

Muñoz-La Rivera, F., Proboste, M., Montecinos, S. & Muñoz, N. (2024). Realidad virtual para la inspección remota de infraestructura: caso de implementación en puentes. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción* (IX ELAGEC2024).

REALIDAD VIRTUAL PARA LA INSPECCIÓN REMOTA DE INFRAESTRUCTURA: CASO DE IMPLEMENTACIÓN EN PUENTES

Felipe Muñoz La Rivera ¹ – benjamin.lopez.c01@mail.pucv.cl

Mathias Proboste ² – mathias.proboste@pucv.cl

Sofía Montecinos ³ - sofia.montecinos.o@mail.pucv.cl

Nicolás Muñoz ⁴ - nicolas.munoz.m01@mail.pucv.cl

¹ Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

² Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

³ Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

⁴ Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

RESUMEN

Los procesos de inspección en minería, infraestructura y energía son esenciales. La tendencia hacia la gestión preventiva y predictiva ha impulsado el uso de tecnologías de acceso remoto, como drones y robots, para acceder a zonas de riesgo y realizar inspecciones desde un computador. No obstante, estas no reemplazan completamente el juicio de un trabajador en terreno. La realidad virtual (RV) permite a los profesionales realizar inspecciones de manera remota y en primera persona. Esta optimiza procesos de revisión, análisis y colaboración, proyectando modelos 3D y reconstruyendo sitios de trabajo reales. Este artículo muestra el desarrollo de un método para la inspección remota de infraestructura mediante realidad virtual, desarrollando un caso de implementación en puentes. Utilizando nubes de puntos creadas a partir de imágenes de drones, integradas con modelos BIM, se permite una inspección detallada de elementos estructurales, evaluando daños según normativa. Diseñada en Unity 3D, la experiencia incluye un tutorial interactivo y generación de informes detallados, con potencial para sincronizarse con los modelos BIM y almacenar la información. Su implementación demuestra aspectos de correcta funcionalidad y eficiencia en la inspección, en particular en el caso de estudio de puentes, pero ampliable a diversas infraestructuras.

PALABRAS CLAVE

Realidad virtual; inspección remota; BIM; nubes de puntos; virtualización

INTRODUCCIÓN

INSPECCIÓN Y MONITOREO DE PUENTES

Los procesos de inspección y monitoreo en proyectos son cruciales, ya que fallos en infraestructuras o derrumbes en minas tienen consecuencias severas para la industria, afectando costos operativos, seguridad laboral y tiempos de inactividad (Rafsanjani & Nabizadeh, 2023). En los últimos años, el mantenimiento preventivo ha ganado reconocimiento significativo, apuntando incluso al mantenimiento predictivo, especialmente en el contexto de los puentes, que son componentes cruciales de la infraestructura crítica que asegura conectividad, transporte, rutas comerciales y calidad de vida (Pour et. al, 2020).

El monitoreo de puentes incluye actividades como inspecciones periódicas, reparaciones, rehabilitación o sustitución de elementos estructurales, esenciales para garantizar la seguridad operativa de las rutas y vías ferroviarias, y prevenir fallos estructurales. Los métodos actuales de inspección comprenden la inspección visual tradicional, inspección automatizada con cámaras, y la inspección remota con drones, cada uno con sus limitaciones. Además, se utilizan sensores para monitorear vibraciones y comportamientos estructurales específicos.

Frecuentemente, los puentes se encuentran en zonas remotas y peligrosas, lo que hace que la inspección directa sea un desafío significativo, implicando la movilización de recursos humanos especializados y el cumplimiento de regulaciones extensas. Los riesgos se intensifican debido a la exposición a ambientes complejos y peligros inherentes a los procesos operativos (Potkonjak, et. al, 2016).

Estos desafíos subrayan la necesidad de mejorar los métodos de inspección y monitoreo para garantizar la seguridad y eficiencia en condiciones adversas. La tendencia internacional apunta hacia la gestión preventiva y predictiva, enfocándose en sacar a los trabajadores humanos del sitio de trabajo para garantizar su seguridad (Carreira et. al, 2018). Tecnologías de acceso remoto, como drones y robots, permiten acceder a zonas de riesgo y realizar inspecciones desde un computador (Chacón, 2021). Sin embargo, estas herramientas ofrecen una perspectiva limitada y no pueden replicar el juicio crítico de un trabajador humano, quien puede considerar un análisis contextual y adaptarse a las particularidades del terreno (Ding, Liu, Liao, & Zhang, 2019). Por lo tanto, estas herramientas se utilizan como complemento, pero no reemplazan completamente la presencia de los trabajadores en el sitio (Alaloul, Liew, Zawawi, & Mohammed, 2018).

REALIDAD PARA EL MONITOREO REMOTO DE INFRAESTRUCTURA

La realidad virtual (VR) ha emergido como una tecnología importante en la industria de la arquitectura, ingeniería y construcción, ofreciendo potencial significativo para mejorar la inspección y monitoreo remoto de infraestructuras (Goulding, Nadim, Petridis, & Alshawi, 2012). La capacidad de crear simulaciones virtuales de entornos permite a los

usuarios interactuar con modelos de las infraestructuras, proporcionando experiencias inmersivas sin necesidad de estar físicamente presentes en el sitio. Esto no solo reduce costos y tiempos de inspección, sino que también mejora la calidad y seguridad de los proyectos (Guerrero, Gómez Pizano, & Thomson, 2018).

En el contexto de la inspección y monitoreo de puentes, la realidad virtual ofrece diversas ventajas (Balali, Zalavadia, & Heydarian, 2020). Tradicionalmente, estas actividades implican la movilización de equipos especializados y el cumplimiento de estrictas regulaciones, exponiendo a los trabajadores a entornos peligrosos. Con la VR, se pueden crear modelos virtuales detallados de los puentes (mediante nubes de puntos por modelos de fotogrametría o scanner), permitiendo a los ingenieros y técnicos realizar inspecciones detalladas desde una ubicación segura. Esto minimiza la necesidad de desplazamientos y reduce el riesgo asociado con la inspección en áreas remotas o peligrosas.

La realidad virtual facilita una visualización precisa de los elementos estructurales en un entorno tridimensional. Esto es particularmente útil en la planificación y ejecución de proyectos, donde los planos y renderizados tradicionales pueden ofrecer perspectivas limitadas o sesgadas. Integrando modelos BIM con simulaciones de VR, se pueden llevar a cabo inspecciones más eficientes y precisas. Esta combinación permite el reconocimiento de objetos y la identificación de elementos, facilitando la toma de decisiones informadas ante inconsistencias o problemas detectados en el proyecto. La realidad virtual, al permitir una visualización remota, es especialmente valiosa para infraestructuras de difícil acceso, garantizando una supervisión continua y efectiva sin exponer a los trabajadores a peligros innecesarios (Bauer & Lienhart, 2023).

BRECHAS Y OPORTUNIDADES

La bibliografía muestra el amplio uso que se le está dando a la realidad virtual para efectos de capacitación, en maquinaria, trabajo en entornos peligrosos, demostrando amplios beneficios (Kommeter & Ebner, 2019). Esta se ha integrado para manipular y visualizar modelos 3D BIM, mejorando la planificación de proyectos, seguridad y formación (Vergara, Rubio, & Lorenzo, 2017). Por otro lado, las tecnologías de escaneo han permitido capturar datos precisos de entornos físicos, creando representaciones digitales detalladas que se exploran en realidad virtual para análisis detallados de su estado (Sydora, Lei, Siu, Han, & Hermann, 2021). La interactividad en realidad virtual ha evolucionado para permitir la colaboración en tiempo real entre usuarios en distintas ubicaciones, optimizando la revisión de proyectos y la toma de decisiones (Luo & Mojica Cabico, 2018). También, la integración de VR con sistemas de gestión de datos y proyectos facilita la actualización en tiempo real, crucial para la gestión eficiente de infraestructuras. Sin embargo, las brechas están en la integración de todos estos elementos, y la migración del uso de la RV desde la capacitación y operación de maquinaria, a transformarse en una herramienta de interacción con los entornos reales de trabajo (Muñoz-La Rivera, et. al, 2021).

Así, esta investigación tiene como objetivo proponer un método para la inspección remota de infraestructura en realidad virtual, utilizando como ejemplo de aplicación un puente ferroviario. Se muestra la propuesta conceptual e implementación de los diferentes componentes. Los hallazgos dan cuenta del potencial para mejorar la seguridad,

funcionalidad y eficiencia en la inspección, en particular en el caso de estudio, pero ampliable a diversas infraestructuras.

METODOLOGÍA

La Metodología de Investigación en Ciencia del Diseño (DSRM) ha sido utilizada para guiar todo el proceso de justificación, desarrollo y demostración (Peffer et al., 2006). DSRM implica cuatro etapas: (1) identificar problemas y motivaciones observadas; (2) definir los objetivos de una solución potencial; (3) diseño y desarrollo; y (4) demostración. La Figura 1 muestra un diagrama de la metodología de investigación. En la primera etapa se realizó una revisión bibliográfica para identificar los problemas y requerimientos técnicos sobre inspección de infraestructura con foco en puentes; las formas de inspección de la infraestructura existente; y cómo la realidad virtual mejora la formación y el proceso de inspección. La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de Scopus y Web of Science. En la segunda etapa se definió el objetivo de una posible solución: el uso de RV como ayuda a la ejecución de la inspección de puentes. En la tercera etapa se creó la propuesta conceptual y se desarrolló el escenario y los algoritmos para la interacción virtual. Finalmente, en la cuarta etapa se implementó la experiencia virtual y se evaluó inicialmente por el equipo de investigación.

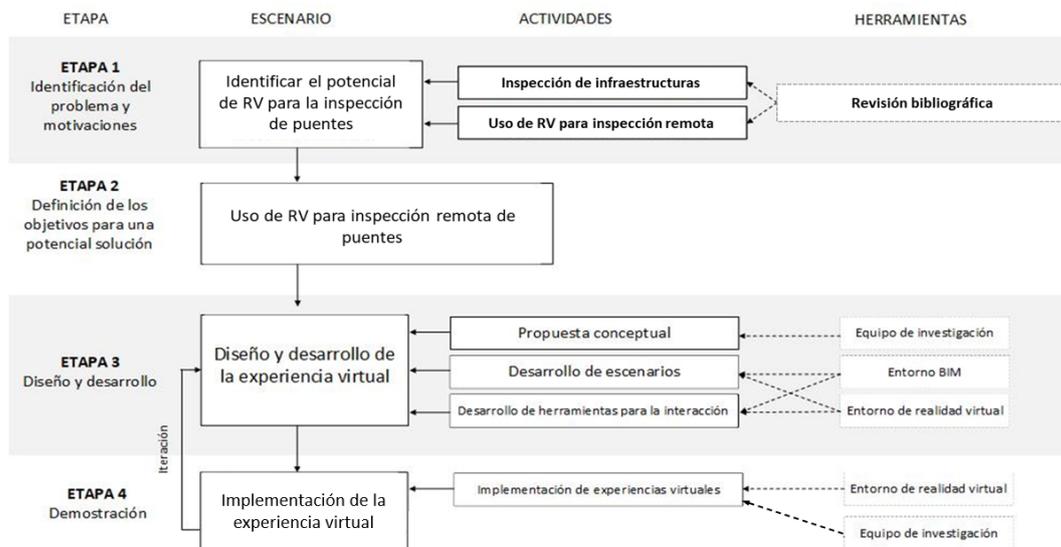


Figura 1. Metodología de Investigación

FLUJO DE TRABAJO PROPUESTO

Para generar un método para el uso de la realidad virtual para la inspección de puentes, se propone un flujo de trabajo que se desarrolla en cinco etapas: (I) Condiciones iniciales, (II) Preparación de datos, (III) Desarrollo e implementación, (IV) Implementación en el caso de estudio y (V) Evaluación de la experiencia de realidad virtual. La Figura 2 muestra el Flujo de trabajo propuesto.

En la primera etapa se establecen las (I) Condiciones iniciales, donde se realizan los preparativos para la creación de la experiencia de realidad virtual para la inspección de

puentes. Se establecen tres condiciones: a) La definición de requisitos de inspección acorde a normativa, en el caso desarrollado, acorde a la Norma Adif para inspecciones de puentes ferroviarios (podría aplicarse otra normativa); b) Creación del modelo BIM, siendo un insumo indispensable (con un nivel de detalle y parametrización según requiera y/o se desee la inspección); y c) Generación de nube de puntos, esta etapa implica el uso de fotogrametría con drones (u otro método) para crear un modelo del puente que refleje su estado real. La nube de puntos corresponde a una colección de puntos en un espacio 3D, que representa de forma externa un objeto o superficie, en este caso, del puente, teniendo coordenadas específicas y data gráfica, cuya visualización global permite ver la estructura reconstruida. Así se podrá compara el modelo BIM con la nube de puntos para la inspección dentro de la realidad virtual.

En la segunda etapa, se realiza la (II) Preparación de datos. En este punto, el modelo BIM y la nube de puntos requieren ser exportados a un formato en específico para poder ser utilizados dentro del motor de videojuegos Unity. El modelo BIM se exporta formato FBX y la nube de puntos a formato RCS. Luego estos modelos se integran a Unity para configurar sus materiales y texturas con el fin de mejorar su visualización de cara a la inspección. Posteriormente, se realiza la configuración inicial del entorno de realidad virtual, generando lo básico dentro del entorno virtual como el terreno, la iluminación y cualquier otro componente relacionado con el espacio visual.

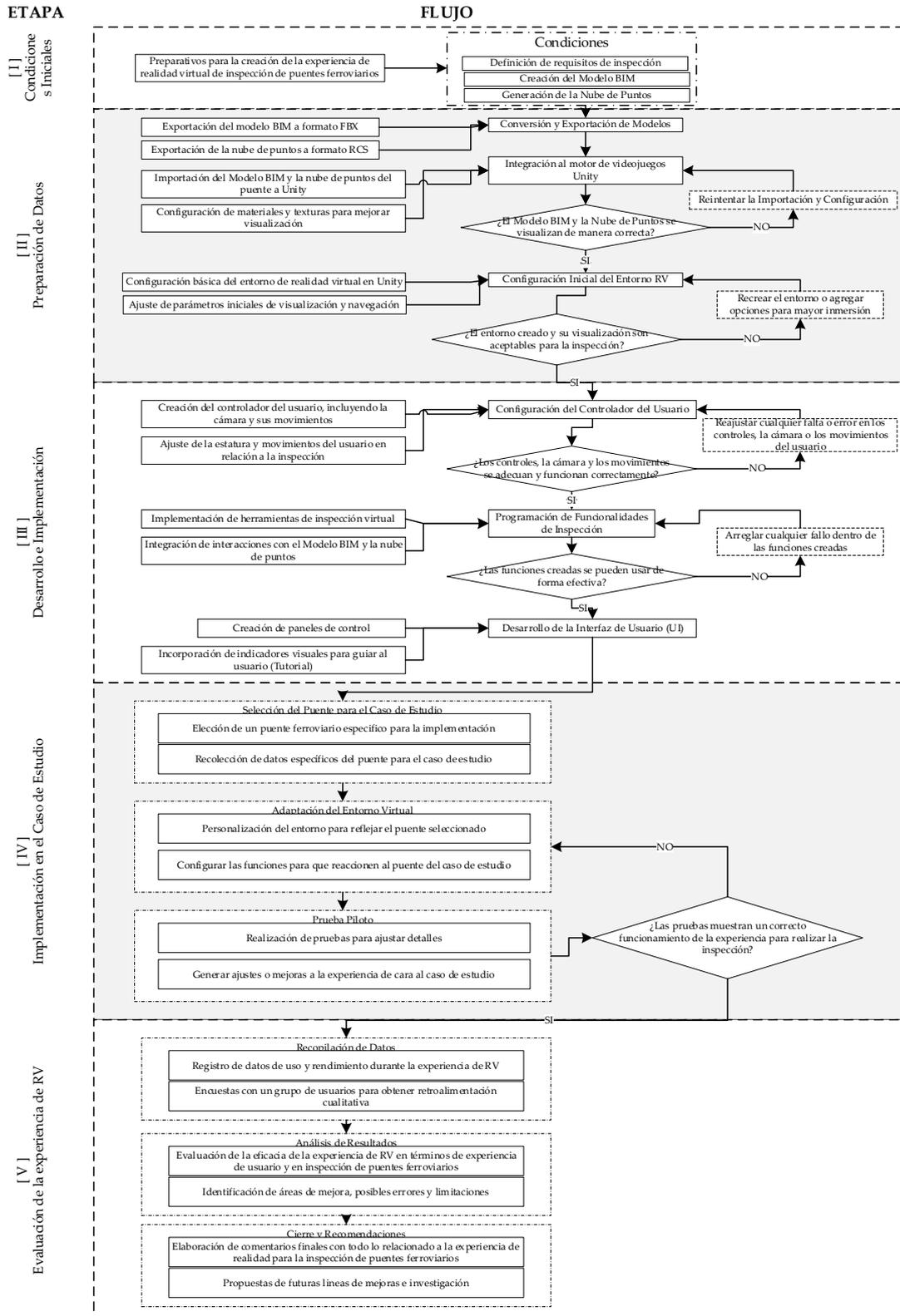


Figura 2. Flujo de trabajo propuesto

En la tercera etapa, del (III) Desarrollo se programan y ensamblan todos los elementos necesarios para desarrollar la herramienta. Esta considera:

- Generar la configuración del controlador del usuario, permitiéndole la visualización y reacción a la cámara y sus movimientos dentro de la realidad virtual, aparte se ajustan parámetros del usuario como su estatura, físicas, nivel de sensibilidad, velocidad, y cualquier otro parámetro que afecte al movimiento del usuario dentro de la experiencia.
- Programación de funciones relacionadas a herramientas para la inspección virtual de puentes ferroviarios, y en segundo lugar interacciones que permiten modificar el modelo BIM, como también la nube de puntos del puente.
- Se crean paneles de control que permiten las interacciones con el modelo BIM y con la nube de puntos, de manera de operar e interactuar con ambos insumos a la vez, verificando en uno (nube de puntos) y almacenando la información de la inspección en el modelo BIM, que se encuentra dentro de la realidad virtual.
- Adicionalmente, se incorporan indicadores visuales para guiar al usuario, los cuales comprenden una sección completa dentro de la experiencia, que funciona como tutorial para que el usuario que no posee experiencias previas con realidad virtual o con el método de inspección de puentes pueden tener conocimiento para afrontar el método propuesto.

En la cuarta etapa, se realiza la (IV) Implementación en el caso de estudio, para poner a prueba la experiencia desarrollada. Se utiliza un puente ferroviario para la implementación, con el fin de hacer una recopilación de datos específicos del puente, relacionado a sus elementos estructurales los parámetros de inspección a evaluar (acorde a normativa). Se entenderán por parámetros aquellos aspectos que se valoran durante la inspección, otorgándoles un grado e intensidad de daño, y cuya ponderación permiten categorizar el deterioro del elemento estructural particular del puente, junto con el global (ADIF, 2018). Se hace una adaptación del entorno virtual para el caso de estudio, en este punto se deben personalizar el espacio para el puente seleccionado, además de configurar las funciones creadas en la anterior etapa para que funcionen con el puente del caso de estudio. Después, se realizan pruebas para ajustar detalles o generar mejoras para la experiencia de cara a la siguiente etapa.

En la quinta etapa, se finaliza el flujo de trabajo realizando una (V) Evaluación de la experiencia de RV, la cual tiene como finalidad hacer una recopilación de datos de uso y rendimiento mientras se realizan pruebas con usuarios, y que luego estos realicen encuestas para obtener retroalimentación cualitativa. Lo cual, permitirá generar un análisis de la experiencia, evaluando la eficiencia del método propuesto, considerando la experiencia de usuario como la inspección de puentes, para así identificar su utilidad frente a los métodos tradicionales como áreas de mejora o posibles limitaciones. Dentro del alcance de esta investigación, no se considera la evaluación y el testeo masivo de la aplicación, solo se considera una evaluación de las funcionalidades implementadas

DESARROLLO Y RESULTADOS

CONSIDERACIONES DE INSPECCIÓN DE PUENTES FERROVIARIOS

Según la normativa Adif para la inspección de puentes ferroviarios, el "Nivel de daño" detectado durante una inspección se define como la combinación de la "intensidad de

daño" y la "categoría de daño". La "categoría de daño" mide la relevancia o importancia de las consecuencias del daño en términos de funcionalidad y seguridad ferroviaria, especialmente cuando alcanza su máxima intensidad. Esta categoría depende de la naturaleza del daño, el elemento afectado y el material del que está hecho, y se mide en una escala de 1 a 4, donde 1 indica menores consecuencias y 4 mayores consecuencias. Por otro lado, la "intensidad del daño" se refiere al estado de avance o extensión del deterioro en el momento de la inspección, es decir, cuánto ha progresado el daño desde su aparición hasta la evaluación. Este parámetro es registrado por el inspector utilizando una escala de 1 a 4, donde 1 representa un deterioro incipiente y 4 un deterioro severo. La combinación de estos dos parámetros permite evaluar de manera integral el nivel de daño detectado en los puentes ferroviarios. La Figura 3 muestra un ejemplo de Categorías, intensidad y Nivel de daño.

		Intensidad del Daño				Nivel de Daño		Descripción
		Intensidad 1	Intensidad 2	Intensidad 3	Intensidad 4	N1	N2	
Categoría de Daño	Categoría 1	N1	N1	N1	N1	N1	Defectos sin repercusión en el comportamiento estructural del activo, ni en la explotación ferroviaria, ni en la durabilidad o funcionalidad del activo.	
	Categoría 2	N1	N2	N2	N2	N2	Defectos sin repercusión en el comportamiento estructural del activo, ni en la explotación ferroviaria, pero que menoscaban la durabilidad o funcionalidad del activo.	
	Categoría 3	N1	N2	N3	N3	N3	Defectos que evidencian una evolución patológica que puede afectar la seguridad estructural del activo, o a la seguridad de las personas que utilicen o a la explotación ferroviaria.	
	Categoría 4	N1	N2	N3	N4	N4	Defectos que afectan a la seguridad estructural o a la explotación ferroviaria. Se requiere limitación de velocidad para mantener el nivel de seguridad.	

(a)

(b)

Figura 3. Ejemplo de (a) Intensidad del Daño y (b) Descripción niveles de daño

SOFTWARE Y HERRAMIENTAS

Para crear una experiencia de realidad virtual para la inspección visual y remota de un puente ferroviario, se utiliza el motor de videojuegos Unity3D debido a sus amplias opciones, incluyendo la capacidad de crear proyectos específicos para realidad virtual. Es fundamental determinar las herramientas necesarias para la inspección en este entorno virtual. Se debe poder visualizar los parámetros de cada elemento, observar el modelo BIM y la nube de puntos del puente, y tener una función para examinar solo la nube de puntos. Esto permite al inspector evaluar el estado actual del puente. También se requieren funciones de movimiento, como el movimiento vertical y la teletransportación, para que el usuario tenga libertad durante la inspección. Además, se utilizan gafas de realidad virtual HTC VIVE XR Elite, que permiten visualizar la experiencia en Unity a través de la aplicación Steam VR, disponible en la plataforma Steam.

Para obtener la nube de puntos de un puente, se realiza fotogrametría con drones, capturando diversas imágenes que, al ser procesadas en un generador de nubes de puntos como ContextCapture, permiten crear un modelo tridimensional que refleja la realidad del puente en el momento de la captura. Para el modelo BIM, existen dos métodos: usar planos previamente diseñados en AutoCAD e importarlos a Autodesk Revit para generar el modelo, o, si el puente es muy antiguo y no tiene planos digitalizados, crear el modelo BIM a partir de la nube de puntos importada en Autodesk Revit.

FUNCIONES DE INSPECCIÓN

Para interactuar con el puente, se diseñan e implementan las funciones que se mencionaron en la propuesta conceptual, es decir, las interacciones que permitan realizar una inspección. La Tabla 1 muestra un resumen de los códigos implementados.

Tabla 1. Resumen códigos implementados.

Nombre del Código	Función
Aparecer Parámetros	Permite mostrar u ocultar las pantallas que muestran los parámetros que afectan a un elemento
Aparecer Información Intensidad	Permite mostrar u ocultar la información de cada uno de los cuatro niveles de intensidad que existen para cada parámetro de cada elemento
Lógica Parámetros	Este código se replica para cada uno de los elementos a inspeccionar, porque este permite que al seleccionar el nivel de intensidad de todos los parámetros de un elemento refleje a través del color de la pieza el nivel de daño resultante. Cada elemento tiene una distinta cantidad de parámetros por lo que se mantiene la función del código, solo que, según el elemento, variara la cantidad de parámetros, por lo que el código podría ser, por ejemplo, Lógica Parámetros Superestructura o Lógica Parámetros VanoArco.
Transparencia	Permite hacer transparente a través de un medidor horizontal el modelo BIM
Reporte	Permite guardar la información de los elementos inspeccionados, esto lo hace en un archivo de bloc de notas (.txt)

La Figura 4. Muestra el funcionamiento de la opción “Aparecer Parámetros” y la información de la intensidad. En Figura 4(a) al presionar el botón blanco asignado al elemento provoca la aparición de los parámetros; y Figura 4(b) una vez presionado se visualiza la pantalla que muestra los parámetros que afectan al elemento, en este caso, un elemento del Vano Arco el cual tiene 30 parámetros a inspeccionar y evaluar. En Figura 4(c) al presionar el botón blanco (i) asignado a la pantalla se despliegue una segunda pantalla; y en Figura 4(d) una vez presionado se visualiza la pantalla que muestra la información de cada uno de los niveles de intensidad de cada parámetro del elemento.

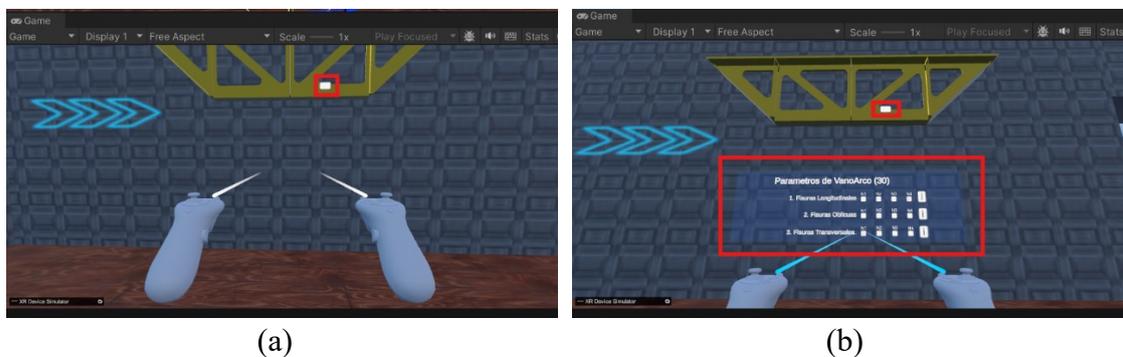
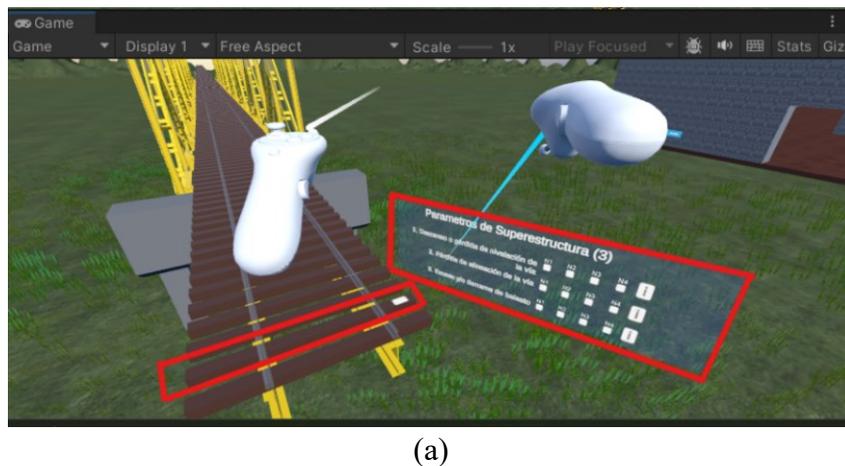




Figura 4. Visualización de parámetros a inspeccionar y evaluar. Ejemplo de (a) Botón de parámetros y (b) Parámetros con set de aspectos a evaluar desplegados. (C) Botón de mayor información; y (d) Información de niveles de intensidad.

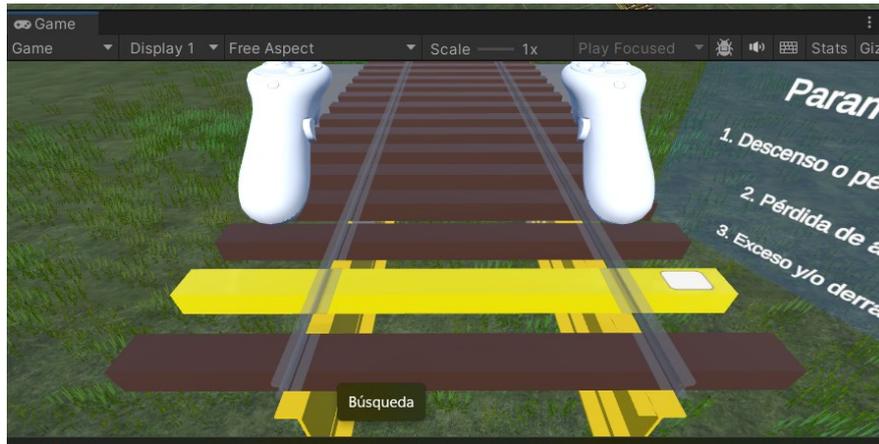
La Figura 5 muestra el detalle de la interacción con cada uno de los elementos del puente, para su inspección. En Figura 5(a) es posible ver como al seleccionar un elemento se despliega un menú con los parámetros a inspeccionar. En Figura 5(b) se puede ver la evaluación que se realiza, valorizando acorde a norma el estado del daño. Finalmente, en Figura 5(c) se aprecia el cambio de color del elemento, el cual es resultado de la combinación de la evaluación de cada parámetro valorizado, acorde a normativa (Adif, en este caso).



(a)



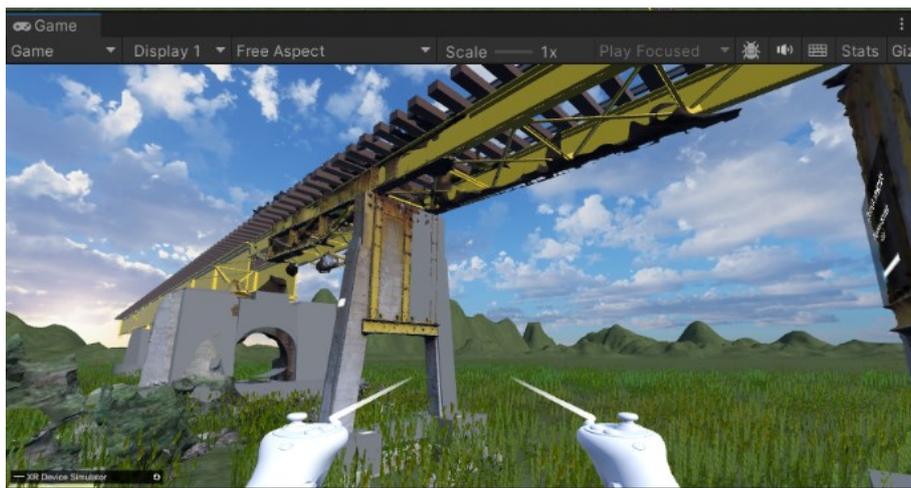
(b)



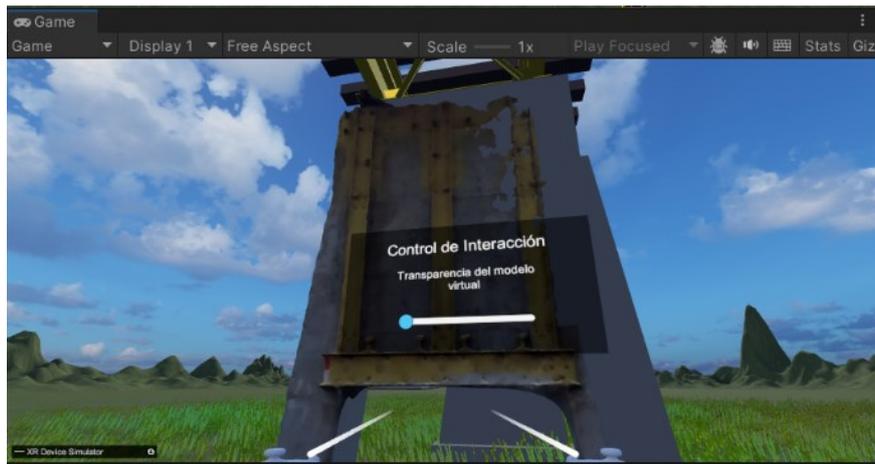
(c)

Figura 5. Interacción para la inspección. (a) Se muestra la pantalla destacada, asignada al elemento destacado; (b) Se seleccionan los niveles de intensidad por parámetro del elemento a inspeccionar; y (c) Visualización del estado

En la Figura 5 se aprecia la interacción con el modelo BIM dentro del puente, al que se le ha añadido los parámetros. Esa interacción es solo con el modelo BIM, sin embargo, para inspeccionar y evaluar el daño, se debe visualizar el modelo real del puente. Ahora es cuando se incluye la superposición de la visualización con la nube de puntos. Se creó una función que permite transparentar el modelo BIM, para visualizar de mejor manera el modelo de la nube de puntos, para efectos de la inspección, se debe mencionar que se pensó un concepto donde ambos modelos estén superpuestos uno sobre otro, de esa forma el código actuaría de forma que permita, en este caso, transparentar el modelo BIM que es el que varía dentro de la experiencia, para así visualizar los defectos visuales que se pueden apreciar con la nube puntos, como se muestra en la Figura 6.



(a)



(b)

Figura 6. Funcionamiento de “Transparencia” (a) Como se ven en un principio los modelos superpuestos.; (b) El control de interacción muestra un medidor que permite variar el valor de transparencia del modelo BIM.

ANÁLISIS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos del desarrollo de una experiencia de realidad virtual para la inspección de puentes muestran que el método propuesto destaca en varios aspectos clave. Se destaca la simplicidad y facilidad de comprensión del método, lo que cumple con las expectativas de una experiencia de realidad virtual. Este otorga una mejora significativa en comparación con los métodos tradicionales, especialmente en la reducción de riesgos asociados a las inspecciones de puentes ferroviarios. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, particularmente en la calidad de la nube de puntos, que es crucial para la efectividad de la inspección virtual. Mejorar esta representación virtual del puente podría aumentar significativamente la utilidad y precisión del método propuesto.

Una de las ventajas clave de utilizar VR en este tipo de análisis, en lugar de utilizar un modelo BIM o una nube de puntos en un ordenador, es la capacidad de inmersión total que ofrece la VR. La inmersión permite a los inspectores experimentar el entorno como si estuvieran físicamente presentes, lo que puede mejorar significativamente la percepción espacial y la comprensión de las condiciones estructurales del puente. Esto es especialmente importante en la inspección de puentes ferroviarios, donde la percepción detallada de las alturas, distancias y posibles riesgos puede ser crítica. Además, la VR facilita una interacción más intuitiva con el entorno virtual, permitiendo a los inspectores realizar evaluaciones en tiempo real y tomar decisiones más informadas al estar "dentro" del modelo. Este nivel de inmersión no se logra con el uso de una pantalla plana en un ordenador, ya que la percepción tridimensional y la sensación de escala son mucho más limitadas.

Este estudio abre varias líneas de investigación para mejorar la inspección de puentes ferroviarios mediante realidad virtual. Una de las principales áreas a explorar es la automatización del procedimiento, donde se podría investigar la posibilidad de que los elementos inspeccionados generen respuestas automáticas a los daños. Esto facilitaría la identificación y resolución de problemas, integrando la información necesaria en uno o

varios programas de manera eficiente. Por otro lado, utilizando los datos recogidos durante las inspecciones, se podrían crear modelos predictivos de mantenimiento y gestión de activos, anticipando problemas antes de que se conviertan en reparaciones costosas. Esta proactividad en la gestión de infraestructura podría significar un avance significativo en la eficiencia y seguridad de las inspecciones.

CONCLUSIONES

La implementación de experiencias de realidad virtual para la inspección de puentes ferroviarios asociada a un entorno BIM representa un avance significativo en la forma en que se lleva a cabo el mantenimiento de estas infraestructuras críticas. En esta investigación se identificaron las problemáticas inherentes a los métodos tradicionales de inspección visual, que incluyen la interrupción del funcionamiento cotidiano de la infraestructura y, más importante aún, los riesgos a la integridad y seguridad de los inspectores. Para abordar estos desafíos, se desarrolló un procedimiento que permite el monitoreo remoto de puentes mediante el uso de realidad virtual.

Este enfoque se basa en la creación de una nube de puntos a partir de imágenes capturadas con drones, que representa con alta fidelidad un puente ferroviario real. Dicha nube de puntos se integra con un modelo BIM de la infraestructura, lo que posibilita una inspección detallada de cada elemento estructural. Cada componente del puente se evalúa según los niveles de daño definidos en la Norma Adif, todo dentro de un entorno de realidad virtual. La investigación se ha centrado en la incorporación de estos dos insumos, los que se reconocen en la actualidad como parte de los flujos de trabajo de las inspecciones (o tenderían a ser en el mediano plazo). Se diseñó una experiencia para un puente determinado. Los usuarios realizan la inspección de elementos estructurales seleccionados y generan un reporte detallado de su evaluación.

Esta investigación resalta la capacidad de la realidad virtual y otras tecnologías emergentes para agregar un valor sustancial a las etapas de inspección y mantenimiento de proyectos de infraestructura. La virtualización de la inspección visual no solo garantiza la seguridad de los inspectores, sino que también mejora la eficiencia y la precisión del proceso. Este avance tiene el potencial de convertirse en un estándar en la industria, reformulando la manera en que se llevan a cabo las inspecciones de infraestructura (más de accesos complejos).

No obstante, se reconocen áreas de mejora y futuras líneas de investigación que pueden optimizar aún más el uso de la realidad virtual y tecnologías actuales en la inspección de infraestructuras. La continua evolución de estas herramientas promete incrementar aún más la efectividad y seguridad de los procedimientos de mantenimiento e inspección. La automatización de la inspección es otra área clave, donde la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático podría reducir la intervención humana y mejorar la eficiencia del proceso de inspección. Esto no solo aumentaría la rapidez de las inspecciones, sino que también podría mejorar la precisión y consistencia de los resultados.

REFERENCIAS

- ADIF. (2018). Norma ADIF plataforma: Puentes y viaductos ferroviarios (2^a ed., M1: Mayo 2019, M2: Enero 2024). ADIF.
- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Mohammed, B. S. (2018). Industry Revolution IR 4.0: Future Opportunities and Challenges in Construction Industry. *MATEC Web of Conferences*, 203, 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820302010>
- Balali, V., Zalavadia, A., & Heydarian, A. (2020). Real-Time Interaction and Cost Estimating within Immersive Virtual Environments. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001752](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001752)
- Bauer, P., & Lienhart, W. (2023). 3D concept creation of permanent geodetic monitoring installations and the a priori assessment of systematic effects using Virtual Reality. *Journal of Applied Geodesy*, 17(1), 1–13. <https://doi.org/10.1515/jag-2022-0020>
- Carreira, P., Castelo, T., Gomes, C. C., Ferreira, A., Ribeiro, C., & Costa, A. A. (2018). Virtual reality as integration environments for facilities management: Application and users perception. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(1), 90–112. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2016-0198>
- Chacón, R. (2021). Designing construction 4.0 activities for aec classrooms. *Buildings*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/buildings11110511>
- Ding, Z., Liu, S., Liao, L., & Zhang, L. (2019). A digital construction framework integrating building information modeling and reverse engineering technologies for renovation projects. *Automation in Construction*, 102, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.012>
- Goulding, J., Nadim, W., Petridis, P., & Alshawi, M. (2012). Construction industry offsite production: A virtual reality interactive training environment prototype. *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.09.004>
- Guerrero, L. F., Gómez Pizano, D., & Thomson, P. (2018). Development of a virtual earthquake engineering lab and its impact on education. *DYNA*, 85(204), 9–17. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.66957>
- Kommetter, C., & Ebner, M. (2019). A Pedagogical Framework for Mixed Reality in Classrooms based on a Literature Review HCI for Teaching View project Learning Analytics View project. <https://www.researchgate.net/publication/334451940>
- Luo, X., & Mojica Cabico, C. D. (2018). Development and Evaluation of an Augmented Reality Learning Tool for Construction Engineering Education. *Construction Research Congress 2018*, 149–159. <https://doi.org/10.1061/9780784481301.015>
- Muñoz-La Rivera, F., Mora-Serrano, J., Valero, I. & Oñate, E. (2021). Methodological-Technological Framework for Construction 4.0. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 689–711 <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09455-9>
- Peffer, K., Tuunanen, T., & Rossi, M. (2006). The design science research process: A model for producing and presenting information systems research Continuous Cyber-Physical Service Innovation View project ENACT-ERP development networks in action View project. <https://www.researchgate.net/publication/228650671>
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95, 309–327. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- Pour Rahimian, F., Seyedzadeh, S., Oliver, S., Rodriguez, S., & Dawood, N. (2020). On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid application

- of BIM and machine learning. *Automation in Construction*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103012>
- Rafsanjani, H. N., & Nabizadeh, A. H. (2023). Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. *Energy and Built Environment*, 4(2), 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004>
- Sampaio, A. Z., & Martins, O. P. (2014). The application of virtual reality technology in the construction of bridge: The cantilever and incremental launching methods. *Automation in Construction*, 37, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.015>
- Sydora, C., Lei, Z., Siu, M. F. F., Han, S. H., & Hermann, U. (2021). Critical lifting simulation of heavy industrial construction in gaming environment. *Facilities*, 39(1–2), 113–131. <https://doi.org/10.1108/F-08-2019-0088>
- Vergara, D., Rubio, M., & Lorenzo, M. (2017). On the Design of Virtual Reality Learning Environments in Engineering. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(2), 11. <https://doi.org/10.3390/mti1020011>