

DE LO REAL A LO VIRTUAL:
UNA METODOLOGÍA ACCESIBLE Y REPLICABLE DE
DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS ORIENTADA AL USUARIO Y
APLICADA AL SECTOR DE VIDEOJUEGOS



Universidad
Francisco de Vitoria
UFV Madrid

Jaime Berrocal Truchemotte

jberrocal.truchemotte@gmail.com

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE VITORIA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMUNICACIÓN
GRADO EN CREACIÓN Y NARRACIÓN DE VIDEOJUEGOS

2024/2025

Tutor: Alejandro Montiel de la Corte

alejandro.montiel@ufv.es

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología accesible y replicable para la digitalización de objetos reales mediante escaneado 3D, con el objetivo de integrarlos con fidelidad en entornos virtuales, particularmente en el ámbito de los videojuegos. Partiendo de una hipótesis que plantea la viabilidad técnica y funcional de este proceso, se ha establecido un enfoque dividido en tres fases: investigación teórica, desarrollo práctico y análisis de resultados. Como caso de estudio, se ha escaneado y virtualizado un Subaru WRX STI 2015, seleccionando esta pieza principalmente por su complejidad geométrica, valor simbólico y aplicabilidad en simuladores además de otros factores evaluados utilizando matrices. Tras un estudio del mercado y una entrevista, se seleccionó el dispositivo *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022) para el proceso de escaneado. Se aplicaron diversas técnicas existentes y personalmente diseñadas para optimizar tanto este proceso como el de postprocesado de la malla resultante. La implementación del vehículo en el simulador *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), ha servido para validar la metodología propuesta, evaluando la fidelidad del escaneo, la eficiencia del flujo de trabajo y la experiencia para un usuario novel en este sector de la industria. El resultado ha sido la creación de una metodología clara y práctica que permite a desarrolladores de la industria y entidades externas replicar el proceso con fines creativos, educativos o sociales. Así, este trabajo no solo aporta valor técnico al sector del videojuego, sino que explora también su potencial como herramienta accesible de simulación y diseño.

Palabras clave: Escaneado 3D, Virtualización, Digitalización, Metodología, Accesible, Reproducible, Simulación, Assetto Corsa, Vehículo, Subaru.

Abstract

This work presents the development of an accessible and replicable methodology for the digitization of real-world objects through 3D scanning, with the aim of faithfully integrating them into virtual environments, particularly in the field of video games. Based on a hypothesis that proposes the technical and functional viability of this process, a three-phase approach has been established: theoretical research, practical development, and results analysis. As a case study, a 2015 Subaru WRX STI was scanned and virtualized, selected primarily for its geometric complexity, symbolic value, and applicability in simulators, among other factors evaluated using decision matrices. Following market research and an interview, the EINSTAR (SHINING 3D, 2022) device was selected for the scanning process. Various techniques, both existent and designed personally, were applied and designed to optimize both this process and the post-processing of the resulting mesh. The vehicle's implementation in the Assetto Corsa simulator (Kunos Simulazioni, 2014) served to validate the proposed methodology, assessing the scan's fidelity, workflow efficiency, and user experience from the perspective of a novice in this sector of the industry.

The result is a clear and practical methodology that allows industry developers and external entities to replicate the process for creative, educational, or social purposes. Thus, this work not only contributes technical value to the video game sector but also explores its potential as an accessible tool for simulation and design.

Keywords: 3D Scanning, Virtualization, Digitization, Methodology, Accessible, Replicable, Simulation, Assetto Corsa, Vehicle, Subaru.

Índice

1	Introducción	12
1.1	Hipótesis y Objetivos	12
1.2	Metodología	14
1.3	Estado de la cuestión.....	15
1.3.1	Herramientas	17
2	Desarrollo.....	19
2.1	Metodología de Escaneo 3D.....	19
2.1.1	Selección de Equipo de Escaneo	19
2.1.2	Preparación del Vehículo para el Escaneo.....	20
2.1.2.1	Consideración Sobre el Entorno de Trabajo	20
2.1.2.2	Tratamiento de Superficies Problemáticas.....	21
2.1.2.3	Uso de Marcadores de Referencia.....	22
2.1.3	Protocolo de Captura Tridimensional	22
2.1.3.1	Configuración de Software y de Escáner 3D.....	22
2.1.3.2	Estrategia y optimización de Captura.....	26
2.1.4	Análisis de Incidencias y Soluciones Aplicadas	28
2.1.4.1	Errores del Software y Limitaciones del Hardware	29
2.1.4.2	Problemas con la geometría de ciertas piezas.....	29
2.2	Preparación del Modelo Digital.....	30
2.2.1	Post-Procesado de la Malla en EXStar	31
2.3	Optimización Poligonal.....	35
2.4	Preparación del modelo para Assetto Corsa	36
2.4.1	Preparación de la malla	36
2.4.2	Jerarquización del modelo	38

-

2.4.3	Mapeado UV	40
2.4.4	Texturizado	43
2.4.5	Creación del archivo .kn5 a través de ksEditor.....	47
2.5	Importación al entorno virtual.....	50
2.5.1	Creación de la carpeta del vehículo	50
2.5.2	Modificaciones para Content Manager	51
2.5.3	Carga del vehículo en el juego y últimas modificaciones.....	54
3	Análisis de resultados.....	57
3.1	Calidad y fidelidad del escaneo 3D	57
3.2	Preparación del modelo para su integración en Assetto Corsa.....	59
3.3	Integración del modelo en Assetto Corsa.....	60
4	Conclusiones.....	62
5	Referencias	65
6	Anexo	70

Índice de figuras

Figura 1: Comparativa entorno de trabajo exterior e interior. Autoría propia.	20
Figura 2: Metodología aplicada con pulimento líquido. Autoría propia.	21
Figura 3: Productos y Metodología aplicada con polvos de talco y alcohol. Autoría propia.	21
Figura 4: Vehículo con Marcadores colocados. Autoría propia.	22
Figura 5: Parámetros utilizados en el programa EXStar. Autoría propia.	26
Figura 6: Proceso de alineación programa EXStar. Autoría propia.	27
Figura 7: Parte inferior del alerón. Autoría propia.....	28
Figura 8: Vehículo elevado. Autoría propia.	28
Figura 9: Menú de opciones en EXStar para optimizar la malla. Autoría propia.....	32
Figura 10: Menú de opciones en EXStar para modificar la malla. Autoría Propia	33
Figura 11: Herramienta para eliminar geometría flotante. Autoría propia.	34
Figura 12: Comparativa de malla tras el uso de la herramienta "Hole Filling ". Autoría propia.	34
Figura 13: Comparativa de la pieza "Suspensión" con normales invertidas vs. normales reparadas. Autoría propia.....	37
Figura 14: Jerarquía en Maya del ensamblaje y "objetos dummy". Autoría propia.	40
Figura 15: Visualización en Maya del mapeado UV relajado en modo "UV Distortion". Autoría propia.	41
Figura 16: Visualización en Maya del mapeado UV sin superposiciones ni normales invertidas en modo "Shaded". Autoría propia.....	42
Figura 17: Mapeado UV del chasis proyectado en la malla tridimensional en el modo "Checker Map". Autoría propia.....	42

Figura 18: Listado de materiales creados en Maya. Autoría propia.....	43
Figura 19: Configuración para el uso de la herramienta "bakeo" en Substance 3D Painter. Autoría propia.	44
Figura 20: Comparativa del modelo previo y posterior al "bakeo". Autoría propia.	44
Figura 21: Proceso de texturizado de la pinza de frenos en Substance 3D Painter. Autoría propia.	45
Figura 22: Renderizado de las texturas aplicadas a cada parte del vehículo. Autoría propia.	46
Figura 23: Creación "ORM" del chasis en Adobe Photoshop. Autoría propia.....	46
Figura 24: Texturas del vehículo. Autoría propia.....	47
Figura 25: Modelo cargado en ksEditor con sus texturas recién aplicadas. Autoría propia.	48
Figura 26: Ajustes del "shader": "ksPerPixelMultiMap" aplicado a "M_car_body_mesh". Autoría propia.	49
Figura 27: Opción "cast shadow ON" activada. Autoría propia.	49
Figura 28: Archivo "lods" adaptado. Autoría propia.	52
Figura 29: Archivo "car" adaptado. Autoría propia.	52
Figura 30: Archivo "ui_car" adaptado e interfaz resultante en Content Manager. Autoría propia.	53
Figura 31: Visualización y comprobación en "CM Showroom". Autoría propia.	53
Figura 32: Archivo "suspensions" adaptado. Autoría propia.	54
Figura 33: Modificación del archivo "drivetrain". Autoría propia.	54
Figura 34: Captura de pantalla ajustando los valores del collider. Autoría propia.	55
Figura 35: Efectos de CSP aplicados a las mallas con valores ajustados. Autoría propia.	56

-

Figura 36: Metodología completada. Autoría propia. 56

-

Índice de Tablas

Tabla 1: Matriz de Valores. Autoría propia.....	13
Tabla 2: Tabla de Matrices con Resultados. Autoría propia.	13
Tabla 3: Requisitos recomendados para el uso de EXStar. Autoría propia.	23
Tabla 4: Jerarquía del ensamblaje "Rueda" nomenclaturizada. Autoría propia.	38
Tabla 5: Jerarquía del ensamblaje "Suspensión" nomenclaturizada. Autoría propia.	38

Glosario

A continuación, se define la terminología técnica empleada a lo largo del documento, con el objetivo de facilitar la comprensión de conceptos específicos.

1. Nube de puntos: Es un registro digital resultado del escaneado 3D de un objeto o un espacio. (Grupo Trato, 2023).
2. Malla poligonal: Es el conjunto de vértices, aristas y caras utilizado para definir la forma y el contorno del objeto 3D. Es la forma más antigua de representación geométrica utilizada en los gráficos por ordenador para crear objetos en el espacio 3D. (Tiigimägi, s.f.).
3. .OBJ: Formato de almacenamiento de datos importantes como coordenadas, archivos de imágenes 3D y mapas de textura así como información de la paleta de colores. (Abax Engineering Solutions, s.f.).
4. Decimar la malla: La decimación de malla reduce el número de elementos en una malla mientras conserva atributos adicionales como el error de aproximación de la superficie o la calidad de los triángulos. (Polygon Mesh Processing Library, s.f.).
5. Ruido en geometría: Se refiere a una función matemática que produce una salida aparentemente aleatoria, pero determinista. (Delassus, 2023).
6. Mapa de normales: Un tipo especial de textura que le permite a usted agregar detalles en las superficies como golpes/bultos/bumps, surcos, rayones a un modelo que atrapa la luz como si fuera representado por una geometría real. (Unity, 2017).
7. LiDAR: "Light Detection and Ranging" - Detección y rango de luz
8. VCSEL: "Vertical cavity surface emitting laser" - Láser de Emisión Superficial de Cavidad Vertical.
9. UDIMS: "U Dimension" - Dimensión U.
10. Shaders: Son pequeños scripts que contienen los cálculos matemáticos y algoritmos para calcular el Color de cada píxel procesado, en función de la entrada de iluminación y la configuración del Material. (Unity, 2018).
11. Objetos dummy: Los objetos dummy son objetos que no se renderizan pero que pueden formar parte de la escena. (Escudero-Mancebo & Muñoz, 2023).
12. Pivote: Es el punto en el espacio que define el centro matemático del objeto para la rotación y la escala. (Microsoft, 2025).

-
13. Mapeado de UVs: La técnica que permite desempaquetar la superficie de un modelo 3D en una representación plana 2D, para que una imagen o textura pueda ser colocada con precisión sobre el modelo, controlando cómo la textura se ajusta y se estira en la geometría (Flavell, 2010).
 14. Edge loops: Es una serie de aristas conectadas en la superficie de un objeto que recorren completamente alrededor del objeto y terminan en el punto de inicio. (bjorng, 2012).
 15. Retopología: Es un proceso digital esencial dentro de la tecnología 3D con el que construimos una malla de polígonos simplificados de una forma 3D que ya tenemos. Se basa en redibujar cada polígono de un objeto 3D ya existente, pero que tiene una cantidad de polígonos mucho mayor a la que necesitamos (TRAZOS, s.f.).
 16. Direct X: DirectX usa una convención de coordenadas donde el eje Y apunta hacia abajo (Y-), lo que significa que el origen está en la parte superior y los valores de Y aumentan hacia abajo, facilitando el mapeado de texturas top-down. (TextureCan, s.f.).
 17. RGB: “Red, Green, Blue” – Rojo, Verde, Azul.
 18. UI: “User Interface” - Interfaz de usuario.
 19. PI: Propiedad intelectual.
 20. SDK: “Software Development Kit” - Kit de desarrollo de software.
 21. Conducción arcade: Se enfoca en experiencias de juego rápidas y emocionantes, son simples y fáciles de aprender, y son muy adecuadas para principiantes y entretenimiento familiar. Los efectos físicos en el juego suelen ser exagerados e irreales. (FUNSPACE, s.f.).
 22. Tren: Conjunto de cada componente que empuja su vehículo hacia adelante. (Kia Motors, s.f.).

1 Introducción

Este trabajo explorará cómo utilizar tecnologías de escaneo 3D accesibles para crear una metodología efectiva que permita la adaptación precisa de objetos reales al entorno digital, con especial atención al ámbito del diseño de videojuegos. La tecnología de escaneo tridimensional permite capturar con gran fidelidad la geometría de un objeto físico y convertirla en un modelo digital. Por lo cual, se ha convertido en una herramienta fundamental en campos como la ingeniería inversa, la realidad aumentada, el diseño industrial y, cada vez más, en la creación de contenido interactivo.

En el contexto del desarrollo de videojuegos, esta técnica facilita la representación fiel de objetos del mundo real, permitiendo una integración más coherente y visualmente realista en los entornos virtuales. Este nivel de precisión geométrica contribuye directamente al realismo del universo interactivo al cual se integren estos modelos brindando una experiencia más inmersiva y verosímil para el usuario.

1.1 Hipótesis y Objetivos

La hipótesis de este trabajo es que una metodología basada en escaneo 3D permite la virtualización de objetos y su integración en motores de juego de forma accesible y replicable.

En base a esta hipótesis, el objetivo principal de este trabajo será desarrollar una metodología estructurada que se base primeramente en un proceso de escaneo 3D del objeto que se desee virtualizar, seguido de una optimización de las mallas obtenidas para finalmente poder implementar en motores de juegos el modelo final respetando los requisitos de estos mismos y por ende de la industria.

Para lograr este objetivo y demostrar la hipótesis, en paralelo al desarrollo de la metodología, se llevará a cabo un caso específico a modo de ejemplificación que servirá tanto de apoyo al estudio y de base para una guía que permita la reproducción del método de forma clara y sencilla.

La intención al desarrollar dicha guía es incentivar que la metodología sirva de herramienta y sea adoptada tanto por desarrolladores en futuras creaciones para la industria del videojuego como por entidades de sectores externos con propósitos de aportación social.

Para poder concretizar estos objetivos de manera satisfactoria y debido a la infinidad de objetos reales y mundos virtuales a los que trasladarlos, se necesita especificar el objeto a virtualizar sobre el cual se sostendrá este trabajo.

Conseguir esto de manera óptima e imparcial requiere un estudio de los diferentes factores que repercutan en la validez y calidad de este trabajo con la finalidad de contrastarlos con diferentes opciones de ejemplos y así deducir la alternativa idónea.

Utilizando una matriz de riesgo (ver *Tabla 1*) y aplicándola de forma inversa (impacto positivo) se han atribuido valores concretos a los factores seleccionados en base a los objetivos previamente expuestos. Contrastando estos valores a la probabilidad relativa de impacto que cada objeto tendría sobre estos mismos, se ha generado una tabla de matrices con resultados (ver *Tabla 2*).

		IMPACTO →				
		Insignificante 1	Menor 2	Significativo 3	Mayor 4	Severo 5
↓ PROBABILIDAD RELATIVA	Improbable 1	1	2	3	4	5
	Poco probable 2	2	4	6	8	10
	Probable 3	3	6	9	12	15
	Muy probable 4	4	8	12	16	20
	Casi seguro 5	5	10	15	20	25

Tabla 1: Matriz de Valores. Autoría propia.

		FACTORES TÉCNICOS						VALOR INDUSTRIAL				VALORES AGREGADOS				RESULTADO FINAL
		Accesibilidad y Portabilidad del objeto		Escala y Complejidad de la malla		Intrincación de la superficie		Aplicabilidad y Utilidad en motores de juego		Potencial de reutilización		Impacto social		Accesibilidad de dificultad		
		Probabilidad Relativa	Impacto	Probabilidad Relativa	Impacto	Probabilidad Relativa	Impacto	Probabilidad Relativa	Impacto	Probabilidad Relativa	Impacto	Probabilidad Relativa	Impacto	Probabilidad Relativa	Impacto	
OBJETOS COTIDIANOS	Utensilios de cocina	5	15	2	8	2	4	1	4	2	10	2	6	5	25	91
	Decoración	4	12	3	12	4	8	2	8	5	25	3	9	5	25	125
	Mochila/Bolso	4	12	3	12	3	6	3	12	3	15	2	6	2	10	93
	Electrodomésticos	3	9	3	12	4	8	3	12	2	10	3	9	4	20	102
VEHÍCULOS	Bicicleta	4	12	2	8	2	4	4	16	3	15	4	12	2	10	98
	Moto	2	6	3	12	3	6	5	20	4	20	4	12	1	5	103
	Coche	4	12	4	16	4	8	5	20	5	25	4	12	1	5	125
	Bus/Camión	1	3	5	20	4	8	5	20	4	20	5	15	1	5	116
INFRAESTRUCTURA Y ENTORNO	Banco	4	12	2	8	2	4	2	8	5	25	1	3	4	20	100
	Fachada	2	6	3	12	3	6	3	12	5	25	3	9	3	15	107
	Parque infantil	2	6	5	20	3	6	4	16	2	10	5	15	2	10	106
	Rotonda/Intersección	1	3	4	16	4	8	2	8	4	20	5	15	3	15	108

Tabla 2: Tabla de Matrices con Resultados. Autoría propia.

Respaldándose en los resultados de la tabla de matrices y tras un análisis de estos mismos, se ha optado por virtualizar un vehículo. Esta decisión se ha tomado respecto a la de virtualizar un elemento decorativo ya que el vehículo, a pesar de puntuar equivalentemente, con su mayor escala y complejidad resultará en un ejemplo guiado más equilibrado y con menos carencias. Además de esto, este objeto tiene una aplicabilidad y utilidad mayor en motores de juego gracias a las posibilidades de simulación que brinda, expandiendo así el alcance de la metodología y valor de

-

entretenimiento para el usuario final. Esta ampliación de potencial de simulación, unido a una metodología guiada, incrementan el valor agregado del vehículo ya que permitirá a entidades externas replicar un proceso con el cual realizar pruebas con vehículos específicos sin arriesgar activos reales; esto va desde pruebas de conducción para personas que necesiten recuperar confianza en su vehículo tras un accidente, pasando por discapacitados que deseen experimentar la conducción de un vehículo en particular llegando hasta la realización de modificaciones estéticas o basadas en las simulaciones de manera virtual sin consumir recursos reales. Este valor social adicional supera la accesibilidad y simplicidad del objeto decorativo que aun así será compensada a través del diseño de la metodología y consecuente guía.

En vista a todo lo anterior, el objetivo final será virtualizar un vehículo de la marca Subaru, específicamente el modelo WRX STI del año 2015 por su icónico legado en la comunidad de aficionados al motor, a un mundo digital interactivo utilizando un escáner 3D, ambos posteriormente elegidos a través del estudio de las herramientas y del marco teórico.

1.2 Metodología

Para alcanzar a comprobar la hipótesis planteada, la investigación se estructura en tres fases clave de manera que se siga un método de producción secuencial: en la primera fase se realiza el análisis bibliográfico para fundamentar el enfoque; en la segunda fase, se ejecuta el escaneado, procesado y la implementación en el motor gráfico. Finalmente, en la tercera fase, se evaluará la concepción de la metodología cerrando el ciclo.

Comenzaremos realizando un análisis bibliográfico previo sobre el modelado de vehículos en videojuegos, estudiando las mejores prácticas y técnicas actuales para crear una metodología robusta que combine el escaneado 3D con técnicas de modelado básicas.

En base a los requisitos técnicos y conceptuales extraídos se identificarán y seleccionarán las herramientas de escaneado 3D más adecuadas para capturar con alta fidelidad las proporciones reales y las diversas características estéticas del Subaru WRX STI 2015, garantizando precisión y eficiencia en el proceso de modelado. Para reforzar esta decisión, se profundizará en el tema con información de primera mano mediante una entrevista a un profesional del sector del escaneado tridimensional.

Posteriormente, se procederá al escaneado tridimensional del Subaru WRX STI 2015. En este paso es esencial capturar con precisión milimétrica la geometría y los detalles estéticos del vehículo, generando una nube de puntos de alta densidad que reproduzca fielmente el vehículo.

-

A continuación, la nube de puntos se convertirá en una malla poligonal. Este modelo 3D se preparará para su integración en el motor de juego. Asegurar la correcta adaptación del modelo a los requisitos incluye la optimización de la malla y la asignación adecuada de materiales y texturas conforme a las especificaciones del entorno gráfico. Esto se puede realizar con una gran variedad de programas. Debido a esto se escogerán los softwares de modelado y texturizado en la sección del estudio de herramientas.

En la siguiente etapa, se realizará una nueva entrevista con un experto en la integración de elementos al motor gráfico que sea seleccionado en el estado de la cuestión. Enfocándose en obtener sus opiniones y consejos sobre este proceso.

Finalmente, analizaremos todo este proceso práctico documentado en el desarrollo para poder concluir la validez de la hipótesis de este proyecto y elaborar la guía de forma correcta y acorde a los objetivos.

1.3 Estado de la cuestión

El escaneado 3D ha emergido como una tecnología revolucionaria en el diseño de vehículos para videojuegos. Esta tecnología permite capturar formas complejas con alta precisión, facilitando la creación de modelos digitales realistas y optimizados para motores gráficos actuales (Artec 3D, s.f.).

Como demuestran varios estudios de caso realizados por *ScanTech* esta tecnología es un avance reciente y en crecimiento en simuladores de carreras que priorizan el realismo y la inmersión. Ya que permite capturar con alta precisión la geometría del vehículo, detalles como la textura de los materiales o el desgaste de los neumáticos, incrementando la fidelidad visual (ScanTech, 2024).

En *Gran Turismo Sport* (Polyphony Digital, 2017), los desarrolladores con *Kazunori Yamauchi* al frente, fueron de los primeros en utilizar el escaneo 3D para poder garantizar la mayor exactitud respecto a los modelos reales (Martín, 2023).

La empresa *Creative Mesh* fundada en 2016 y con sede en Alemania ha utilizado el escaneo 3D durante el desarrollo del DLC *Emergency Pack* para el videojuego *Farming Simulator 22* (GIANTS Software, 2022) en colaboración con sus desarrolladores. Mediante el uso de los escáneres *Artec Leo* y *Ray II* (Artec 3D, 2017 y 2023) lograron capturar con precisión vehículos y equipos reales, como camiones de bomberos, para integrarlos en el juego. Esta colaboración demuestra cómo el escaneo 3D permite a los desarrolladores crear contenido auténtico y detallado, mejorando la inmersión del jugador en el entorno virtual (Hanaphy, 2024).

-

Un estudio de *Daniele R.* en 2018 examina cómo los videojuegos de carreras estimulan diferentes habilidades de conducción y evalúa los niveles de realismo experimentados en estos juegos, sugiriendo que el realismo técnico es clave para la inmersión y la experiencia del jugador (Ruscio, 2018).

Esto es especialmente notable en simuladores como *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), que priorizan el realismo técnico, a diferencia de títulos estilizados como la saga *Grand Theft Auto V* (Rockstar North y Rockstar Games, 2013), que buscan una jugabilidad más accesible y divertida a través de una conducción arcade. Esto resalta la diferencia entre los modelos que priorizan el realismo a la accesibilidad focalizándose en una audiencia principalmente de entusiastas de la simulación más que de jugadores casuales.

Por otro lado, la transferencia de comportamientos de conducción entre diferentes videojuegos refleja cómo los simuladores técnicos influyen en las habilidades adquiridas por los jugadores. En particular, se ha observado que los simuladores técnicos permiten a los usuarios desarrollar habilidades que pueden aplicarse incluso fuera del entorno virtual, destacando la importancia del impacto educativo y formativo (Cardamone, Caiazzo, Loiacono, & Lanzi, 2011).

Los videojuegos varían considerablemente su enfoque en la adaptación estética, pasando de una precisión absoluta en juegos como *DiRT Rally* (Codemasters, 2015), *Forza Horizon 5* (Playground Games, 2021) o *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) a títulos como *Grand Theft Auto V* (Rockstar North y Rockstar Games, 2013), *Art of Rally* (Funselektor Labs Inc., 2020) o *Distance* (Refract, 2018) que adoptan un enfoque más estilizado, donde el estilo gráfico no se basa en técnicas de reproducción de alta fidelidad, como el escaneo 3D, sino más bien en técnicas de modelado 3D que les permitan armonizar los vehículos con la estética de su universo.

En una entrevista a Marco Massarutto por Antonela Pounder de *505 Games* el cofundador y director gerente del estudio italiano *Kunos Simulazioni* menciona como en el videojuego de simulación de carreras *Assetto Corsa Competizione* (Kunos Simulazioni, 2019) han implementado los circuitos en su juego utilizando escaneado 3D “*Todos los circuitos que aparecen en el juego aprovechan la tecnología Laserscan. La única excepción es Zandvoort, ya que fue recreado por una empresa externa para el título anterior Assetto Corsa. Como fue bien recibido por nuestra comunidad por su apariencia y precisión, no sentimos la necesidad de volver a hacerlo desde cero.*” – Marco. También explica como utilizando este método han logrado alcanzar niveles de fidelidad extremadamente elevados “*En resumen, el resultado es una cantidad masiva de datos que consiste en una nube de puntos 3D muy densa, lo que permite a los artistas comprender con la máxima precisión exactamente dónde se colocan todos los detalles en el espacio. Esto incluye los bordillos del circuito, el césped, los postes y los*

-

pequeños baches que afectan a la forma en la que las suspensiones de los automóviles se comportan sobre ellos.” – Marco (Jeffrey, 2020).

Este enfoque no únicamente estético, sino también funcional, afecta directamente a la simulación de las físicas del vehículo. Aplicar esta tecnología a los vehículos además de los circuitos, repercutiría también sobre el realismo de la aerodinámica y otros aspectos físicos que influyen en la experiencia de conducción.

Mientras que *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) utiliza el escaneado tridimensional para lograr representaciones extremadamente precisas, otros juegos adoptan enfoques distintos. Por ejemplo, en *Grand Theft Auto V* (Rockstar North y Rockstar Games, 2013) los desarrolladores emplean técnicas de modelado 3D tradicionales para diseñar vehículos que se adaptan al estilo gráfico único del juego, que combina realismo con un enfoque caricaturesco. Este diseño estilizado es idóneo para esta PI ya que el juego se aleja deliberadamente de la simulación de físicas realistas. En lugar de eso, prioriza una experiencia de conducción más divertida y caótica, alineándose con su narrativa satírica y su jugabilidad centrada en la exploración y el entretenimiento. Esto permite una inmersión coherente con el propósito del juego, proporcionando una experiencia única y envolvente.

Considerando las alternativas exploradas y sus diferencias, encontramos dos opciones para el desarrollo de este trabajo, ambas válidas, pero con enfoques distintos. Por un lado tenemos el atractivo modelo estilizado, particularmente el de la saga *Grand Theft Auto V* (Rockstar North y Rockstar Games, 2013), donde los vehículos tienen un rol principal y tienen mayor libertad artística en su integración con menor consideración a las decisiones técnicas. Resulta por lo tanto interesante virtualizar un vehículo en este universo específicamente para el actualizado título *Grand Theft Auto V* (Rockstar North y Rockstar Games, 2013). Sin embargo, por otro lado tenemos un claro compromiso con el realismo y superar los límites de la simulación. Esto encaja mucho mejor con los objetivos de este proyecto por lo que virtualizar el vehículo a *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) resulta la opción idónea.

1.3.1 Herramientas

Para desarrollar la metodología propuesta, utilizaremos diversas herramientas y softwares especializados en el campo del escaneado 3D, el modelado y la integración en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014).

En primer lugar utilizaremos tecnologías de escaneado 3D que permitan realizar escaneos precisos que sirvan de base robusta para el modelado tridimensional del vehículo. Basado en un estudio propio del mercado, hasta la fecha, algunos de los escáneres láser portátiles de calidad profesional más rápidos, inteligentes, intuitivos y

-

con softwares de postprocesado son los modelos insignia de *Artec 3D*. A un nivel técnico similar pero más asequible se han encontrado el *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022) y el *3D CR-Scan Otter* (Creality, 2024). Por otra parte, existen alternativas aún más asequibles, incluso gratuitas, como *Scanniverse* (Niantic, 2022). Encontrar la herramienta adecuada, con especificaciones técnicas profesionales pero sin resultar inasequible, para poder capturar un modelo detallado del Subaru WRX STI 2015 a escala de forma óptima es una cuestión que se resolverá en el desarrollo.

Existen diversos programas de modelado tridimensional para limpiar y adaptar las mallas poligonales escaneadas; *Autodesk 3ds Max* (Autodesk, 2025), *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) o *Blender* (Fundación Blender, 2025) son algunas de las opciones, esta última siendo de código abierto y gratuita pero con una curva de aprendizaje particularmente pronunciada para usuarios novatos en comparación a sus alternativas de *Autodesk* (Eloy, 2024). Estos softwares son ideales para realizar retopologías, crear mapas UV y aplicar materiales, técnicas esenciales para el procesado a versiones low-poly que estén optimizadas para videojuegos. En este caso se utilizará *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) ya que no solamente es ampliamente reconocido en la industria del videojuego por su robusta gestión de mallas, su versatilidad en la creación de objetos tridimensionales y su compatibilidad con los flujos de producción en estudios AAA (Jaquez, 2024), sino que también es preferida por estos mismos por cuestiones de encriptado y soporte técnico profesional (Krishnan, 2024).

Los mapas de normales sirven para poder proyectar los detalles del modelo high-poly en el low-poly. Estos son una práctica recomendada para mejorar la calidad visual de los juegos sin aumentar la carga de polígonos mejorando así el rendimiento en tiempo real (arm | Developer, s.f.). Para finalizar el proceso de modelización, utilizaremos la herramienta de hornear (bakeo) del programa *Substance 3D Painter* (Adobe, 2023/24) para proyectar las normales del modelo de alta densidad poligonal en el modelo de baja densidad poligonal. En este mismo programa crearemos y exportaremos las texturas.

Por último, para la implementación del vehículo a *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) se utilizará una herramienta externa *Content Manager* (Jusupov, 2025) ya que mejora la gestión de mods al incluir características adicionales como la instalación y configuración de coches y pistas, lo cual es vital para optimizar la experiencia de simulación (Terrell, 2021). Previamente a la implementación se empleará la herramienta oficial *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014), parte del SDK de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), para convertir el modelo al formato .kn5 asegurando que los detalles visuales se integren correctamente el motor del juego.

2 Desarrollo

2.1 Metodología de Escaneo 3D

La metodología de escaneo 3D adoptada en este proyecto se fundamenta en un proceso meticuloso que abarca desde la selección del equipo hasta la preparación del vehículo y la ejecución del escaneo propiamente dicho. Cada fase ha sido diseñada para garantizar la máxima precisión en la digitalización del Subaru WRX STI 2015, lo que permitirá una posterior integración en entornos gráficos de alta fidelidad. La correcta elección del equipo de escaneo, la optimización del entorno de trabajo y la aplicación de técnicas específicas para el tratamiento de superficies son elementos clave que, en conjunto, aseguran la obtención de un modelo digital fiel y detallado.

2.1.1 Selección de Equipo de Escaneo

La elección del equipo de escaneo es un aspecto crucial, ya que define la calidad del modelo digital que se obtendrá. En este proyecto, el objetivo es capturar con alta fidelidad la geometría del Subaru WRX STI 2015 para su posterior integración en un motor gráfico, lo cual requeriría un dispositivo que combinara precisión, facilidad de uso y un costo razonable.

Inicialmente, se consideró la posibilidad de utilizar *Scanniverse* (Niantic, 2022), una aplicación de escaneo 3D basada en tecnología LiDAR disponible en dispositivos móviles. Esta opción presentaba la ventaja de ser una solución sin coste y de fácil acceso, además de ofrecer un flujo de trabajo rápido y directo. Sin embargo, durante un uso previo, se identificaron diversas limitaciones. Por un lado, la tecnología LiDAR integrada en dispositivos móviles no tiene la capacidad de capturar con exactitud superficies con curvaturas finas o detalles geométricos pequeños, generando modelos con pérdida de información en áreas críticas. Por otro lado, las capturas realizadas con *Scanniverse* (Niantic, 2022) generaban modelos con un elevado número de imperfecciones, requiriendo un postprocesado manual intensivo para corregir errores. Finalmente, se observó que la aplicación tenía problemas al escanear cristales y piezas metálicas pulidas debido a la falta de referencias geométricas consistentes. Estas superficies pueden reflejar o refractar la luz de manera impredecible, lo que dificulta la obtención de datos precisos y consistentes llegando a generar nubes de puntos falsos o perder información.

Frente a estas limitaciones y tras una entrevista con un profesional del sector del escaneado tridimensional, se optó por el escáner *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022), desarrollado por Shining 3D, que utiliza tecnología de luz estructurada infrarroja VCSEL. Esta tecnología permite una mayor resolución en la captura de detalles, ya que la

-

proyección de patrones de luz sobre el objeto y el análisis de su deformación facilitan la reconstrucción precisa de la geometría. Según su ficha técnica, el *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022) garantiza una precisión de hasta 0,1 mm y una tasa de captura de hasta 14 fotogramas por segundo, lo que se traduce en la capacidad de reproducir curvas suaves y elementos delicados del vehículo de forma confiable (SHINING 3D, s.f.). Esta mejora en la resolución y precisión resulta especialmente relevante cuando se trata de digitalizar vehículos, donde la correcta representación de cada detalle puede influir en la calidad del modelo final (Fox, 2022).

2.1.2 Preparación del Vehículo para el Escaneo

La preparación del vehículo es un componente crítico en el proceso de digitalización 3D, ya que influye directamente en la calidad y precisión del modelo final. En esta fase se establecieron medidas para optimizar las condiciones de captura, tanto en términos de entorno físico como de tratamiento de superficies problemáticas y el uso estratégico de marcadores de referencia.

2.1.2.1 Consideración Sobre el Entorno de Trabajo

Una de las primeras acciones fue definir un entorno de trabajo que garantizara condiciones de iluminación constantes y controladas. Se optó por trasladar el proceso de escaneo a un espacio interior, en contraposición a los intentos iniciales realizados en exteriores, donde la luz natural generaba reflejos intensos y variabilidad en la exposición. La utilización de focos artificiales permitió configurar una iluminación difusa, con ángulos e intensidades ajustables, lo que resultó crucial para evitar la sobreexposición en zonas críticas del vehículo. Este ambiente controlado facilitó la calibración del escáner, ya que las condiciones de luz constantes contribuyeron a una captura de datos más estable y precisa, aspecto fundamental para la virtualización de un objeto con una complejidad como la del Subaru WRX STI 2015.



Figura 1: Comparativa entorno de trabajo exterior e interior. Autoría propia.

2.1.2.2 Tratamiento de Superficies Problemáticas

El vehículo presenta diversas superficies que dificultan la correcta captación de la geometría, como los cristales, faros, retrovisores y ciertas piezas metálicas pulidas, que tienden a reflejar la luz de forma descontrolada. Durante las pruebas iniciales se aplicó líquido de pulimento con el objetivo de crear una capa protectora sobre estos elementos, pero dicho método resultó ineficaz debido a la formación irregular de la película, lo que generaba huecos y fallos en la captura de datos. Ante esta limitación, se implementó un tratamiento específico que consistió en la aplicación de una mezcla compuesta por alcohol isopropílico al 80% y polvo de talco en proporciones de 80% y 20% respectivamente. Al ser aplicada en spray, esta solución generaba, tras la rápida evaporación del alcohol, una fina capa opaca sobre las superficies problemáticas, reduciendo significativamente los reflejos y permitiendo que el escáner capturara de manera adecuada los contornos y detalles de dichas áreas. La eficacia de este tratamiento se tradujo en una mejora sustancial en la calidad de la malla digital, facilitando la detección de la geometría de elementos que, de otra forma, habrían quedado mal representados.



Figura 2: Metodología aplicada con pulimento líquido. Autoría propia.



Figura 3: Productos y Metodología aplicada con polvos de talco y alcohol. Autoría propia.

2.1.2.3 Uso de Marcadores de Referencia

En áreas del vehículo donde la superficie resultaba demasiado lisa y carecía de suficientes variaciones geométricas, el escáner tendía a perder el seguimiento, comprometiendo la continuidad y precisión en la captura de datos. Para contrarrestar esta limitación, se optó por la aplicación estratégica de marcadores de referencia en casi toda la superficie del vehículo, intensificando el volumen de estos marcadores en las zonas críticas, tales como el techo, los parachoques, el alerón, las puertas y otras áreas planas. La utilización de estos marcadores proporcionó puntos de anclaje adicionales, lo que facilitó la alineación de las capturas individuales y aseguró la continuidad en la reconstrucción de la malla digital. Esta técnica híbrida, que integra la información geométrica natural del objeto con la señalización adicional de los marcadores, redujo significativamente los errores de seguimiento y mejoró la fidelidad del modelo final.



Figura 4: Vehículo con Marcadores colocados. Autoría propia.

2.1.3 Protocolo de Captura Tridimensional

El protocolo de captura tridimensional es una fase crítica en la digitalización 3D, pues establece los pasos, técnicas y ajustes necesarios para un proceso meticuloso que involucra la selección cuidadosa de técnicas de escaneo, la configuración del software y el seguimiento de protocolos de alineación de datos.

La captura tridimensional precisa es crucial para la creación de modelos digitales de alta calidad, sobre todo cuando se trata de objetos de cierta complejidad geométrica. Un protocolo de escaneo adecuado, que cubra tanto la preparación del equipo como la configuración del software, es esencial para garantizar la fidelidad del modelo final y obtener un modelo digital lo más fiel posible al objeto físico.

2.1.3.1 Configuración de Software y de Escáner 3D

Para comenzar el proceso de escaneo, es necesario preparar adecuadamente tanto el hardware como el software del escáner *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022). Este dispositivo utiliza tecnología de luz estructurada combinada con seguimiento por infrarrojos, lo que

-

facilita la captura precisa de geometrías complejas. Sin embargo, para aprovechar al máximo esta tecnología, es fundamental configurar el software correctamente.

Para poder utilizar este escáner en específico es necesario descargar la aplicación *EXStar* (SHINING 3D, 2024) (SHINING 3D, s.f.). La configuración óptima del software se estableció mediante un proceso iterativo de investigación y pruebas, logrando un equilibrio entre calidad de captura y eficiencia operativa. Los parámetros clave se ajustaron según las características específicas del vehículo.

Se utilizó la versión más reciente del software *EXStar* (SHINING 3D, 2024), ya que *SHINING 3D* recomienda encarecidamente utilizar la última versión disponible para aprovechar mejoras en rendimiento y nuevas funcionalidades. Este programa debe descargarse desde el sitio oficial de *SHINING 3D* o de un proveedor autorizado. Es fundamental verificar que el sistema operativo del equipo sea compatible con la aplicación y que los controladores del dispositivo estén actualizados. Además, se recomienda revisar los requisitos mínimos del sistema para asegurar que el equipo utilizado cuente con los recursos adecuados para manejar la gran cantidad de datos que el escáner genera durante el proceso de captura.

A continuación, se presenta una tabla con los requisitos recomendados para utilizar el software *EXStar* (SHINING 3D, 2024). Para un rendimiento eficiente, es crucial contar con un equipo que cumpla con las especificaciones mínimas (ver *Tabla 3*).

Componentes	Requisitos Recomendados
Sistema Operativo	Windows 10 o Windows 11 (64 bits)
Procesador (CPU)	Intel® Core™ i7-11800H o superior
Memoria RAM	32 GB o más
Tarjeta Gráfica (GPU)	NVIDIA GTX 1060 o superior
Memoria de Video (VRAM)	6 GB o más
Puerto USB	USB 2.0 o superior

Tabla 3: Requisitos recomendados para el uso de EXStar. Autoría propia.

Por otro lado, la calibración del escáner es un procedimiento fundamental para garantizar la precisión en la digitalización, ya que permite al sistema ajustar su referencia espacial y minimizar errores en la reconstrucción de la geometría. Este proceso es esencial debido a que el escáner emplea luz estructurada y un sistema de seguimiento

-

por infrarrojos, los cuales requieren una calibración precisa para interpretar correctamente la deformación de los patrones proyectados sobre la superficie del objeto a escanear.

Como inicialmente las pruebas de escaneo se realizaron en exterior y que posteriormente se optó por trasladar el proceso a un entorno interior con diferente iluminación, esto requirió repetir el proceso de calibración para adaptar el escáner a las nuevas condiciones ambientales.

El escáner necesita comprender su entorno y compensar cualquier desviación en la captura de datos. Para lograrlo, el procedimiento de calibración se inicia alineando el dispositivo con una placa de calibración diseñada con puntos de referencia y marcadores conocidos que permiten al software ajustar la configuración de captura. Esta placa actúa como una referencia universal para corregir distorsiones ópticas, errores de perspectiva y desviaciones en la proyección de la luz estructurada.

El proceso de calibración consiste en una serie de capturas realizadas. Comenzando desde una posición perpendicular a la placa, realizando cambios angulares de 30° en cada dirección oscilante (horizontal y vertical) además de variar la altura en cada una de estas posiciones (Vision Miner, 2022). Esto permite al escáner generar un modelo interno de corrección que mejora la precisión en la reconstrucción tridimensional del objeto. Estos ajustes son cruciales, ya que el campo de visión y la distancia focal del escáner afectan la precisión de la captura, y la variabilidad en la altura permite al sistema compensar posibles distorsiones en la profundidad de los datos adquiridos.

Además, se llevó a cabo un ajuste del balance de blancos para garantizar una correcta interpretación del color y evitar dominantes cromáticas no deseadas en la captura de texturas. Este ajuste es esencial para obtener una representación fiel de la superficie del vehículo, evitando que la iluminación artificial genere alteraciones en el modelo digital final.

El ajuste adecuado de los parámetros del escáner es fundamental para garantizar una digitalización precisa y eficiente. En este caso, se utilizaron los parámetros más adecuados para digitalizar el Subaru WRX STI 2015, teniendo en cuenta las características del vehículo, el entorno de escaneo y los objetivos del proyecto. A continuación, se detallan los parámetros específicos utilizados.

El primer ajuste realizado fue la selección del modo de escaneo. En este caso, se configuró el modo "Object" para la captura, ya que este modo está específicamente diseñado para la captura de geometrías complejas y superficies detalladas como las de un vehículo. Además, se estableció el tamaño del objeto en "Medium and Large". Este ajuste es crucial para adaptarse a las dimensiones del vehículo, que es considerablemente más grande que los objetos pequeños, como piezas de arte o modelos a escala. Configurando el tamaño del objeto, se asegura que el escáner ajuste

-

su campo de visión, distancia focal y otros parámetros técnicos, permitiendo una captura eficiente de la totalidad del vehículo sin perder detalle en zonas complejas y con geometría intrincada, como la parrilla o las llantas.

Uno de los parámetros más importantes en la digitalización 3D de vehículos es la correcta alineación de las capturas, ya que esto garantiza la continuidad y precisión de la malla poligonal resultante. Para ello, se utilizó una estrategia que combina el uso exclusivo de referencias geométricas con el uso de una hibridación entre las referencias geométricas y los marcadores de referencia.

En primera instancia, se utilizaron únicamente las referencias geométricas naturales del vehículo como líneas, bordes y detalles de las partes más prominentes de la carrocería. Estas referencias geométricas, como las formas de los faros, los bordes de las puertas o las curvaturas del chasis, proporcionaron puntos de anclaje iniciales para el escáner. Sin embargo, en áreas con superficies más lisas o zonas con falta de detalles geométricos, como el techo o los parachoques, se optó por integrar marcadores de referencia. Estos marcadores fueron estratégicamente colocados en áreas clave del vehículo para mejorar la precisión y la continuidad del escaneo.

La hibridación entre las referencias geométricas y los marcadores de referencia permitió que el escáner trabajara de manera eficiente en zonas con menos geometría natural y ayudó a reducir los errores de seguimiento que pueden ocurrir en la captura de datos. Este enfoque combinado mejoró la fidelidad del modelo digital final, al permitir que el software alinee y una correctamente las distintas capturas, asegurando que las piezas del vehículo se reconstruyeran con un alto nivel de precisión.

La resolución de captura es un parámetro que afecta directamente la calidad y detalle del modelo digital resultante. En este caso, se configuró la resolución a 1.5, un valor que representaba un compromiso óptimo entre calidad y rendimiento. La resolución de 1.5 permitió capturar detalles suficientes del vehículo sin generar archivos demasiado pesados que pudieran dificultar el procesamiento de datos y la creación del modelo final.

Por otro lado, se optó por desactivar la captura de texturas. Esta decisión se tomó para optimizar el rendimiento del escáner, ya que la textura no era un factor esencial para esta parte del proceso en particular, cuyo enfoque estaba en capturar la geometría del vehículo. Al desactivar la textura, se evitó la complejidad adicional que podría haber generado la captura de datos de color y superficie, especialmente en zonas con reflejos o superficies brillantes.

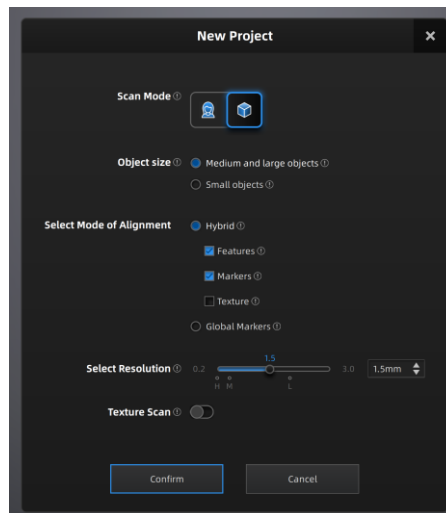


Figura 5: Parámetros utilizados en el programa EXStar. Autoría propia.

2.1.3.2 Estrategia y optimización de Captura

La estrategia de captura es esencial para obtener un modelo digital preciso y de alta fidelidad del Subaru WRX STI 2015. Dada la complejidad geométrica del vehículo y la variabilidad de sus superficies, se adoptaron técnicas de barrido específicas y se estableció un riguroso control del campo de visión y distancia focal del escáner para maximizar la calidad de la digitalización.

En primer lugar, se definieron dos métodos de barrido para abordar las distintas áreas del vehículo. Para las superficies curvas se emplearon movimientos en espiral concéntrica, lo que permite capturar de forma continua la complejidad inherente a las curvas sin interrumpir la continuidad de la información. Para las zonas planas se optaron por pasadas lineales paralelas, lo que garantiza una cobertura uniforme y evita la omisión de detalles en áreas con baja variación geométrica.

Adicionalmente, se ajustó la velocidad de barrido según las zonas. Se utilizó una velocidad de barrido muy lenta en las zonas con geometría natural comprensible para asegurar que cada punto se registrara con precisión, mientras que en las secciones más complejas donde el escáner tenía dificultades para captar la geometría, se aceleraba la velocidad del barrido para intentar capturar la mínima información de esta sección sin sacrificar la integridad de la zona completa siendo escaneada. Posteriormente, rematando la captura completa de datos realizando barridos más lentos en las secciones complejas que estaban ya correctamente situadas en el modelo global.

El control de la distancia de trabajo es otro aspecto crítico. El escáner opera eficazmente en un rango de 160mm a 1400mm, siendo la distancia óptima aproximadamente 400mm. Si el dispositivo se acerca demasiado, se produce sobreexposición y se “quema” la

geometría; si se aleja en exceso, se pierde resolución. Para facilitar el posicionamiento, el escáner incorpora indicadores luminosos y el software *EXStar* (SHINING 3D, 2024) muestra en tiempo real las zonas comprometidas, permitiendo al operador ajustar la iluminación y la distancia de captura de forma precisa.

Para asegurar la máxima precisión en el modelo final, se adoptó una estrategia de escaneo que consistió en capturar individualmente cada componente del vehículo y, posteriormente, alinear los datos obtenidos para formar una representación coherente y completa del Subaru WRX STI 2015. El software *EXStar* (SHINING 3D, 2024) proporciona una vista en tiempo real del proceso de alineación, permitiendo al operador verificar de inmediato la correcta integración de las piezas y realizar ajustes manuales cuando fuese necesario. Esta funcionalidad visual resulta crucial para identificar áreas donde el algoritmo automático no corrija completamente los errores de posición o existan variaciones en la densidad de datos, de modo que la geometría final refleje fielmente la realidad.

El proceso de alineación se apoya en algoritmos automáticos que combinan las características geométricas naturales del vehículo para alinear las secciones. Estos algoritmos minimizan los desplazamientos entre las distintas capturas. Sin embargo, en determinadas áreas las condiciones de escaneo pueden generar desviaciones que requieran intervención manual, utilizando puntos de referencia geométricos o marcadores del método de escaneo híbrido para refinar la posición de las piezas.

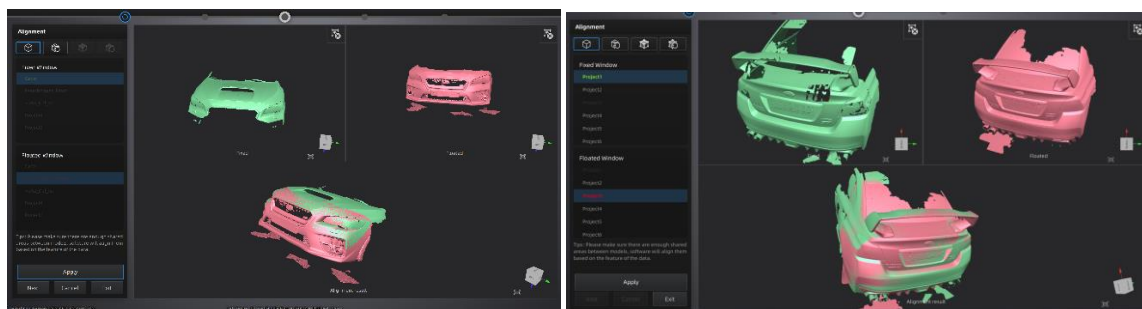


Figura 6: Proceso de alineación programa EXStar. Autoría propia.

Para maximizar la eficiencia de tiempo de escaneo, recursos de hardware y peso de la malla poligonal resultante, se decidió únicamente escanear con detalle una mitad del vehículo. Posteriormente utilizando la herramienta de simetría en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) para recrear la totalidad del vehículo.

El alerón presentó un reto adicional debido a la proximidad de su zona inferior al maletero, lo que dificultaba la captura precisa de esa región. Esta estrechez reduce el campo de visión y distancia focal del escáner, generando problemas de sobreexposición que

-

afectan a la calidad de los datos geométricos. Para mitigar este inconveniente, se realizaron múltiples pasadas de escaneo, ajustando cuidadosamente los ángulos de captura y variando la intensidad de la luz. Además, se incrementó la densidad de marcadores de referencia en la zona, lo que permitió mejorar la precisión y reducir los efectos adversos de la sobreexposición, asegurando que la geometría de la parte inferior del alerón se registrara con alta fidelidad.



Figura 7: Parte inferior del alerón. Autoría propia.

Para otras piezas de difícil acceso, como elementos del tren delantero y trasero, se implementaron medidas técnicas específicas. El vehículo fue elevado mediante un gato mecánico, retirando el neumático, facilitando la captura integral del brazo de dirección, la suspensión y el conjunto mecánico asociado, además de permitir un escaneo completo de la geometría de la rueda, proceso que habría resultado imposible debido a la inaccesibilidad a ciertos puntos críticos.



Figura 8: Vehículo elevado. Autoría propia.

2.1.4 Análisis de Incidencias y Soluciones Aplicadas

A lo largo del proceso de escaneo del vehículo, se presentaron múltiples desafíos que afectaron tanto la precisión de la captura como la eficiencia del trabajo. Estos inconvenientes estuvieron relacionados con limitaciones del hardware y el funcionamiento del software *EXStar* (SHINING 3D, 2024) en el equipo informático, así como con la complejidad geométrica de ciertas piezas del vehículo. Algunos errores se

-

debieron a la interpretación incorrecta de referencias por parte del software, lo que provocaba duplicaciones de geometría o la generación de datos en ubicaciones erróneas. Además, determinadas superficies y materiales presentaron dificultades adicionales debido a sus propiedades reflectantes o a la falta de puntos de referencia naturales.

Para hacer frente a estos problemas, se aplicaron diversas soluciones que incluyeron ajustes en la configuración del escáner, el uso de materiales auxiliares como el spray matificante, la segmentación del escaneo en múltiples etapas y la mejora en la disposición de los marcadores de referencia. A continuación, se detallan las principales incidencias encontradas y las estrategias implementadas para solucionarlas.

2.1.4.1 Errores del Software y Limitaciones del Hardware

Durante el proceso de escaneo, se presentaron diversas limitaciones tanto en el hardware como en el funcionamiento del software del escáner en el equipo, lo que afectó significativamente la calidad y eficiencia del proceso. Para mitigar estos inconvenientes se implementaron estrategias de optimización como ajustes en la configuración del PC y una mejor planificación de la secuencia de escaneo. Sin embargo, a pesar de estas mejoras, algunos problemas persistieron, lo que requirió una solución más drástica. Para poder superar este impase se decidió excluir el escaneado del interior del coche, ya que esto es un aspecto mayoritariamente estético y con una repercusión prácticamente insignificante en la hipótesis y objetivos de este trabajo.

2.1.4.2 Problemas con la geometría de ciertas piezas

Uno de los errores más frecuentes fue la duplicación de geometría y marcadores al retroceder o avanzar en la captura de datos. Esta situación provocaba que el programa se desincronizara, generando incoherencias en la superposición de datos y afectando la calidad del modelo final. Para evitarlo, se estableció como norma mantener una progresión constante en los barridos de escaneo, sin retrocesos innecesarios y realizando verificaciones en tiempo real para detectar cualquier posible error antes de continuar con la siguiente fase.

La mayoría de las piezas del vehículo requirieron múltiples repeticiones de escaneo debido a que los resultados iniciales no cumplían con las expectativas. Uno de los principales inconvenientes fue que el software interpretaba erróneamente las referencias, generando geometría en ubicaciones incorrectas. Para solucionar esto, se implementó una estrategia de corrección manual, eliminando la geometría defectuosa y volviendo a escanear las áreas afectadas con una mejor distribución de los marcadores.

-

El retrovisor presentó una dificultad considerable al intentar escanearlo junto con la puerta, ya que el software duplicaba la geometría en varias ocasiones. Como solución, se intentó escanear el retrovisor por separado; sin embargo, la complejidad de la pieza, la variación de materiales y el reducido espacio entre el cristal y el retrovisor dificultaron significativamente la captura. La refracción de la luz en ciertas superficies también afectó la calidad del escaneo. Para mitigar este problema, se ajustaron los ángulos de escaneo y se probaron diferentes configuraciones de marcadores para eliminar los errores de captura.

Las rejillas del vehículo representaron otro desafío importante debido a su geometría compleja, la ausencia de una capa trasera que facilitara la referencia del escaneo y el alto brillo del material. Estos factores hacían que el escáner tuviera dificultades para capturar correctamente la información de la superficie. Para solucionar este problema, se aplicó también el spray matificante sobre la zona, reduciendo los reflejos y mejorando la calidad de la captura.

Finalmente, el sistema de dirección del vehículo presentó un gran desafío debido a la complejidad de sus componentes y el espacio reducido en el que se encuentran. La acumulación de piezas en un área tan estrecha dificultó la captura completa de la geometría, ya que muchas zonas quedaban parcialmente ocultas. Para solucionar este problema, como se mencionó anteriormente, se optó por retirar la rueda, lo que permitió un mejor acceso a los componentes internos y facilitó el escaneo de áreas de difícil visibilidad. Además, se aplicó spray matificante para reducir reflejos y mejorar la precisión de la captura. Aun así, debido a la complejidad de la zona, el proceso requirió mucha paciencia y la exploración de múltiples ángulos hasta obtener una reconstrucción completa y precisa de los elementos del tren delantero y trasero.

2.2 Preparación del Modelo Digital

Una vez finalizado el proceso de escaneo y alineación de los distintos componentes del Subaru WRX STI 2015, comienza la fase de preparación del modelo digital, cuyo objetivo es obtener una malla poligonal optimizada, limpia y lista para su uso en programas de modelado 3D. Esta etapa comprende una serie de operaciones técnicas clave que permiten transformar los datos crudos obtenidos por el escáner en un modelo funcional y de alta calidad.

El proceso se organiza en tres grandes bloques. En primer lugar, se genera una malla poligonal a partir de la nube de puntos alineada, operación fundamental para dar forma al modelo tridimensional. A continuación, se lleva a cabo una fase de limpieza y optimización, que incluye la eliminación de errores, artefactos, marcadores físicos y otras imperfecciones del escaneado. Finalmente, se realiza la exportación del modelo

-

en formatos compatibles con softwares de modelado como *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025), lo que permite su posterior edición, texturizado o integración en flujos de trabajo de animación o videojuegos.

2.2.1 Post-Procesado de la Malla en EXStar

Una vez alineadas correctamente todas las capturas individuales del vehículo, el siguiente paso en el software *EXStar* (SHINING 3D, 2024) consiste en transformar la nube de puntos consolidada en una malla poligonal. Esta conversión representa el primer paso dentro del postprocesado del modelo, ya que permite trabajar con una superficie continua que puede ser limpiada, editada y exportada a otros programas de modelado.

El escaneo inicial genera mallas de gran densidad, lo cual no siempre es necesario ni eficiente. Al querer llevar el modelo a un motor de juego, es imprescindible que esté optimizado para asegurar un rendimiento adecuado sin sacrificar demasiado detalle.

El procedimiento comienza con la generación de la malla base mediante el algoritmo de triangulación del propio software *EXStar* (SHINING 3D, 2024). Esta herramienta analiza la distribución de los puntos en el espacio y crea una superficie que conecta dichos puntos mediante polígonos triangulares. Es importante ajustar correctamente los parámetros de este proceso, como la densidad de malla o la suavización de bordes, ya que una configuración inadecuada puede dar lugar a una geometría deficiente, con ruido o con zonas desconectadas. *EXStar* aplica distintos algoritmos que permiten decimar la malla reduciendo la cantidad de polígonos conservando la forma general del objeto. Este paso debe aplicarse con cuidado, ya que una reducción excesiva puede comprometer detalles relevantes.

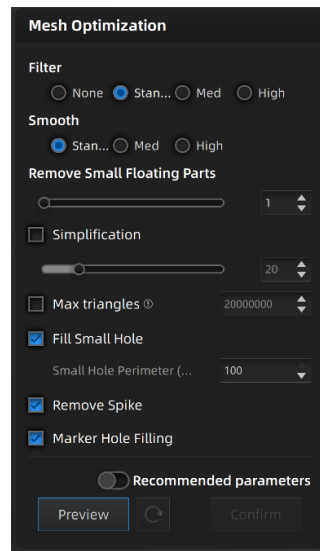


Figura 9: Menú de opciones en EXStar para optimizar la malla. Autoría propia.

Las mallas de alta densidad complican el manejo del modelo en etapas posteriores al sobrecargar el flujo de trabajo. Por ello, aunque en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) se aplicarán optimizaciones adicionales, es imprescindible encontrar un equilibrio previo entre la reducción de polígonos y la conservación de detalles clave, especialmente en las áreas más complejas del vehículo, para asegurar una transición fluida hacia la retopología, la texturización y el mapeo UV.

Una vez generada la malla inicial a partir de la nube de puntos, comienza una fase clave del postprocesado; la limpieza exhaustiva del modelo. Esta etapa es fundamental para garantizar que la geometría final sea utilizable y precisa, libre de errores o imperfecciones que puedan afectar su posterior uso en entornos de modelado o animación.

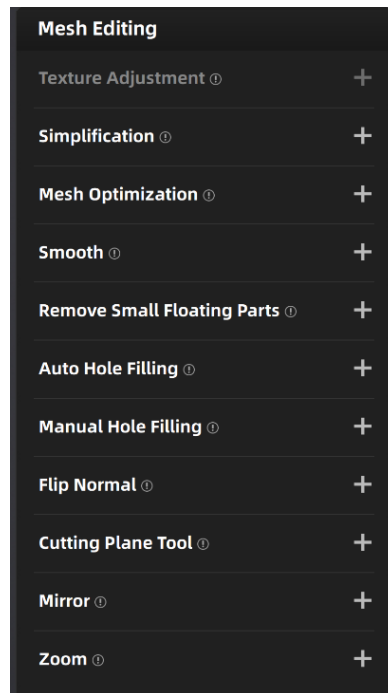


Figura 10: Menú de opciones en EXStar para modificar la malla. Autoría Propia

En primer lugar, es común que durante la triangulación de la nube de puntos se generen artefactos o pequeñas estructuras anómalas. Estas pueden deberse a reflejos durante el escaneo, fallos en la lectura de superficies curvas o problemas de alineación previos. Su forma suele ser irregular o amorfa, y se manifiestan como "picos", "burbujas" o zonas de ruido que no pertenecen a ninguna parte lógica del vehículo. Estas áreas deben ser suprimidas para evitar distorsiones visuales y errores de sombreado en los renders o motores gráficos.

También es habitual encontrar geometría flotante; fragmentos desconectados del cuerpo principal del modelo. Estos suelen ser el resultado de escaneos parciales en los que el escáner captó elementos ajenos al objeto como el suelo, partes del equipo de escaneo, manos del operador o incluso datos mal interpretados durante la triangulación. *EXStar* (SHINING 3D, 2024) permite localizar este tipo de geometría mediante filtros de selección por tamaño o por conectividad, identificando así automáticamente las islas de malla independientes.

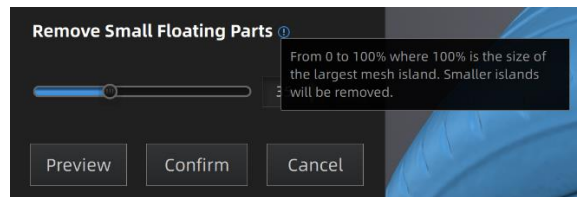


Figura 11: Herramienta para eliminar geometría flotante. Autoría propia.

Uno de los problemas más característicos de los modelos escaneados es la representación no deseada de los marcadores de referencia físicos. Estos pequeños discos reflectantes o adhesivos, colocados sobre la superficie del vehículo durante la captura, son útiles para facilitar la alineación de escaneos múltiples, pero su presencia en la geometría final no es deseada. En la malla, se traducen como bultos o depresiones localizadas, generalmente de forma circular o semicircular. Para eliminarlos, se utilizan herramientas de selección por topología, que permiten seleccionar regiones de la malla con cambios bruscos de forma o relieve. También se puede emplear la selección manual, zona por zona, utilizando pinceles de selección para aislar cada marcador y borrarlo cuidadosamente sin dañar la geometría adyacente.

En algunos casos, cuando el marcador ha afectado demasiado la superficie, no basta con eliminarlo, es necesario reconstruir la zona afectada. Esto se hace rellenando el hueco resultante mediante la función de "Hole Filling", que interpolan una nueva malla a partir de los bordes circundantes. Alternativamente, si se dispone de escaneos de esa misma área sin marcadores, se puede sustituir la región dañada mediante fusión de partes de malla.

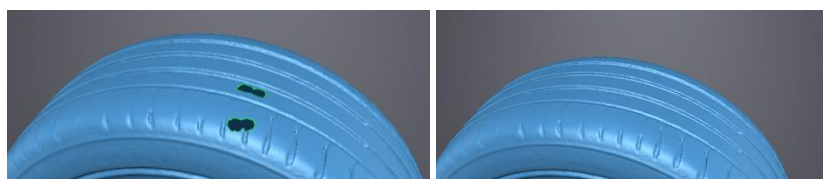


Figura 12: Comparativa de malla tras el uso de la herramienta "Hole Filling ". Autoría propia.

Una vez finalizado el postprocesado, se realiza una validación visual para comprobar la integridad de la malla. Este proceso consiste en rotar y revisar el modelo desde múltiples ángulos, aprovechando la iluminación en tiempo real del software para identificar imperfecciones, zonas con sombreado incorrecto o superficies duplicadas.

-

Finalizado este proceso de revisión, el modelo está listo para su exportación a formato .OBJ, compatibles con softwares de edición como *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025). Durante la exportación, se pueden incluir opciones como el mantenimiento de la escala real, la orientación del modelo en el eje correcto o la inclusión de coordenadas UV básicas si han sido generadas.

2.3 Optimización Poligonal

El modelo más optimizado obtenido en *EXStar* (SHINING 3D, 2024) generó una densidad poligonal superior a los veintiocho millones de triángulos. Aunque este nivel de detalle resulta idóneo para renderizados estáticos de alta calidad, se convierte en un lastre para su uso en tiempo real, tanto por la sobrecarga de memoria como por el incremento en los tiempos de cálculo de shaders y colisiones. Tras una conversación con un experto en crear, modificar e implementar vehículos en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) me explicó que según el propósito de uso del coche, debían tener ciertos límites en el número de polígonos. Si el vehículo iba a estar pensado para ser utilizado en sesiones sin red, los límites están alrededor de 1-2 millones de polígonos, mientras que su uso en un servidor en línea estaba más centrado en 300-600k polígonos. Además, las mallas de este tamaño complican enormemente las operaciones de edición, limpieza de topología y creación de mapeados UVs. Por ello, se decidió trasladar el modelo a *ZBrush* (Maxon, 2022), software reconocido por su capacidad para gestionar de forma estable y eficiente geometrías de gran complejidad (U-Tad, 2024).

En *ZBrush* (Maxon, 2022) se empleó la herramienta “Decimation Master”, que actúa en dos fases: primero, una precuenta de la malla evalúa la distribución de polígonos en función de la curvatura y el detalle superficial, y después aplica un algoritmo de decimación selectiva. Este proceso preserva las aristas y vértices esenciales mientras reduce de manera progresiva los triángulos en áreas de baja importancia geométrica. Se generaron tres variantes optimizadas, una de 1.500.000 polígonos, otra de 750.000 polígonos y finalmente una de 600.000 polígonos. Para cada una de ellas se comprobó la fidelidad visual con respecto al modelo original, centrándose en zonas críticas como el alerón, los nervios y molduras de la carrocería. Esta comparativa visual, permitió determinar que la versión de 600.000 polígonos seguía manteniendo un nivel de detalle suficientemente alto sin comprometer el rendimiento objetivo, dejando margen al aumento de geometría para completar la simetría del vehículo.

Una vez seleccionada la malla en *ZBrush* (Maxon, 2022), esta se exportó al software *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025). En este entorno, el modelo ya era más manejable.

En cuanto a la topología proporcionada por el programa *EXStar* (SHINING 3D, 2024), al estar basada en triángulos, limita la capacidad de realizar flujos de edge loops

-

coherentes, esenciales para una mejor manejabilidad de la malla, afectando positivamente a la hora de hacer el mapeado UV, haciéndolo más eficiente.

Para ello, se consideró convertir la malla a una formada por quads. Ya que trabajar con quads es beneficioso en el modelado 3D por que proporcionan una topología más limpia y predecible, lo cual facilita subdivisiones suaves y reduce deformaciones no deseadas, crucial para mantener la integridad del modelo en animaciones y simulaciones físicas en motores gráficos (Pla, 2017). Además, quads son más eficientes para el modelado porque minimizan las deformaciones y mejoran la calidad visual de las subdivisiones, permitiendo un control más preciso durante el rigging y la animación (Stella, 2025).

Se probaron diversas herramientas dentro del programa *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025). Estas fueron “quadrangulate” y “retopology”, las cuales no dieron un resultado adecuado. Finalmente se optó por probar con una extensión externa conocida como *Quad Remesher* (Exoside, 2023) en Maya. Esta herramienta, transforma en cuestión de segundos una malla triangular compleja en una topología de quads limpia y coherente.

Tras instalar *Quad Remesher* (Exoside, 2023) en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025), con su versión de prueba de 30 días, y varios intentos probando y ajustando los diversos parámetros, el remallado global no rindió la calidad esperada perdiendo un considerable nivel de detalle.

Por otro lado, se contempló la opción de utilizar la herramienta “Polydraw”. Esta herramienta del programa *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) permite generar polígonos directamente sobre una malla base mediante técnicas de proyección y adaptación superficial, facilitando una reconstrucción topológica precisa.

Sin embargo, se optó por no utilizar esta herramienta, ya que, aunque ofrece un control detallado sobre la topología, su implementación puede resultar menos accesible para todos los perfiles de usuario. Además como el vehículo es de superficie sólida no va a experimentar deformaciones. En su lugar, se ha decidido mantener la malla utilizando triángulos, priorizando la simplicidad y manteniendo un nivel de detalle óptimo, con el objetivo de que la metodología permanezca comprensible y manejable para un público más amplio.

2.4 Preparación del modelo para Assetto Corsa

2.4.1 Preparación de la malla

Este proceso requiere una preparación específica del modelo 3D, tanto a nivel geométrico, jerárquico, como su correcta asignación de los materiales, con el objetivo de conseguir un flujo de trabajo óptimo y asegurar una correcta interpretación por parte del motor del juego y evitar errores de compatibilidad durante su ejecución.

-

En primer lugar, es de vital importancia configurar la escena en metros y colocar el objeto centrado en el origen (0,0,0) de las coordenadas (X,Y,Z). Esto permite recrear el lado opuesto utilizando la herramienta de simetría. Una vez tenemos la totalidad del vehículo, habrá que eliminar los elementos asimétricos; chapa de marca y modelo, logo STI, así como los números de la matrícula tanto por razones estéticas como de privacidad.

Para lograr esto, *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) ofrece una serie de pinceles para el suavizado y estiramiento de la malla, permitiendo el alisado y, por tanto, la disolución de las zonas no deseadas. Esta herramienta también resulta útil para corregir ciertas partes irregulares o con picos de altura muy pronunciados, elementos comunes en los modelos generados a partir de escaneos 3D.

Posteriormente, se debe realizar una revisión completa de la malla, buscando y eliminando artefactos innecesarios u objetos que no se verán o tendrán funcionalidad, los cuales aumentan de forma innecesaria el número total de polígonos.

Además, es fundamental verificar que todas las normales de los polígonos estén correctamente orientadas. Las normales determinan la dirección en la que una cara del modelo es visible y cómo interactúa con la luz en el motor gráfico. Si una normal está invertida, esa parte del modelo puede no visualizarse correctamente en el juego o generar errores de sombreado. Este problema es común en modelos escaneados o en objetos que han sido editados extensamente.

Para detectar y corregir este problema en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025), se puede utilizar la herramienta “Mesh Display → Reverse”, que permite invertir las normales seleccionadas manualmente. También se recomienda activar la visualización de normales desde el menú “Display → Polygons → Face Normals” para detectar fácilmente si hay alguna cara orientada hacia el interior.

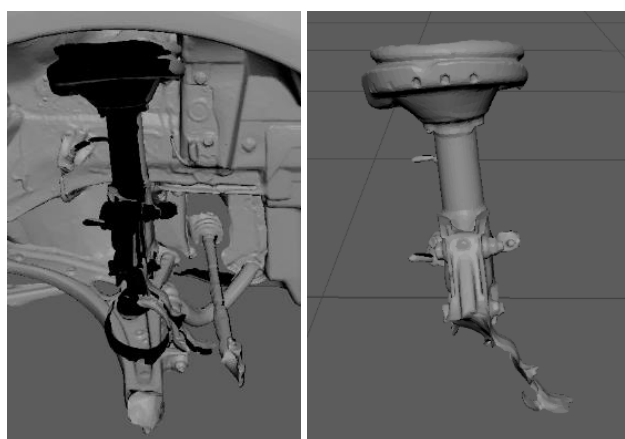


Figura 13: Comparativa de la pieza "Suspensión" con normales invertidas vs. normales reparadas. Autoría propia.

2.4.2 Jerarquización del modelo

Una vez la malla ha sido limpiada y optimizada, el siguiente paso es establecer una jerarquía estructural coherente entre los diferentes elementos del vehículo. Este proceso es fundamental para que *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) interprete correctamente los movimientos, animaciones y comportamientos físicos durante la simulación.

Uno de los primeros aspectos para tener en cuenta es la separación de componentes clave del sistema de rodaje, como los ejes de las ruedas, discos de freno y pinzas de freno, de la carrocería del vehículo. Cada uno de estos elementos debe tratarse como un objeto independiente dentro de la jerarquía, ya que el motor del juego necesita aplicar rotaciones, desplazamientos y animaciones físicas específicas a cada uno.

En este sentido, se construye una jerarquía en la que cada rueda y su correspondiente sistema de suspensión se enlazan mediante controladores jerárquicos. Los elementos se deben asignar a “objetos dummy” con nombres en correspondencia a las nomenclaturas utilizadas en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) para su correcta vinculación a las herramientas del SDK.

WHEEL_LF	Rueda delantera izquierda
WHEEL_RF	Rueda delantera derecha
WHEEL_LR	Rueda trasera izquierda
WHEEL_RR	Rueda trasera derecha

Tabla 4: Jerarquía del ensamblaje "Rueda" nomenclaturizada. Autoría propia.

SUSP_LF	Suspensión delantera izquierda
SUSP_RF	Suspensión delantera derecha
SUSP_LR	Suspensión trasera izquierda
SUSP_RR	Suspensión trasera derecha

Tabla 5: Jerarquía del ensamblaje "Suspensión" nomenclaturizada. Autoría propia.

Estas convenciones de nomenclatura y jerarquía no son opcionales, sino que forman parte de los requisitos técnicos del simulador para asegurar compatibilidad total con su sistema físico y visual.

-

Es importante entender qué componentes deben estar contenidos dentro de cada uno de estos controladores.

En los objetos WHEEL_XX, deben incluirse tanto la rueda, el disco de freno como los tornillos, ya que rotan conjuntamente cuando el vehículo está en movimiento. Si estos objetos no están dentro de esta jerarquía, no girarán y se producirá un fallo visual evidente en la simulación. En cambio, dentro de los objetos SUSP_XX solo debe estar la pinza de freno. Esto se debe a que la pinza no rota con la rueda, sino que permanece estática, sujetando el disco. Al estar conectada a la suspensión, su movimiento se limita al desplazamiento vertical asociado al trabajo del amortiguador y de pivote en la dirección de las ruedas. Esta distribución garantiza que el comportamiento de cada componente sea el correcto desde el punto de vista visual y físico, respetando el funcionamiento real de un sistema de frenos. Finalmente, todos los elementos deben agruparse bajo un nodo padre denominado CHASSIS, que actúa como raíz de la jerarquía del vehículo.

Otro aspecto crítico en esta etapa es el centrado correcto de los pivotes de todos los objetos. El pivote determina el punto de referencia a partir del cual se aplican transformaciones como la rotación y el escalado. El nodo principal CHASSIS debe situarse exactamente en el origen de coordenadas (0,0,0), ya que este es el punto de referencia general del modelo en el juego. Las ruedas y discos deben tener sus pivotes perfectamente centrados en su eje de rotación real, es decir, en el centro de masa local del conjunto rueda-freno. Si el pivote está mal colocado, las ruedas pueden girar de forma errónea o presentar deformaciones visuales al animarse. Las pinzas, al no rotar, deben tener su pivote alineado con la geometría de la suspensión y la rueda.

También es imprescindible respetar la orientación de los ejes locales de cada objeto. En el caso de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), el estándar es; Eje Y hacia arriba, con el Eje Z apuntando al frente del vehículo. Una orientación incorrecta puede provocar errores de rotación o inversiones en el movimiento de las ruedas durante la simulación.

Aunque el interior del vehículo no se haya hecho, se requiere la presencia de un “objeto dummy” llamado STEER_HR, que actúe como punto de referencia para el volante. El editor de *Assetto Corsa*, *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014), espera encontrar este objeto, y su ausencia puede provocar errores durante la importación.

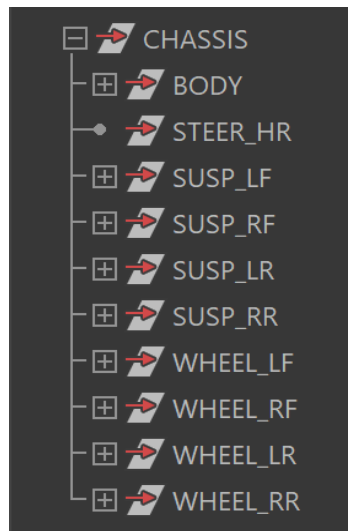


Figura 14: Jerarquía en Maya del ensamblaje y "objetos dummy". Autoría propia.

Adicionalmente, es recomendable modelar e incluir un plano básico denominado “undershadow” que se sitúe en la parte inferior del vehículo. Este plano tiene la función de cerrar visualmente la geometría inferior y, sobre todo, la de proyectar una sombra sólida en el suelo dentro del simulador.

Finalmente, es esencial aplicar las funciones de *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) “Freeze Transformations” y “Delete History” a todos los objetos. Estas operaciones reinician los valores de transformación y eliminan datos residuales, garantizando un comportamiento estable del modelo en el motor del juego.

2.4.3 Mapeado UV

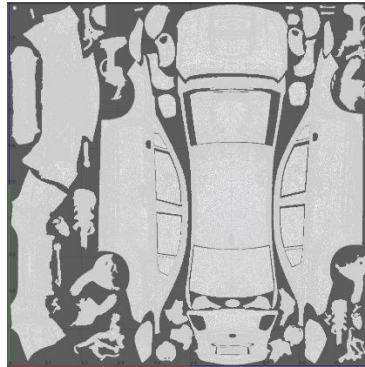
El mapeado UV es un paso fundamental en la preparación del modelo 3D para *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), ya que consiste en desplegar la geometría tridimensional del vehículo sobre un plano bidimensional, lo que permite aplicar las texturas con precisión y coherencia sobre su superficie. Una correcta elaboración del mapeado asegura que los detalles visuales del modelo se reproduzcan fielmente y evita distorsiones o defectos en la textura.

Para realizar un mapeado UV óptimo, se deben considerar los siguientes aspectos:

Por un lado, la malla se divide en islas, que corresponden a diferentes partes del vehículo, como por ejemplo el capó, el maletero, los retrovisores o las llantas. Cada isla representa una sección plana de la superficie que facilita la aplicación precisa de las

-

texturas. Para evitar estiramientos o deformaciones es necesario realizar cortes inteligentes en la malla, especialmente en las áreas curvas o complejas. Estos cortes permiten que la superficie se despliegue de manera natural y que las texturas se ajusten sin distorsión. Para reducir la distorsión utilizaremos la herramienta “UVtoolkit →Unfold UV”.



*Figura 15: Visualización en
Maya del mapeado
UV relajado en modo
"UV Distortion".
Autoría propia.*

La densidad de texel, cantidad de píxeles de textura por unidad de superficie, debe ser homogénea para que todas las partes del vehículo tengan una resolución visual consistente. Sin embargo, en elementos visualmente prioritarios, se puede incrementar la densidad para garantizar un nivel de detalle superior y mayor nitidez. Es importante aprovechar al máximo el espacio disponible en la disposición UV, para mejorar la calidad de las texturas sin desperdiciar recursos. Esto incluye distribuir las islas de forma ordenada y ajustar su tamaño según la importancia visual de cada componente, siempre asegurándose de no superponer las piezas.

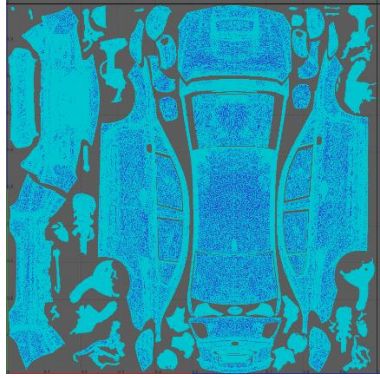


Figura 16: Visualización en Maya del mapeado UV sin superposiciones ni normales invertidas en modo "Shaded". Autoría propia.

En cuanto a la resolución de las texturas, se recomienda utilizar mapas de 4K para las piezas más grandes y visibles, como la carrocería principal, mientras que para otros componentes se pueden usar resoluciones menores, manteniendo siempre la proporción adecuada con la densidad de texel.

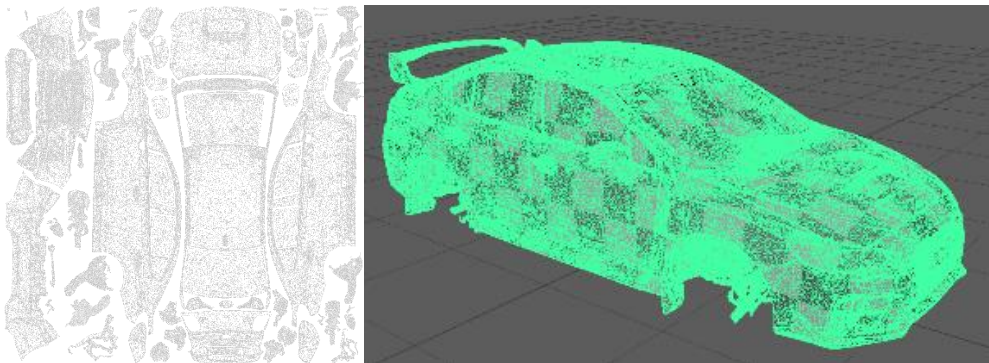


Figura 17: Mapeado UV del chasis proyectado en la malla tridimensional en el modo "Checker Map". Autoría propia.

Además, para facilitar la gestión y el control dentro del motor del juego, es conveniente organizar las UVs en UDIMs separados por grupos funcionales. Por ejemplo, la carrocería puede ocupar un UDIM, mientras que las ruedas y otros accesorios se despliegan en UDIMs distintas. Esto permite aplicar texturas o materiales de forma independiente y mejorar el rendimiento.

La correcta asignación de materiales es otro paso esencial en la preparación de la malla. Aunque en esta etapa no se trabaja todavía con las texturas finales, es fundamental establecer una base de materiales organizada que facilite el trabajo posterior en el editor *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014). Es recomendable seguir una convención de nombres simple pero descriptiva: *M_nombre_de_la_pieza_nº*. Cada parte del modelo debe tener asignado un material base que luego será sustituido o refinado en *ksEditor* mediante los shaders del simulador.

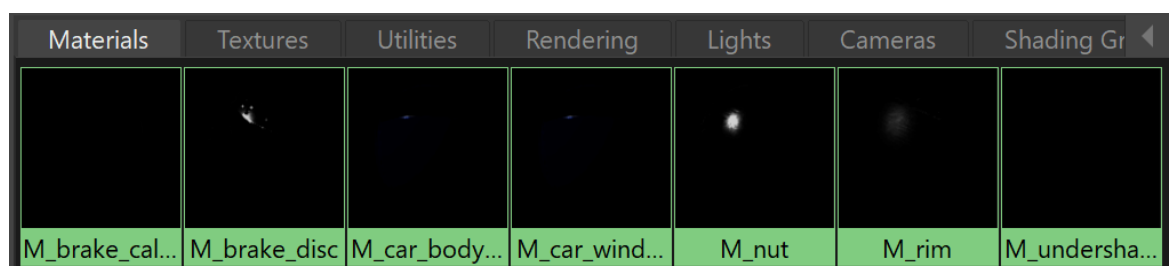


Figura 18: Listado de materiales creados en Maya. Autoría propia.

Una vez completado el mapeado UV y asignados los materiales creados, se debe preparar el modelo para el proceso de texturizado. Para ello, es necesario exportar la geometría en formato .fbx y en paralelo generar una versión high-poly con la herramienta “Smooth”. Esta versión de alta resolución servirá para el bakeo de mapas de normales y otros detalles en herramientas como *Substance 3D Painter* (Adobe, 2023/24). Para facilitar su identificación durante el proceso, se recomienda añadir el sufijo *_HP* al nombre del archivo y del modelo. Esta organización asegura un flujo de trabajo más limpio y eficiente al pasar a la siguiente etapa.

2.4.4 Texturizado

Una vez completado el mapeado UV y preparada la versión high-poly del modelo, el siguiente paso consiste en llevar a cabo el proceso de texturizado. Para ello, se utiliza el software *Substance 3D Painter* (Adobe, 2023/24), una herramienta especializada que permite aplicar materiales PBR (Physically Based Rendering) de forma visual, detallada y precisa. Este tipo de materiales simula cómo la luz interactúa con las superficies, logrando un resultado realista que se mantiene coherente bajo diferentes condiciones de iluminación dentro del motor del juego.

Antes de aplicar los materiales, es necesario realizar un paso previo conocido como bakeo. Este proceso consiste en transferir la información de detalle del modelo high-poly al modelo low-poly mediante la generación de distintos mapas. Entre los más importantes se encuentra el mapa de normales, que permite simular detalles geométricos sin necesidad de aumentar el número de polígonos, así como el Ambient Occlusion, que añade sombreado suave en zonas de mayor densidad poligonal. También se generan otros mapas auxiliares como el de curvatura, útil para efectos de desgaste.

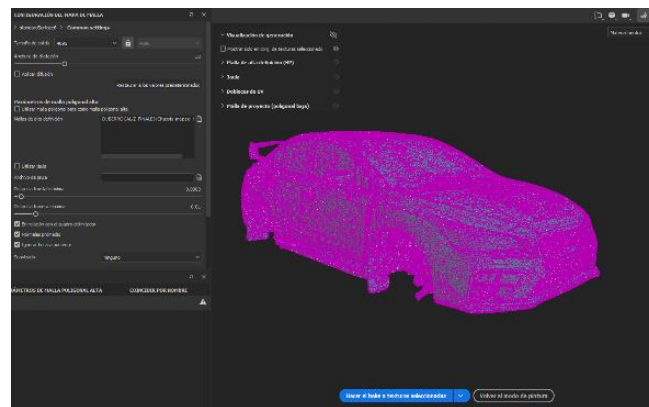


Figura 19: Configuración para el uso de la herramienta "bakeo" en Substance 3D Painter. Autoría propia.

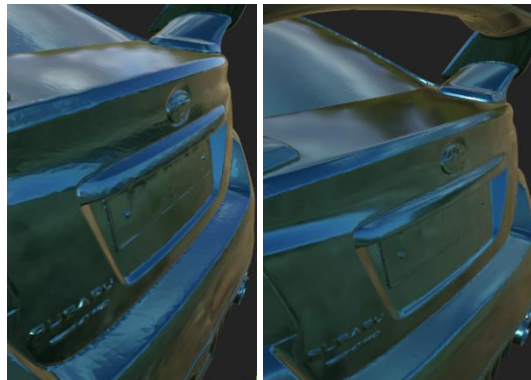


Figura 20: Comparativa del modelo previo y posterior al "bakeo". Autoría propia.

Una vez finalizado el proceso de “bakeo”, se procede a aplicar los materiales y texturas sobre las distintas partes del modelo. Para texturizar el modelo, se comienza aplicando materiales del programa, asignándolos a regiones específicas mediante máscaras. Estas máscaras permiten delimitar con precisión las áreas donde se quiere aplicar

cada material, como la pintura de la carrocería, el plástico de los retrovisores o el metal de las llantas. También existen máscaras inteligentes que aplican efectos como óxido, corrosión o desgaste utilizando los valores de oclusión ambiental generados por el “bakeo”. Utilizando los distritos parámetros del programa se modifican los materiales base aplicados para generar el resultado deseado. Esto se realiza con herramientas como: color, altura, rugosidad, metalizado, etc. Además, se pueden añadir imágenes externas, como logotipos o emblemas del vehículo, a través de capas proyectadas, asegurando su correcta posición sobre el mapa UV. Este enfoque facilita una personalización detallada y coherente con el diseño original del vehículo.

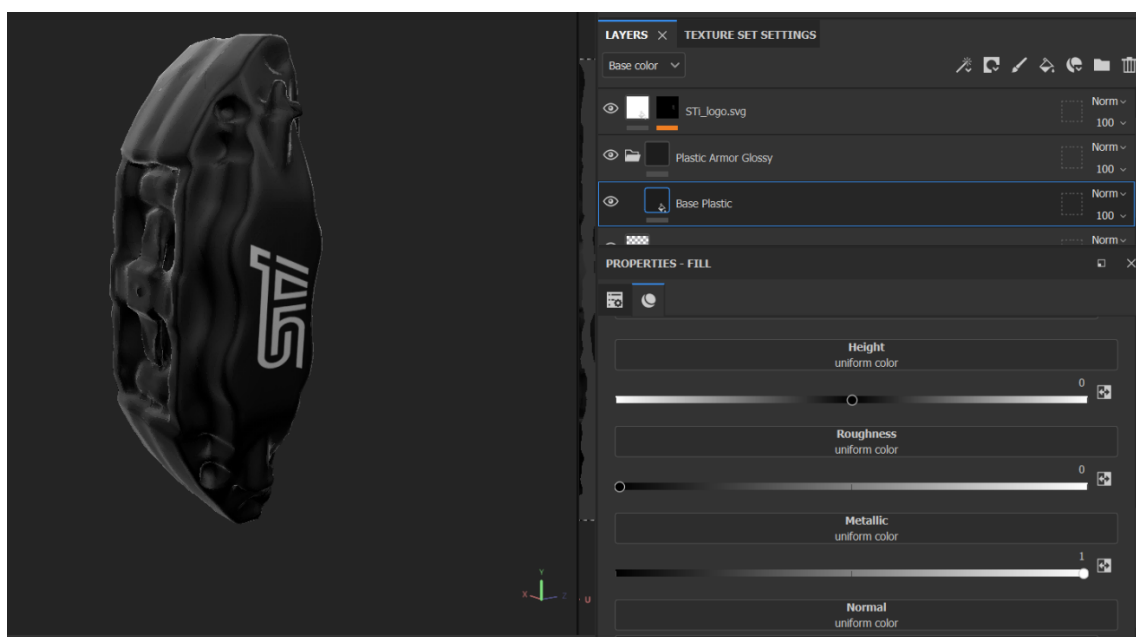


Figura 21: Proceso de texturizado de la pinza de frenos en Substance 3D Painter. Autoría propia.

Para optimizar el proceso de texturizado, especialmente debido a la alta densidad poligonal del modelo, se recomienda trabajar las piezas por separado. Es suficiente texturizar un solo ejemplar de cada elemento repetido ya que los idénticos utilizan el mismo mapeado, y por lo tanto se les puede aplicar el mismo material.



Figura 22: Renderizado de las texturas aplicadas a cada parte del vehículo. Autoría propia.

Una vez finalizado el proceso de texturizado, para exportar las texturas, *Substance 3D Painter* (Adobe, 2023/24) genera una serie de archivos .png de las texturas proyectadas en el mapa UDIM. Entre estas se puede encontrar: “Base Color”, “Normal”, “Roughness”, “Metallic” y “Ambient Occlusion”. Es importante tener en cuenta que el mapa de normales debe exportarse con la convención de espacio “DirectX” ya que es el estándar requerido por *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014).

Con el objetivo de optimizar el número de texturas y reducir la carga de procesamiento dentro del juego, se unifican algunos de estos mapas en un único archivo denominado “ORM” (Oclusión, Rugosidad, Metálico). Este archivo reúne tres mapas en los canales “RGB” (Rojo, Verde, Azul) de una misma imagen: el canal “R” almacena el mapa de “Ambient Occlusion”, el canal “G” el mapa de “Roughness” y el canal “B” el de “Metallic”. Para crear el mapa en Adobe Photoshop (Adobe, 2021), es necesario combinar los tres mapas de los canales RGB en una única imagen. En primer lugar, se deben abrir por separado los mapas en escala de grises de “Ambient Occlusion”, “Roughness” y “Metallic”. A continuación, se crea un nuevo documento con las mismas dimensiones que los mapas originales y con modo de color “RGB”.

Desde la pestaña Canales, se selecciona los canales “RGB” y se les asigna sus correspondientes mapas de texturas. Tras asegurarse de que los tres canales están activos, se vuelve a la vista en color RGB para comprobar la correcta combinación de los mapas.

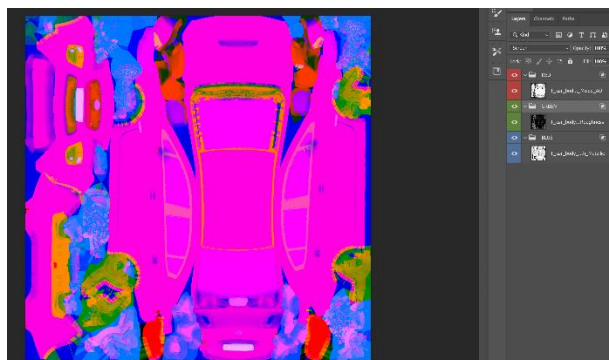


Figura 23: Creación "ORM" del chasis en Adobe Photoshop. Autoría propia.

Por último, se guarda la imagen, en formato .png sin compresión, siguiendo la convención de nomenclatura: $T_nombre_de_la_pieza_n^o$, garantizando así la calidad y compatibilidad con *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014). En caso de no contar con un mapa de “Ambient Occlusion”, se puede utilizar una imagen blanca en el canal rojo, lo que indica la ausencia de oclusión ambiental.

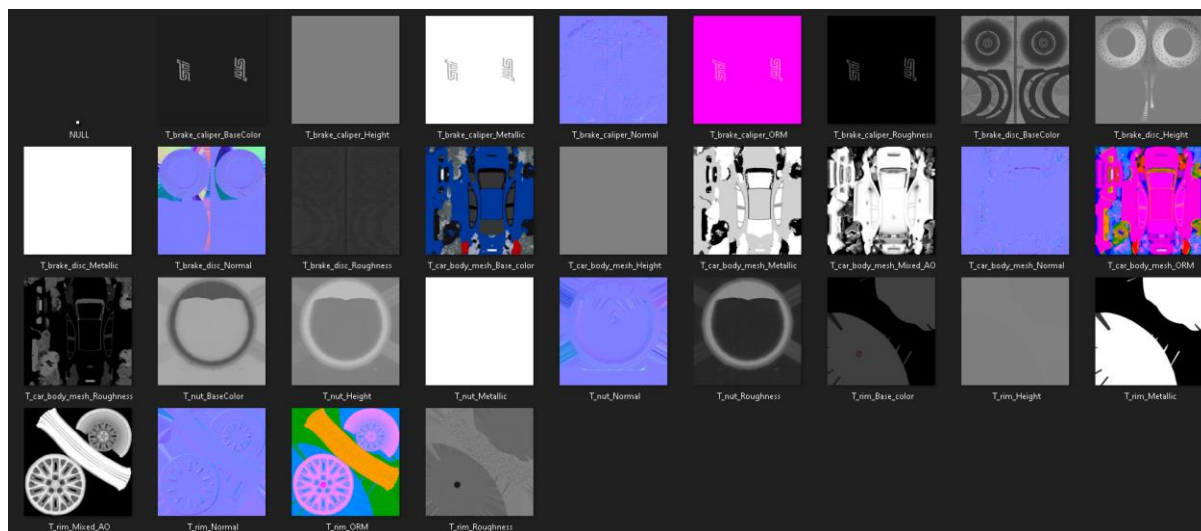


Figura 24: Texturas del vehículo. Autoría propia.

2.4.5 Creación del archivo .kn5 a través de ksEditor

Una vez finalizado el modelo y sus respectivas texturas, es necesario convertirlo al formato .kn5. Este formato es interpretado por el motor de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) y contiene tanto la geometría como la asignación de materiales y rutas de textura. Para realizar esta conversión se utiliza ksEditor (Kunos Simulazioni, 2014), el editor oficial incluido en el SDK de *Assetto Corsa*, localizado en la ruta “...\AssettoCorsa\sdk\editor\ksEditor.exe”.

El vehículo ya finalizado debe exportarse en formato FBX 2014/2015. Este formato es compatible con *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014) y garantiza una correcta interpretación de la jerarquía, los pivotes y los materiales. Una vez exportado, se importa en ksEditor mediante “File → Import FBX”, lo que mostrará el vehículo sin texturas y toda su jerarquía del modelo en el panel izquierdo. En esta fase es fundamental revisar que todos los objetos y sus respectivas jerarquías conserven su nomenclatura correcta, que estén ubicados en su debida posición y que mantengan su asignación de materiales.

Al intentar importar el vehículo a *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014) saltó un error indicando que límite máximo de polígonos por objeto es de 65.536. Si alguna malla supera este umbral, debe ser dividida en partes más pequeñas. Gracias a una correcta

organización previa del mapeado UV, esta separación se pudo realizar fácilmente. Para ello, se seleccionan las caras deseadas desde el editor UV, se utiliza la herramienta “Edit Mesh → Detach” para descoser las caras de la malla y luego “Mesh → Separate” para separar el objeto, creando dos partes. A cada nueva pieza se le asigna su respectivo nombre, asegurando que mantenga su correcta posición en la jerarquía.

Con el modelo ya cargado, el siguiente paso consiste en asignar a cada malla un “shader” PBR compatible con el motor gráfico del simulador. Para la mayoría de piezas, se utiliza el “shader” “ksPerPixelMultiMap”, el cual permite la asignación de múltiples mapas como el difuso, correspondiente al “base color”, el mapa de normales, y el “ORM”. En el caso de superficies especiales como los cristales, se debe emplear el “shader” “ksGlass”. Este material incluye parámetros específicos para reflexión, tono y transparencia.

Desde el panel derecho se selecciona el objeto y desde el izquierdo se aplican las texturas correspondientes en los canales definidos, verificando que las rutas sean correctas y que las imágenes carguen adecuadamente.

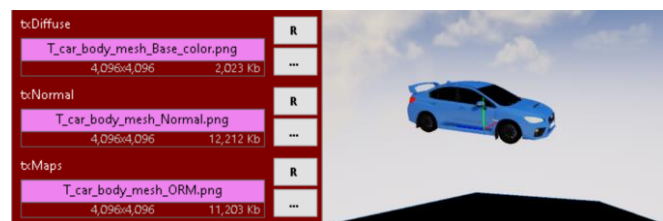


Figura 25: Modelo cargado en ksEditor con sus texturas recién aplicadas. Autoría propia.

Para optimizar la apariencia visual del material asignado, es necesario ajustar cuidadosamente los parámetros de los “shaders”. Estos ajustes permiten mejorar la calidad del sombreado y lograr un acabado más realista, especialmente en superficies complejas como el cristal o la pintura de la carrocería.

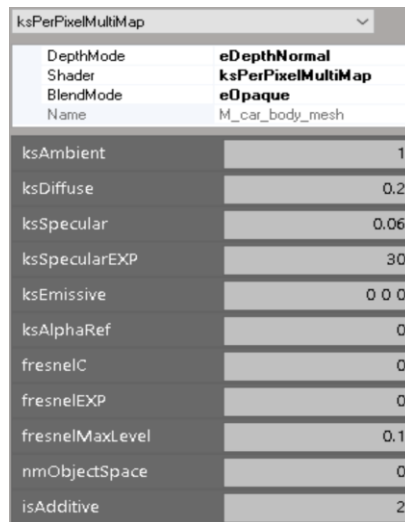


Figura 26: Ajustes del "shader":
"ksPerPixelMultiMap"
aplicado a
"M_car_body_mesh".
Autoría propia.

Finalmente, el material del *undershadow plane* se debe activar la opción "cast shadow ON" en el panel de propiedades del objeto dentro de *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014). De esta manera, el modelo proyectará sombras dinámicas sobre la pista y otros elementos del entorno, mejorando la integración visual del vehículo en el simulador.

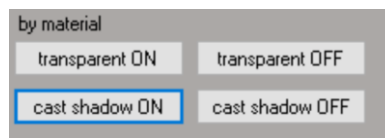


Figura 27: Opción "cast shadow ON" activada. Autoría propia.

Una vez completada la configuración de "shaders" y texturas, se procede a exportar el archivo final desde "File → Save KN5 → Car". Durante esta exportación, *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014) también genera un archivo .ini adicional que almacena metadatos. Es importante conservar este archivo junto al *vehículo.kn5*, ya que es requerido por el simulador para cargar correctamente el modelo. Para guardar las rutas relativas a las texturas aplicadas en *ksEditor* se debe crear un archivo .persistence utilizando "File → Save Persistence".

-

Antes de cerrar *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014), se recomienda revisar el panel de consola situado en la parte inferior de la interfaz. Este panel muestra advertencias y errores relacionados con UVs incompletas, texturas no encontradas o nombres inválidos. Ignorar estos mensajes puede provocar errores gráficos o incluso impedir la carga del coche en el simulador, por lo que su revisión es una etapa crítica en el proceso de exportación.

2.5 Importación al entrono virtual

Una vez generado el archivo .kn5 y completada la configuración en *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014), el siguiente paso consiste en integrar el vehículo dentro del entorno del simulador *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014). Para ello, es necesario respetar la estructura de carpetas establecida por el juego, así como realizar las configuraciones correspondientes mediante herramientas externas como *Content Manager* (Jusupov, 2025). Este proceso permite que el modelo 3D se comporte correctamente dentro del simulador, reproduciendo tanto las físicas como los efectos visuales y de sonido asociados al vehículo.

2.5.1 Creación de la carpeta del vehículo

Para que *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) pueda reconocer y cargar un nuevo vehículo, es necesario crear una carpeta específica dentro de su sistema de archivos. Esta debe ubicarse en la ruta "...\\AssettoCorsa\\content\\cars\\", y debe llevar un nombre único y descriptivo, en este caso siendo "subarusti".

Posteriormente, para la configuración de las físicas, se toma de base un vehículo del pack oficial diseñado por *Kunos Simulazioni* incluido en el contenido original de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014). Esta elección garantiza una total compatibilidad con el motor del simulador y asegura el cumplimiento de las buenas prácticas en el desarrollo de mods, evitando el uso no autorizado de contenido creado por terceros.

Dado que *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) no incluye ningún modelo de Subaru en su contenido oficial, se optó por seleccionar como referencia el vehículo con las dimensiones más similares al modelo escaneado, este es el *Alfa Romeo Giulietta QV*. Esta elección se basó en la necesidad de contar con una base compatible desde el punto de vista dimensional y estructural, asegurando una integración precisa en el simulador. Desde la UI del Giulietta en *Content Manager* (Jusupov, 2025), utilizando la herramienta "unpack data", se descomprimen las carpetas del vehículo en el directorio.

-

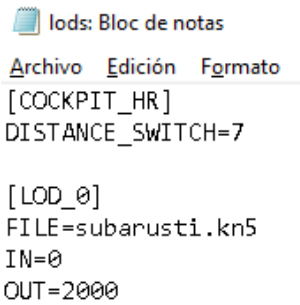
Los archivos de esta carpeta se deben duplicar a la de “subarusti”. Esta metodología presenta un valor añadido, ya que permite introducir en el simulador un vehículo no disponible en la versión básica del juego, ampliando así su catálogo de forma coherente y respetuosa con las directrices oficiales de desarrollo.

Posteriormente, se eliminan los archivos visuales .kn5 del vehículo original y se reemplazan por el archivo .kn5 recién generado en *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014) junto con su respectivo archivo .ini. Los contenidos de la carpeta “skins” deben ser eliminados, ya que estos son exclusivos para el modelo previo. Sin embargo se debe mantener la carpeta “skins” dejando así la estructura del directorio intacta y disponible en caso de querer incorporar nuevas texturas.

2.5.2 Modificaciones para Content Manager

Una vez estructurada la carpeta del vehículo y reemplazado el modelo visual por la versión generada en *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014), es necesario adaptar los archivos de configuración para que *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) y *Content Manager* (Jusupov, 2025) reconozcan el coche como un modelo independiente.

El primer archivo para modificar es “lods.ini”, ubicado dentro de la carpeta “data”. Este archivo determina el nivel de detalle (Level of Detail, LOD) del modelo utilizado según la distancia del observador al vehículo para optimizar el rendimiento gráfico en sesiones multijugador. En caso de contar únicamente con un modelo visual de alta resolución, como en este caso, es necesario eliminar las entradas adicionales y conservar únicamente “LOD_0”. Es esencial mantener el valor de “IN” en 0 ya que esta es la distancia mínima que asegura que el vehículo cargue y ajustar el valor de “OUT” a un número elevado (<1000) para garantizar que el juego no de errores al no poder cargar modelos con niveles de detalle inferior (LOD_1 o siguientes) asociados a distancias lejanas. En la entrada “FILE” del “LOD_0” debe reemplazarse el nombre del archivo .kn5 original por el del nuevo modelo.

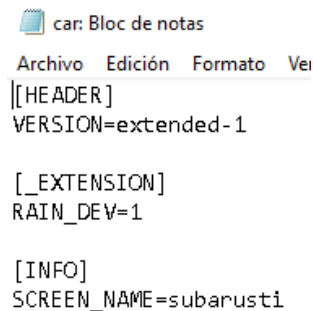


```
Archivo Edición Formato
[COCKPIT_HR]
DISTANCE_SWITCH=7

[LOD_0]
FILE=subarusti.kn5
IN=0
OUT=2000
```

*Figura 28: Archivo "lods"
adaptado.
Autoría propia.*

A continuación, se debe modificar el archivo “car.ini”, también en la carpeta “data”. Este archivo contiene información básica del vehículo, como su nombre visible dentro del simulador. En la sección [INFO], se edita el parámetro SCREEN_NAME para asignar un nombre personalizado.



```
Archivo Edición Formato Ver
[[HEADER]
VERSION=extended-1

[_EXTENSION]
RAIN_DEV=1

[INFO]
SCREEN_NAME=subarusti
```

*Figura 29: Archivo "car"
adaptado.
Autoría propia.*

Para complementar la personalización, se accede a la carpeta “ui”, donde se encuentra el archivo “ui_car.json”. Este fichero permite definir la marca, nombre comercial, autor, descripción, año de fabricación y otras características del vehículo. Su correcta edición facilita la identificación del coche dentro de *Content Manager* (Jusupov, 2025) y mejora la experiencia del usuario.

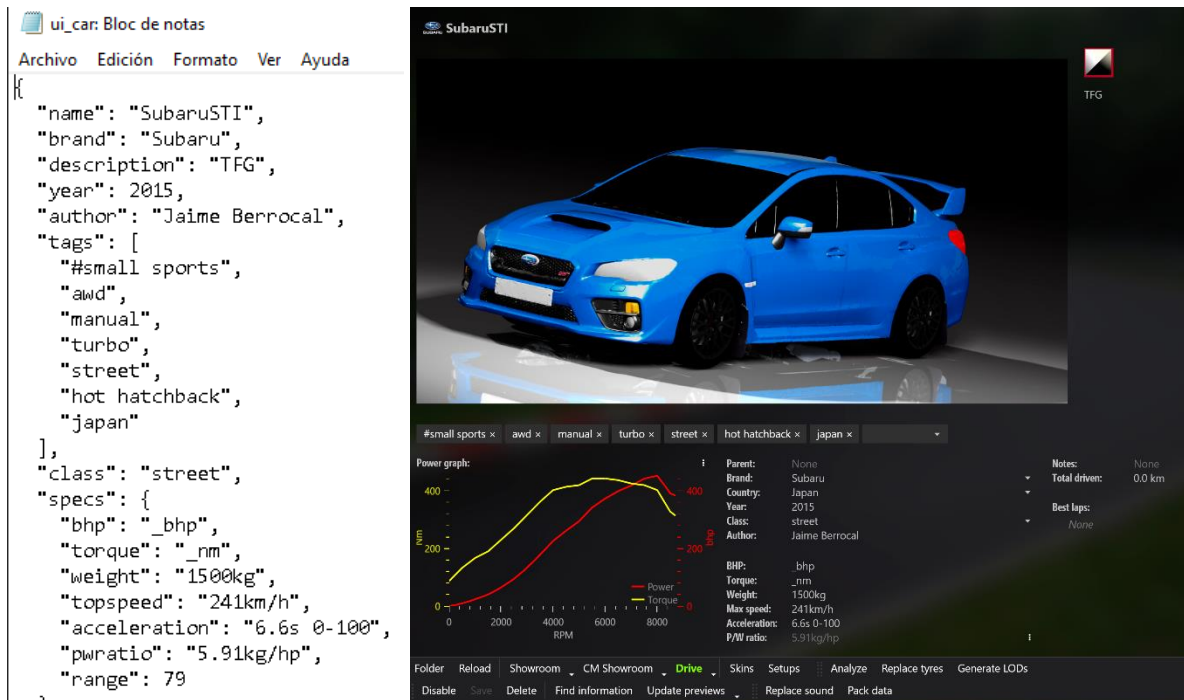


Figura 30: Archivo "ui_car" adaptado e interfaz resultante en Content Manager. Autoría propia.

Con esta configuración cargada, se puede visualizar el vehículo en el visor tridimensional de *Content Manager* (Jusupov, 2025) "CM Showroom". Es fundamental comprobar que las ruedas están correctamente alineadas y que rotan según la dirección esperada (ver Figura 31). Dado que los archivos de físicas provienen de un chasis diferente, es habitual que las posiciones de las ruedas no coincidan exactamente con el nuevo modelo. Para corregirlo, se deben editar manualmente las coordenadas en el archivo "suspensions.ini", localizado en la carpeta "data", ajustando los valores de altura, separación y desplazamiento longitudinal (ver Figura 32).

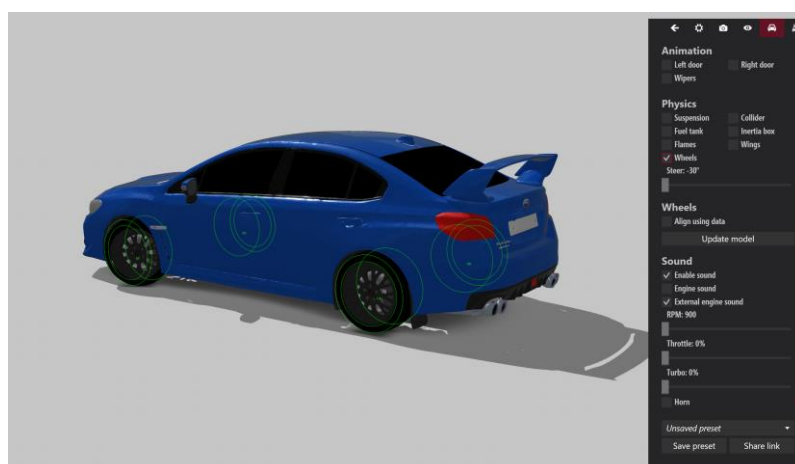
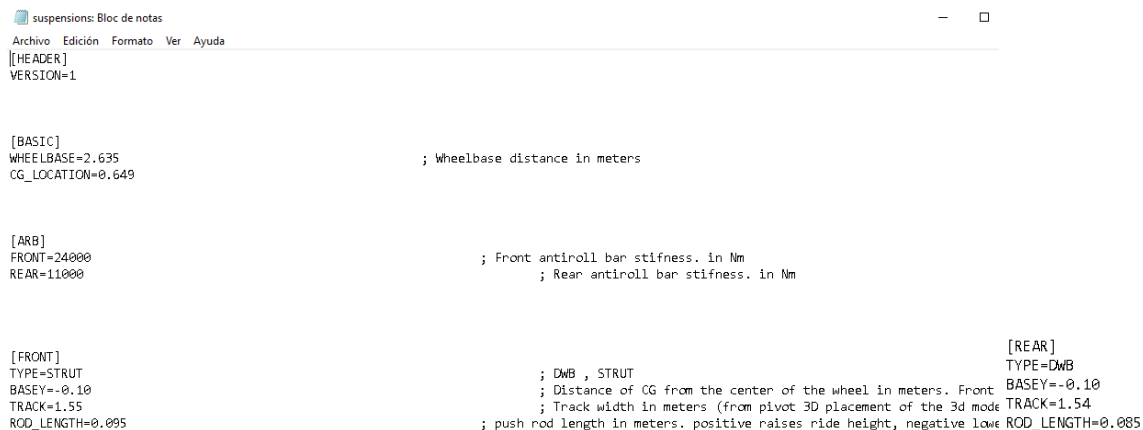


Figura 31: Visualización y comprobación en "CM Showroom". Autoría propia.



```

suspensions: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
[[HEADER]
VERSION=1

[BASIC]
WHEELBASE=2.635 ; Wheelbase distance in meters
CG_LOCATION=0.649

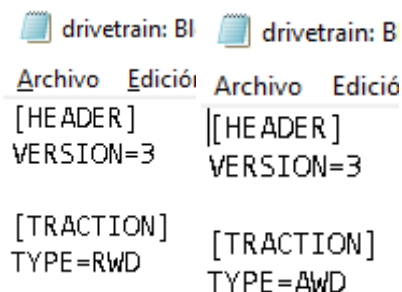
[ARB]
FRONT=24000 ; Front antiroll bar stiffness. in Nm
REAR=11000 ; Rear antiroll bar stiffness. in Nm

[FRONT]
TYPE=STRUT ; DWB , STRUT
BASEY=-0.10 ; Distance of CG from the center of the wheel in meters. Front
TRACK=1.55 ; Track width in meters (from pivot 3D placement of the 3d model)
ROD_LENGTH=0.095 ; push rod length in meters. positive raises ride height, negative lowers it
[REAR]
TYPE=DWB
BASEY=-0.10
TRACK=1.54
ROD_LENGTH=0.085

```

Figura 32: Archivo "suspensions" adaptado. Autoría propia.

Adicionalmente, en la carpeta "data", el archivo "drivetrain.ini" permite modificar el tipo de tracción. En este caso, dado que el coche de referencia (RWD) posee tracción trasera, y el modelo escaneado corresponde a un vehículo de tracción total (AWD), es imprescindible realizar el ajuste para garantizar un comportamiento dinámico acorde con las especificaciones reales del Subaru.





 drivetrain: BI	 drivetrain: B
<u>Archivo</u> <u>Edición</u>	<u>Archivo</u> <u>Edición</u>
[HEADER] VERSION=3	[HEADER] VERSION=3
[TRACTION] TYPE=RWD	[TRACTION] TYPE=AWD

Figura 33: Modificación del archivo "drivetrain". Autoría propia.

2.5.3 Carga del vehículo en el juego y últimas modificaciones

Una vez que el modelo con sus texturas y configuración han sido integrados correctamente, el vehículo está listo para ser cargado en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014).

Al iniciar una sesión de prueba es común que aparezcan algunos errores en la consola, como el mensaje "Cannot find FUEL_INDICATOR target". Este error indica que el simulador busca elementos referenciados en la configuración que no están presentes en el modelo, especialmente en casos donde no se ha creado un interior o ciertos elementos auxiliares. Para evitar estos errores, se recomienda eliminar o comentar

-

estas referencias en los archivos de configuración, impidiendo que el juego intente cargar elementos inexistentes.

Una vez que el modelo se visualiza y funciona correctamente dentro del juego, es necesario ajustar la posición del “collider” para que se adapte a las dimensiones reales del vehículo. Se recomienda abrir el vehículo en CM Showroom en segundo plano y el archivo “colliders.ini” de la carpeta “data” en primer plano para realizar los ajustes en tiempo real. Este proceso es fundamental para que las colisiones sean precisas y el comportamiento físico sea correcto durante la simulación.

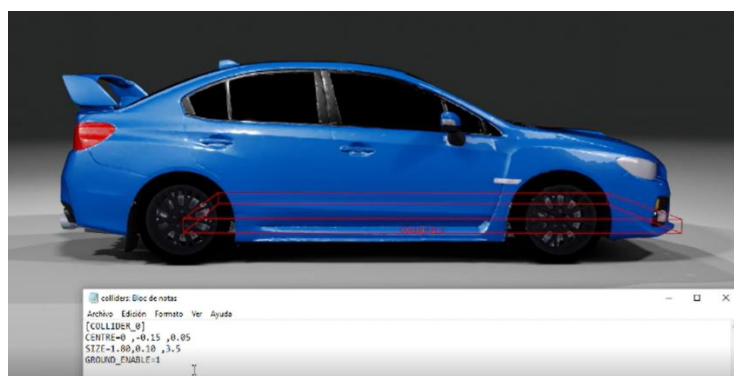


Figura 34: Captura de pantalla ajustando los valores del collider. Autoría propia.

Para mejorar la apariencia y realismo visual, se puede recurrir a Custom Shaders Patch (CSP), una extensión muy popular en la comunidad de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014). CSP permite definir efectos visuales avanzados mediante scripts. Para integrarlos, dentro de la carpeta del vehículo es necesario crear una nueva carpeta llamada “extensions” donde se ubicará el archivo con los datos con la nomenclatura “ext_config.ini”. Algunos ejemplos de estos efectos son la iluminación emisiva de faros e indicadores, la vibración de tubos de escape o la iluminación ambiental. Para ello, es imprescindible asociar correctamente los nombres de las mallas donde se quiera aplicar el efecto a las funciones correspondientes dentro del script. Posteriormente se recomienda ajustar los valores de cada función para conseguir el resultado deseado.

<pre>[EMISSIVE_BRAKE...] NAME=car_left_tail_light_mesh,car_right_tail_light_mesh COLOR=10,10,10, 15 FALLBACK_HEADLIGHTS_COLOR = 50, 5, 5 LAG=0.3 SIMULATE_HEATING=1 LOCATION=NONE CAST_LIGHT=1 CLUSTER_THRESHOLD=0.5</pre>	<pre>[EMISSIVE_LIGHT...] NAME=car_left_head_light_mesh,car_right_head_light_mesh BIND_TO_HEADLIGHTS=1 COLOR=200,200,200, 0.4 LAG=0.3 SIMULATE_HEATING=1 LOCATION=NONE CAST_LIGHT=1 CLUSTER_THRESHOLD=0.5</pre>
--	--


```
-----VIBRAR ESCAPE-----
[SHAKING_EXHAUST...]
MESHERS = car_exhausts_mesh
POINT_0 = 1, 2, 3
POINT_0_RADIUS = 1
POINT_0_EXP = 1
POINT_0_SCALE = 0.3, 0.6, 0.4
```

Figura 35: Efectos de CSP aplicados a las mallas con valores ajustados. Autoría propia.

Por último, se recomienda realizar una validación completa del vehículo cargado en pista para verificar su comportamiento dinámico, la correcta proyección de las sombras y texturas así como posibles errores gráficos.

Siguiendo estos pasos, el vehículo escaneado será finalmente funcional dentro del simulador, ofreciendo un acabado visual fiel y una integración técnica sólida.



Figura 36: Metodología completada. Autoría propia.

3 Análisis de resultados

En este apartado se examinarán de manera crítica y objetiva los resultados obtenidos tras la realización y aplicación de la metodología. Debido a la ausencia de valores cuantitativos se evaluarán todos los aspectos del desarrollo de forma cualitativa.

Esto consistirá en analizar la fidelidad geométrica y eficiencia poligonal del proceso de escaneado 3D para evaluar el rendimiento del escáner *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022) y por ende la selección de este equipo de escaneado.

Igualmente se estudiará el proceso de optimización de la malla poligonal, de texturizado y de integración en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014); y se valorará la calidad de los resultados obtenidos en cada una de las etapas.

Asimismo, se identificarán y examinarán tanto los puntos fuertes como las limitaciones globales de la metodología desarrollada en este proyecto para juzgar la accesibilidad, eficacia y reproducibilidad de esta misma.

3.1 Calidad y fidelidad del escaneo 3D

En la fase de captura tridimensional el escáner *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022) demostró ser capaz de capturar la geometría del Subaru WRX STI 2015 con un nivel de detalle adecuado para su virtualización gracias a su resolución de hasta 0,1 mm. Esto permitió capturar y reproducir de forma fiel las superficies con contornos, detalles finos como nervaduras y los elementos más complejos.

Sin embargo, esto no fue posible únicamente por las especificaciones del equipo de escaneado, ya que se presentaron diversos desafíos al intentar capturar zonas reflectantes, translúcidas o con escasez de geometría natural en superficies planas. El uso híbrido de referencias geométricas y marcadores resultó imprescindible para la construcción de la malla global. Además, la pulverización de una solución 80% alcohol y 20% polvos de talco, recomendada en la entrevista con el profesional del sector del escaneado tridimensional, en las superficies reflectantes y traslúcidas permitió al escáner capturar áreas fuera de su alcance. Adicionalmente, fue importante la decisión de trasladar este proceso a un entorno interior con iluminación controlada para eliminar variables y aportar coherencia al proceso.

Inversamente, en secciones hipercomplejas como los elementos del tren trasero y delantero la ideación y aplicación del método de adaptación de velocidad de barrido fue esencial para permitir el alineamiento de estas secciones con sus colindantes. Durante el proceso de escaneado se detectaron errores de duplicación de geometría en retrocesos de barrido que también fueron resueltos mediante el perfeccionamiento del

-

método de escaneo, realizando barridos continuos y verificando los resultados en tiempo real.

El escaneado de un objeto con el tamaño y complejidad como la de un vehículo es un proceso extenso que requiere mucho tiempo. Debido a esto, se optimizó la eficiencia del mismo reduciendo la superficie escaneada a la mitad. Esta decisión se evaluó estimando el tiempo que consumiría utilizar la herramienta de simetría y corregir los detalles asimétricos en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) posteriormente respecto al de realizar el escaneo completo del vehículo. Esto resultó exitoso ya que el escaneo de medio vehículo consumió ampliamente más tiempo que el postprocesado en Maya. A pesar de esto, debido a restricciones de tiempo se tuvo que optimizar aún más el uso del mismo. Considerando los diferentes factores que influyen en la validez y calidad de este trabajo y su repercusión en los objetivos del proyecto, se llegó a la conclusión de que escanear el interior del vehículo sacrificaría los aspectos con más impacto. Por lo tanto se tomó la decisión de no escanearlo. Todas estas decisiones permitieron completar el proceso de escaneado en un plazo de tiempo razonable y consecuentemente optimizar la metodología.

En *EXStar* (SHINING 3D, 2024) mediante triangulación el postprocesado del escaneo generó una malla de más de 28 millones de polígonos. Está siendo la versión más optimizada tras el uso de la función de simplificación que no sacrificase detalle. Utilizando las herramientas del programa disponibles en la sección de postprocesado se consiguió eliminar el 100% de caras desconectadas y restos del entorno de escaneo con filtros de geometría flotante, además de cerrar el 100% de los huecos con la herramienta “Hole Filling”. No obstante los marcadores utilizados generaron deformaciones que el software no consiguió corregir. Ahora bien, después de una revisión manual de la malla se detectó que el número de estas imperfecciones era escaso. Por este motivo se decidió trasladar el postprocesado a un software externo más especializado en el tratamiento de objetos 3D. En primer lugar se optó exportar el modelo a *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025). Desafortunadamente, la densidad poligonal siendo muy elevada impidió el uso el funcionamiento correcto del software. Ante este inconveniente, se investigó la herramienta más apropiada para la reducción de densidades poligonales notables, concluyendo que ZBrush (Maxon, 2022) era la opción óptima.

Una vez importado en ZBrush (Maxon, 2022), con la función “Decimation Master”, se generaron tres modelos distintos de 1.5M, 750k y 600k polígonos respectivamente. Se conservó el modelo de 600k, ya que este se encontraba en el límite entre mantener una diferencia visual casi imperceptible con los modelos superiores y respetar los rangos recomendados para *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014). Esta etapa de optimización poligonal cumplió con la premisa de equilibrar detalle y rendimiento. Aunque se valoró la conversión a quads para facilitar la etapa de mapeado y texturizado, las herramientas internas de *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) y la extensión de software

-

“*Quad Remesher* (Exoside, 2023)” no rindieron un resultado aceptable. Para conservar la accesibilidad y reproducibilidad de la metodología se descartó la alternativa de realizar una retopología manual.

3.2 Preparación del modelo para su integración en Assetto Corsa

Antes de adaptar el modelo tridimensional al entorno del simulador, fue necesario llevar a cabo el mapeado UV y el texturizado del mismo, dos procesos esenciales para garantizar tanto su legibilidad por parte del motor gráfico como su correcta visualización en tiempo real. Esta fase se inició con la generación de coordenadas UV a través de *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025), utilizando una estrategia de corte y despliegue que equilibrara la continuidad en las zonas más visibles del modelo con la eficiencia en el uso del espacio del UDIM. Se emplearon funciones de “Checker Maps” en Maya para verificar visualmente la correcta proporción y evitar distorsiones en las texturas futuras. A pesar de las limitaciones inherentes al modelo triangulado, el despliegue fue satisfactorio y no hubo solapamientos.

En cuanto a la optimización poligonal, se aplicaron criterios objetivos de simplificación que respetaron el equilibrio entre detalle visual y rendimiento computacional. La elección del modelo de 600k polígonos como versión final para el simulador fue coherente con los requerimientos técnicos de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), y permitió mantener una experiencia de usuario estable y visualmente satisfactoria. A pesar de que se descartaron soluciones más avanzadas como la conversión a quads o la retopología manual, estas decisiones se tomaron de forma razonada para preservar la accesibilidad del flujo de trabajo, reforzando uno de los valores fundamentales del proyecto: su reproducibilidad por parte de otros usuarios con recursos limitados.

La decisión de mantener una malla triangulada y con alta densidad poligonal implicó una mayor complejidad en términos de tiempo de trabajo. La manipulación de una malla con cientos de miles de triángulos supuso una carga significativa en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025), ralentizando las operaciones de selección, edición y creación del mapeado. Sin embargo, esta inversión de tiempo resultó ventajosa en etapas posteriores, particularmente durante la segmentación del vehículo en piezas individuales para su exportación a *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014). Dado que impone un límite técnico de 65k polígonos por pieza, el hecho de contar con una malla ya subdividida en islas facilitó la tarea de dividir el modelo sin comprometer su continuidad. Así, se logró mantener una estructura ordenada y compatible, respetando las restricciones técnicas sin sacrificar fidelidad visual ni integridad del modelo además de convertirse en un paso esencial para la metodología. La inversión de tiempo en realizar un buen mapeado también afectó en la calidad del bakeo.

-

Una vez completado el mapeado UV, el modelo fue exportado a *Substance 3D Painter* (Adobe, 2023/24), donde se realizó un bakeo al modelo de baja proyectando los detalles del modelo de alta densidad. Este proceso permitió generar mapas de normales, curvatura, rugosidad y oclusión ambiental que aportaron profundidad visual sin incrementar el conteo poligonal. Aunque el acabado visual no es prioritario para cumplir los objetivos, que principalmente se basan en comprobar la viabilidad de todo el flujo de trabajo, se logró un resultado limpio y verosímil.

Completados el mapeado y el texturizado, se inició la preparación estructural del modelo para su integración en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014). Para ello, se construyó una jerarquía de nodos en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) respetando la estructura establecida por el SDK del simulador, con un nodo principal y subnodos correspondientes a las ruedas, suspensión y volante. Esta etapa exigió precisión en la ubicación de los pivotes y el respeto del sistema de coordenadas de *Assetto Corsa*.

Con la estructura definida, el modelo fue exportado en formato .fbx (versión 14-15) y procesado en *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014). Durante este paso se asignaron los materiales base a las distintas partes del modelo, activando propiedades como el proyectado de sombras y el tipo de shader adecuado para cada superficie. El modelo respondió correctamente a las configuraciones asignadas y no se detectaron errores estructurales ni de compatibilidad con el entorno de *ksEditor*. No obstante, crear un rendimiento visual de alta calidad sin conocimiento previo de los ajustes de valores de la herramienta resultó fuera del alcance y los objetivos.

3.3 Integración del modelo en Assetto Corsa

Una vez completada la exportación del modelo en formato .kn5, se procedió a su integración en el entorno de simulación utilizando *Content Manager* (Jusupov, 2025). Se configuraron los archivos .ini necesarios para el correcto funcionamiento del vehículo asegurando que el simulador reconociera el nuevo modelo como un coche funcional e independiente.

Sin embargo, esta fase presentó ciertas dificultades derivadas del desconocimiento inicial del funcionamiento interno del sistema de archivos de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) y de su estructura de datos. La falta de documentación oficial clara y la necesidad de interpretar configuraciones específicas a partir de recursos comunitarios o ejemplos existentes añadieron una capa de complejidad al proceso. Fue necesario realizar múltiples pruebas acompañadas de ajustes manuales. Este proceso, aunque laborioso, resultó fundamental para comprender en profundidad la lógica de

-
funcionamiento del motor gráfico, y permitió adquirir conocimientos valiosos que se reflejaron en la integración del vehículo.

Durante las pruebas en pista, el modelo se comportó de forma estable. La visualización fue consistente desde el exterior, y no se produjeron errores gráficos, fallos en la carga de texturas ni anomalías de iluminación. Esto indica que la reducción de polígonos realizada en ZBrush (Maxon, 2022) fue suficiente para lograr un equilibrio entre fidelidad visual y eficiencia técnica, contribuyendo a una sensación de realismo en tiempo real.

La estructura jerárquica del modelo también cumplió su función, ya que las ruedas giraban correctamente en el simulador indicando su correcta interpretación de los puntos de pivote definidos en *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) por el motor del juego. Adicionalmente, no se detectaron errores visuales, colisiones mal definidas ni deformaciones de malla durante las pruebas.

A pesar de que algunas decisiones metodológicas, como la omisión del escaneo del interior y la ausencia de LODs secundarios, podrían limitar la escalabilidad del modelo, esta fase de integración permitió comprobar la solidez del flujo de trabajo desarrollado a lo largo del proyecto.

Por último, cabe destacar que la posibilidad de utilizar herramientas como *Content Manager* (Jusupov, 2025) y *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014), ambos de uso libre, contribuye significativamente a la accesibilidad y reproducibilidad del proceso. Esto respalda la validez del método propuesto no solo en términos técnicos, sino también en su aplicación práctica para la industria.

4 Conclusiones

A lo largo del desarrollo del proyecto se abordaron todas las etapas necesarias para alcanzar el objetivo principal, desde el escaneado tridimensional del Subaru WRX STI 2015, pasando por el tratamiento y simplificación de la malla, hasta su implementación y prueba en el entorno de simulación. Cada una de estas fases aportó evidencia para sostener la eficacia de la metodología propuesta.

En términos de calidad geométrica, el escáner *EINSTAR* (SHINING 3D, 2022) ofreció resultados adecuados a los requerimientos del proyecto, con una fidelidad suficiente para conservar los aspectos esenciales del vehículo original. El método de escaneado planteado demostró ser efectivo frente a los desafíos prácticos propios de la digitalización de un objeto de tamaño considerable y geometría compleja. Estas estrategias no solo permitieron gestionar los recursos temporales de manera eficiente, sino que también preservaron la coherencia del modelo tridimensional generado.

En cuanto a la optimización poligonal, se aplicaron criterios objetivos de simplificación que respetaron el equilibrio entre detalle visual y rendimiento. La elección del modelo de 600k polígonos como versión final para el simulador fue coherente con los requerimientos técnicos de *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014), y permitió mantener una experiencia de usuario estable y visualmente satisfactoria. A pesar de que se descartaron soluciones más avanzadas como la conversión a quads o la retopología manual, estas decisiones se tomaron de forma razonada para preservar la accesibilidad del flujo de trabajo, reforzando uno de los valores fundamentales del proyecto: su reproducibilidad por parte de otros usuarios incluso con recursos limitados.

El texturizado y el mapeado UV, desarrollados a través de *Autodesk Maya* (Autodesk, 2025) y *Substance 3D Painter* (Adobe, 2023/24), cumplieron su función sin comprometer la calidad visual ni generar incompatibilidades con el motor gráfico. Si bien el acabado estético no fue el foco principal del trabajo, se demostró que la aplicación de mapas de normales y materiales básicos resultó suficiente para evaluar el funcionamiento del modelo en tiempo real, estableciendo una base sólida para futuras mejoras visuales. Por su parte, la integración en *Assetto Corsa* (Kunos Simulazioni, 2014) mediante *ksEditor* (Kunos Simulazioni, 2014) y *Content Manager* (Jusupov, 2025) confirmó la viabilidad del modelo como mod funcional, sin presentar errores de carga, deformaciones, ni fallos estructurales. La correcta respuesta del simulador a la jerarquía del modelo, la física básica y las interacciones visuales validó definitivamente el proceso metodológico seguido.

En términos generales, el flujo de trabajo completo ha demostrado una coherencia interna robusta, una curva de aprendizaje razonable y un nivel de dependencia tecnológica asumible para usuarios individuales o colectivos de la industria. La

-

documentación y herramientas empleadas, muchas de ellas disponibles públicamente o de bajo coste, refuerzan el carácter accesible y formativo del proyecto, haciendo posible su aplicación tanto en contextos educativos como en entornos de desarrollo independiente.

No obstante, también se han detectado limitaciones que deben ser consideradas en futuras iteraciones. La imposibilidad de escanear el interior del vehículo, la falta de niveles de detalle (LODs) adicionales y la ausencia de una retopología optimizada para animaciones complejas son aspectos que restringen parcialmente el alcance y la escalabilidad del modelo final especialmente a los estándares de la industria. A pesar de no comprometer el objetivo central del trabajo, estas carencias ofrecen oportunidades claras para su ampliación y mejora. Por ejemplo, una extensión del proyecto podría contemplar la digitalización completa del habitáculo, la incorporación de materiales personalizados más detallados o la compatibilidad con otros simuladores y motores gráficos.

Desde una perspectiva ética y social, los resultados de este proyecto reafirman el potencial de la metodología desarrollada, no solo en el ámbito del entretenimiento digital, sino también en contextos de utilidad práctica y valor humano. Tal como se propuso en los objetivos iniciales, la metodología desarrollada, por su carácter accesible y replicable, puede ser aplicada por entidades externas con el fin de realizar pruebas con vehículos específicos sin comprometer activos físicos. Este planteamiento abre oportunidades en distintos ámbitos de impacto. Por un lado, se podrían replicar procesos que faciliten la recuperación de la confianza en la conducción para personas que hayan atravesado situaciones traumáticas, al permitirles entrenar o interactuar con un entorno seguro, controlado y realista. Del mismo modo, ofrece la posibilidad de desarrollar experiencias de conducción personalizadas para personas con discapacidad, adaptadas a sus necesidades particulares, eliminando las barreras físicas de acceso a determinados vehículos. Por otro lado, el uso de modelos tridimensionales permite realizar modificaciones estéticas y funcionales en entornos virtuales antes de su aplicación real, lo que reduce significativamente el consumo de recursos materiales y optimiza las decisiones de diseño. A ello se suma el potencial para la preservación digital del patrimonio automovilístico, posibilitando la documentación y conservación de vehículos históricos o de valor cultural.

En conclusión, este trabajo ha logrado satisfacer plenamente los objetivos definidos en su fase inicial, ha demostrado la hipótesis de partida mediante una metodología sistemática, práctica y eficaz, y ha establecido una plataforma de conocimiento útil para su reproducción, mejora o extensión. Además de los resultados prácticos, ofrece una visión accesible sobre el papel de la digitalización 3D en el diseño y simulación virtual. Su continuidad podría implicar no solo un perfeccionamiento técnico, sino también una

-

proyección social significativa, fomentando la convergencia entre tecnología, cultura automovilística y accesibilidad.

5 Referencias

- Abax Engineering Solutions. (s.f.). *¿Conoces la extensión OBJ?* Obtenido de Abax3dtech: <https://abax3dtech.com/2020/09/03/conoces-la-extension-obj/20>
- Adobe. (2021). *Adobe Photoshop (versión 22.5.1) [Software]*.
- Adobe. (2023/24). *Substance 3D Painter (verison 9.0.0 y 10.0.1) [software]*.
- arm | Developer. (s.f.). *Normal map baking best practice*. Obtenido de arm | Developer: <https://developer.arm.com/documentation/102449/0200/Normal-map-baking-best-practice>
- Artec 3D. (2017 y 2023). *Artec Leo y Ray II [Dispositivo]*.
- Artec 3D. (s.f.). *Artec 3D scanners for video games*. Obtenido de Artec 3D: <https://www.artec3d.com/3d-scanning-solutions/video-games>
- Autodesk. (2025). *Austodesk 3ds Max [Software]*.
- Autodesk. (2025). *Autodesk Maya (versión 2025.3.1) [Software]*.
- bjornrg. (15 de Octubre de 2012). *Edge Loops*. Obtenido de Wings 3D: <https://www.wings3d.com/documentation/user-manual-table-of-contents/basic-functions/edge-loops/>
- Cardamone, L., Caiazzo, A., Loiacono, D., & Lanzi, P. L. (2011). Transfer of driving behaviors across different racing games. *2011 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG'11)* (págs. 227-234). Seoul: IEEE.
- Codemasters. (2015). *DiRT Rally [Videojuego]*.
- Creality. (2024). *3D CR-Scan Otter [Dispositivo]*.
- Delassus, D. (30 de Agosto de 2023). *I made my own noise function*. Obtenido de Medium: <https://david-delassus.medium.com/i-made-my-own-noise-function-9e6ce4b95a9c>
- Eloy, R. (29 de Octubre de 2024). *Blender vs. 3ds Max: Navigating the Learning Curve*. Obtenido de CGarchitect:

-

<https://www.cgarchitect.com/features/articles/bb7b0504-blender-vs-3ds-max-navigating-the-learning-curve>

Escudero-Mancebo, D., & Muñoz, J. (2023). *Seminarios de animación 3D*. Valladolid: Universidad de Valladolid.

Exoside. (2023). *Quad Remesher (versión 1.3) [Extensión de Software]*.

Flavell, L. (2010). UV Mapping. En L. Flavell, *Beginning Blender* (págs. 97-122). Berkeley: Apress.

Fox, D. (8 de Diciembre de 2022). *The best Consumer 3D Scanner? Einstar full review...*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=X7-D7VVmB20>

Fundación Blender. (2025). *Blender [Software]*.

Funselektor Labs Inc. (2020). *Art of Rally [Videojuego]*.

FUNSPACE. (s.f.). *From Classic To VR: The Ultimate Guide To Arcade Racing*. Obtenido de fun-space: <https://fun-space.com/industry-information/the-ultimate-guide-to-arcade-racing.html>

GIANTS Software. (2022). *Farming Simulator 22 [Videojuego]*.

Grupo Trato. (27 de Junio de 2023). *¿Qué es y para qué sirve una nube de puntos?* Obtenido de Grupo Trato: <https://grupotrato.com/blog/que-es-para-que-sirve-nube-de-puntos/>

Hanaphy, P. (5 de Agosto de 2024). *Live out your firefighting fantasies with Farming Simulator DLC made using Artec Leo & Ray II*. Obtenido de Artec 3D: <https://www.artec3d.com/cases/creative-mesh-farming-simulator-dlc>

Jaquez, L. (21 de Septiembre de 2024). *Maya: Esencial para el Desarrollo de Videojuegos en 3D*. Obtenido de CodeAndPlay: <https://codeandplay.net/maya-esencial-para-el-desarrollo-de-videojuegos-en-3d/>

Jeffrey, P. (20 de Diciembre de 2020). *Assetto Corsa Competizione | Interesting Read: Laserscan Technology in ACC*. Obtenido de OVERTAKE:

<https://www.overtake.gg/threads/assetto-corsa-competizione-interesting-read-laserscan-technology-in-acc.194837/>

Jusupov, I. (2025). *Content Manager (versión 24.4) [Software]*.

Kia Motors. (s.f.). *¿Qué es un tren motriz?* Obtenido de Kia: <https://www.kia.com/pe/discover-kia/ask/what-is-a-powertrain.html#:~:text=un%20tren%20motriz?-,Un%20tren%20motriz%20es%20un%20conjunto%20de%20cada%20componente%20que,de%20transmisi%C3%B3n%20ejes%20y%20diferencial.>

Krishnan, H. (25 de Mayo de 2024). *Why Do Video Game Studios Avoid Blender?* Obtenido de Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=2ymwP6_Fu0U

Kunos Simulazioni. (2014). *ksEditor (version 1.0.0.0) [Software]*.

Kunos Simulazioni. (2014). *Assetto Corsa [Videojuego]*.

Kunos Simulazioni. (2019). *Assetto Corsa Competizione [Videojuegos]*.

Martín, A. (12 de Enero de 2023). *La demencia de Kazunori Yamauchi y Polyphony Digital con Gran Turismo 7: escaneado de coches al milímetro*. Obtenido de Vida Extra: <https://www.vidaextra.com/conduccion/demencia-kazunori-yamauchi-polyphony-digital-gran-turismo-7-escaneado-coches-al-milimetro>

Maxon. (2022). *Zbrush (versión 2022.0.7) [Software]*.

Microsoft. (12 de Junio de 2025). *Modificar el punto de pivote de un modelo en 3D*. Obtenido de Microsoft Learn: <https://learn.microsoft.com/es-es/visualstudio/designers/how-to-modify-the-pivot-point-of-a-3-d-model?view=vs-2022>

Niantic. (2022). *Scanniverse [Dispositivo]*.

Pla, L. M. (29 de Mayo de 2017). *Why quads are better than tris and n-gons*. Obtenido de luismpla: <https://luismpla.com/2017/05/29/why-quads-are-better-than-tris-and-n-gons/>

Playground Games. (2021). *Forza Horizon 5 [Videojuego]*.

-

Polygon Mesh Processing Library. (s.f.). *Decimation*. Obtenido de pmp-library:
<https://www.pmp-library.org/decimation.html#:~:text=Polygon%20Mesh%20Processing%20Library%20Decimation&text=Mesh%20decimation%20reduces%20the%20number,on%20works%20on%20triangle%20meshes>.

Polyphony Digital. (2022). *Gran Turismo Sport* [Videojuego].

Refract. (2018). *Distance* [Videojuego].

Rockstar North y Rockstar Games. (2013). *Grand Theft Auto V* [Videojuego].

Ruscio, D. (2018). What Driving Abilities Do Racing Video Games Stimulate? Rating the Levels of Realism Experienced in Commercial Racing Video Games. *Advances in Human Aspects of Transportation (AHFE 2017)*, 916–926.

ScanTech. (4 de Enero de 2024). *How 3D Scanning Brought Classic Cars to Life in Racing Games*. Obtenido de Scantech: <https://www.3d-scantech.com/how-3d-scanning-brought-classic-cars-to-life-in-racing-games/>

SHINING 3D. (2022). *EINSTAR* [Dispositivo].

SHINING 3D. (2024). *EXStar (versión 1.2.2.0)* [Software].

SHINING 3D. (s.f.). *EINSTAR*. Obtenido de EINSTAR Powered by SHINING 3D: <https://www.einstar.com/products/einstar>

SHINING 3D. (s.f.). *EXStar | Install software*. Obtenido de SHINING 3D: <https://docs.shining3d.com/exstar/1.0.1/en-us/install/>

Stella. (27 de Marzo de 2025). *La guía definitiva sobre la topología de malla para modelos 3D de alto rendimiento*. Obtenido de AI Meshy: <https://www.meshy.ai/es/blog/mesh-topology>

Terrell, J. (26 de Marzo de 2021). *Ultimate Assetto Corsa Content Manager Guide*. Obtenido de drifted.com: <https://www.drifted.com/assetto-corsa-content-manager/>

-

TextureCan. (s.f.). *DirectX vs OpenGL Normal Map*. Obtenido de Texturecan:
<https://www.texturecan.com/post/3/DirectX-vs-OpenGL-Normal-Map/>

Tiigimägi, S. (s.f.). *¿Qué es una malla poligonal y cómo editarla?* Obtenido de 3dstudio.co:
<https://3dstudio.co/es/polygon-mesh/>

TRAZOS. (s.f.). *Retopología en 3D ¿Qué es y para qué sirve?* Obtenido de TRAZOS:
<https://trazos.net/retopologia-en-3d-que-es-y-para-que-sirve/#:~:text=La%20retopolog%C3%ADa%20es%20un%20proceso,mayor%20a%20la%20que%20necesitamos.>

Unity. (2017). *Normal map (Bump mapping)*. Obtenido de Unity Documentation:
<https://docs.unity3d.com/es/2017.1/Manual/StandardShaderMaterialParameterNormalMap.html>

Unity. (2018). *Materiales, Shaders y Texturas*. Obtenido de Unity Documentation:
<https://docs.unity3d.com/es/2018.4/Manual/Shaders.html#:~:text=Shaders%20son%20peque%C3%B1os%20scripts%20que,y%20la%20configuraci%C3%B3n%20del%20Material.>

U-Tad. (4 de Septiembre de 2024). *¿Qué es Zbrush?* Obtenido de U-Tad: <https://u-tad.com/que-es-zbrush/>

Vision Miner. (20 de Septiembre de 2022). *Calibrating Your Shining 3D Einstar 3D Scanner - Vision Miner 3D Scanning*. Obtenido de Youtube:
https://www.youtube.com/watch?v=RsyX106YtYs&ab_channel=VisionMiner

-

6 Anexo

Anexo

[Pon aquí tantos anexos como necesites, cada uno como un apartado diferente según su naturaleza. Por ejemplo: Anexo 1. Datos adicionales, Anexo 2. Muestra de resultados...]