



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Centre de la Imatge i la Tecnologia Multimèdia

Desplazamiento en VR: El futuro no-euclidiano

Raul Cano Ibañez

Director: Sofia Seinfeld
Grado: Videojuegos
Curso: 2022-23
Universidad: UPC | CITM

Índex

Resumen	3
Palabras clave	3
Enlaces	3
Índice de tablas	4
Índice de figuras	5
Glosario	6
1. Introducción	7
1.1 Motivación	7
1.2 Formulación del problema	7
1.3 Objetivos generales del TFG	7
1.4 Objetivos específicos del TFG	8
1.5 Alcance del proyecto	8
2. Estado del arte	9
3. Gestión del proyecto	16
3.1. DAFO	17
3.2. Riesgos y plan de contingencias	17
4. Metodología	18
5. Desarrollo del proyecto	20
5.1. Pruebas VR	20
5.2. Entrevista Desarrolladores	23
6. Validación del proyecto	25
7. Conclusiones	26
7.1 Líneas de futuro	26
8. Bibliografía	27
9. Anexos	29

Resumen

La Realidad Virtual (VR) es una tecnología que nos permite sumergirnos en entornos virtuales y que está siendo cada vez más utilizada, especialmente en videojuegos. Sin embargo, hay una falta de equilibrio entre la inmersión y la comodidad del usuario, lo que plantea un desafío para los desarrolladores. Para lograr una inmersión efectiva, es necesario tener en cuenta la relación inmersión-embodiment-presencia. Además, el jugador debe sentirse cómodo mientras usa el dispositivo VR, lo que implica reducir el peso que debe cargar, proporcionar una buena ventilación y evitar movimientos bruscos. También es importante elegir la técnica de locomoción virtual adecuada para el juego, ya sea mediante el propio movimiento del jugador o mediante el uso de controladores o la teleportación.

Existen empresas que ofrecen instrumentos para una mejor movilidad por el mundo virtual, produciendo una mejor inmersión, pero que resultan costosos para el usuario. Un sistema poco estudiado y utilizado es el desplazamiento por **geometría no-euclidiana** o espacios imposibles/flexibles, que permite al usuario desplazarse físicamente por diferentes habitaciones o zonas sin salir de su área de juego. La idea es superponer diferentes áreas mientras se avanza por pasillos, dando la sensación de progresión y redirigiendo al jugador hacia el centro del espacio definido.

En resumen, la Realidad Virtual ofrece un mundo de posibilidades para la creación de videojuegos inmersivos y entretenidos, pero su uso debe tener en cuenta tanto la inmersión como la comodidad del usuario. La elección de la técnica de locomoción adecuada es crucial para lograr una experiencia de juego satisfactoria, y el desplazamiento por **geometría no-euclidiana** puede ser una opción interesante y poco explorada para lograr una inmersión efectiva sin sacrificar la comodidad del usuario.

Palabras clave

Realidad Virtual, Locomoción Virtual, No-euclidiano, Reorientación, Diseño, Análisis.

Enlaces

- Void Room. (2019)
[Tea For God.](#)
- Triangular Pixels. (2016)
[Unseen Diplomacy.](#)
- Robert Wetzold. (2020)
[TraVRsal.](#)

Índice de tablas

Tabla 1: DAFO	Pág. 16
Tabla 2: Riesgos	Pág. 17
Infograma	Pág. 21

Índice de figuras

Figura 1: Tipología de locomociones	Pág. 10
Figura 2: Ekto VR	Pág. 11
Figura 3: Kat Walk	Pág. 11
Figura 4: Habitaciones Superpuestas	Pág. 11
Figura 5: Generación del pasillo	Pág. 12
Figura 6: Plano del centro comercial	Pág. 13
Figura 7: Ejemplo 4 Piso	Pág. 13
Figura 8: Mapa de Tea For God	Pág. 14
Figura 9: Intersección de Pasillos	Pág. 15
Figura 10: Diagrama Metodología	Pág. 18

Glosario

- **Distancia Interpupilar:** Longitud, en milímetros, que hay entre las dos pupilas de un ser humano. Los cristales que usan los dispositivos VR tienen un centro, siendo el punto de mejor visión, y debe ser ajustado a la posición donde está la pupila.
- **Visión Estereoscópica:** La capacidad que tiene el ser humano de integrar en una sola las imágenes que nos llegan de cada uno de nuestros dos ojos y crear una imagen tridimensional, en relieve y con suficiente profundidad.
- **Motion Sickness (mareo por movimiento):** Sensación de mareo, angustia y náuseas que se manifiesta en una persona por el movimiento, aceleración y desaceleración lineal y angular. Nuestro aparato vestibular, encargado del equilibrio, sufre de continuas alteraciones que el cerebro no llega a procesar. Suele ser producido por gafas VR o medios de transporte como coches, barcos, etc.
- **Geometría No-Euclidiana:** Sistema formal de geometría que difiere en algún postulado de los establecidos por Euclides, siendo estos:
 1. Dos puntos distintos determinan un segmento de recta.
 2. Un segmento de recta se puede extender indefinidamente en una línea recta.
 3. Se puede trazar una circunferencia dados un centro y un radio cualquiera.
 4. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí.
 5. Si una línea recta corta a otras dos, de tal manera que la suma de los dos ángulos interiores del mismo lado sea menor que dos rectos, las otras dos rectas se cortan, al prolongarlas, por el lado en el que están los ángulos menores que dos rectos.

Esto aplicado a VR nos permite extender la zona de juego en un espacio físico más reducido.¹

- **Point & Teleport:** Técnica de locomoción VR donde el jugador apunta con su mano o mando hacia el punto que se quiere dirigir y, una vez seleccionado, el personaje se ve teleportado allí.
- **Generación Procedural:** Método de creación de datos con algoritmos que nos permite de manera automática obtener el contenido deseado. Esto nos permite tener archivos de menor tamaño, mayor cantidad de contenido o la inclusión de aleatoriedad para experiencias de juego menos predecibles.

¹ [▶ Non-euclidean virtual reality using ray marching](#)
[▶ Tea For God - impossible spaces trailer](#)

1. Introducción

1.1 Motivación

El tema de este TFG proviene de mis inicios en el sector VR. Al utilizar por primera vez unas gafas VR vi las limitaciones ya no solo que aportan al propio usuario, sino las que hay en aplicaciones y juegos. Viendo que familiares y amigos pasaron por la misma evolución que tuve yo al probar las gafas que compré me hizo reflexionar en las posibilidades que se están ofreciendo y cómo sería posible su mejora. El usuario debe pasar un largo tiempo de adaptación si quiere ser capaz de evitar el *motion sickness* en diferentes tipos de locomoción desarrolladas.

Fue cuando jugué por primera vez a un título aún en desarrollo, llamado *Tea For God*, que vi como la locomoción *no-euclidiana* que tiene implementada puede resolver estos límites anteriormente mencionados.

1.2 Formulación del problema

Actualmente, los programas de VR se ven limitados por el espacio físico disponible, la limitación económica y la comodidad del usuario, ya sea provocado por el dispositivo o por el funcionamiento de la aplicación.

Aunque haya en el mercado ciertas aplicaciones que explotan el concepto de la *geometría no-euclidiana*, quiero investigar si es realmente la solución a los problemas anteriormente mencionados; además de qué supone al jugador y en temas de diseño del juego y/o niveles.

1.3 Objetivos generales del TFG

Analizar los sistemas de locomoción VR más usados en la industria e investigar cuál de ellos aportan mayor inmersión, mayor comodidad al jugador y tienen la posibilidad de superar las limitaciones del espacio físico que supone el ámbito VR.

1.4 Objetivos específicos del TFG

- Recabar información de los temas a tratar para contextualizar la idea principal del proyecto.
- Recolectar y analizar datos sobre los efectos de los diferentes sistemas de locomoción más implementados, además del propuesto, para comparar y calificar según la experiencia de los usuarios.
- Desarrollar un cuestionario para realizar a los voluntarios que se presenten a las pruebas sobre los efectos de los diferentes sistemas de locomoción.
- Realizar un cuestionario formal para entrevistar a desarrolladores VR.
- Entrevistar a diferentes desarrolladores de VR sobre su experiencia a la hora de idear y desarrollar formas de locomoción.

1.5 Alcance del proyecto

Es importante que existan recursos y guías disponibles para comprender aspectos clave de este ámbito y explorar nuevas funcionalidades a implementar.

Este proyecto tiene como objetivo informar y guiar a futuros desarrolladores de videojuegos VR mediante un análisis de los métodos de desplazamiento VR más usados en la actualidad, así como realizar pruebas y encuestar a un gran público con el fin de comparar qué ofrece y qué limitaciones tiene cada uno.

De esta manera, estos desarrolladores podrán tener una mejor comprensión de las necesidades y deseos de los jugadores en cuanto a su navegación por el entorno virtual, lo que les permitirá encaminar mejor las decisiones a tomar y crear juegos más atractivos e inmersivos en la realidad virtual.

2. Estado del arte

La Realidad Virtual (VR) nos ofrece un entorno virtual con apariencia real y que nos permite trasladarnos a cualquier lugar o situación. Para ello, se han creado gafas o cascos que sellan la visión exterior, compuestos mayormente por dos pantallas que muestran dos ángulos de la misma escena a una **distancia interpupilar**, generando así una imagen en 3D gracias a la **visión estereoscópica**. Se complementa con unos sensores internos y/o externos para identificar la posición y rotación del usuario dentro del área de juego, delimitada por estos sensores o mediante el software de las gafas.

Con el creciente uso del ámbito VR, especialmente en videojuegos, se está investigando cómo optimizar y mejorar ya no solo la inmersión a ese mundo virtual, sino maximizar la comodidad del jugador que hace uso del dispositivo. Actualmente, muchas de las propuestas que mejoran esa inmersión empeoran la comodidad, y viceversa.

La noción de inmersión explicada por sí sola crea un conflicto, por lo que se tiene que considerar la relación inmersión-embodiment-presencia [12], definiendo estos como:

- **Inmersión (Relación Focal):** percepción visual del jugador al mundo virtual. Una buena inmersión da un sentimiento de estar rodeado y comprometido con ese mundo. Los elementos básicos para una inmersión efectiva son: sonido envolvente, interacción natural y fluida con el mundo y una locomoción que resulte natural [12].
- **Embodiment (Relación Personificada):** relación de similitud entre el cuerpo físico del jugador y el cuerpo virtual gracias al uso de sensores de posición y rotación, para la cabeza y las manos como mínimo, permitiendo interactuar con el entorno virtual [12].
- **Presencia (Relación Hermenéutica):** interpretación del mundo virtual que hace el jugador, comprendiendo el significado de objetos, espacios y eventos. Forma el sentido de presencia e interpretación del mundo, siendo subjetiva a cada usuario [12].

Huizinga describe la acción de jugar como una actividad segregada espacial y temporalmente de la vida diaria, y sujeto a un sistema autónomo de reglas que se deben cumplir. Si estas reglas se cambian, los jugadores se ven forzados a “salir” del juego para reevaluar su percepción de ese mundo, por lo que destroza la sensación de inmersión, rompiendo así el entretenimiento del jugador [12].

Para que el usuario se sienta cómodo en el uso de su dispositivo VR es importante reducir al máximo el peso del equipo a portar, que disponga de buena ventilación y resulte ergonómico para que las sesiones no se vean interrumpidas constantemente por dolores o sensación de cansancio. También requiere reducir giros de cámara o movimiento bruscos para evitar provocar a los usuarios **motion sickness**.

A la hora de crear mundos es necesario implementar un sistema de locomoción virtual que nos permita explorarlos. Estudios han categorizado las diferentes técnicas de locomoción que se han desarrollado para poder explorarlo [7]:

- **Motion-Based (Basado en movimiento):** El desplazamiento lo realiza el propio jugador; en otras palabras, el jugador se mueve por su espacio físico y el personaje proyecta su posición y rotación en el mundo virtual. No produce *motion sickness* y ofrece una alta inmersión, pero es necesario un amplio espacio para moverse [7].
- **Room-Scale-Based (Basado en la escala de la habitación):** Es similar al anterior, pero el escenario virtual se limita al espacio físico del jugador. No produce *motion sickness* y ofrece una alta inmersión, pero el mundo resulta limitado y poco explorable [7].
- **Teleportation-Based (Basado en teletransporte):** El personaje se ve transportado en un momento a un punto del escenario, ya sea con *Point & Teleport*, con puntos predefinidos en el escenario, etc. Produce poco *motion sickness*, pero resulta poco inmersivo [7].
- **Controller-Based (Basado en el mando):** El jugador hace uso de controladores (mandos VR, mandos de consola, teclado) para dirigir el movimiento y rotación del personaje. Puede producir *motion sickness* en usuarios poco experimentados, pero resulta más inmersivo que el anterior [7].

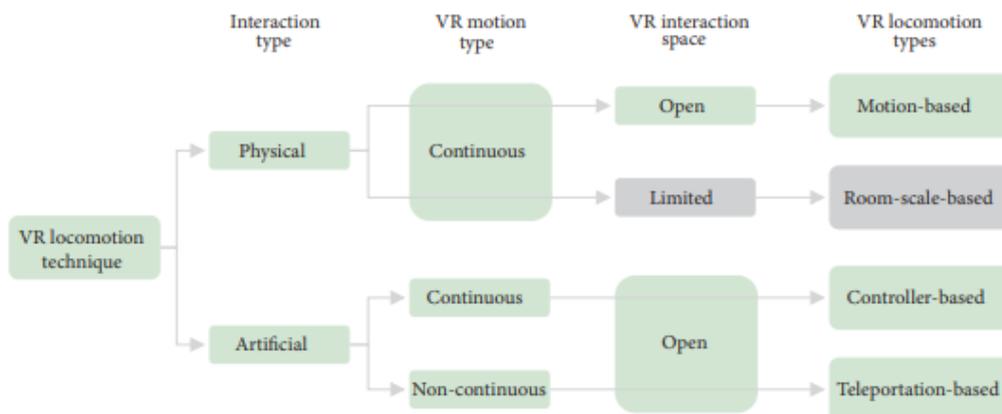


Figura 1: Tipología de técnicas de locomoción. Los tipos y aspectos de interacciones están representados en verde, llegando a las principales técnicas que se usan en la actualidad [7].

Con el objetivo de perfeccionar la inmersión en los juegos, varias empresas han creado instrumentos pensados para una mejor movilidad por el mundo virtual, como **Ekto VR** o **KAT Walk**, que ofrecen la capacidad de moverse libremente caminando sin desplazamiento físico a un elevado coste monetario, además de un peso extra en el jugador para el primero y el espacio físico que supone el segundo para almacenarlo, implicando un decremento en la comodidad del usuario.



Figura 2: Ekto VR



Figura 3: Kat Walk

Sin embargo, hay un sistema poco estudiado e implementado en la actualidad, conocido como desplazamiento por **geometría no-euclidiana** o espacios imposibles/flexibles, el cual usa la técnica locomotora Room-Scale-Based permitiendo desplazarse como si de Motion-Based se tratara.

La principal idea reside en superponer diferentes habitaciones, zonas, etc. mientras avanzas por pasillos o similares, dando así la sensación de progresión. El objetivo es redirigirnos al centro del espacio definido a la hora de hacer un cambio de habitación.

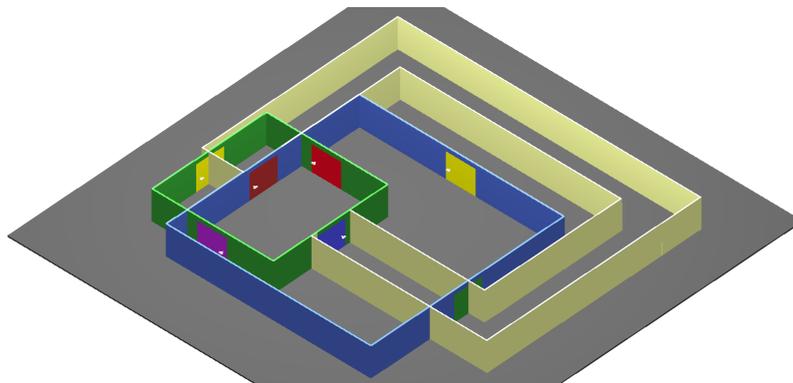


Figura 4: Habitaciones Superpuestas²

² Hannes Kaufmann [4]
[Flexible Spaces: Dynamic Layout Generation for Infinite Walking in Virtual Environments.](#)

A la hora de querer implementar un movimiento *no-euclidiano* es necesario aclarar que se trata más bien de un concepto en vez de una práctica; no hay una única manera establecida de poder desarrollar esa locomoción.

La visión del Game Designer puede servir de guía para el resultado final: ¿Tiene una justificación dentro del mundo o se utilizará como mera herramienta para el jugador? Partiendo de esa base hay gran variedad de maneras de implementarlo, pero lo más óptimo y cómodo para el desarrollador suele ser *generar proceduralmente* parte del mapa.

Hannes Kaufmann y su equipo idearon un algoritmo en 2013 que generaba pasillos entre habitaciones en el que, a partir de la puerta que abra el jugador, colocará la segunda habitación dentro del área de seguimiento y generará tres puntos: el de la salida de la habitación, un punto aleatorio fuera de la habitación y el punto de entrada de la próxima habitación. Para conectar estos puntos se generan subpuntos entre sus posiciones y así generar el pasillo [4].

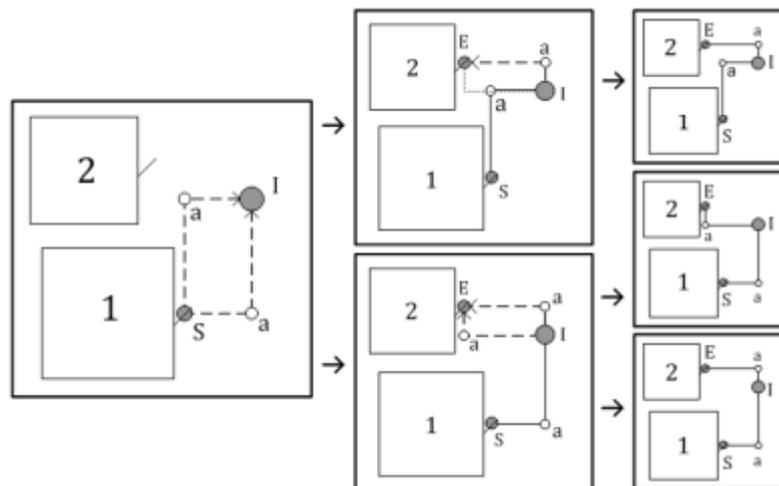


Figura 5: Generación del pasillo [4]

Este sistema de generación, al crear un pasillo “lineal” a otra sala, evita la sensación de que el mundo se dobla sobre sí mismo, ofreciendo mayor inmersión, pero se requiere un espacio relativamente grande para poder generar parte de dos habitaciones y el pasillo que los conecte.

Otro ejemplo de esta implementación lo tenemos en *A Shopping Mall Simulator*, desarrollado por Adrian Schröder, Eva Goodnight, Markus Kühner, Wilhelm Gerner, Michael Hebel y Daniel Görlich en 2020. Usaron para los 3 primeros pisos un movimiento que llamaron *Active/Passive Walking* [3], que permite al jugador desplazarse entre habitaciones y pisos sin la necesidad de moverse gracias a usar escaleras mecánicas y cintas transportadoras. Para el 4 piso usaron **generación procedural no-euclidiana** para crear pasillos y oficinas.



Figura 6: Plano del centro comercial [3]

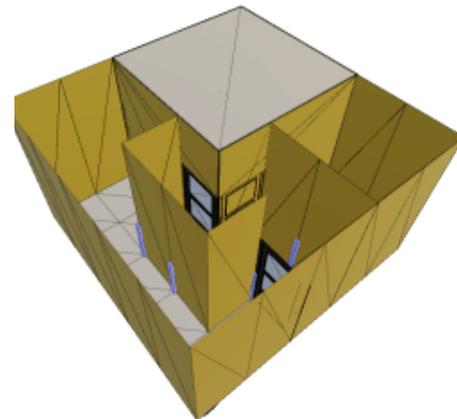


Figura 7: Ejemplo del 4 piso [3]

Este proyecto depende en menor medida de la **geometría no-euclidiana**, pero muestra otras alternativas para moverse entre zonas que no sean pasillos. El uso de escaleras mecánicas, cintas transportadoras, ascensores, etc. cumple en cierta manera la función de los pasillos, dado que el pasillo te permite recolocarte en el centro de tu entorno físico, y ofrecen una vía menos monótona para el jugador.

Por último, debo mostrar la implementación usada en el juego *Tea for God*, aún en desarrollo por Jarosław Ciupiński (*Void Room*). Este juego, con elementos FPS, Rogue Lite y Mundo Abierto, hace uso de la **generación procedural** para crear gran parte del juego (zona de juego, armas, aparición de enemigos, etc.) y cuenta con una locomoción **no-euclidiana** que te permite moverte por tu propio pie por el mapa.

Al hacer uso de bloques o trozos de mapas ya predefinidos, que se generan dependiendo del bioma actual y el área de juego disponible, permite crear un laberíntico mundo infinito donde encontraremos:

- Gran cantidad de pasillos básicos, curvados, en forma de X, en forma de T; de los cuales algunos serán sin paredes y darán la sensación de poder caer al vacío, que sean anchos pareciendo una habitación, entre otros.
- Salas de transición entre zonas (ascensores, cintas transportadoras, plataformas rotatorias, etc.) que dan más variedad y frescura a la experiencia.
- Habitaciones especiales de una única entrada donde mejorar el personaje, mejorar armas, recuperar salud y energía, etc.

Esta **generación procedural** está programada para aprovechar al máximo el área física de juego, por lo que es común girar un pasillo y que accedas a un segundo pasillo que de manera perceptual intersecciona con el anterior, rompiendo la realidad y, por ende, la inmersión. En su defensa comentar que esta fractura de la percepción ocurre al inicio, cuando el jugador se acostumbra resulta un concepto más bien interesante.

Para complementar este método, la zona virtual de juego se reescala en proporción del área física del jugador, por lo que si se dispone de un área muy limitada la experiencia que ofrece es extremadamente similar a un usuario que usa un espacio más amplio. Obviamente, el juego tiene unos valores mínimos para ofrecer la jugabilidad que desea el desarrollador, siendo estos un área de 1.8x1.2m. En caso de no disponer de ella, el juego incrementará más la escala en el eje horizontal y aparentar que es más largo, limitándose a un área de 90x60cm.³

Hay una pega en buscar aprovechar al máximo la zona de juego, y es que la orientación del jugador por el mundo se pierde por completo, haciendo imposible poder avanzar por este. La solución que se ofrece es un mapa básico con las rutas disponibles, que está a disposición del jugador en todo momento, el cual puede ir desvelando qué zonas se encontrarán mediante sus respectivas habitaciones.

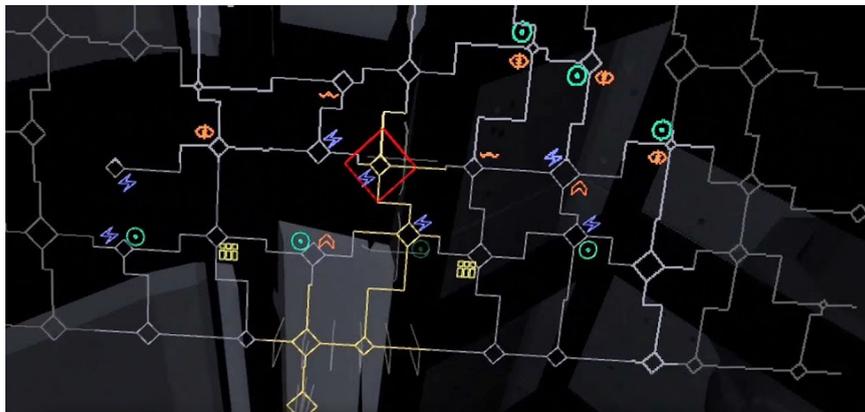


Figura 8: Mapa de *Tea For God*

³ Void Room
[Tea For God Steam](#)

Complementando al mapa, en las puertas que hay entre pasillo y pasillo se encuentran unas flechas indicando hacia qué dirección se dirige ese camino, permitiendo orientarnos y seguir la ruta deseada. Además de las flechas, cada cierto tiempo cambiará e indicará qué habitaciones especiales hay siguiendo ese camino.



Figura 9: Intersección de pasillos, *Tea For God*

En conclusión, implementar una locomoción *no-euclidiana* no tiene una única manera establecida de hacerlo y puede depender de las necesidades y objetivos del juego, la visión del Game Designer y la comodidad del desarrollador. Se pueden usar técnicas de *generación procedural* para crear pasillos, escaleras mecánicas, cintas transportadoras, ascensores, entre otros, al hacer una transición entre zonas para reubicar al jugador y así mejorar la inmersión. Sin embargo, intentar aprovechar al máximo el área de juego a través de la *generación procedural* puede tener limitaciones, como la pérdida de orientación del jugador en el mundo.

3. Gestión del proyecto

Se ha planificado durante una semana por las tardes unas sesiones de pruebas y recolección de datos. Esta recolección se llevará a cabo en el plató del CITM, haciendo uso de las gafas VR de la marca Oculus del centro mediante el juego *Rec Room* para el desplazamiento por teletransporte y *Tea For God* para el resto.

Se publicitaron estas pruebas a través de familiares y conocidos dentro y fuera del recinto universitario del CITM mediante un cuestionario donde registrarse. Estas pruebas se han organizado en sesiones de media hora entre las 9h - 20h donde los voluntarios que asistan jugarán 10 minutos por cada locomoción a examinar (locomoción mediante mando, por teletransporte y *no-euclidiana*) y, una vez finalizan cada prueba, se les dará un formulario a rellenar explicando su experiencia y sensaciones respecto ese sistema de locomoción. Al realizar el cuestionario al final de cada prueba defino mejor las secciones, garantizando una mayor comprensión y permitiendo un breve descanso entre pruebas.

Este cuestionario consta de 4 partes ordenadas según la probabilidad de producir posibles síntomas, siendo estas:

1. Información sobre el voluntario, como la edad, de qué centro proviene, si tiene experiencia con VR, etc.
2. Valoración sobre el movimiento por teletransporte.
3. Valoración sobre el movimiento *no-euclidiano*.
4. Valoración sobre el movimiento por mando.

Además, se entrevistó a varios desarrolladores de juegos VR que hayan implementado una locomoción por *geometría no-euclidiana* para conocer su experiencia, recomendaciones a la hora de implementarlo y consejos, asentando así mejor las bases del proyecto.

3.1. DAFO

	Positivos	Negativos
Origen Interno	<p>Fortalezas</p> <ul style="list-style-type: none"> Espacio, material y gran cantidad de voluntarios para realizar el análisis de la experiencia que ofrecen los diferentes sistemas de locomoción en VR. 	<p>Debilidades</p> <ul style="list-style-type: none"> Conocimientos que no acabo de dominar. Falta de tiempo.
Origen Externo	<p>Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> Dado el creciente uso de VR y la popularidad de mundos abiertos, la geometría no-euclidiana ofrece poder hacer uso de los dos sin que los usuarios sientan una gran fatiga. 	<p>Amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> Que el desarrollo de este sistema de locomoción resulte demasiado complejo en los motores gráficos.

3.2. Riesgos y plan de contingencias

Riesgo	Solución
No poder alquilar de manera continua el material necesario.	Organizar varios días en distintas semanas en vez de realizarlas consecutivamente.
No conseguir público suficiente para realizar el cuestionario.	Publicitar fuera de universidades cercanas, atrayendo público de todas las edades y sectores.
No poder entrevistar desarrolladores que hayan implementado la locomoción a explayar.	Entrevistar a Game Designers y/o Level Designers que puedan aportar opiniones, ideas, etc. sobre el tema.

4. Metodología

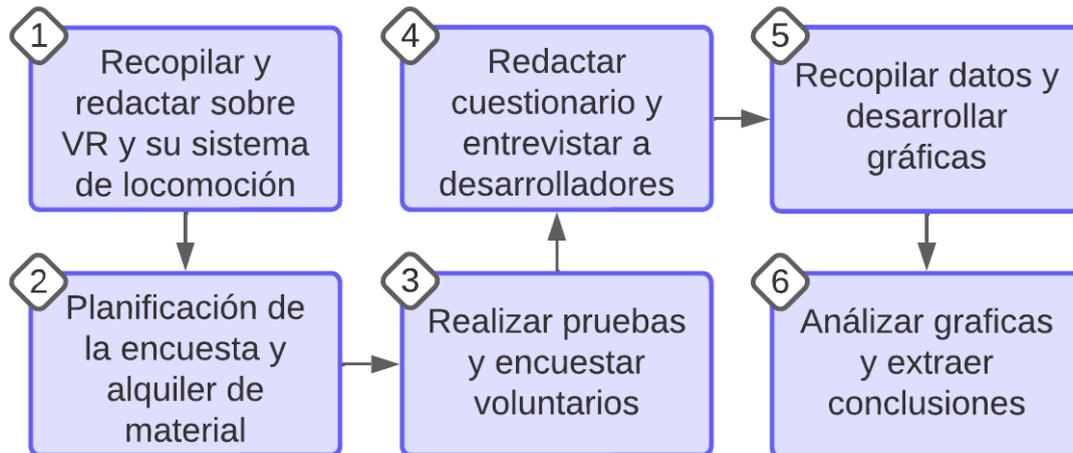


Figura 10: Diagrama Metodología

Para poder desarrollar este proyecto de manera óptima se debe dividir en 6 partes:

1. Recopilación y redacción sobre VR:

Búsqueda de información sobre qué es el VR, categorización de locomoción VR y cómo se implementa, maneras de mejorar los síntomas negativos del uso del VR y realizar un análisis sobre *geometría no-euclidiana*.

2. Planificación y alquiler:

Cuadrar cuándo realizar las pruebas (recopilación de datos sobre efectos y síntomas sufridos por los voluntarios) y cuándo está disponible el material y sala a utilizar.

3. Realizar pruebas y encuestar voluntarios:

Realizar las pruebas durante una semana por las tardes. Una vez el voluntario termina la prueba, se somete a un cuestionario explicando sus experiencias.

Esta prueba hace uso del método cuantitativo, buscando la experiencia promedio resultante de las distintas locomociones gracias a gran cantidad de voluntarios, obteniendo una conclusión de qué resultados tiene en diferentes usuarios.

4. Redactar y entrevistar desarrolladores:

Búsqueda de desarrolladores que hayan hecho uso de la locomoción *no-euclidiana* para enviarles un cuestionario con una serie de preguntas sobre su experiencia en el desarrollo de experiencias VR.

Esta entrevista hace uso del método cualitativo, buscando una visión más profesional sobre cómo funciona la implementación de la locomoción y, según su opinión como desarrollador, que resulta más cómodo de implementar.

5. Desarrollar gráficas:

Una vez obtenidos los datos necesarios, se deben relacionar entre ellos para obtener promedios, correlaciones, etc. La mejor manera de realizar esto es mediante cálculos y gráficas.

6. Interpretación y análisis:

A partir de interpretar estas gráficas desarrolladas, se obtendrá una conclusión y un conjunto de “buenas prácticas” para mejorar el futuro de la plataforma VR.

Este proyecto se realizará principalmente mediante varias plataformas de Google:

- **Documents:** Principalmente para realizar la redacción de la parte escrita del proyecto.
- **Forms:** Se hace uso en la inscripción de los usuarios, las encuestas después de las pruebas y las entrevistas a los
- **Sheets:** Tablas que estarán vinculadas con las respuestas de los formularios, lo que permitirá una limpieza y exportación rápidas.

Además, se usarán varias aplicaciones o webs para un uso en específico:

- **Creación de gráficos:** *RawGraphs*, *Tableau* e *Infograms* que me permitirá introducir datos y crear gráficos detallados fácilmente.
- **Presentación del TFG:** *Canva*, herramienta muy dinámica a la hora de crear presentaciones por sus integraciones y prediseños.
- **Seguimiento personal:** *Trello* es de uso más personal, para recordatorios o elementos a corto plazo, mientras que *HacknPlan* es para proyectos amplios, permitiendo un seguimiento de cada tarea de manera más clara.

5. Desarrollo del proyecto

5.1. Pruebas VR

[Desplazamiento en VR: Cuestionario de la Prueba.](#)

He realizado pruebas sobre las 2 locomociones más comunes, además de la **no-euclidiana**, a un total de 31 voluntarios. Antes de empezar con las pruebas les he pedido que me respondan unas preguntas sobre ellos:

- Qué edad tienen.
- Donde y que estudian.
- Si tienen oficio y qué cargo ejerce.
- Experiencia previa con videojuegos y VR.
- Si disponen de un dispositivo VR y que marca es.
- Qué complemento VR posee (Guantes VR, Cinta de correr, etc.)

Una vez completadas estas preguntas, se realizaba cada prueba durante 10 minutos aproximadamente y, entremedio de cada prueba, el participante respondía unas preguntas sobre la experiencia y qué síntomas negativos había sufrido durante la prueba, estas siendo:

Experiencia

- ¿En qué grado sentiste que tus interacciones con el entorno virtual eran naturales?
- ¿Cómo de reales te parecían tus experiencias virtuales?
- ¿Cómo de convincente resultó tu desplazamiento dentro del mundo virtual?
- ¿En qué grado sentiste como si estuvieras dentro (inmerso) del mundo virtual?
- ¿En qué medida te adaptaste al mundo virtual?
- Al final de la prueba, ¿en qué grado calificarías tu movimiento por el mundo virtual?

Síntomas

- Malestar General.
- Fatiga.
- Dolor de cabeza.
- Fatiga Visual.
- Incremento en la salivación.
- Sudores.
- Náuseas
- Visión borrosa.
- Mareo.

Los resultados finales se recogieron automáticamente en *Google Sheets*, por lo que se exportó a Tableau para poder tratarlos y desarrollar las gráficas que mejor representen los datos. Para representarlas, se ha utilizado *Infograms* que permite crear un infograma donde representar gran variedad de gráficas interactivas, muy visuales y de fácil difusión.

A continuación se adjunta enlace de las gráficas desarrolladas y su respectivo análisis:

[Desplazamiento en VR: Infograma.](#)

Para poder añadir la opinión personal de los voluntarios, en el formulario entregado se incluía un recuadro de texto para comentarios y opiniones en cada apartado de la prueba, siendo los más relevantes:

Teletransporte

- “El no poder mover la cabeza hacia arriba y hacia abajo directamente con los controles del mando me ha sacado un poco de la inmersión.”
- “Dependiendo de como giras la cabeza a la vez que te mueves, puede llegar a marear.”
- “El sistema hace que moverse por el escenario sea muy cómodo y fácil, pero se pierde inmersión.”

No-Euclidiano

- “Me ha gustado mucho la experiencia, al principio he tenido que adaptarme a los mandos, pero en nada ya me sentía dentro del juego. Muy buena experiencia, muy realistas los efectos y el tiempo se me ha pasado volando.”
- “Es la ostia, una inmersión increíble.”
- “Es muy natural aunque al inicio cuesta acostumbrarse, al menos en este juego, porque hay caídas muy profundas y da un poco de miedo caerse y vas con mucho cuidado.”
- “Super cómodo y fácil de mover.”
- “La **geometría no-euclidiana** te saca un poco de lo que es la realidad para nosotros dado que no vas a lugares donde tu esperas.”

Joystick

- “El movimiento se siente menos natural; por la inmersión tiendes a mover tu cuerpo antes que los joysticks.”
- “El moverse con los joysticks no se siente más inmerso y me mareo muchísimo.”
- “Al tener que moverse con los controles tienes más sensación de mareo.”
- “Es el peor de todos los movimientos, si solo usas el movimiento aún es aguantable, pero si usas la rotación se siente muy mal.”
- “Al girar la visión con joysticks pierdo totalmente la noción del espacio, lo veo todo borroso y necesito quitarme las gafas. En el movimiento me pasa igual.”
- “El cambio de movimiento ha resultado en una primera sensación de mareo y algo de vértigo. Luego mi cuerpo se ha acostumbrado.”

Una vez examinado el infograma y revisado los comentarios, que aportan mayor claridad personal de los voluntarios, podemos llegar a la conclusión de que el público actual del ámbito VR suelen ser jóvenes menores de 25 años, con mucha experiencia con los videojuegos.

A la hora de desarrollar un juego VR se puede observar que, de los tres sistemas de locomoción, el que mejor resultado da en temas de inmersión y naturalidad es la locomoción mediante **geometría no-euclidiana**, superando en gran cantidad al resto. Si esto se compara con los síntomas causados, se puede observar que el **no-euclidiano** apenas presenta indicios negativos, aunque las notas, en general, superan por unas décimas el desplazamiento mediante teletransporte. Estos factores muestran que este sistema de locomoción, al menos respecto a la experiencia del usuario, resulta una excelente opción; y así lo muestran los comentarios de los participantes.

También es muy recomendable hacer uso de la locomoción mediante teletransporte, dado que aunque no produzca experiencias tan realistas al público, los síntomas negativos que producen son mínimos.

El sistema de locomoción mediante joysticks no es una opción recomendable, dado a las malas experiencias que han vivido los voluntarios, tanto por una experiencia con el entorno pésimas como por una fuerte presencia de síntomas negativos durante su respectiva fase de pruebas. Esto se puede ver reflejado en los comentarios que dejaron los participantes al finalizar la prueba.

5.2. Entrevista Desarrolladores

VR Displacement: Interview.

Para poder comprender y definir adecuadamente cómo funciona el desarrollo de aplicaciones y juegos VR, se ha entrevistado a tres desarrolladores VR:

- Jarosław Ciupiński, conocido artísticamente como VoidRoom, desarrollador del juego ***Tea For God***, juego que aprovecha en sobremedida las capacidades del dispositivo para hacer uso de la locomoción ***no-euclidiana*** de manera eficiente.
- John Campbell, desarrollador del juego ***Unseen Diplomacy***, uno de los primeros juegos en hacer uso de locomoción ***no-euclidiana***.
- Hannes Kaufmann, *Flexible Spaces* [4], Profesor en la Universidad Técnica de Viena⁴ y pionero del sistema de locomoción mediante ***geometría no-euclidiana*** o espacios imposibles/flexibles.

Lo primero que les pregunté es si hay alguna diferencia entre el desarrollo de videojuegos y el desarrollo VR, además de posibles limitaciones, a lo que me contestaron que en términos de herramientas no hay diferencia más allá de hacer uso de un conjunto de archivos, llamado también librerías. Si que han destacado que se requiere un ordenador con cierta potencia y cierto espacio físico donde poder probar el trabajo realizado.

Hablando sobre el propio desarrollo, hay ciertos elementos o conceptos que hay que tener en cuenta:

- Las interacciones con el entorno son completamente distintas, dado que el principal atractivo del VR es tener la capacidad de interactuar prácticamente con todo, como si de la vida real se tratase.
- La cámara y el movimiento del personaje. En VR tienen que ser estables y que el jugador tenga el completo control, en caso contrario solo provocaría efectos negativos como mareos, náuseas y similares.

Las siguientes preguntas tratan sobre con que locomociones han implementado en sus proyectos, que problemas hay al implementar varias y porque escogieron esas.

- VoidRoom comentó que el principal atractivo de su juego era la locomoción ***no-euclidiana***, pero ha implementado también la locomoción mediante joystick, dado que el funcionamiento es el mismo en el ámbito del videojuego. Comentaba que, por la manera que ha implementado la ***no-euclidiana***, el cálculo de movimiento de la Inteligencia Artificial, la ***generación procedural*** de niveles, etc. es mucho más complejo que el promedio. Al incluir otra locomoción adicional tiene que estar todo bien configurado al hacer el cambio para que los jugadores no rompan el juego.

⁴ [Mag. Dr. Hannes Kaufmann](#)

- Campbell me explicó que la locomoción usada en anteriores proyectos se parece al **Point & Teleport** en funcionamiento, pero en vez de teletransportar al jugador el personaje caminaba hacia la posición seleccionada. Uno de los problemas más comunes que ha encontrado es la configuración de este movimiento, dado que tiene que adecuar la velocidad de movimiento, la cámara, etc. al escenario para evitar que el público sufra síntomas negativos.
- Kaufmann también ha implementado una locomoción similar a Campbell, añadiendo que teme que es necesario un espacio físico amplio para ciertas locomociones, como esta modificación del sistema del **Point & Teleport** y mediante **geometría no-euclidiana**.

A continuación, se habló sobre la locomoción más efectiva para las experiencias VR, coincidiendo los tres que la que ofrece la experiencia más inmersiva es la técnica *Room-Scale-Based* (Basado en la escala de la habitación), donde el escenario virtual se limita al espacio físico del jugador [7], siempre que el movimiento sea preciso y el mundo virtual no te fuerce un movimiento rápido.

La octava pregunta trata sobre cómo diseñar mundos intuitivos y que resulten fáciles de navegar, donde me explican que se pueden implementar las mismas técnicas que se usan en videojuegos, como el uso de luces y sombras, colores, sonidos, etc. Además, es óptimo que los controles sean muy sencillos y dejar la interactividad y movimiento a la parte primitiva del ser humano.

Las preguntas finales tratan sobre las ventajas y desventajas de la locomoción **no-euclidiana**, así como su posible futuro dentro de la industria VR. Concuerdan en que, aunque ofrece un inmersión prácticamente completa, resulta muy intuitiva al jugador y no produce síntomas negativos, requiere mucho más trabajo de diseño para lograr un mundo expandible e interesante para que el jugador no se llegue a aburrir. Campbell comenta que es posible que en un futuro estos juegos con locomoción **no-euclidiana** tendrán su propio género, por lo que convivirán con otros juegos con diferentes locomociones.

6. Validación del proyecto

Este proyecto tiene el objetivo de analizar los sistemas de locomoción VR más usados en la industria e investigar cuál de ellos resulta más apto en inmersión, comodidad y superar las limitaciones. Se escogió los sistemas de teletransporte y joystick, dado su amplia implementación en proyectos VR, además del **no-euclidiano**, que muestra ser una locomoción con gran potencial en los conceptos anteriormente mencionados.

Después de estudiar diversos documentos, realizar pruebas a voluntarios y entrevistar a ciertos desarrolladores VR reconocidos en el ámbito, puedo concluir con los siguientes resultados:

- **Teletransporte:** Los desarrolladores entrevistados suelen utilizar esta locomoción o alguna variante parecida gracias a que apenas produce efectos secundarios como mareos, náuseas o fatiga, aunque implique menor inmersión. Esto lo reflejan los datos obtenidos de la realización de las pruebas, donde los participantes la disfrutaron por sus nulos efectos adversos y por resultar una experiencia sencilla y poco intensa.
- **Joystick:** Este sistema de locomoción ha rendido deficientemente, provoca síntomas negativos frecuentemente durante la duración de la experiencia y ofrece una inmersión poco mayor a la del uso de teletransporte y resulta relativamente realista. Esto lo corroboran los desarrolladores, donde comentan que el público suele sufrir mareos, dolores de cabeza y visión borrosa; esto, combinado con que el joystick permite moverte hacia cualquier dirección, los usuarios acaban chocando contra los obstáculos de la escena, provocando una experiencia frustrante.
- **No-euclidiano:** En las pruebas ha mostrado los mejores índices de experiencias vividas y unos síntomas increíblemente bajos. Estos desarrolladores, especialistas en movimiento **no-euclidiano**, corroboran estos hechos. Aunque resulte una experiencia prácticamente óptima para el usuario, para el desarrollador puede acabar siendo todo lo contrario: requiere diseñar los niveles o escenarios alrededor de este concepto y tener en cuenta que, dependiendo de la extensión de la zona de juego del usuario, ese nivel variará de tamaño.

7. Conclusiones

Podemos concluir que el sistema de locomoción mediante **geometría no-euclidiana** es la que más disfruta el usuario, aunque pueda resultar una tarea más complicada al desarrollador. El núcleo principal es plantearse desde el principio que el proyecto hará uso de esta locomoción y como sus niveles o escenarios funcionarán.

Una alternativa muy apta es mediante teletransporte, dado que no presenta muchos síntomas negativos y, aunque no tenga la misma experiencia inmersiva, resulta agradable al público.

Por último, una locomoción que hace uso de Joysticks es muy poco recomendable para el público general. Podría usarse para un público con mucha experiencia en el ámbito VR, pero incluso así no se puede garantizar que este público no tenga efectos adversos. Si tiene algo positivo es que su implementación es extremadamente sencilla, dado que es el mismo tipo de movimiento que en el ámbito del videojuego.

7.1 Líneas de futuro

A pesar de que este proyecto ha alcanzado sus objetivos principales, existe un amplio espacio para una investigación en profundidad sobre el público que hace uso de plataformas VR. Se sugiere replicar la metodología de las pruebas organizadas para obtener mayor número de voluntarios y definir de manera más precisa las experiencias y síntomas que han sufrido. Esto permite delimitar mejor el público objetivo, dado que se podrá asociar en mayor medida el grado de intensidad que tiene la experiencia desarrollada, y realizar productos de mayor calidad.

También es recomendable entrevistar a más profesionales del sector y así poder llegar a establecer un método de ejecución apropiado para seguir desarrollando los sistemas de locomoción que se suelen implementar en los proyectos actuales, además de poder diseñar nuevos sistemas que resulten más inmersivos en la experiencia y eviten sensaciones desagradables mientras el usuario está jugando.

8. Bibliografía

- [1] Eklund, V. (2022). Maximizing the VR Play Space by Using Procedurally Generated Impossible Spaces: Research on VR Play Spaces and Their Impact on Game Development.
<https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=-878&pid=diva2%3A1664805>
- [2] Keunen, H. (2021). Infinite spaces: procedural generation of virtual environments with self-overlapping geometry for infinite walking.
<https://documentserver.uhasselt.be/bitstream/1942/35302/1/c1bfacfa-bc77-4a56-a7a0-cc32a0a4975d.pdf>
- [3] Schroeder, Goodnight, E., Kühner, M., Gerner, W., Hebel, M., & Görlich, D. (2020). Infinite walking in three dimensions in virtual reality: A shopping mall simulator game. CHI PLAY 2020 - Extended Abstracts of the 2020 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, 76–79.
<https://doi.org/10.1145/3383668.3419918>
- [4] Vasylevska, Kaufmann, H., Bolas, M., & Suma, E. A. (2013). Flexible spaces: Dynamic layout generation for infinite walking in virtual environments. 2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), 39–42.
<https://doi.org/10.1109/3DUI.2013.6550194>
- [5] Al Zayer, MacNeilage, P., & Folmer, E. (2020). Virtual Locomotion: A Survey. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 26(6), 2315–2334.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2887379>
- [6] Bozgeyikli, Raij, A., Katkooori, S., & Dubey, R. (2019). Locomotion in virtual reality for room scale tracked areas. International Journal of Human-Computer Studies, 122, 38–49.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.08.002>
- [7] Boletsis, & Cedergren, J. E. (2019). VR Locomotion in the New Era of Virtual Reality: An Empirical Comparison of Prevalent Techniques. Advances in Human-Computer Interaction, 2019, 1–15.
<https://doi.org/10.1155/2019/7420781>
- [8] Boletsis. (2017). The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology. Multimodal Technologies and Interaction, 1(4), 24–.
<https://doi.org/10.3390/mti1040024>

- [9] Chattha, Janjua, U. I., Anwar, F., Madni, T. M., Cheema, M. F., & Janjua, S. I. (2020). Motion Sickness in Virtual Reality: An Empirical Evaluation. *IEEE Access*, 8, 130486–130499.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007076>
- [10] Kim, Park, J., Choi, Y., & Choe, M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 69, 66–73.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>
- [11] Yu, Zhou, R., Wang, H., & Zhao, W. (2019). An evaluation for VR glasses system user experience: The influence factors of interactive operation and motion sickness. *Applied Ergonomics*, 74, 206–213.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.012>
- [12] Fang. (2020). Hermeneutic Relations in VR: Immersion, Embodiment, Presence and HCI in VR Gaming. In *HCI in Games* (Vol. 12211, pp. 23–38). Springer International Publishing AG.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-50164-8_2
- [13] Borba, E. Z. (2020). Audiovisuales ampliados en la realidad virtual: inmersión, multisensorial y escenarios 360. *Sphera Publica*, 1(20), 78-94.
<https://sphera.ucam.edu/index.php/sphera-01/article/view/383>

9. Annexos

- [Desplazamiento en VR: Cuestionario de la Prueba.](#)
- [Desplazamiento en VR: Cuestionario de Inscripción.](#)
- [Desplazamiento en VR: Cuestionario para Desarrolladores.](#)
- [Desplazamiento en VR: Infograma.](#)
- [VR Displacement: Interview.](#)
- [Desplazamiento en VR: Video Presentación.](#)