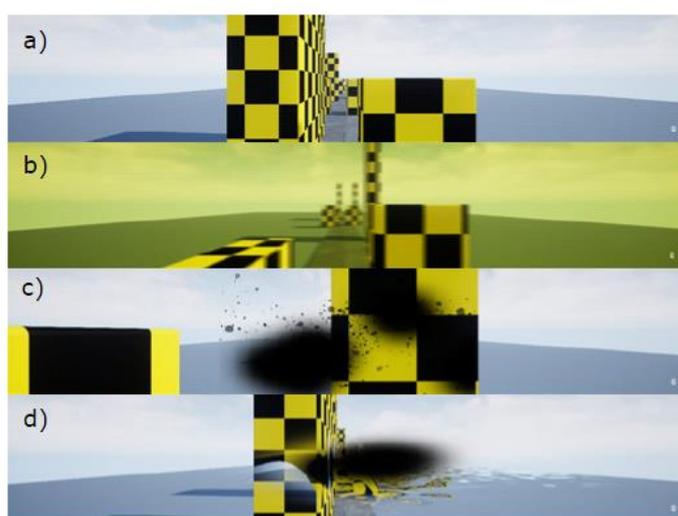


Figura 11: Simulaciones en el entorno BlockCity: a) simulación al natural, b) cataratas, c) desprendimiento de retina y d) degeneración macular.

Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el entorno BlockCity se dividen en los siguientes apartados:

- Relación de las modalidades de uso respecto a la velocidad media y los errores cometidos en el entorno BlockCity
- Análisis de la evolución de la velocidad media y de los errores cometidos en el entorno BlockCity respecto a cada modalidad de uso.
- Análisis de las diferencias entre las simulaciones de las discapacidades visuales en el entorno BlockCity

6.1 Relación de las modalidades de uso respecto a la velocidad media y los errores cometidos en el entorno BlockCity

Para poder evaluar la relación entre las dos modalidades de uso en la cueva virtual, se realizó un análisis comparativo día a día entre los dos modos para observar si presentaban relación entre sí, o si por el contrario, se consideraban independientes.

Primero, se analizaron los datos tanto de velocidad media como de los errores cometidos durante los diez días y se rechazó la hipótesis de que seguían una distribución normal (prueba Shapiro Wilk velocidad media p. value < 0.01; prueba Shapiro Wilk errores <0.01).

Realizada la prueba de normalidad, se analizó la relación entre los diez días en conjunto, y los resultados mostraron que sí existían diferencias significativas tanto en la velocidad media como en los errores cometidos (prueba Friedman para velocidad media p.value < 0.01; prueba Friedman para errores p.value < 0.01).

Después de comprobar que los datos de la velocidad media y de los errores no establecían relación entre los diez días, se profundizó analizando las dos modalidades de uso día a día de forma consecutiva. Se analizaron los modos de uso en la cueva de forma que, el día uno en el que se utilizaron las pantallas se comparaba con el día uno en el que se habían utilizado las gafas RV, el día dos habiendo utilizado las pantallas se comparaba con día dos habiendo utilizado gafas RV y así sucesivamente (Tabla 1).

Velocidad media		p. value	Errores cometidos		p.value
Día 1; Pantallas	Día 2; Gafas RV	< 0.01	Día 1; Pantallas	Día 2; Gafas RV	< 0.01
Día 3; Pantallas	Día 4; Gafas RV	< 0.01	Día 3; Pantallas	Día 4; Gafas RV	< 0.01
Día 5; Pantallas	Día 6; Gafas RV	< 0.01	Día 5; Pantallas	Día 6; Gafas RV	< 0.01
Día 7; Pantallas	Día 8; Gafas RV	0.02	Día 7; Pantallas	Día 8; Gafas RV	< 0.01
Día 9; Pantallas	Día 10; Gafas RV	0.09	Día 9; Pantallas	Día 10; Gafas RV	< 0.01

Tabla 1: Se muestran los resultados de la prueba Mann, Whitney y Wilcoxon en el que se comparan los modos de uso en la cueva Nemty día a día.

La prueba Mann, Whitney y Wilcoxon dio como resultado que las dos modalidades de uso no mantenían relación entre ellas a días consecutivos, salvo el último día en la velocidad media (prueba Mann, Whitney y Wilcoxon p.value = 0.09). Por tanto, se estableció que los dos modos de uso eran independientes entre sí día a día y que no había relación entre ellos durante el experimento.

En la Figura 12, queda presente la variación que existe entre los dos modos de uso, tanto para la velocidad media como para error. Se observa que para la velocidad media (Figura 12 a.), los días en los que se utilizó pantallas poseen una media inferior a los días en los que se utilizaron gafas de realidad virtual. Mientras que para los errores cometidos (Figura 12 b.), la media de los días es superior para el modo de uso con pantallas que para el modo de uso con gafas de realidad virtual.

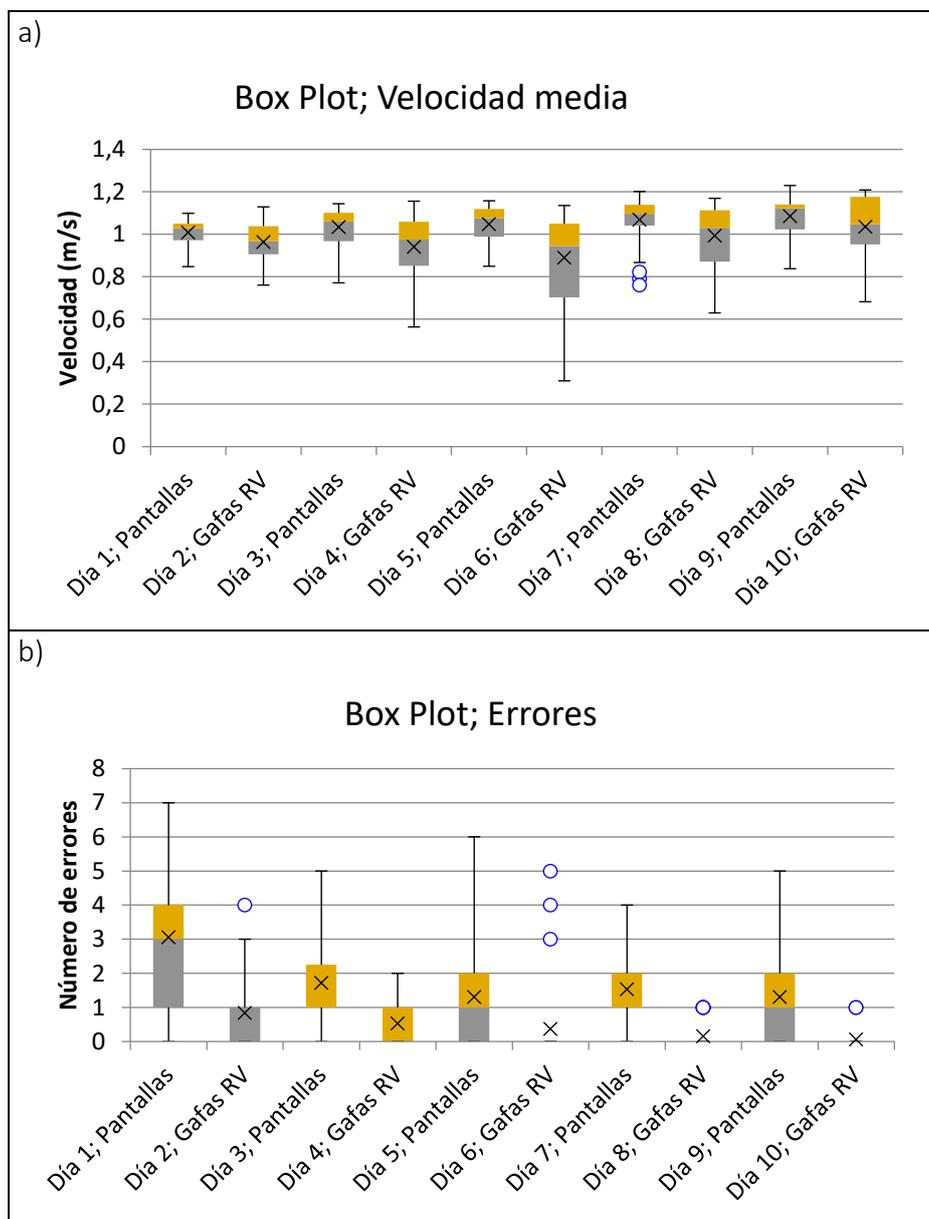


Figura 12: Diagrama de cajas y bigotes de la velocidad media y de los errores, donde quedan representados los cuartiles, la mediana, los datos atípicos y la media. En el interior de la caja, el cambio de color gris/ amarillo marca la mediana, siendo el cajón gris el cuartil 2 y el cajón amarillo el cuartil 3. Las líneas que se extienden verticales muestran los valores extremos dentro del rango intercuartil. Los puntos azules denotan los valores atípicos (valores fuera de rango intercuartil). La x representa la media de los valores de cada día.

a) Velocidad media frente a días,

b) Número de errores cometidos frente a días.

6.2 Análisis de la evolución de la velocidad media y de los errores cometidos en el entorno BlockCity respecto a cada modalidad de uso.

Se quiso analizar la evolución de la velocidad media y de los errores cometidos respecto a la utilización de pantallas y respecto a la utilización de gafas de realidad virtual. Así pues, se separaron los diez días por modalidades, siendo cinco días para la modalidad pantalla y cinco días para la modalidad gafas.

Se comprobó que, tanto para velocidad media como para los errores, se obtenía una evolución significativa, es decir, existían diferencias significativas entre los cinco días correspondientes a cada modalidad (aplicando la prueba Friedman para velocidad media en pantalla $p.value < 0.01$; prueba Friedman para velocidad media en gafas $p.value < 0.01$; prueba Friedman para errores en pantalla $p.value < 0.01$; prueba Friedman para errores en gafas $p.value < 0.01$).

Después de comprobar que, sí existían diferencias en cada uno de los modos respecto a la velocidad media y a los errores, se pasó a analizar día por día cada modalidad de uso con la prueba Mann, Whitney y Wilcoxon, los resultados fueron los siguientes:

- Evolución de la velocidad media en modalidad de pantallas:

No existían diferencias significativas cuando se realizó la prueba día a día. En cambio, la prueba mostró diferencias significativas cuando se tomaron datos de más de dos días consecutivos, es decir, si se analizaba el día uno con el día tres de uso en pantallas (prueba Mann Whitney y Wilcoxon $p.value = 0.023$).

- Evolución de la velocidad media en modalidad de gafas de realidad virtual:

La prueba mostró una primera diferencia significativa del día tres al día cuatro en la modalidad de gafas RV (prueba Mann, Whitney y Wilcoxon $p.value = 0.01$) y también mostró otra diferencia significativa entre el día cuatro y el día cinco (prueba Mann, Whitney y Wilcoxon $p.value = 0.04$).

- Evolución de los errores cometidos en modalidad de pantallas:

La prueba mostró diferencias significativas del primer día al segundo día en cuanto a errores cometidos cuando los sujetos utilizaron pantallas (prueba Mann, Whitney y Wilcoxon $p.value < 0.01$).

- Evolución de los errores cometidos en modalidad de gafas de realidad virtual:

Los resultados no mostraron diferencias significativas día a día, pero sí en días no correlativos, como entre el día uno y el día tres correspondiente al uso de gafas de realidad virtual (prueba Mann, Whitney y Wilcoxon $p.value < 0.01$).

Con estos resultados, se demostró que para las dos modalidades de uso de la cueva existe una evolución tanto en velocidad media como una mejora en errores cometidos. Pero también se obtuvo como resultado que, dependiendo del modo de uso, existe una evolución distinta para la velocidad media y una mejora distinta referente a los errores.

Como se observa en la Figura 13, la velocidad media utilizando las pantallas y la mejora a la hora de evitar los obstáculos con gafas de realidad virtual, mostraron una evolución progresiva y directa. Mientras que los resultados referidos a la velocidad media utilizando gafas de realidad virtual y la mejora en cuanto a evitar los obstáculos utilizando pantallas, mostraron una evolución indirecta.

Con relación a los errores cometidos (Figura 13 b.), tanto en la utilización de pantallas como en la utilización de gafas de realidad virtual, los datos mostraron un día central en el que se consiguió una curva constante. En la modalidad pantallas, el error constante fue uno, mientras que, en el uso de gafas de realidad virtual, el número de errores se mantuvo constante en cero desde el día tres.

En cuanto a la velocidad media se registró una evolución (Figura 13 a.), pero resultó ser distinta en cuanto a los modos, ya que cuando los sujetos utilizaron gafas de realidad virtual, la curva marca diferencias en cuanto a los días, mientras que la curva en el uso de la cueva con pantallas se muestra constante a lo largo del tiempo.

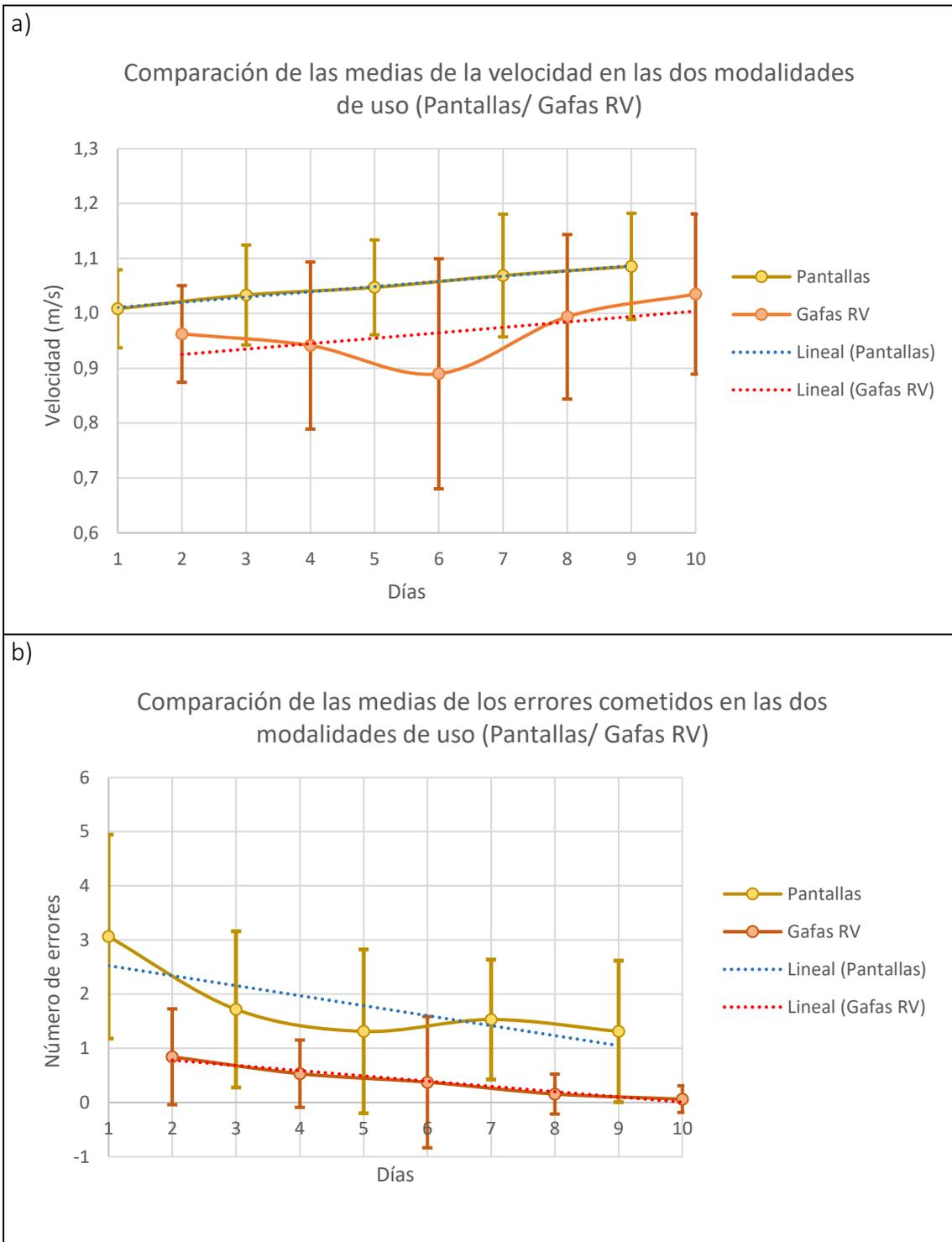


Figura 13: Gráficos donde quedan representadas las medias de velocidad y error por modo de uso frente a los días. Representada por medio de barras verticales la desviación estándar de cada día.

a) Curva de la velocidad frente a los días,
 b) Curva de los errores frente a los días.

6.3 Análisis de las diferencias entre las simulaciones de las discapacidades visuales en el entorno BlockCity

Una vez se hubo demostrado que no existía relación entre las modalidades de uso y que en los dos se mostraba una mejora de los sujetos, se pasó a analizar los datos de las simulaciones utilizadas en el entorno BlockCity. Para ello, se analizaron las medianas de cada día, separando los datos por variable, modo y simulación.

A la hora de comparar las velocidades medias de cada una de las discapacidades visuales simuladas, se realizó por modalidades de uso. Los resultados establecían que si existían diferencias significativas entre el conjunto de simulaciones en el uso de pantallas y en el uso de gafas de realidad virtual (prueba Friedman para velocidad media en pantalla $p.value = 0.03$; prueba Friedman para velocidad media en gafas $p.value = 0.03$).

Se compararon entonces las simulaciones entre sí, y el resultado fue que para las simulaciones visión control, desprendimiento de retina y degeneración macular utilizando las pantallas (prueba Friedman $p. value = 0.07$), no existían diferencias significativas y de forma análoga ocurría con la velocidad media utilizando las gafas de realidad virtual (prueba Friedman $p. value = 0.24$). Estos resultados demostraban que la única simulación en la que existían diferencias significativas en cuanto a la velocidad media era la simulación referente a cataratas.

En la Figura 14 se observa como en la velocidad media en el uso de pantallas (Figura 14 a.), la barra referente a cataratas mostró una disminución en la velocidad de los sujetos a partir del día tres de ese modo, mientras que las demás simulaciones permanecían a velocidades prácticamente constantes. En cuanto a la velocidad media utilizando gafas de realidad virtual (Figura 14 b.) mostró más diferencias entre las velocidades medias de las simulaciones, pero solo en cataratas el resultado fue significativo.

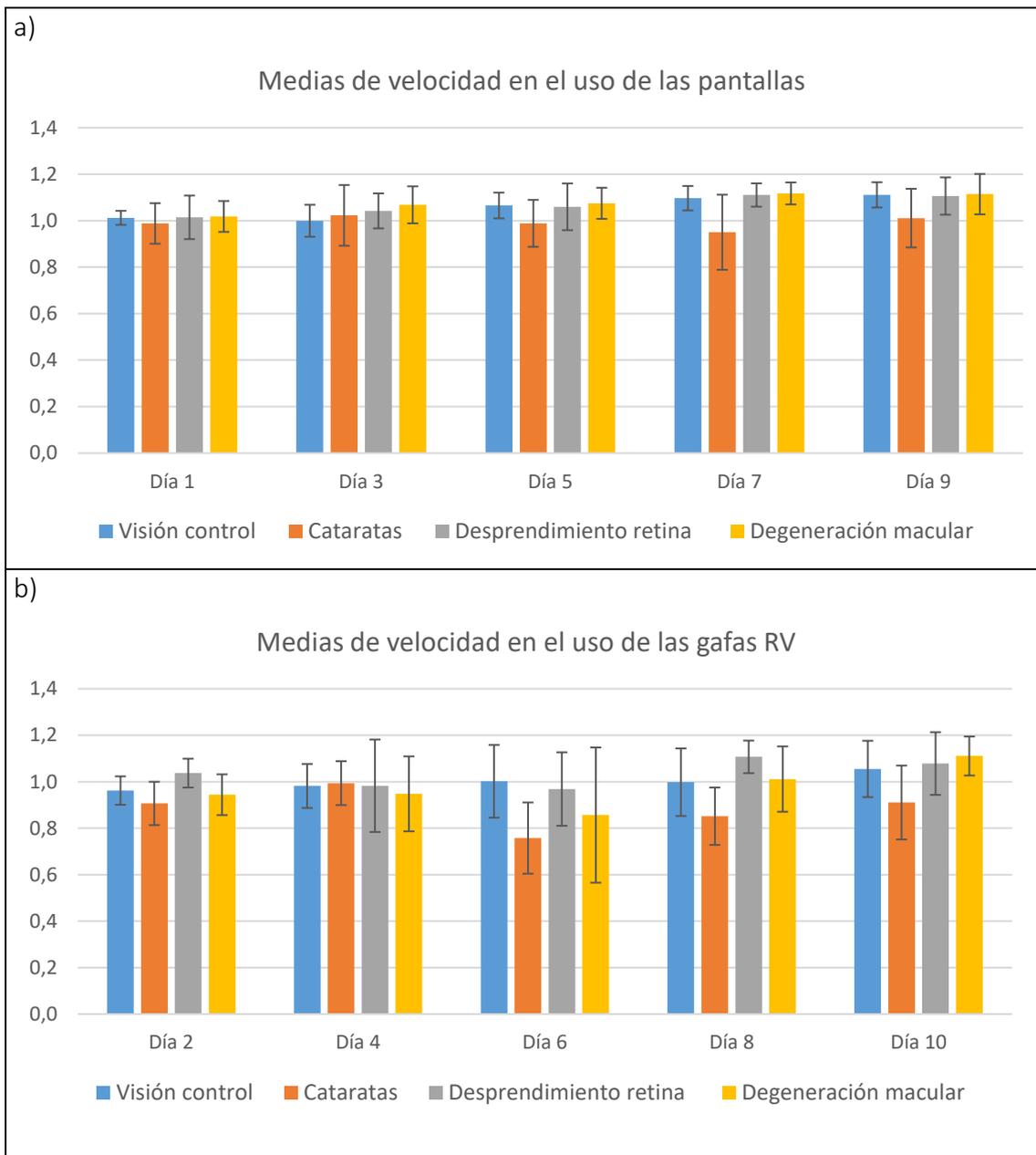


Figura 14: Gráfico de barras para velocidad media y errores cometidos donde se representan las medias de cada día. Los colores representan las cuatro simulaciones, siendo; azul, visión control; naranja, cataratas; gris, desprendimiento de retina; y amarillo, degeneración macular.

- a) Medias de la velocidad en la modalidad de pantallas,
 b) Medias de la velocidad en la modalidad gafas de realidad virtual.

Análogamente se realizó el análisis respecto a los errores cometidos para las dos modalidades de uso en la cueva, los resultados mostraron que no existían diferencias significativas entre las simulaciones en un mismo modo, por tanto, se consideró que los choques no eran representativos en cuanto a las simulaciones (prueba Friedman para errores en pantalla $p.value < 0.01$; prueba Friedman para errores en gafas $p.value < 0.01$).

7. Discusión

En este estudio, se muestra que existe una mejora y una adaptación de los sujetos a los entornos virtuales. Se demuestra que la cueva Nemty es una herramienta tecnológica capaz de reproducir cualquier situación deseada, adaptándose a las necesidades y características del sujeto. La cueva permite reproducir cualquier entorno y ser utilizada en cualquier tipo de experimento, en el caso del entorno BlockCity, se realizan simulaciones de diversos deterioros en la visión con el objetivo de establecer un protocolo de control y posteriormente extrapolarlo a futuros estudios con pacientes reales en los que se proponga una rehabilitación.

Mediante Nemty, los experimentos de movilidad y orientación se plantean de otra manera. Cuando Marron y Bailey evaluaron la movilidad de personas con baja visión [4], necesitaron el diseño de un recorrido interior y de otro recorrido exterior en el que los sujetos iban esquivando los obstáculos. Esta metodología presentaba muchas limitaciones, principalmente el espacio ocupado, la ubicación y el tiempo de montaje, utilizando incluso pocas combinaciones. Nemty es la solución propuesta a estas limitaciones, ya que es capaz de reproducir cualquier entorno y puede colocarse en un lugar de trabajo fijo.

Cuando Chung [8] realizó un estudio para evaluar la movilidad y la orientación, diseñó un recorrido con obstáculos para dos grupos, un grupo de sujetos que poseían discapacidades visuales y un grupo de control. En este recorrido se registraba la velocidad y los errores cometidos a diversos niveles de iluminación, cosa que todavía diferenciaba más a las dos poblaciones. Con ello se registró una disminución del rendimiento con el tiempo y se mostraron diferencias significativas en cuanto a los sujetos con patologías y los sujetos del grupo de control. En el estudio realizado con las simulaciones de BlockCity, se ha registrado una mejora en los dos modos. Además, no se han mostrado diferencias significativas entre las simulaciones de discapacidades visuales y la simulación natural, solo en una de ellas respecto a la velocidad.

Neruban [9] en su estudio, realizó una evaluación de la movilidad en personas afectadas por distrofia retiniana, donde proponía realizar tres evaluaciones de movilidad; seguir una línea recta, un laberinto simple y pasar encima de un bordillo, realizando los tres recorridos a diversos niveles de luz. Siendo el laberinto, el recorrido que mostraba una mayor diferencia en cuanto a la medición de los datos y teniendo características muy similares al entorno BlockCity, diseñado para el estudio con Nemty. Los resultados de Neruban mostraron una diferencia significativa entre los sujetos con patologías visuales y el grupo de control, aun cuando los niveles de iluminación eran altos.

En cuanto a estudios referidos a la rehabilitación mediante entornos virtuales, Wilson [12] y Chunningham [16] fueron de los primeros en demostrar que el aprendizaje en los entornos virtuales era transmitido a la realidad. Posteriormente, Faria [17] realizó un análisis intragrupal que reveló mejoras significativas en el funcionamiento cognitivo global en personas que habían sufrido accidentes cerebrovasculares. Los resultados mostraron mejoras significativamente mayores en el funcionamiento cognitivo global en

el grupo que se expuso a una rehabilitación por medio de entornos virtuales frente a el grupo control que se expuso al proceso de rehabilitación tradicional.

Diversos autores que se han dedicado a la investigación en el campo de la rehabilitación por medio de entornos virtuales [14][13], exponen que es imprescindible la sincronización motora y virtual para el correcto uso de los simuladores. Además, para cada herramienta es necesaria una curva de aprendizaje, y para Nemty, los sujetos deben someterse a unos días de adaptación antes de comenzar en todo caso, una rehabilitación. En cuanto a los errores cometidos por los sujetos, se ha llegado a observar cómo los datos se logran mantener constantes prácticamente al tercer día, mientras que, para la velocidad media no se ha llegado a alcanzar esa forma constante en la gráfica. Por tanto, se establece que, para la utilización de Nemty como herramienta en la rehabilitación, es necesario establecer la curva de aprendizaje, la cual para 10 días ha sido insuficiente.

Se propone para estudios futuros, establecer dicha curva de aprendizaje y posteriormente utilizarla como entrenamiento previo a la rehabilitación de los pacientes con diversos tipos de deterioro de la visión.

8. Conclusiones

1. Durante este estudio, se ha conseguido desarrollar y evaluar un entorno virtual de carácter sencillo que podría servir en un futuro como una herramienta para analizar la movilidad en personas que sufren deterioro de la visión.
2. Se ha evaluado el entorno BlockCity en la cueva virtual Nemty, mediante el uso de pantallas y gafas de realidad virtual. Se ha demostrado mediante el análisis de los datos que los dos modos de uso de la cueva no presentan relación entre sí.
3. Así mismo, en ambos modos ha quedado presente una evolución durante el experimento, aunque la mejora respecto a la velocidad media y a los errores cometidos no fue igual para la modalidad de uso con pantallas que para la modalidad de uso con gafas de realidad virtual.
4. En cuanto a la evaluación de la dificultad respecto a las discapacidades visuales simuladas en el entorno, los datos de velocidad media han mostrado que solo existen diferencias significativas en una de las patologías simuladas (cataratas), mientras que, para los errores cometidos, la diferencia significativa entre las simulaciones es nula.
5. Los resultados obtenidos sirven como referencia a futuros estudios estandarizando el método de análisis de movilidad en pacientes con deficiencias visuales en un entorno virtual.

9. Agradecimientos

Gracias a mi tutor, Eduardo Fernández, por enseñarme, animarme y creer en mí.

Gracias a Antonio Alarcón por ser parte esencial del día a día.

A Juan Sebastián Suarez, primero por amigo y segundo, por ser imprescindible tanto en mi trabajo diario, como en este estudio.

Gracias a todos mis voluntarios y compañeros de laboratorio. A Cris y a Tente, por todo. Y por supuesto, a Diego, mi inseparable.

10. Referencias

- [1] R. R. A. Bourne *et al.*, “Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: The Right to Sight: An analysis for the Global Burden of Disease Study,” *Lancet Glob. Heal.*, vol. 9, no. 2, pp. e144–e160, Feb. 2021, doi: 10.1016/S2214-109X(20)30489-7.
- [2] R. R. A. Bourne *et al.*, “Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: An analysis for the Global Burden of Disease Study,” *Lancet Glob. Heal.*, vol. 9, no. 2, pp. e130–e143, Feb. 2021, doi: 10.1016/S2214-109X(20)30425-3.
- [3] T. R. Fricke *et al.*, “Global Prevalence of Presbyopia and Vision Impairment from Uncorrected Presbyopia: Systematic Review, Meta-analysis, and Modelling,” *Ophthalmology*, vol. 125, no. 10, pp. 1492–1499, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ophtha.2018.04.013.
- [4] J. A. Marron and I. L. Bailey, “Visual factors and orientation-mobility performance,” *Optom. Vis. Sci.*, vol. 59, no. 5, pp. 413–426, 1982, doi: 10.1097/00006324-198205000-00009.
- [5] K. A. Turano, A. T. Broman, K. Bandeen-Roche, B. Munoz, G. S. Rubin, and S. K. West, “Association of visual field loss and mobility performance in older adults: Salisbury eye evaluation study,” *Optom. Vis. Sci.*, vol. 81, no. 5, pp. 298–307, 2004, doi: 10.1097/01.opx.0000134903.13651.8e.
- [6] D. R. Geruschat, K. A. Turano, and J. W. Stahl, “Traditional measures of mobility performance and retinitis pigmentosa,” *Optom. Vis. Sci.*, vol. 75, no. 7, pp. 525–537, 1998, doi: 10.1097/00006324-199807000-00022.
- [7] A. C. Nau, C. Pintar, C. Fisher, J. H. Jeong, and K. H. Jeong, “A standardized obstacle course for assessment of visual function in ultra low vision and artificial vision,” *J. Vis. Exp.*, no. 84, Feb. 2014, doi: 10.3791/51205.
- [8] D. C. Chung *et al.*, “Novel mobility test to assess functional vision in patients with inherited retinal dystrophies,” *Clin. Exp. Ophthalmol.*, vol. 46, no. 3, pp. 247–259, Apr. 2018, doi: 10.1111/ceo.13022.
- [9] N. Kumaran, R. R. Ali, N. A. Tyler, J. W. B. Bainbridge, M. Michaelides, and G. S. Rubin, “Validation of a vision-guided mobility assessment for RPE65-associated retinal dystrophy,” *Transl. Vis. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–11, Sep. 2020, doi: 10.1167/tvst.9.10.5.
- [10] and R. W. Duane Geruschat, Sharon Bentley, Marshall Flax, Richard Long, James Weiland, “Orientation and mobility Assessments,” *Curr. Issues Educ. ...*, vol. 9, no. 8, pp. 40–44, 2014, [Online]. Available: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=7UE-AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA253&dq=%22daily+travel%22+and+%22people+with+disabilities%22&ots=IHKUN884fp&sig=KmbymOlAJq3jweoYIQ5nBTOHkrY>.

- [11] P. N. Wilson, N. Foreman, and D. Stanton, "Virtual reality, disability and rehabilitation," *Disability and Rehabilitation*, vol. 19, no. 6. Informa Healthcare, pp. 213–220, 1997, doi: 10.3109/09638289709166530.
- [12] P. N. Wilson, N. Foreman, and M. Tlauka, "Transfer of spatial information from a virtual to a real environment in physically disabled children," *Disabil. Rehabil.*, vol. 18, no. 12, pp. 633–637, 1996, doi: 10.3109/09638289609166328.
- [13] E. B. Larson, M. Feigon, P. Gagliardo, and A. Y. Dvorkin, "Virtual reality and cognitive rehabilitation: A review of current outcome research," *NeuroRehabilitation*, vol. 34, no. 4. IOS Press, pp. 759–772, 2014, doi: 10.3233/NRE-141078.
- [14] M. T. Schultheis and A. A. Rizzo, "The application of virtual reality technology in rehabilitation," *Rehabilitation Psychology*, vol. 46, no. 3. pp. 296–311, 2001, doi: 10.1037/0090-5550.46.3.296.
- [15] D. Cunningham and M. Krishack, "Virtual reality promotes visual and cognitive function in rehabilitation," *Cyberpsychology Behav.*, vol. 2, no. 1, pp. 19–23, 1999, doi: 10.1089/cpb.1999.2.19.
- [16] D. Cunningham and M. Krishack, "Virtual reality: a wholistic approach to rehabilitation.," *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 62, pp. 90–3, Jan. 1999, Accessed: Jun. 17, 2021. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10538406>.
- [17] A. L. Faria, A. Andrade, L. Soares, and S. B. I Badia, "Benefits of virtual reality based cognitive rehabilitation through simulated activities of daily living: a randomized controlled trial with stroke patients," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, Nov. 2016, doi: 10.1186/s12984-016-0204-z.
- [18] J. J. Urgan Symanzik, D. Cook, B. D. Kohlmeyer, and C. Cruzzneira, "Dynamic Statistical Graphics in the CAVE Virtual Reality Environment."

