Instituto Politécnico Nacional

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal I

"SISTEMA NEURODIFUSO PARA LA INTERACCIÓN CON UNA RECONSTRUCCIÓN HIPOTÉTICA DEL GRAN BASAMENTO DE CACAXTLA BASADO EN GESTOS PARA KINECT"

Que para obtener el título de

"Ingeniero en Mecatrónica"

Presentan:

Jiménez Carmona Ana Elena

Ramírez Ibarra Alejandra Genoveva

Asesores:

Arqlga. Yajaira Mariana Gómez García

M. en C. Erick Huitrón Ramírez

Junio 2021

Instituto Politécnico Nacional

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal I

"SISTEMA NEURODIFUSO PARA LA INTERACCIÓN CON UNA RECONSTRUCCIÓN HIPOTÉTICA DEL GRAN BASAMENTO DE CACAXTLA BASADO EN GESTOS PARA KINECT"

Que para obtener el título de

"Ingeniero en Mecatrónica"

Presentan:

Jiménez Carmona Ana Elena

Ramírez Ibarra Alejandra Genoveva

Asesores:

Arqlga. Yajaira Mariana Gómez García — Presidente de jurado

M. en C. Erick Huitrón Ramírez — Profesor titular

Dra. Blanca Tovar Corona

Dr. Víctor Darío Cuervo Pinto

upiita-ipn

Contenido

Resumen vii

Abstract viii

Índice de figuras ix

Índice de tablas xii

Introducción 1

Enfoque mecatrónico 1

Definición del problema 2

Justificación 4

Objetivos 4

Objetivo general 4

Objetivos específicos 5

Antecedentes 5

1 Marco de referencia 9

1.1 Marco teórico 9

1.1.1 Sistema neurodifuso 9

1.1.2 Captura de movimiento 14

1.1.3 Sistema Kinect 15

1.1.4 Entorno virtual tridimensional 16

1.1.5 Avatar 16

1.1.6 Realidad mixta 16

1.1.7 Realidad virtual 17

1.1.8 Motor de videojuegos 18

1.1.9 La zona arqueológica de Cacaxtla 22

1.1.10 Zona arqueológica 23

1.2 Marco procedimental 24

2 Diseño del sistema 26

2.1 Diseño conceptual 26
2.1.1 Necesidades – requerimientos 26
2.1.2 Arquitectura funcional 28
2.1.3 Arquitectura física 34
2.1.4 Propuesta de solución 36
2.1.5 Selección de herramientas 37
2.2 Diseño detallado 43
2.2.1 Sistema neurodifuso 43
2.2.2 Gestión del entorno virtual tridimensional 53
2.2.3 Protección y ubicación del sistema 55
2.2.4 Reconstrucción virtual hipotética 56
Conclusiones 63
Trabajo futuro 63
Apéndices 64
AHP 64
AHP del *software* de modelado 65
AHP del motor de videojuegos 67
AHP del *software* de programación 69
AHP de sensor de movimiento 73
Anexos 75
Kinect 75
Leap Motion Controller 79
Autodesk maya 84
Blender 85
Cinema 4d 86
El Gran Basamento de Cacaxtla 87
Referencias 89

Resumen

El presente documento describe el desarrollo de un sistema neurodifuso basado en la lectura mediante Kinect de múltiples gestos con las manos que controlarán un entorno virtual 3D representativo de la reconstrucción hipotética del Gran Basamento de la zona arqueológica de Cacaxtla.

El sistema empleará los sensores incorporados al sistema Kinect, para obtener las variables que describen la posición y los movimientos del usuario, así como el reconocimiento de los gestos realizados por éste. El sistema neurodifuso procesará los datos obtenidos y determinará el esquema de interacción con el entorno virtual 3D, proponiendo una experiencia audiovisual interactiva para los visitantes de la zona.

La representación tridimensional, estará basada en procedimientos de fotogrametría y modelado tridimensional, para representar el Gran Basamento de Cacaxtla conformado por la serie de reconstrucciones hipotéticas de su estructura, murales, artefactos y ornamentos detectados en el sitio.

Palabras clave

Kinect, gestos, sistema neurodifuso, reconstrucción 3D, entorno virtual tridimensional, fotogrametría, patrimonio cultural, arqueología, Cacaxtla.

Abstract

This document describes the development of a neuro-fussy system based on hand gestures captured by the Kinect sensor; that will control a 3D virtual environment depicting the hypothetical reconstruction of Cacaxtla's Great Basement.

The system will operate the sensors incorporated into the Kinect system to obtain the variables that describe the position and movements of the user and the recognition of the hand gestures made by the user.

The neuro-fuzzy system will process the data obtained and thereby determine how to interact in a 3D virtual environment, thus proposing an interactive audiovisual experience for visitors to the area.

The three-dimensional virtual representation will be based on photogrammetry and three-dimensional modeling procedure, to represent Cacaxtla's Great Basement constituted by the series of hypothetical reconstructions of its structure, murals, artifacts and ornaments found on the site.

Keywords

Kinect neuro-fuzzy system, 3D reconstruction, three-dimensional virtual environment, photogrammetry, cultural heritage, archeology, Cacaxtla.

Índice de figuras

Ilustración 1. El Gran Basamento de Cacaxtla protegido totalmente por una techumbre moderna. 3
Ilustración 2. Estructura general de un sistema neurodifuso. [9] 10
Ilustración 3. Reglas Takagi-Sugeno. [11] 10
Ilustración 4. Sistema ANFIS. [12] 11
Ilustración 5. Arquitectura Red FSOM. [13] 12
Ilustración 6. FOSM con neuronas simbolizadas con círculos rellenos. [14] 12
Ilustración 7. Conjunto recortado y conjunto escalado. [15] 14
Ilustración 8. Clasificación de sistemas de captura de movimiento. 15
Ilustración 9. Kinect Xbox 16
Ilustración 10. Esfera de la realidad mixta. [20] 17
Ilustración 11. Ejemplo de un usuario interactuando en un entorno de realidad virtual [21]. 17
Ilustración 12. Arquitectura sencilla de un sistema de realidad virtual [23]. 18
Ilustración 13. Ventana para el ingreso de comandos de Python en Unity y Unreal Engine [25] 19
Ilustración 14. Ejemplo de reconstrucción 3D [27]. 21
Ilustración 15. Interfaz de usuario de Meshroom trabajando. 22
Ilustración 16. Mapa de la ubicación de la zona arqueológica de Cacaxtla. 22
Ilustración 17. Área comprendida del sitio arqueológico Cacaxtla-Xochitécatl. 23
Ilustración 18. Modelo en V de acuerdo con la Norma VDI 2206 [31]. 24
Ilustración 19. Diagrama FBS del proyecto. 30
Ilustración 20. IDEF0 General del sistema. 30
Ilustración 21. Diagrama IDEF0 del proyecto. 31
Ilustración 22. IDEF0 del sistema neurodifuso. 32
Ilustración 23. IDEF0 de la gestión del EV3D. 33
Ilustración 24. Distancia de detección del Kinect. [33] 34
Ilustración 25. Pantalla proyectada a tres metros de distancia. 35
Ilustración 26. Propuesta de distancia para colocar los elementos físicos. 36
Ilustración 27. Interacción de elementos que describen la arquitectura física. 36
Ilustración 28. Diagrama de flujo del sistema neurodifuso. 43
Ilustración 29. Diagrama de movimientos del usuario. 44

Ilustración 30. Posición inicial del usuario. [35] 44
Ilustración 31. Gestos para desplazamiento a la derecha e izquierda. [35] 45
Ilustración 32. Gestos para desplazamiento de arriba hacia abajo. [35] 45
Ilustración 33. Pantalla de esperando usuario. 46
Ilustración 34. Detección de usuario para comenzar el programa. 46
Ilustración 35. Desplazamiento hacia la izquierda 47
Ilustración 36. Desplazamiento hacia la derecha. 47
Ilustración 37. Desplazamiento hacia abajo 48
Ilustración 38. Desplazamiento hacia arriba. 48
Ilustración 39. Detección de un único usuario a pesar de haber más personas presentes. 49
Ilustración 40. Adaptador eliminador USB Para Kinect 1. [36] 49
Ilustración 41. Conexión del Kinect a la computadora para su correcta comunicación. 50
Ilustración 42. Diagrama de flujo del procesamiento. 51
Ilustración 43. Usuario frente a la cámara RGB, binarización del usuario y asignación del esqueleto en la imagen binarizada del usuario. 52
Ilustración 44. Diagrama a bloques de un control difuso. 52
Ilustración 45. Diagrama de flujo del control al EV3D. 53
Ilustración 46. Elementos de la visualización. 54
Ilustración 47. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla realizada para el presente proyecto en el ambiente de Unity. 54
Ilustración 48. Elementos de la interfaz de usuario. 55
Ilustración 49. Estructura propuesta para resguardar al Kinect. 55
Ilustración 50. Plano del Gran Basamento de Cacaxtla. [37] 56
Ilustración 51. Procedimiento para realizar el modelado de los diferentes elementos del Gran Basamento de Cacaxtla. 57
Ilustración 52. Técnica de fotografía empleada para la fotogrametría. 57
Ilustración 53. Secuencia fotográfica del basamento aledaño al Gran Basamento de Cacaxtla. 58
Ilustración 54. Reconstrucción generada por el software de fotogrametría. 58
Ilustración 55. Modelo obtenido del basamento aledaño al Gran Basamento de Cacaxtla. 59

Ilustración 56. Malla de triángulos del modelo obtenido a través de fotogrametría. 60
Ilustración 57. Reconstrucción basada en el modelo fotogramétrico. 60
Ilustración 58. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla realizada para el presente trabajo. 61
Ilustración 59. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla sector centro. [37] 62
Ilustración 60. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla sector sur. [37] 62
Ilustración 61. Escala Fundamental de Saaty. [38] 64
Ilustración 62. Interfaz entre el programador y Visual Studio. 70
Ilustración 63. Interfaz entre el programador y MATLAB. 71
Ilustración 64. Interfaz entre el programador y Python. 72
Ilustración 65. a) Sensores y láser empotrados en una placa metálica. b) Placas paralelas a la metálica con la electrónica y microchips que controlan el dispositivo. [49] 76
Ilustración 66. Diagrama a bloques del sensor Kinect - Arquitectura de hardware del PS1080 SoC [49] 77
Ilustración 67. Leap Motion Controller funcionando. [51] 79
Ilustración 68. Distancia de detección del Leap Motion. [48] 81
Ilustración 69. Interfaz de usuario de Maya. 84
Ilustración 70. Interfaz de usuario de Blender. 85
Ilustración 71. Interfaz de usuario de Cinema 4D [42]. 86
Ilustración 72. Plano general de las estructuras del Gran Basamento, cortes longitudinales y transversales. (Dibujo: G. Lucet, I. Hernández y A. Casas). [52] 87

Índice de tablas

Tabla 1. Representación de Reglas de Mamdami 13
Tabla 2. Requerimientos del sistema. 27
Tabla 3. Matriz de trazabilidad requerimientos-necesidades 28
Tabla 4. Opciones para realizar el proyecto. 38
Tabla 5. Resultados ponderados derivados de la elección del software de modelado. 39
Tabla 6. Resultados ponderados derivados de la elección del motor de videojuegos. 40
Tabla 7. Resultados ponderados derivados de la elección del del software de programación. 41
Tabla 8. Resultados ponderados derivados de la elección del sensor de movimiento. 41
Tabla 9. Opciones elegidas para el sistema 42
Tabla 10. Ponderaciones asignadas a los software de modelado. 65
Tabla 11. Matriz de decisión para software de modelado. 66
Tabla 12. Resultados de las prioridades mediante el método AHP. 67
Tabla 13. Ponderaciones asignadas a los software para EV3D. 67
Tabla 14. Matriz de decisión para Motor de Videojuegos. 68
Tabla 15. Resultados de las prioridades mediante el método AHP. 68
Tabla 16. Ponderaciones asignadas a los software de programación. 69
Tabla 17. Matriz de decisión para software de modelado. 72
Tabla 18. Resultados de las prioridades mediante el método AHP. 73
Tabla 19. Ponderaciones asignadas a los sensores de movimiento. 73
Tabla 20. Matriz de decisión para el sensor de movimiento. 74
Tabla 21. Resultados de las prioridades mediante el método AHP. 74
Tabla 22. Especificaciones del PS1080 77
Tabla 23. Especificaciones del sensor Leap Motion. [51] 79
Tabla 24. Distribución de la zona arqueológica de Cacaxtla. [52] 88

Introducción

Debido a que las condiciones actuales de del Gran Basamento de Cacaxtla en el estado de Tlaxcala, no permiten la apreciación y entendimiento de la arquitectura, derivado de las diversas excavaciones que se han realizado, la implementación de una estructura que la cubre y la actualización constante de información que no permite que los cedularios estén actualizados al día; se propone realizar un proyecto que coadyuve en la labor de difundir la zona, su historia y su cultura mediante el uso de tecnologías digitales y herramientas computacionales.

Este proyecto pretende desarrollar un sistema neurodifuso para interactuar con un Entorno Virtual 3D (EV3D) dicho entorno será la reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla en el periodo Epiclásico (650 d.C. al 1000 d.C.), permitiendo al usuario moverse y visualizar las diferentes etapas constructivas del Basamento. Dentro del EV3D se incluirá una aproximación de los murales y piezas arqueológicas que se encontraron en el lugar, así como la recreación del entorno social de este sitio, esto con el fin de crear una experiencia interactiva e inmersiva para los visitantes, en la cual, mediante el uso de Kinect, puedan interactuar virtualmente con los objetos del sitio, creando una experiencia audiovisual e interactiva como producto final.

Enfoque mecatrónico

En el primer acercamiento a la temática de este trabajo se evidencia la participación de múltiples áreas competente a la ingeniería, donde es fácil detectar a la electrónica dirigiendo la adquisición de datos, hasta su canalización como señales descriptivas a los medios de procesamiento. En segundo lugar, y dentro de los ámbitos computacionales se presentan las áreas de programación como receptoras de esta información para un sistema neurodifuso que constituirá un núcleo de operación en una recreación interactiva de elementos arqueológicos que serán percibidos por un usuario.

Como subáreas de actividad se encuentran el tratamiento y procesamiento de señales digitales, el modelado virtual, la realidad virtual, los sistemas neuronales y difusos, empleo de sensores y su vínculo electrónico mediante instrumentación

virtual, que son parte del estudio de la ingeniería mecatrónica o campos de apoyo a ella.

En este contexto que requiere la participación concurrente de las múltiples áreas, no es posible adoptar una estrategia de trabajo secuencial, sino una metodología dirigida al diseño mecatrónico, que contemple la intervención permanente de los módulos involucrados para su diseño, con una retroalimentación reciproca en las mismas, características que son detectadas en la norma VDI 2206 (*Verein Deutscher Ingenieure*), también conocida como diseño mecatrónico en V. Tal estrategia de diseño dirigida al trabajo descrito en este documento se abordará en el apartado Marco procedimental.

Definición del problema

Una detenida observación al recorrido turístico por la zona arqueológica de Cacaxtla en el estado mexicano de Tlaxcala permite observar algunas circunstancias que limitan el entendimiento del entorno histórico y arqueológico por parte de los visitantes, las cuales se enumeran a continuación:

a) Sobre el edificio principal llamado “Gran Basamento”, se yergue una estructura monumental de protección ante lluvia y sol que por sus considerables dimensiones altera la percepción del edificio en su entorno natural. (Ilustración 1)
b) La reconstrucción física de los vestigios se ha realizado de forma parcial, por lo que aún son visibles múltiples espacios y elementos en situación de montículo o derrumbe sin intervención.
c) La restauración arqueológica abarca elementos arquitectónicos correspondientes a diferentes etapas de construcción (hay que recordar que los métodos de construcción monumental mesoamericanos se basan en la superposición de estructuras nuevas sobre los restos de las anteriores), y los resultados quedan a la vista, sin que el visitante pueda discernir claramente los que corresponden a un mismo periodo histórico.
d) No existen posibilidad de apreciar el entorno de la zona arqueológica, ni de las relaciones geográficas o calendáricas desde la cima del Gran Basamento, dada la presencia de la estructura de protección.

e) Para el visitante es muy difícil idear una visualización del edificio principal con su estado de restauración y la información que se le da durante el recorrido.
f) Hay espacios o áreas de importancia que pasan desapercibidas por los visitantes.
g) Los niveles de restauración, seguridad y la necesidad de protección, implican la colocación de andamios para mantener a los visitantes en una ruta preestablecida.

Las necesidades de protección de los vestigios arqueológicos se deben anteponer siempre a las necesidades u objetividades turísticas, de tal manera que se garantice su conservación hacia estudios futuros o hasta contar con tecnologías que favorezcan la conservación con nuevos métodos. Sin embargo, esto limita el conocimiento y la comprensión como motivadoras de interés a todo visitante actual. De poder proponerse una estrategia de solución, se tendría una herramienta innovadora en el ámbito de la divulgación, que alerte a todo el público del conocimiento arqueológico del sitio, mientras se garantiza su cuidado y conservación.

Ilustración 1. El Gran Basamento de Cacaxtla protegido totalmente por una techumbre moderna.

En este marco se plantea la pregunta de investigación, que cuestiona si es posible realizar una herramienta para instalación en el entorno museográfico, que permita a los visitantes conocer el pasado del sitio a través de una experiencia interactiva basada en las nuevas tecnologías.

Justificación

La reconstrucción física de monumentos arqueológicos es una actividad seriamente criticada ante la imposibilidad de recrear una representación históricamente correcta tanto en apariencia como en método constructivo con procedimientos y materiales permanentes. A nivel internacional se han gestionado recomendaciones de restauración que protegen los hallazgos y restos de monumentos, y que norman los procedimientos para su exposición pública. Las cartas de Viena y de Atenas son ejemplos de estos acuerdos.

En este contexto legal y patrimonial, las herramientas virtuales surgen como alternativas viables que, sin alterar el estado de los monumentos, pueden ofrecer la restituciones visuales y volumétricas que no deben realizarse físicamente. Además, con los nuevos alcances tecnológicos en smartphones e interfaces de video, es posible divulgar estas percepciones acompañadas de datos arqueológicos auténticos y entendibles promoviendo el conocimiento histórico y cronológico de una sociedad extinta.

En el museo de sitio de la zona arqueológica de Cacaxtla se cuenta con técnicas y presentaciones clásicas de diseño museográfico. De ser exitoso el diseño y construcción de este trabajo, se tendrían las condiciones para proponer en uno de sus espacios, la instalación de un medio que ayude al visitante a contextualizarse dentro de la complejidad arquitectónica del yacimiento.

Objetivos

Dadas las circunstancias presentadas en la definición del problema y los criterios destacados de la justificación, es posible señalar una serie de compromisos para el desarrollo de la propuesta, que se en marcan el enunciado de un objetivo general y ocho objetivos específicos.

Objetivo general

Diseñar y desarrollar un sistema neurodifuso para la interacción con un entorno virtual tridimensional que contenga la reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla utilizando un Kinect.

Objetivos específicos

Sustentando una separación entre las etapas de diseño y construcción, los ocho objetivos específicos fueron clasificados de acuerdo las perspectivas de las Unidades de Aprendizaje de Trabajo Terminal I y Trabajo Terminal II.

Objetivos de Trabajo Terminal I

1. Incorporar un sistema de adquisición de datos para el Kinect.
2. Reconstruir hipotéticamente las diferentes etapas constructivas expuestas del Gran Basamento de Cacaxtla con ayuda de un software de modelado tridimensional.
3. Programar el entorno virtual tridimensional.
4. Delimitar las acciones del usuario dentro del entorno virtual tridimensional.

Objetivos de Trabajo Terminal II

1. Diseñar un sistema neurodifuso de reconocimiento basado en gestos con uso del Kinect.
2. Desarrollar un sistema neurodifuso de reconocimiento basado en gestos con uso del Kinect.
3. Desarrollar una interfaz que manipule el movimiento dentro del modelo de la reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla.
4. Probar el sistema imitando el lugar de empleo, para verificar su correcto funcionamiento, de ser necesario realizar los ajustes pertinentes para su óptimo funcionamiento.

Antecedentes

En 2009 Dylla et al., trabajaron en el artículo científico *"Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques"* plantean la reconstrucción virtual de la ciudad de Roma, Italia, en la cúspide de su desarrollo urbano, en el año 320 A.D., describen su uso de técnicas de modelado de procedimientos y paramétrico para crear un modelo preciso de la ciudad de Roma, usando el *software* 3D Studio Max, Multigen Creator y CityEngine. [1]

En 2014 Alvarado León, escribió un artículo llamado la *"Reconstrucción virtual de las zonas arqueológicas de México*" Donde se menciona que desde 2007,

especialistas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), emprendieron un proyecto de reconstrucción virtual de las zonas arqueológicas de Teotihuacán y Xochicalco, mencionando que se han reconstruido pinturas murales, enterramientos, y de edificaciones arquitectónicas, dicho proyecto se basa en aproximaciones, siendo diseños hipotéticos realizados primordialmente en herramientas de diseño gráfico y arquitectónico, tales como Architectural Desktop y 3dStudioMax, para la proyección en internet, y Corel Draw para las texturas. [2]

En 2015 Fanini et al, escriben el artículo *"Engaging and Shared Gesture-based Interaction for Museums"* La investigación presentada en este artículo se centra específicamente en *Admotum* y *Holoint*, dos aplicaciones basadas en gestos desarrolladas para V-Must.net con motivo de la exposición internacional *"Keys of Rome*" sobre la cultura romana.

Admotum es un juego serio que permite al visitante prácticamente explorar entornos reconstruidos en 3D utilizando gestos corporales y movimientos. El objetivo de la exploración es encontrar y recoger los objetos expuestos en los museos de las locaciones de la exposición, siguiendo la mecánica del juego de búsqueda del tesoro, cuando un objeto con valor histórico se encuentra y se recolecta un artículo, un clip de audio cuenta su historia, esta herramienta fue se basada en varios marcos y bibliotecas, incluyendo por ejemplo el marco de código abierto como el motor gráfico *OpenSceneGraph, boostlibraries* y el kit de desarrollo oficial de Kinect, el cual también fue utilizado como sensor de movimiento.

Mientras que *Holoint* pretende ser una reinterpretación digital de un efecto teatral conocido como fantasma de Pepper, Gracias a la ilusión óptica los usuarios visualizan un objeto virtual fluctuando en el aire o apareciendo en un área específica, proporcionando la ilusión de volúmenes, mientras el espectador se convierte en usuario activo gracias a la posibilidad de interactuar con el contenido con los gestos de las manos. En concreto, *Holoint* está compuesto por una estructura, hardware ensamblado (PC, monitor, y el sensor de movimiento) y

Aplicación de *software* utilizando *vvvv que está basado en DirectX y Visual c++.* [3]

En 2015 Balleti et Al, realizan la investigación. *"3D integrated methodologies for the documentation and the virtual reconstruction of an archaeological site"* realizado en el Laboratorio de Fotogrametría de la Universidad IUAV de Venecia, consiste en comprobar los diferentes sistemas de adquisición de documentación para sitios arqueológicos, mediante plataforma aérea UAV (drones) o métodos terrestres, y su prueba de eficacia, considerando cada metodología de forma individual, centrándose en la integración de distintas metodologías para el incremento de la eficacia, Este artículo describe la experiencia en varios sitios del municipio de Sepino (Molise, Italia), donde la adquisición digital 3D de ciudades y la estructura de los monumentos, a veces de difícil acceso, se realizó utilizando técnicas activas y pasivas, mostrando los resultados que cada técnica obtuvo, usando una cámara digital y un *software* basado en algoritmos de Estructura del movimiento (SFM) y de Reconstrucción densa multivista 3D (DMVR). [4]

En 2016 Pierdicca et al, escriben en la revista *Science Direct* el artículo *"Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru"* donde describen diferentes técnicas de fotogrametría para obtener un modelo 3D con una escala y fiabilidad real, así como la metodología que previo a los arqueólogos con modelos fiables para trabajos de restauración, y el manejo de distintos niveles de detalle para los arqueólogos o los turistas que visitan la zona de Huaca del dragón (o Huaca Arcoíris) en Perú.

Se utilizó Fotogrametría esférica de múltiples imágenes (MISP) y estructura de Movimiento de trabajo estéreo de múltiples vistas (SfM-MVS). MISP es una técnica fotogramétrica basada en panoramas esféricos, que es la representación cartográfica de la esfera donde se encuentran las imágenes proyectadas, tomadas de un mismo punto, así mismo el *software* utilizado fueron Agisoft Photoscan Pro y Geomagic Studio fueron utilizados para la gestión de las nubes de puntos, el paquete Sphera, Rhinoceros y 3DStudio Max respectivamente para

la construcción del modelo, la inserción de bajorrelieves en la posición correcta y el modelo final virtual. [5]

En 2018 Selmanovic et al, presentaron *"VR Video Storytelling for Intangible Cultural Heritage Preservation*" En este artículo se ahonda si los videos de realidad virtual en 360 grados en conjunto con una narrativa contribuyen aún más a la inmersión del usuario en la preservación del patrimonio cultural inmaterial. Describe un estudio de caso del proyecto de buceo en el puente de Mostar, Bosnia y Herzegovina. Es una aplicación de realidad virtual que permite al usuario saltar virtualmente del puente después de ver historias en video de 360 grados sobre su historia y la tradición del buceo en el puente, con ayuda del motor gráfico Unity. [6]

En 2019 Huitrón Ramírez trabajó en la "*Aplicación de Realidad Aumentada para la visualización del modelo reconstructivo de una zona arqueológica"*. En su trabajo abordó como realizar una reconstrucción de los basamentos piramidales y edificaciones con técnicas computacionales para situarse en el auge de la Gran Tenochtitlan, aparte de ofrecer un recorrido virtual en esta reconstrucción hipotética apoyándose en técnicas de geolocalización en dispositivos móviles, utilizando el motor gráfico Unity y el *software* Blender. [7]

En 2020 Piste Ek presentó "*Aplicación de realidad aumentada con visión artificial para la visualización del modelo reconstructivo tridimensional de la acrópolis de Ek'Balam*". En su trabajo realizó una aplicación de realidad aumentada que permita a los usuarios manipular la perspectiva de visualización de un mundo virtual que presenta el modelo reconstructivo del edificio más importante de la zona arqueológica de Ek'Balam en el estado mexicano de Yucatán, utilizando el motor gráfico Unity y el *software* Blender. [8]

Como se observa en los trabajos descritos con anterioridad, la realidad virtual y aumentada se han convertido en años recientes en herramientas efectivas para la difusión del patrimonio cultural, sin embargo, se encuentra que en Latinoamérica no se ha realizado un proyecto similar, así mismo se concluye no hay ningún trabajo que ligue las redes neuronales directamente con los modelos de reconstrucción virtual y sistemas interactivos.

1 Marco de referencia

El siguiente apartado expone términos que contextualizan los tópicos de ingeniería útiles para el desarrollo del presente trabajo. De esta forma, se obtendrán las definiciones, teorías y alternativas que esperan una organización procedimental para iniciar las secuencias de diseño y futura construcción del prototipo.

1.1 Marco teórico

En esta primera sección del marco de referencia, se alude a los términos de ingeniería que fueron considerados fundamentales para efectuar la adecuada planeación del diseño y su posterior construcción; así mismo se hace referencia a las cuestiones arqueológicas que describen el contexto receptor del producto final.

1.1.1 Sistema neurodifuso

Un sistema neurodifuso es una combinación de los procedimientos de aplicación de redes neuronales artificiales y sistemas difusos, que a través de una sinergia procedimental permiten alcanzar resultados de optimización, reconocimiento y autoactualización que difícilmente logran las áreas por separado. [9]

En general, estos sistemas derivan su topología de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) preservando los nodos que desarrollan una función simple, pero éstas intercalan capas de nodos con funciones internas más complejas (funciones de pertenencia, implicación y concreción en subconjuntos difusos). [9]

En términos generales se puede distinguir tres módulos componentes de un sistema neurodifuso, los cuales se pueden apreciar en la Ilustración 2.

- Módulo agente:
  Puede ser un sistema de inferencia difusa o un sistema experto (controlador computacional) con lógica difusa.
- Módulo diligente:
  Contiene una red neuronal, que continuamente está observando las entradas y salidas del agente, en determinados casos aprende las situaciones nuevas.
- Módulo traductor:

Tiene como tarea extraer de la arquitectura resultante de la red neuronal información aprendida y expresarla en reglas utilizando predicados ambiguos para ser incorporada a un controlador. [9]

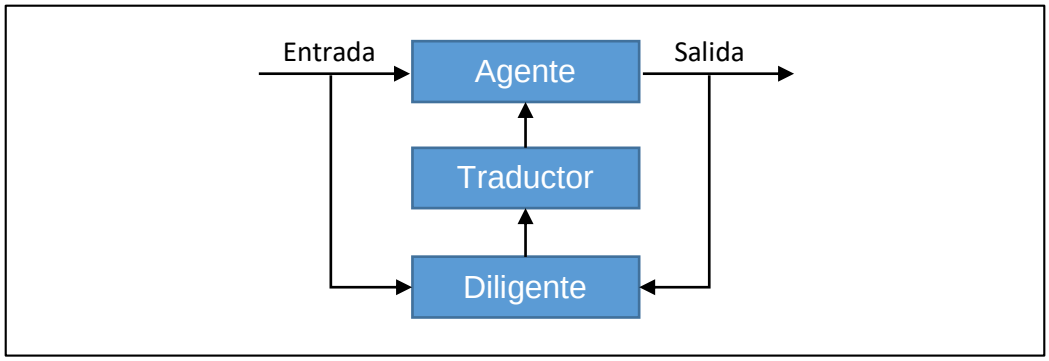

Ilustración 2. Estructura general de un sistema neurodifuso. [9]

1.1.1.1 ANFIS

ANFIS por sus siglas en inglés *Adaptative Neuro Fuzzy Inference System* (Sistemas adaptativos de Inferencia Neurodifusa), es un método que permite sintonizar o crear la base de reglas de un sistema difuso, utilizando el algoritmo de entrenamiento de retro propagación a partir de la recopilación de datos de un proceso (Ilustración 4). Su arquitectura es funcionalmente equivalente a una base de reglas tipo Takagi-Sugeno. [10] La base de reglas Takagi-Sugeno tiene como característica que el consecuente de estas reglas ya no es una etiqueta lingüística, sino que es una función de entrada que tenga el sistema en un momento dado, esto se muestra en la Ilustración 3.

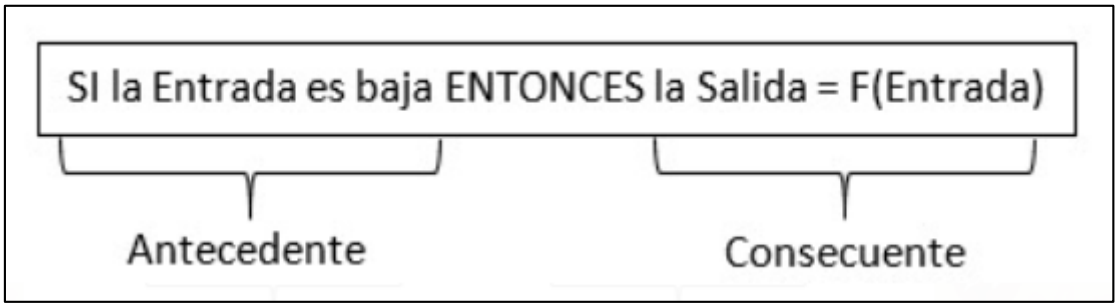

Ilustración 3. Reglas Takagi-Sugeno. [11]

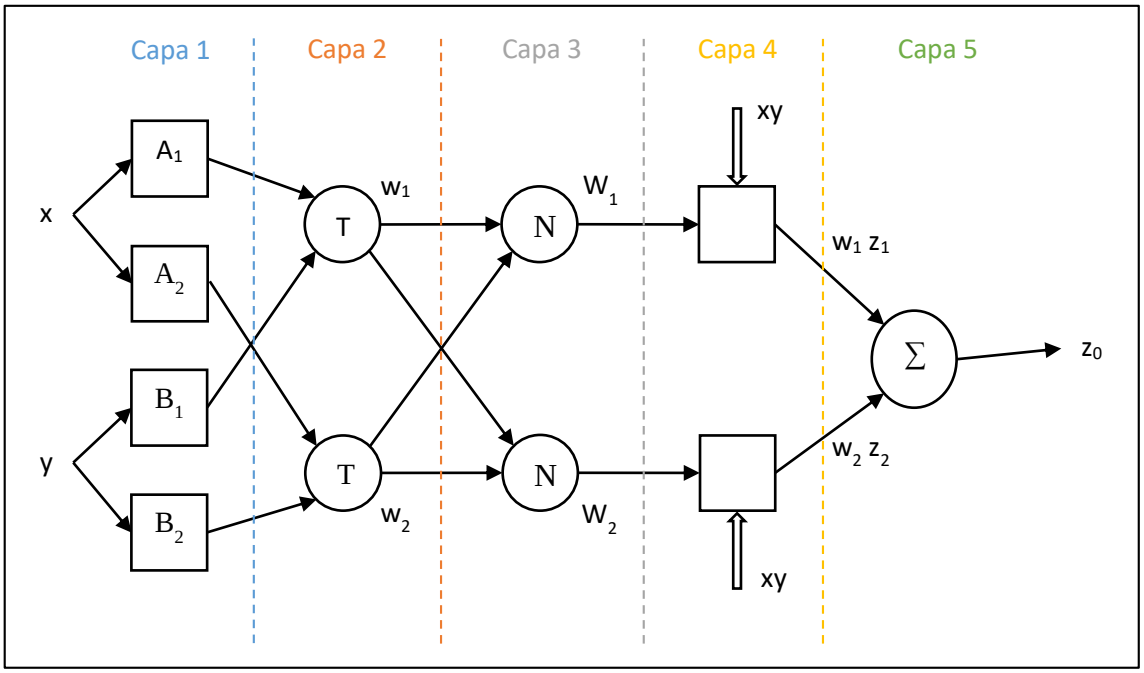

Ilustración 4. Sistema ANFIS. [12]

- Capa uno: Representa la pertenencia.
- Capa dos: Genera el grado de disparo de la regla (T-norma).
- Capa tres: Actúa como normalizador.
- Capa cuatro: Calcula la salida.
- Capa cinco: Combina todas las salidas en su único nodo.

1.1.1.2 FSOM

FSOM por sus siglas en inglés *Fuzzy Self-Organizing Maps* (Mapas Auto Organizados Difusos) consiste en un sistema difuso optimizado a partir de la técnica de los mapas de *Kohanen* como se muestra en la Ilustración 6. Estos mapas están inspirados en la capacidad del cerebro humano de reconocer y extrae rasgos o características relevantes del mundo que los rodea; la idea de estos mapas es crear una imagen de un espacio multidimensional de entrada y dar una salida a un espacio de menor dimensión. Este mapa tiene dos capas de neuronas como se muestra en la Ilustración 5, la primera capa de entrada y la segunda de procesamiento, las capas están ligadas entre sí por los pesos sinápticos de las conexiones, la red pertenece al tipo mono capa.

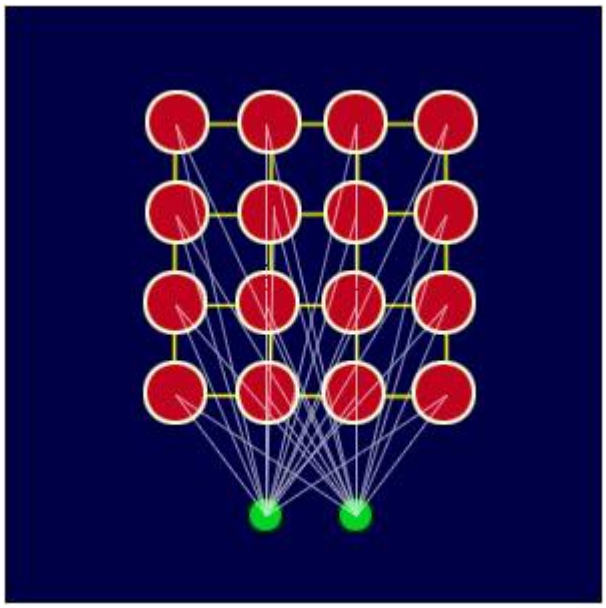

Ilustración 5. Arquitectura Red FSOM. [13]

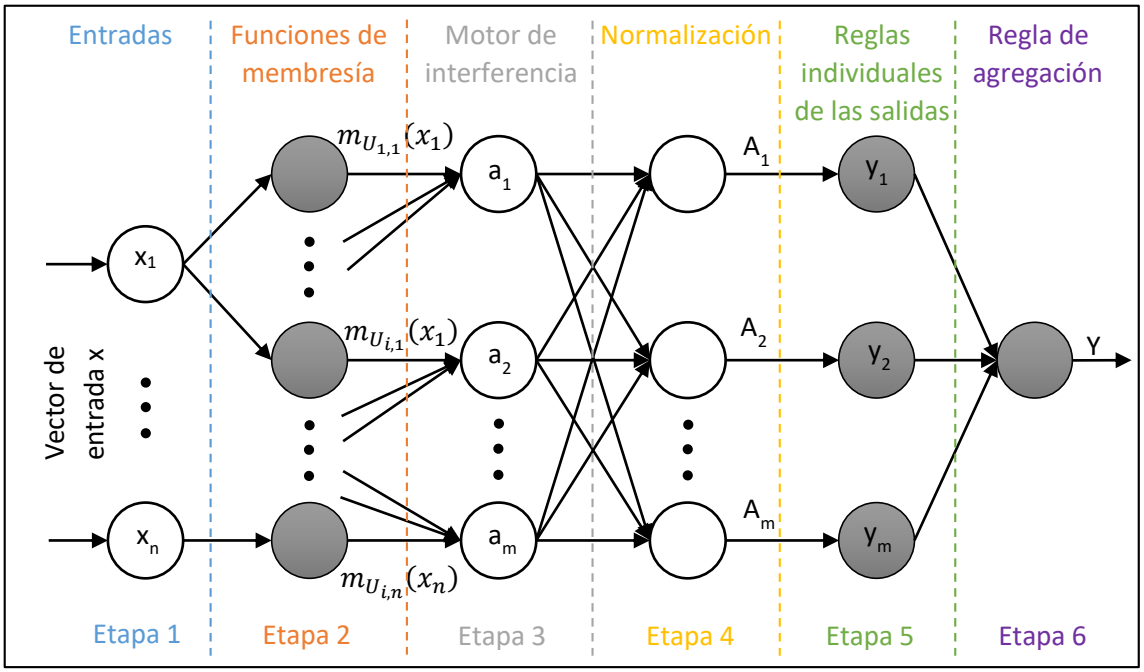

Ilustración 6. FOSM con neuronas simbolizadas con círculos rellenos. [14]

- Etapa 1: Incluye la propagación de las entradas x_j.
- Etapa 2: Realiza las funciones de membresía y contiene una neurona para cada conjunto difuso.
- Etapa 3: Realiza la inferencia difusa, donde la fuerza de disparo de $\propto_i$ para cada regla es determinada por operador mínimo.
- Etapa 4: Normaliza los datos.
- Etapa 5: Determina las salidas de la regla nítida para la i-ésima regla.

- Etapa 6: Consta de una sola neurona que realiza un promedio ponderado. Esta determina la salida final para múltiples reglas.

1.1.1.3 Mamdami

Es un mecanismo de inferencia borrosa, que se entiende por la interpretación de las reglas del tipo SI-ENTONCES (*if-then*) con el fin de obtener las conclusiones de las variables lingüísticas de salida, a partir de los valores de las variables de entrada. La inferencia se basa en el paradigma “Modus Ponens Generalizado” el cual se puede interpretar como la transformación de los grados de cumplimiento del lado izquierdo de las reglas a grados de posibilidad de los lados derechos de las mismas. El proceso se realiza en cuatro pasos:

1. Fuzzificación de las variables de entrada.
2. Evaluación de las reglas
3. Agregación de las salidas de las reglas
4. Defuzzificación

El método de Mamdani utiliza un conjunto de reglas difusas “SI-ENTONCES”. Toma como entrada los valores de la fuzzificación y se aplican a los antecedentes de las reglas difusas, es habitual listar todas las reglas difusas para saber cómo se obtiene la salida del sistema. Un ejemplo sería el que se muestra a continuación:

Regla 1: **SI** X es BAJO y Y es BAJO **ENTONCES** Z es ALTO

Regla 1: **SI** X es BAJO y Y es ALTO **ENTONCES** Z es BAJO

Regla 1: **SI** X es ALTO y Y es BAJO **ENTONCES** Z es BAJO

Regla 1: **SI** X es ALTO y Y es ALTO **ENTONCES** Z es ALTO

Otra forma más extendida de representar las reglas sería mediante una tabla como la que se muestra a continuación:

Tabla 1. Representación de Reglas de Mamdami

		X	
		Bajo	Alto
Y	Bajo	Alto	Bajo
	Alto	Bajo	Alto

Para evaluar la disyunción (operador OR) habitualmente se emplea la T-Conorma estándar (máximo), de igual forma, para el operador AND se usa habitualmente la T-Norma estándar del mínimo. Finalmente, el resultado de la evaluación del antecedente se relaciona con el consecuente aplicando un recorte o escalado según el valor de verdad del antecedente para obtener como salida de la regla un conjunto difuso. El método más comúnmente utilizado es el recorte (*clipping*) que corta el consecuente con el valor de verdad del antecedente (Ilustración 7). El escalado proporciona un resultado más preciso, preservando la forma original del conjunto difuso y se obtiene multiplicando todos los valores por el valor de verdad del antecedente (Ilustración 7).

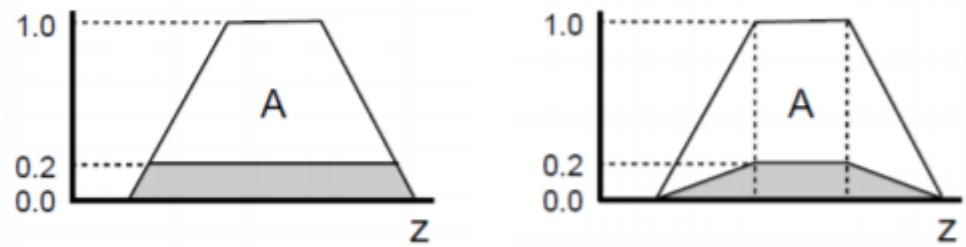

Ilustración 7. Conjunto recortado y conjunto escalado. [15]

La "agregación" es el proceso de unificación de las salidas de todas las reglas; es decir, se combinan (normalmente mediante la unión) las funciones de pertenencia de todos los consecuentes, previamente recortados o escalados, para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida.

1.1.2 Captura de movimiento

La captura de movimiento, también conocida como *"MoCap"* (acrónimo de *Motion Capture*), es el proceso de adquirir las características del movimiento de objetos o personas con un grado de precisión relativamente alto, y su traslado a un modelo digital, estos pueden clasificarse según la tecnología que utilizan, tal como se muestran en la Ilustración 8. [16]

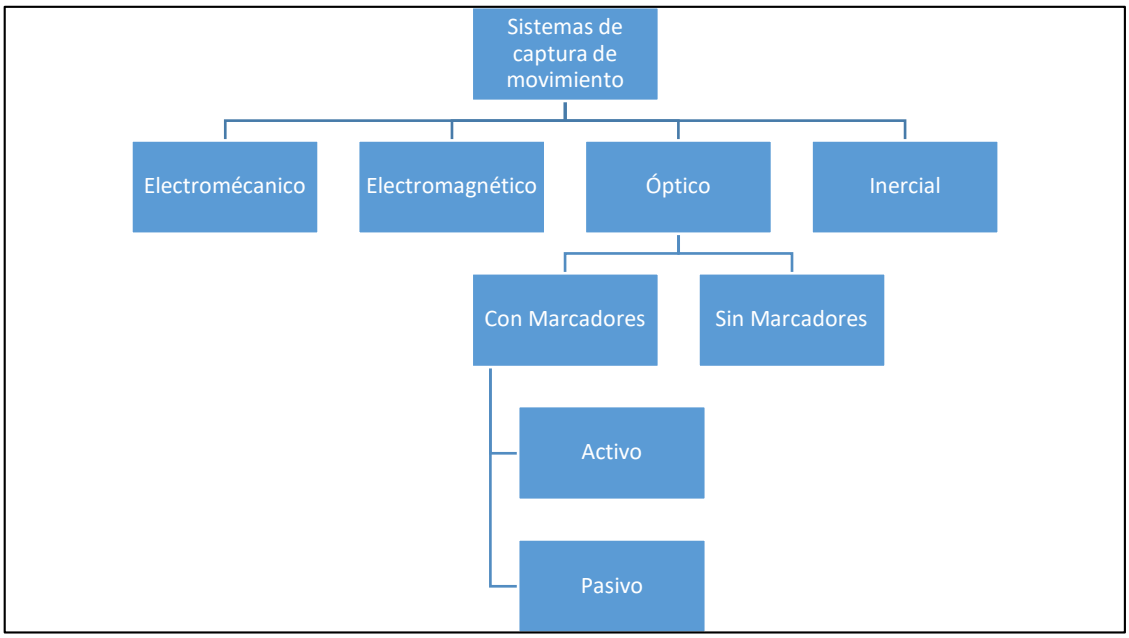

Ilustración 8. Clasificación de sistemas de captura de movimiento.

1.1.3 Sistema Kinect

El Kinect (Ilustración 9) es un periférico de entrada desarrollado por Microsoft para jugar en la videoconsola Xbox 360. Se trata de un controlador que permite la interacción entre un usuario y los videojuegos evitando el uso de un mando tradicional, mediante la captura de movimiento percibiendo y reconociendo los cuerpos de los jugadores y los movimientos que realizan, así como un sistema de reconocimiento de voz. Para ello el dispositivo incorpora y hace uso de dos cámaras frontales, una convencional de RGB y otra de profundidad, así como de un sensor de distancia y de una serie de micrófonos.

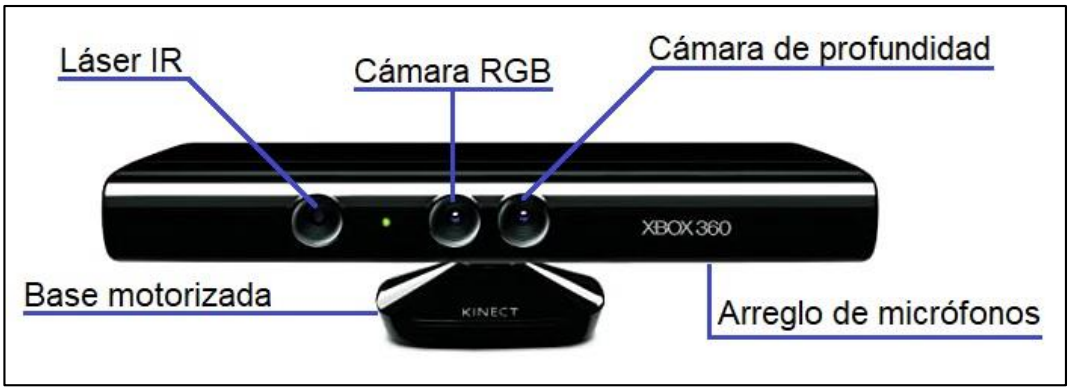

Ilustración 9. Kinect Xbox

1.1.4 Entorno virtual tridimensional

El Entorno Virtual Tridimensional o EV3D, es una representación espacial o modelo virtual generado por una computadora que puede ser experimentado en tiempo real por un usuario a través de diferentes medios de despliegue y control. [17]

En un EV3D el usuario, representado por un avatar, puede desplazarse, interactuar con objetos diversos y comunicarse con otros.

1.1.5 Avatar

Un avatar es una identidad virtual que representa al usuario en una aplicación o sitio web. Estos espacios o mundos virtuales se denominan también entornos inmersivos, por analogía con la inmersión subacuática. [18]

1.1.6 Realidad mixta

La realidad mixta (MR) puede ser descrita como “la combinación de los entornos virtuales y las interfaces naturales del usuario”. La realidad mixta es descrita como una esfera localizada en medio del entorno virtual y el real. [19]

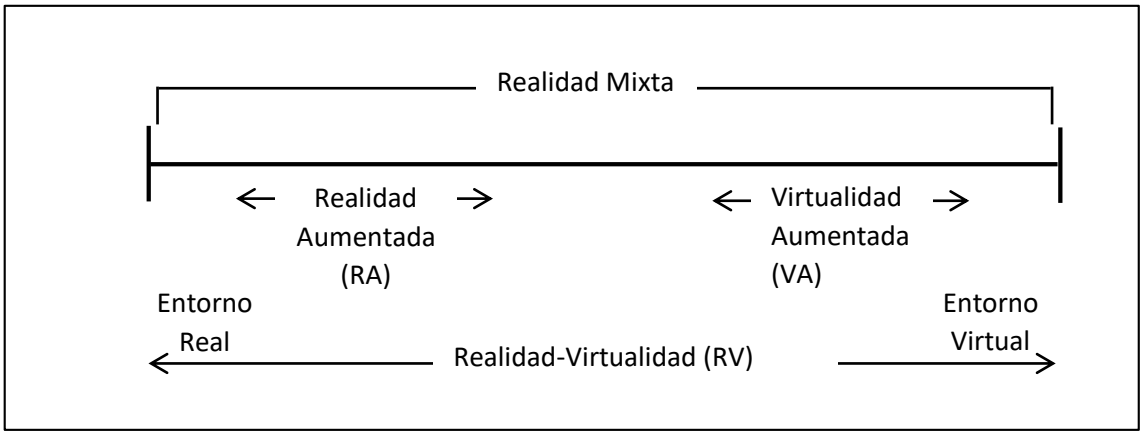

Ilustración 10. Esfera de la realidad mixta. [20]

La Ilustración 10 representa dicha esfera donde abarca una parte de la Realidad Aumentada (RA) y la Virtualidad Aumentada (VA), lo cual representa que se encuentra entre el entorno real y el virtual sin llegar a abarcarlos por completo, pero sí ocupando a ambos.

1.1.7 Realidad virtual

La realidad virtual (RV) normalmente tiene tres componentes: un sistema computacional que permite al usuario interactuar con el espacio virtual; el mundo virtual, un entorno 3D generado por computadora ya sea visual o audiovisual creado originalmente o basado en la realidad; y la interacción del usuario con el mundo virtual en tiempo real (Ilustración 11).

Ilustración 11. Ejemplo de un usuario interactuando en un entorno de realidad virtual [21].

Sumergido en los datos del mundo virtual, el usuario interactúa con un entorno sintético y los objetos que hay en él. La información es presentada en objetos de tres dimensiones gráficas, la cual es actualizada constantemente y con ella los objetos del entorno virtual. [22]

En el diagrama de la Ilustración 12, se resume el funcionamiento de la realidad virtual. El motor de realidad procesa los movimientos gracias a los sensores de entrada y reconfigura el entorno virtual dibujando desde la base de datos y filtrando información mediante los sensores de salida. [23]

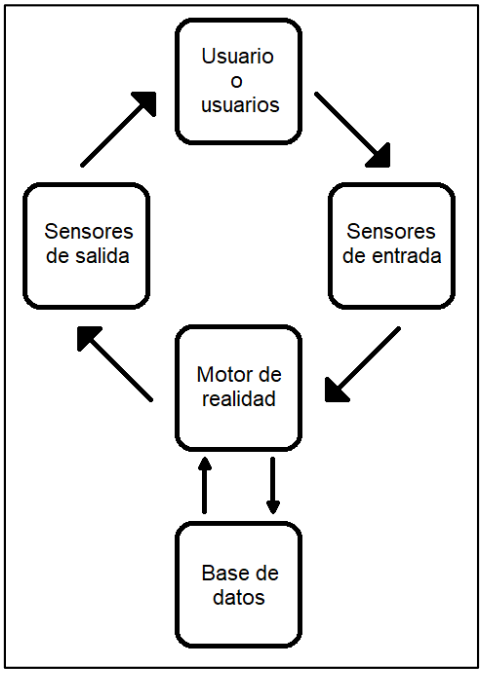

Ilustración 12. Arquitectura sencilla de un sistema de realidad virtual [23].

1.1.8 Motor de videojuegos

Un Motor de videojuegos es una serie de librerías de programación que permiten el diseño, creación y representación de videojuegos, el aspecto más importante es la función gráfica, pues son los encargados de mostrar imágenes 2D y 3D en la pantalla, y son los que realizan los cálculos de los polígonos, iluminación, texturas. Algunas características que considerar al elegir son la facilidad para aprender a usar un motor de videojuegos y la facilidad para exportar juegos a diferentes plataformas. Algunas de las funciones más importantes del motor de videojuegos se exponen a continuación.

1.1.8.1 Motor de física

El motor de física permite aplicar aproximaciones físicas a los videojuegos, para aproximar la sensación de realidad. Es decir, se encarga de realizar los cálculos necesarios para que el objeto simule elementos con propiedades físicas como peso, volumen, aceleración, gravedad, entre otras.

1.1.8.2 Motor de sonido

Se encarga de cargar la pista de audio, modificar su tasa de bits, eliminarla de la reproducción y sincronizarla.

1.1.8.3 Scripting

Todos los motores de videojuegos cuentan con un lenguaje de programación que permite la manipulación de personajes y objetos que forman parte del entorno en la Ilustración 13 se muestran detalles de dos ventanas de comandos.

Estos pueden ser en distintos lenguajes, tales como C++, C#, Python, Java. [24]

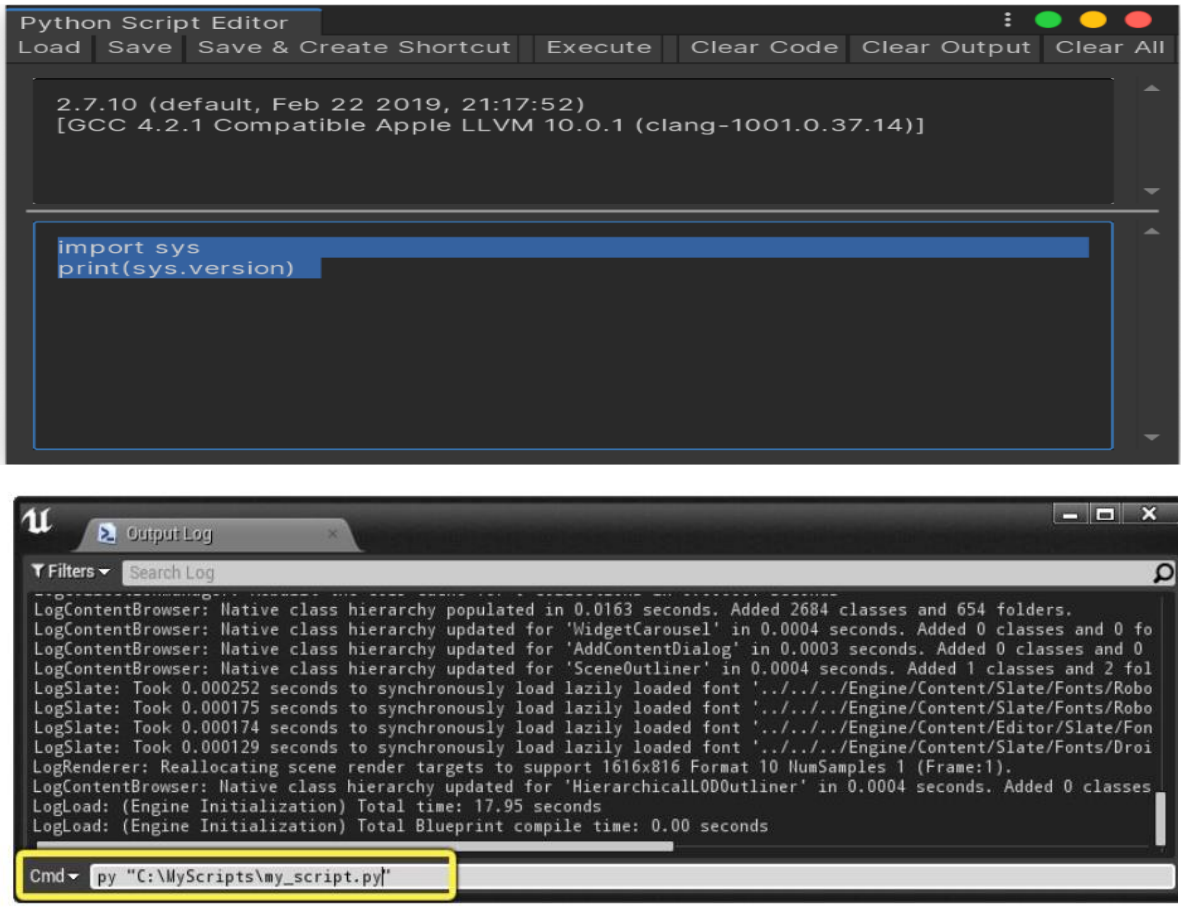

Ilustración 13. Ventana para el ingreso de comandos de Python en Unity y Unreal Engine [25]

1.1.8.4 Modelado 3D

El modelado 3D implica el uso de *software* especializado para crear representaciones matemáticas de objetos o formas tridimensionales. El objeto creado se denomina modelo 3D, que tiene en cuenta propiedades físicas como textura, tamaño, bordes, etc.

Las industrias del cine, la televisión, los videojuegos, la arquitectura, la construcción, el desarrollo de productos, la ciencia y la medicina utilizan modelos 3D para visualizar, simular y renderizar diseños gráficos. [26]

1.1.8.5 Reconstrucción 3D

La reconstrucción 3D es el proceso de capturar la forma y apariencia de objetos reales. El objetivo de la reconstrucción 3D multivisión es inferir la estructura geométrica de una escena capturada por una colección de imágenes. Normalmente, se supone que la posición de la cámara y los parámetros internos son conocidos o pueden estimarse a partir del conjunto de imágenes. Al utilizar varias imágenes, la información 3D se puede recuperar parcialmente resolviendo un problema de correspondencia en píxeles. Dado que la estimación automática de la correspondencia suele ser ambigua e incompleta, es necesario un conocimiento previo sobre el objeto, en la Ilustración 14 se puede observar un ejemplo de reconstrucción 3D basado en fotogrametría. [27]

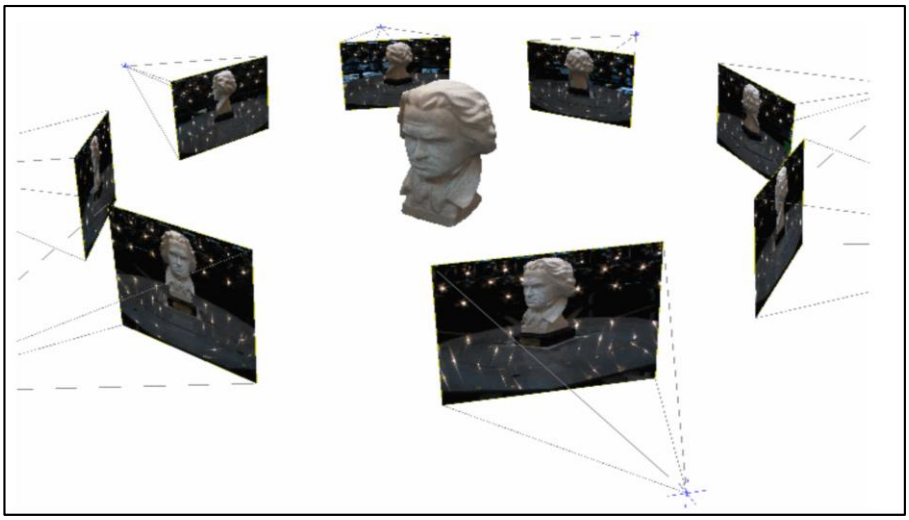

Ilustración 14. Ejemplo de reconstrucción 3D [27].

Fotogrametría

La fotogrametría, según Bonneval, es la técnica que tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías. [28]

Etimológicamente, la palabra fotogrametría significa la métrica de lo escrito con luz. Es, en esencia la utilización de la fotografía para hacer medidas. Su aplicación es extensiva a numerosas áreas de conocimiento.

Finalmente, se puede definir la fotogrametría como la ciencia para elaborar mapas o planos partiendo de fotografías realizadas bajo unos condicionantes específicos. [29]

Meshroom

Meshroom es un *software* de reconstrucción 3D gratuito y de código abierto basado en el entorno de trabajo AliceVision.

AliceVision es un marco de visión por computadora fotogramétrico que proporciona reconstrucción 3D y algoritmos de seguimiento de cámara. AliceVision tiene una base sólida de los últimos algoritmos y *software* de visión por computadora que se pueden probar, analizar y reutilizar (Ilustración 15). El proyecto es el resultado de una colaboración entre la academia y la industria, y tiene como objetivo proporcionar los últimos algoritmos con la robustez y calidad requeridas para fines de producción.

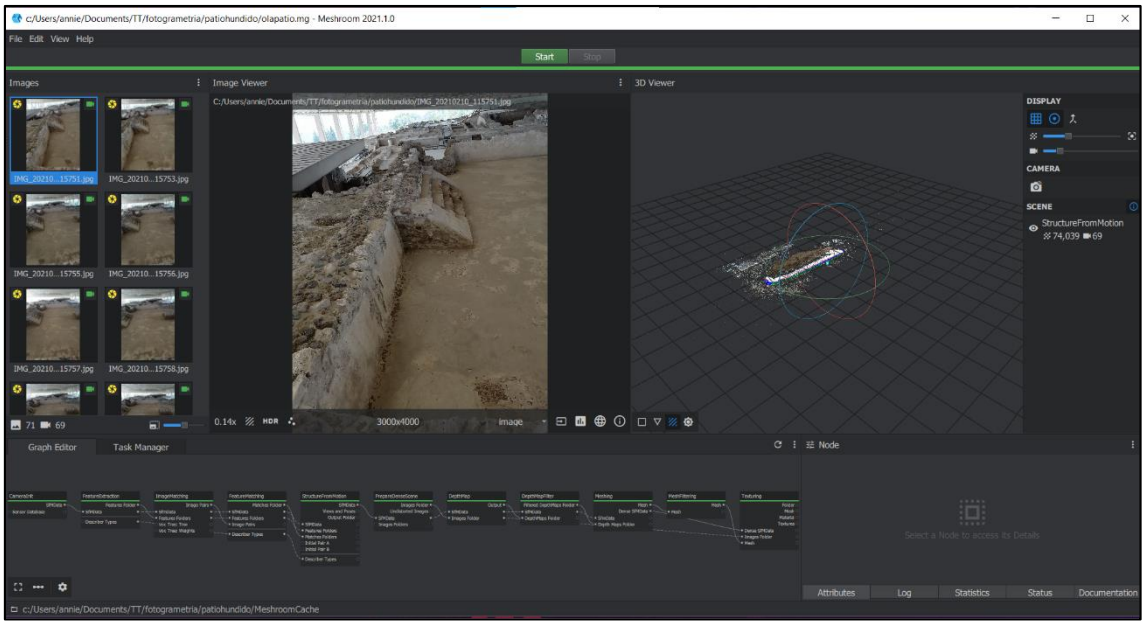

Ilustración 15. Interfaz de usuario de Meshroom trabajando.

1.1.9 La zona arqueológica de Cacaxtla

La zona arqueológica de Cacaxtla se localiza en la población de San Miguel del Milagro, a unos 19 km al suroeste de la ciudad de Tlaxcala, en el municipio de Nativitas (Ilustración 16).

Ilustración 16. Mapa de la ubicación de la zona arqueológica de Cacaxtla.

El tiempo de ocupación del sitio abarca el primer milenio de nuestra era y su esplendor se sitúa en el período Epiclásico alrededor del año 700 d.C. El Gran Basamento habría sido abandonado hacia 900 d.C.

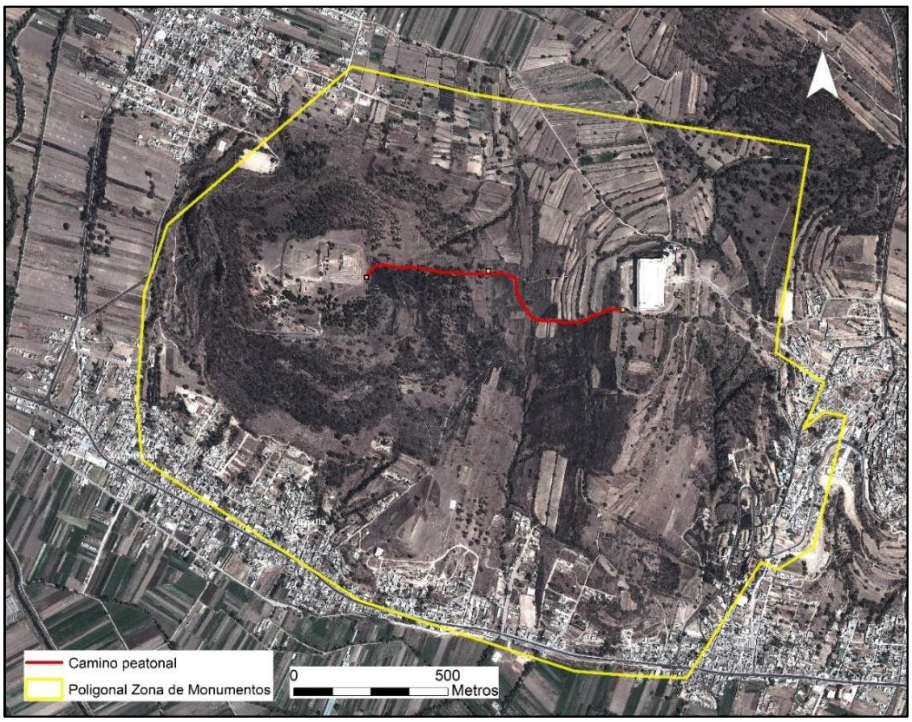

Ilustración 17. Área comprendida del sitio arqueológico Cacaxtla-Xochitécatl.

En la Ilustración 17 se observa el área comprendida del sitio, mientras que en el anexo El Gran Basamento de Cacaxtla se puede apreciar la distribución a detalle que tiene dicha zona hoy en día.

El nombre Cacaxtla se deriva del vocablo *Cacaxtli*, que literalmente significa “Lugar de Cacaxtles”, siendo estos unos armazones indígenas empleados para transportar productos.

1.1.10 Zona arqueológica

Una zona arqueológica es un lugar en el cual se ha preservado evidencia de actividades que han sucedido en el pasado, ya sean prehistóricas o casi contemporáneas, y que han sido investigadas utilizando la disciplina de la arqueología, significando que el sitio representa parte del registro arqueológico. [30]

1.2 Marco procedimental

Este apartado está destinado a describir las consideraciones y características reconocidas en las necesidades del proyecto y su desarrollo bajo criterios de la ingeniería mecatrónica.

Metodología mecatrónica

El comité de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI) elaboró una nueva norma VDI. La norma VDI 2206 "Metodología de diseño para sistemas mecatrónicos". [31]

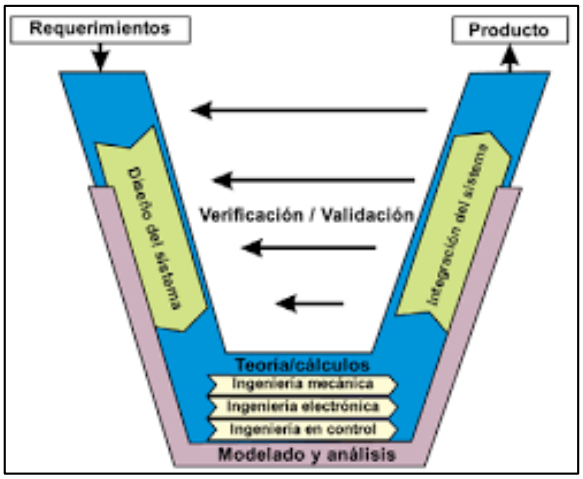

Ilustración 18. Modelo en V de acuerdo con la Norma VDI 2206 [31]

El modelo V (Ilustración 18) es uno de los modelos de procedimiento en el enfoque de ingeniería de sistemas y pertenece a los métodos basados en planes. La "V" en el modelo V surge de la forma del gráfico representación del modelo, combina un enfoque de arriba hacia abajo y uno de abajo hacia arriba.

El modelo en V de la norma VDI comprende de los siguientes pasos:

1. Requerimientos.
2. Especificaciones.
3. Diseño del sistema.
4. Modelo y simulación.
5. Diseño de componentes.
6. Prototipo.
7. Componentes mecatrónicos.
8. Prueba de componentes.

De esta manera, se realizará un sondeo de las necesidades que puedan presentarse en la zona arqueológica en apoyo a los fines de divulgación, algunas de estas ya fueron señaladas en la definición del problema. A tales descripciones se les asignarán parámetros cuantitativos o cualitativos que permitirán expresarlas como especificaciones para diseño. Posteriormente se definirá la arquitectura, módulos, componentes, interfaces y los datos que conforman el Diseño del sistema.

En la faceta de prototipo se abordarán en un marco de construcción todos los módulos heredados de la secuencia de diseño, generando productos parciales como el mundo virtual, el modelo fotogramétrico, el lector de información del Kinect y la preparación del sistema neurodifuso, preparados para buscar una operación conjunta a través de un procedimiento adecuado de integración.

En los procesos finales, se realizará pruebas en un espacio físico con similitud al ambiente museográfico, que permita evaluar su operación en el marco de los objetivos general y específicos, lo que podría proponer su integración, como trabajo futuro, al museo de la zona arqueológica de Cacaxtla.

2 Diseño del sistema

Este capítulo tiene como propósito describir el proceso de diseño del sistema, mediante la definición de su estructura basada en módulos, fases, y datos establecidos como necesidades y requerimientos.

2.1 Diseño conceptual

En este apartado se abordará el proceso de diseño conceptual, el cual consiste en obtener una solución a un problema de diseño a partir de las especificaciones, requisitos y necesidades. [32]

2.1.1 Necesidades – requerimientos

Como lo señala la metodología de diseño mecatrónico seleccionada, el modelo V, el primer paso consiste en la determinación de los requerimientos del proyecto, como consecuentes de las necesidades identificadas en el sitio, que, aunque, descritas de forma cualitativa, pueden establecer en secciones posteriores características técnicas.

2.1.1.1 Necesidades de la zona arqueológica

De acuerdo con las observaciones de la subdirección de la zona arqueológica Cacaxtla-Xochitécatl, el sistema debe cumplir con los siguientes requerimientos.

- Presentar la reconstrucción hipotética de los murales pictográficos característicos de la zona.
- Presentar las reconstrucciones hipotéticas de las fases constructivas del Gran Basamento de Cacaxtla, siendo correspondiente al periodo Epiclásico.
- Presentar la reconstrucción de la plaza principal del Gran Basamento de Cacaxtla.
- Presentar algunos ejemplos de la fauna nativa del lugar.
- Mostrar representaciones tridimensionales de algunas de las piezas arqueológicas y ofrendas encontradas en el Gran Basamento de Cacaxtla
- Ser interactivo.
- El modelo tridimensional debe mostrarse en una plataforma interactiva.
- El sistema debe ser claro y fácil de usar para los visitantes, cumpliendo un propósito educativo y de divulgación.

2.1.1.2 Requerimientos técnicos del sistema propuesto

Las necesidades expuestas se pueden transformar en requerimientos técnicos como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos del sistema.				
No.		Descripción		Clasificación: Funcional (F), No funcional (NF)
R1		Funcionamiento en tiempo real		NF
R2		Visualización y/o modelado del Gran Basamento de Cacaxtla		F
	R2.1		Entorno, incluido fauna y flora	F
	R2.2		Última etapa constructiva	F
	R2.3		Reconstrucción hipotética de los murales	F
	R2.4		Alfarería e ídolos característicos	F
R3		Navegación dentro del EV3D		F
	R3.1		Detección de colisiones	F
	R3.2		Orientación	F
	R3.3		Limitaciones del entorno	F
R4		Detección de gestos		F
	R4.1		Calibración de sensores	F
	R4.2		Envío de datos	F
R5			Control	F
	R5.1		Sistema neurodifuso para gestos	F
	R5.2		Relacionar gestos con movimiento en EV3D	F
R6		Bajo costo		NF
R7		Interfaz		NF
	R7.1		Compatibilidad	NF
	R7.2		Facilidad de operación	NF

Posterior a los requerimientos se expone la Tabla 3 la matriz de trazabilidad entre necesidades y requerimientos del proyecto.

Tabla 3. Matriz de trazabilidad requerimientos-necesidades			
	F1	F2	F3
R1		X	
R2	X		
R3	X		
R4		X	
R5		X	
R6			X
R7		X	

2.1.2 Arquitectura funcional

Con los requerimientos establecidos, es posible deducir las funciones que debe realizar el sistema para agruparlas en módulos y posteriormente en sistemas. Estas funciones deben estar jerarquizadas como se muestra en la Ilustración 19 que representa un diagrama FBS y como sería la funcionalidad general del sistema en el IDEF0 (Ilustración 20).

La lista y jerarquía de funciones se expone a continuación.

Función principal: Interactuar con el EV3D

F1. Gestionar el EV3D
- F1.1. Interfaz con el usuario
- F1.2. Visualización y Modelado
  - F1.2.1. Entorno
  - F1.2.2. Arquitectura
  - F1.2.3. Alfarería e ídolos
- F1.3. Navegación
  - F1.3.1. Detección de colisiones
  - F1.3.2. Orientación
  - F1.3.3. Limitaciones

F2. Sistema neurodifuso

F2.1. Sensores

F2.1.1. Calibración

F2.1.2. Configuración

F2.2. Comunicación

F2.2.1. Envío de datos

F2.2.2. Recepción de datos

F2.3. Procesamiento

F2.3.1. Binarización

F2.3.2. Detección de bordes

F2.3.3. Firma de la imagen

F2.3.4. Red neuronal

F2.4. Toma de decisión

F2.5. Control al EV3D

F3. Protección y ubicación

F3.1. Colocar elementos

F3.1.1. Posicionar sensor de movimiento

F3.1.2. Colocar marcas de distancia

F3.2. Proteger

F3.2.1. Proteger el sensor de movimiento

F3.2.2. Proteger equipo de computo

F3.2.3. Proteger cañón de proyección

Ilustración 19. Diagrama FBS del proyecto.

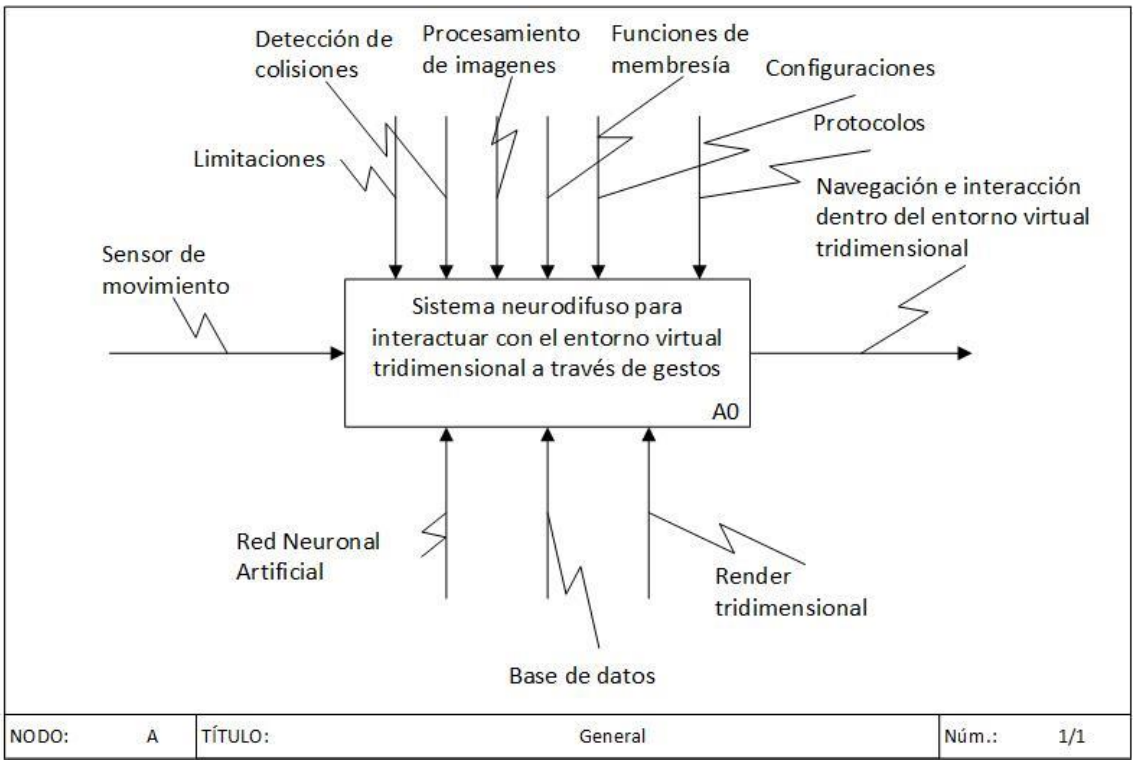

Ilustración 20. IDEF0 General del sistema.

De manera complementaria al FBS, el diagrama IDEF0 de la Ilustración 21 muestra las interacciones y secuencia de esas funciones.

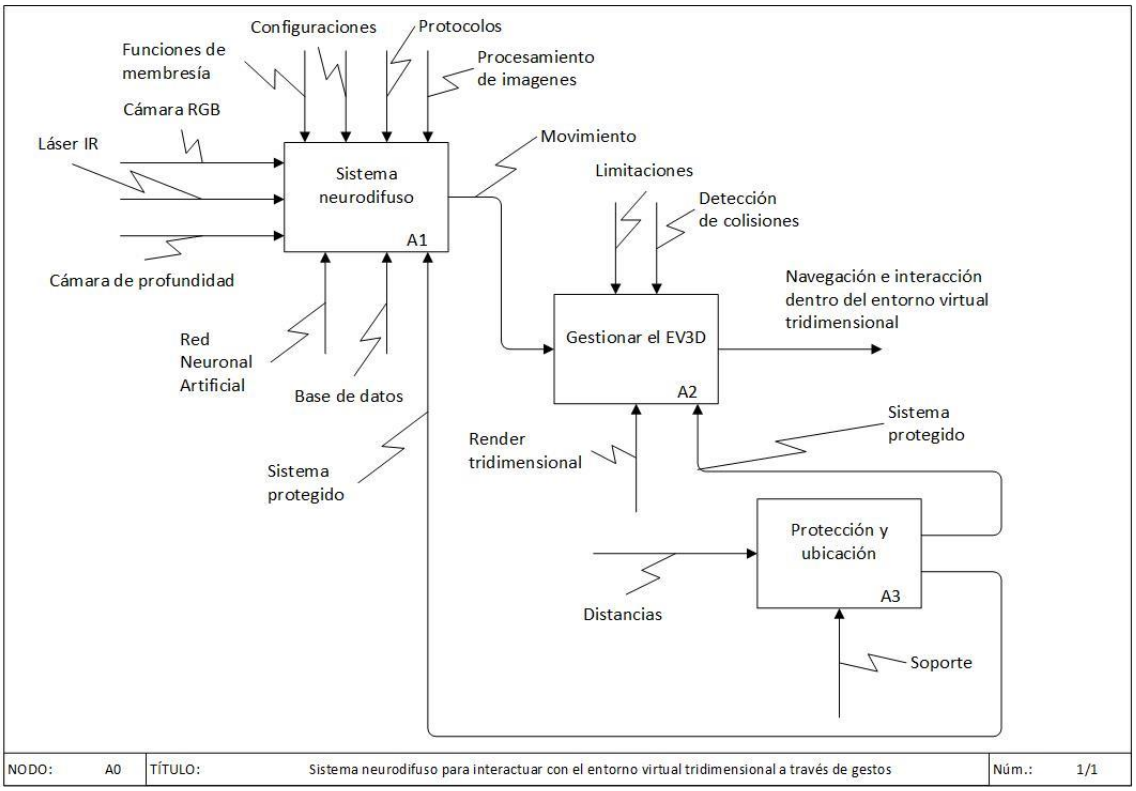

Ilustración 21. Diagrama IDEF0 del proyecto.

En este esquema se puede observar como el sensor de movimiento es el elemento encargado de obtener los datos que procesará el sistema neurodifuso, este resultado será asociado a funciones de membresía, procesamiento de imágenes base de datos, configuraciones, protocolos y redes neuronales artificiales (RNA), este sistema da como salida una señal de movimiento que ingresa a la gestión del entorno virtual tridimensional (EV3D), Está función verificará que el usuario pueda visualizar sus movimientos dentro del EV3D. Finalmente se encuentra la función de protección y ubicación que se encarga de mantener seguro el equipo integrado.

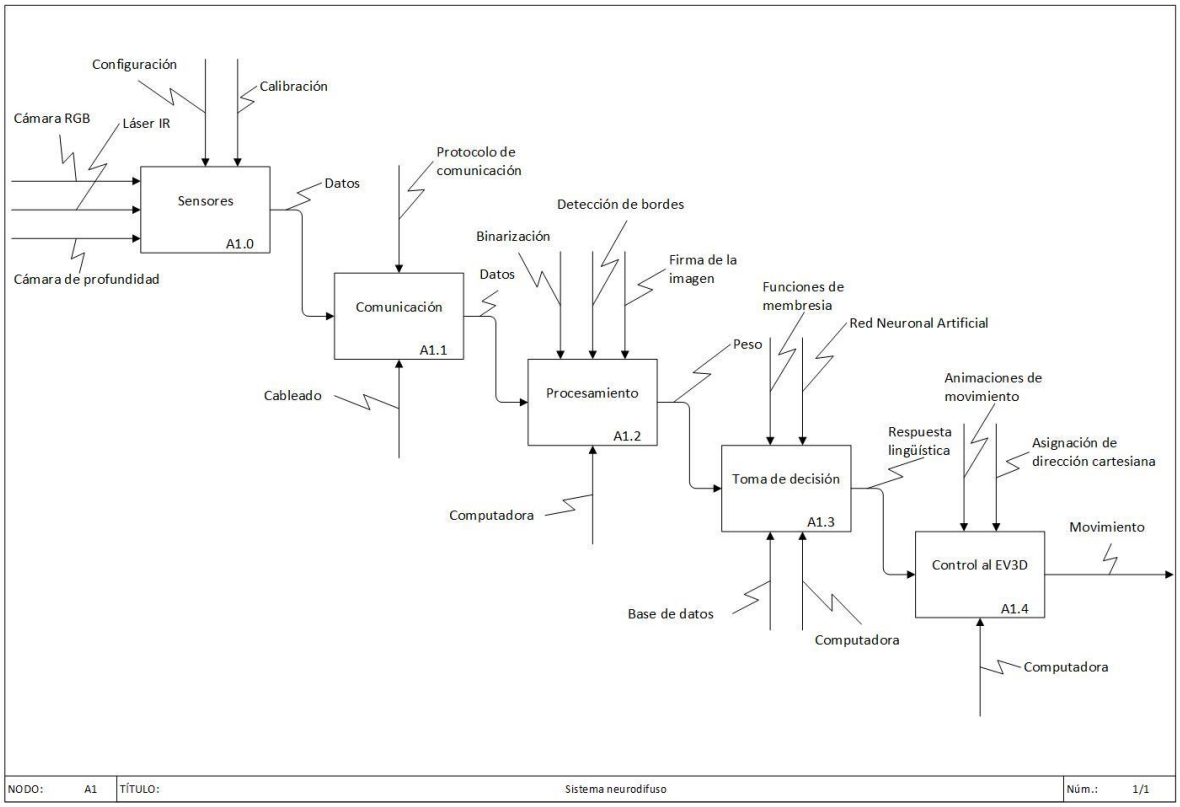

Ilustración 22. IDEF0 del sistema neurodifuso.

En la Ilustración 22 se observa cómo está conformado el bloque perteneciente al Sistema neurodifuso. En este diagrama se puede apreciar que hay cinco procesos en los que se puede dividir el bloque, estos son los sensores, comunicación, procesamiento, toma de decisión y control del EV3D.

En primer lugar, se tiene una función llamada “sensores”, que actúa como receptora de las entradas cámara RGB, láser IR, y cámara de profundidad, esta configuración y calibración, dan como resultado los datos que estarán directamente enlazados con el siguiente subsistema.

El siguiente modulo, “Comunicación”, el cual interactúa con los datos previamente adquiridos, así como con los protocolos de comunicación y el cableado para obtener datos como entrada para el procesamiento.

El tercer subsistema “Procesamiento”, tiene como control un modelo de Red Neuronal Artificial que mediante los procedimientos de Binarización, detección de bordes, y la detección de firmas de imagen, generarán los valores adecuados para configurar los pesos sinápticos.

Estos valores representan la entrada del cuarto bloque llamado “Toma de Decisión” que se encarga de establecer una respuesta lingüística de acuerdo con la base de datos y funciones de membresía.

Finalmente, la respuesta lingüística será la entrada del último subsistema, “Control del Entorno Virtual 3D”, el cual creará una percepción visual de movimiento.

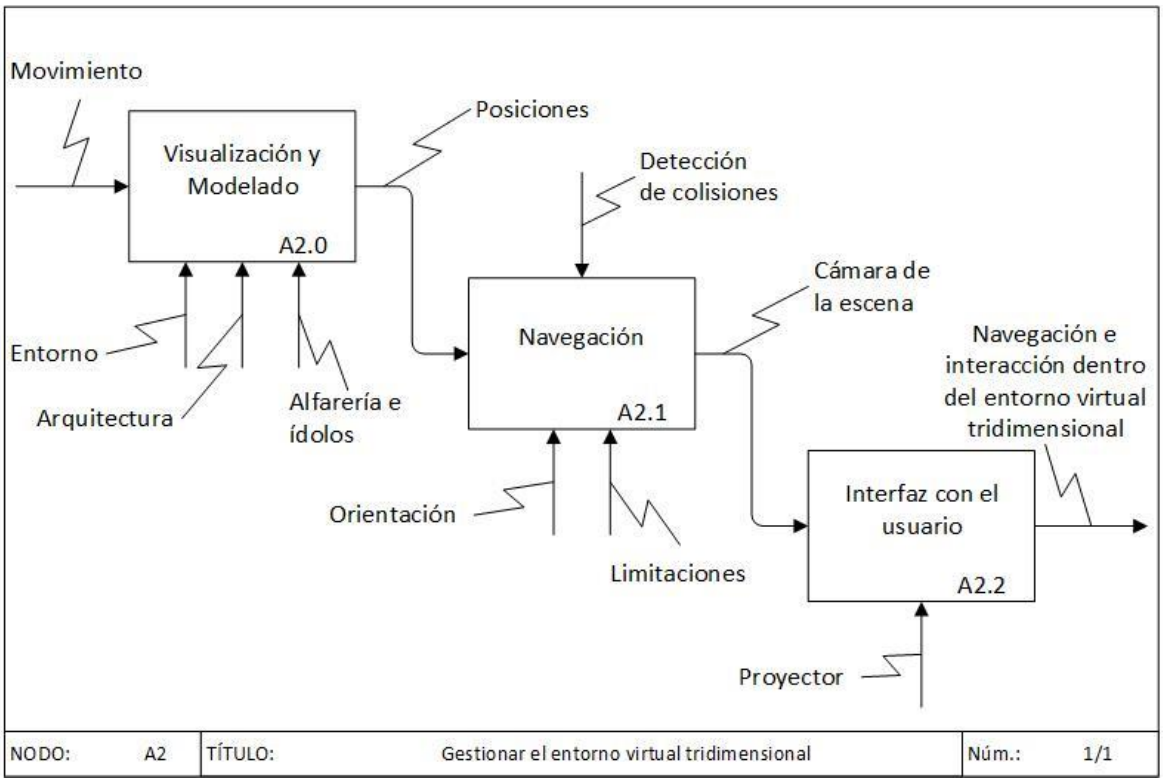

Ilustración 23. IDEF0 de la gestión del EV3D.

En la Ilustración 23 se observa cómo está conformado el bloque “Gestionar el entorno virtual tridimensional” con la representación del IDEF0 (Ilustración 21).

En este proceso, hay tres subsistemas, Visualización y Modelado, Navegación e Interfaz con el usuario.

El módulo de “Visualización y modelado” tiene como entrada el movimiento generado en la función de sistema neurodifuso, usando como herramientas el entorno, la arquitectura, y las representaciones de alfarería y esculturas correspondientes al periodo Epiclásico en la zona arqueológica de Cacaxtla.

El segundo subsistema “Navegación” tiene como finalidad controlar la cámara de escena, usando como herramientas la orientación, ubicación, la detección de colisiones.

El último bloque es “Interfaz con el usuario”, cuya entrada es la cámara de escena, para producir la interacción con el entorno virtual tridimensional.

2.1.3 Arquitectura física

La arquitectura física esperada consta de módulos para incorporar el sensor de movimiento y el cañón de proyección.

2.1.3.1 Sensor de movimiento

De los sensores planeados a ocupar el Kinect es el que tiene un mayor rango de detección (Ilustración 24) en el cual la zona donde tiene su mejor detección es de 1.2 m a 3.5 m.

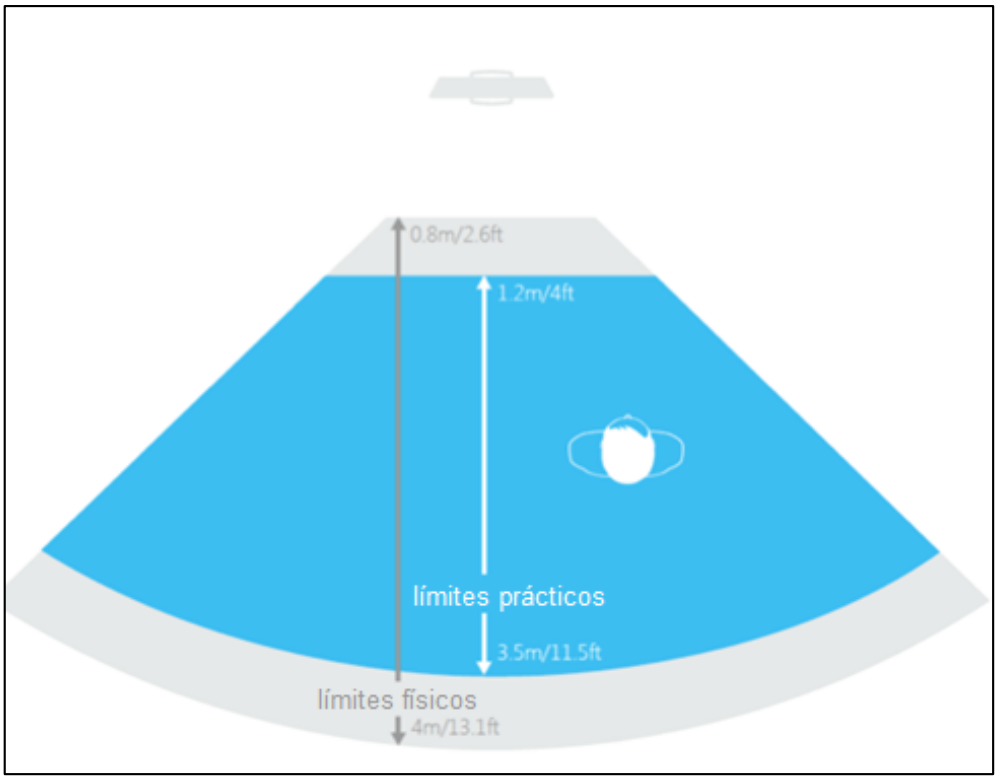

Ilustración 24. Distancia de detección del Kinect. [33]

2.1.3.2 Cañón de proyección

El cañón de proyección se puede ubicar a diferentes distancias lo cual determina la apertura de la pantalla que se obtendrá, para este proyecto se ocupará un

cañón que puede tener una apertura máxima de 2 metros a 3 metros de distancia (Ilustración 25). [34]

Ilustración 25. Pantalla proyectada a tres metros de distancia.

2.1.3.3 Conexión y acomodo

En la Ilustración 26 se muestra el espacio que se necesitará para la implementación de este proyecto en la zona arqueológica mientras que en la Ilustración 27 se muestra cómo interactúan los elementos entre sí.

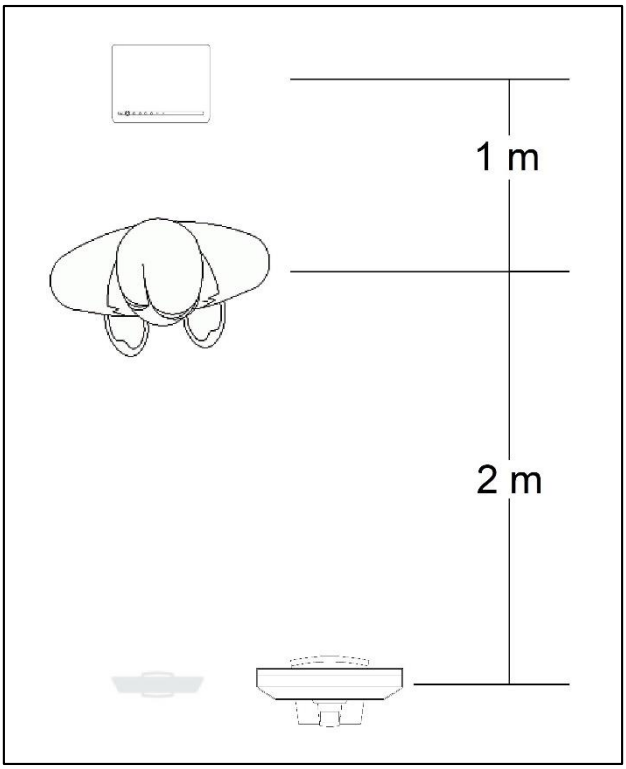

Ilustración 26. Propuesta de distancia para colocar los elementos físicos.

Ilustración 27. Interacción de elementos que describen la arquitectura física.

2.1.4 Propuesta de solución

En este proyecto se plantea realizar un sistema neurodifuso que pueda controlar el movimiento de un mundo virtual mediante gestos con la mano. Se desarrollarán algoritmos necesarios para la detección de los gestos, así como las funciones de membresías necesarias para realizar el control dentro del EV3D y finalmente lograr que el usuario visualice el movimiento mediante una interfaz.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizará la tecnología propia del Kinect (consultar anexos), este dispositivo es altamente empleado en proyectos en donde se busca la interacción con objetos virtuales, lo cual lo hace adecuado

para proporcionar los datos necesarios en la red neuronal que se encargará de diferenciar los gestos y posteriormente mandarlo a las funciones de membresía encargadas del control del EV3D. Este dispositivo cuenta con sensores de profundidad, cámaras, micrófonos, una base motorizada y una compatibilidad en diferentes *software* como MATLAB, Visual Studio, C#, entre otros.

Para realizar esta tarea se identificaron dos subsistemas el sistema neurodifuso y el de gestión del EV3D. A continuación, se describirá brevemente la actividad de cada uno.

Sistema neurodifuso

Como se mencionó en la sección Arquitectura funcional, la subfunción “Sistema neurodifuso” realizará el procesamiento de todos los datos obtenidos por los sensores, procesando sus señales mediante el protocolo de comunicación e ingresándolos al sistema neurodifuso, el cual permitirá al sistema reconocer los movimientos del usuario y posteriormente generar las instrucciones para el movimiento dentro del Entorno Virtual Tridimensional.

Para el correcto funcionamiento de este subsistema es necesario definir qué sensor de movimiento se necesita, así como el lenguaje y entorno de programación que se utilizará para programarlo.

Gestión del EV3D

La subfunción de gestión del Entorno Virtual Tridimensional, EV3D, tiene como finalidad la correcta visualización y navegación en el entorno por parte del usuario.

Para llevar a cabo está subfunción es preciso definir el *software* de modelado, así como el motor de videojuegos con el que se desarrollará el entorno virtual tridimensional.

2.1.5 Selección de herramientas

Para la selección de herramientas para el diseño conceptual se utilizó como fundamento el Proceso de Análisis Jerárquico, AHP, el cual tiene como objetivo encontrar una solución que se ajuste a las necesidades de un problema específico.

En el caso concreto de esta investigación, este método permitió tomar la decisión sobre los *software* que se utilizarían y el sensor de movimiento, en la Tabla 4 se observan las opciones que se consideraron.

Tabla 4. Opciones para realizar el proyecto.			
	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Software de modelado	Blender	Maya	Cinema 4D
Software de programación	Visual Studio	Matlab	Python
Motor de Videojuegos	Unity	Unreal Engine 4	
Sensor de Movimiento	Kinect	LeapMotion	

2.1.5.1 Selección de alternativas

Para elegir los compontes tales como *software* y elementos necesarios de *hardware*, de manera subjetiva se seleccionaron criterios relevantes para la toma de decisiones, y se ponderaron en un rango del 1 al 5, dónde los elementos evaluados con 5 son los más deseables, y los evaluados con 1 son los menos deseables.

2.1.5.1.1 Software de modelado

Para tomar una decisión sobre el *software* de modelado a utilizar se tomaron en cuenta tres *software*, y una serie de elementos que se consideraron esenciales para el manejo de este, tales como:

- Precio de la licencia: Se contempla el costo en pesos mexicanos, así como si tiene convenios con el Instituto Politécnico Nacional para su libre uso en versión estudiantil.
- Funcionalidad: Se ven las características del software, como lo serían las herramientas que tiene, posibilidades de estudiar terrenos, funciones, atajos, compatibilidad con software, entre otros.
- Portabilidad: El cómo importa y exporta archivos.

- Bajo poligonaje: Las herramientas que tiene para reducir la cantidad de polígonos en un modelo, así como el tipo de formas primitivas que puede insertar.
- Soporte: La ayuda que presenta en cuanto a páginas de soporte, foros y posibilidad de contactar al fabricante para solucionar problemas.

Tabla 5. Resultados ponderados derivados de la elección del software de modelado.			
Software de modelado	Blender	Maya	Cinema 4D
Precio de licencia (deseable el más barato)	30.3%	18.18%	6.06%
Funcionalidad	41.68%	41.68%	41.68%
Portabilidad	3.0%	1.2%	1.2%
Bajo Poligonaje	11.4%	9.12%	6.84%
Soporte	3.2%	3.2%	1.92%
TOTAL	**89.58%**	73.38%	57.7%

En el apéndice AHP del *software* de modelado se puede ver el proceso para llegar a los resultados de la Tabla 5 con la cual se concluye que el *software* Blender será la opción elegida.

2.1.5.1.2 Motor de videojuegos

Para tomar una decisión sobre el motor de videojuegos a utilizar se tomaron en cuenta dos *software*, y una serie de elementos que se consideraron esenciales para el manejo de este, tales como:

- Recursos: La cantidad de aditamentos o apoyos que posee el software.
- Conocimiento anterior del software: Conocimientos adquiridos previamente.
- Soporte: La ayuda que presenta en cuanto a páginas de soporte, foros y posibilidad de contactar al fabricante para solucionar problemas.

.

Tabla 6. Resultados ponderados derivados de la elección del motor de videojuegos.		
Motor de Videojuegos	Unity 3D	Unreal Engine
Recursos	17.92%	13.44%
Conocimiento previo del software	55.04%	41.28%
Soporte	8.8%	7.04%
TOTAL	**81.76%**	61.76%

En el apéndice AHP del motor de videojuegos se puede ver el proceso para llegar a los resultados de la Tabla 6 con lo cual se concluye a Unity como el motor a utilizar en el presente proyecto.

2.1.5.1.3 Software de programación

Para tomar una decisión sobre el *software* de programación a utilizar, así como el lenguaje, se tomaron en cuenta tres *software*, y una serie de elementos que se consideraron esenciales para el manejo de este, tales como:

- Precio de la licencia: Se contempla el costo en pesos mexicanos, así como si tiene convenios con el Instituto Politécnico Nacional para su libre uso en versión estudiantil.
- Soporte: La ayuda que presenta en cuanto a páginas de soporte, foros y posibilidad de contactar al fabricante para solucionar problemas.
- Librerías: Recursos de programación que ayudan a realizar operaciones especifica.
- Tratamiento de datos: Si el lenguaje es 1 o 0 indexado, el manejo de los arreglos entre otras.
- Interfaz con el programador: Cómo es la consola de trabajo.

Tabla 7. Resultados ponderados derivados de la elección del del software de programación.			
Software de programación	Visual Studio	MATLAB	Python
Precio de licencia (deseable el más bajo)	28.6%	11.4%	28.6%
Soporte	50.6%	50.6%	30.36%
Librerías	11.8%	11.8%	9.44
Tratamiento de datos	4.8%	3.6%	3.6%
Interfaz con el programador	2.9%	2.9%	.58%
Total	**98.4%**	80.3%	72.58%

En el apéndice AHP del *software* de programación se puede ver el proceso para llegar a los resultados de la Tabla 7 con lo cual se concluye que el lenguaje C# en la plataforma Visual Studio será el utilizado en este proyecto.

2.1.5.1.4 Sensor de movimiento

Para tomar una decisión sobre el sensor de movimiento a utilizar se tomaron en cuenta dos dispositivos, y una serie de factores que se consideraron esenciales para el manejo de este, tales como:

- Disponibilidad: Si se cuenta con fácil acceso al dispositivo y/o el tiempo de entrega de este.
- Huesos detectables: Cuantos y cuales huesos es capaz de detectar además de la distancia a la cual los detecta.
- Precio: Se contempla el costo en pesos mexicanos.

Tabla 8. Resultados ponderados derivados de la elección del sensor de movimiento.		
Sensor	Kinect	*Leap Motion*
Disponibilidad	70.8%	14.16%
Huesos detectables	23.0%	18.4%
Precio	6.2%	3.72%

Total	100%	36.28%

En el apéndice AHP de sensor de movimiento se puede ver el proceso para llegar a los resultados de la Tabla 8 con lo cual se concluye que el Kinect será el utilizado en este proyecto.

2.1.5.2 Concepto final

Finalmente, después de todo el proceso de decisión de elementos se concluye que el concepto final estará conformado por los elementos listados en la Tabla 9.

Tabla 9. Opciones elegidas para el sistema

	Opción Elegida
Software de modelado	Blender
Software de programación	Visual Studio
Motor de Videojuegos	Unity
Sensor de Movimiento	Kinect

2.2 Diseño detallado

En esta sección se abordará la descripción completa de los elementos técnicos sistema, a través de módulos y sus especificaciones.

2.2.1 Sistema neurodifuso

El sistema neurodifuso estará compuesto de cinco submódulos, este sistema realizará la recolección de información a través de los sensores, para posteriormente realizar el procesamiento mediante una red neuronal artificial, definiendo la decisión que controlará al EV3D. En la Ilustración 28 se puede ver un diagrama de flujo que explica el funcionamiento general del sistema neurodifuso.

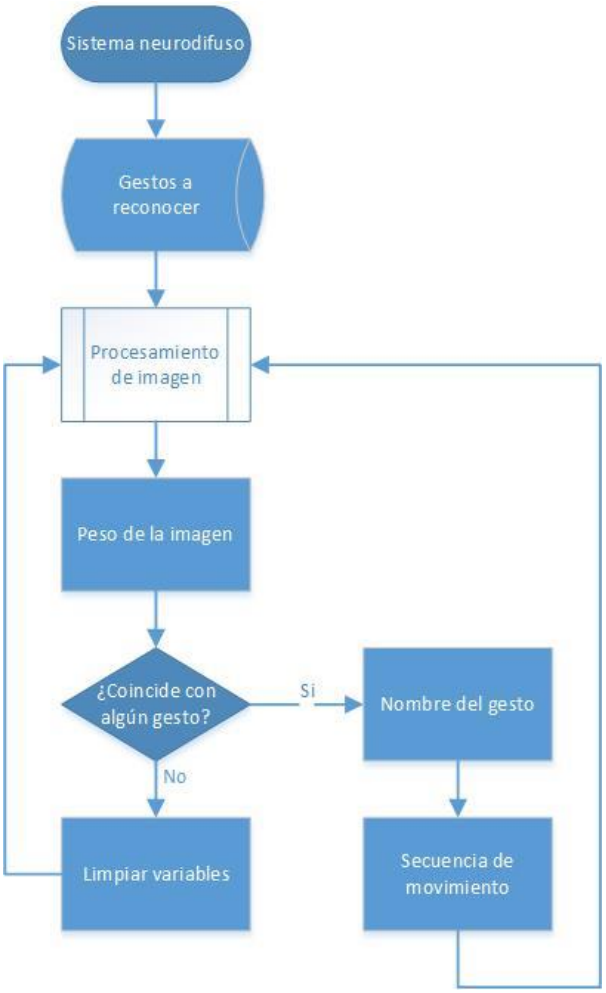

Ilustración 28. Diagrama de flujo del sistema neurodifuso.

2.2.1.1 Sensores

Este subsistema, estará encargado de recolectar información que introducirá el usuario a través de los sensores, incorporados dentro del sistema Kinect.

MOVIMIENTOS DEL USUARIO

El movimiento corporal de usuario será detectado mediante el dispositivo Kinect, para realizar esta acción será necesario que el usuario se encuentre a dos metros del sensor, efectuando una rutina de movimientos, los cuales están descritos en Ilustración 29.

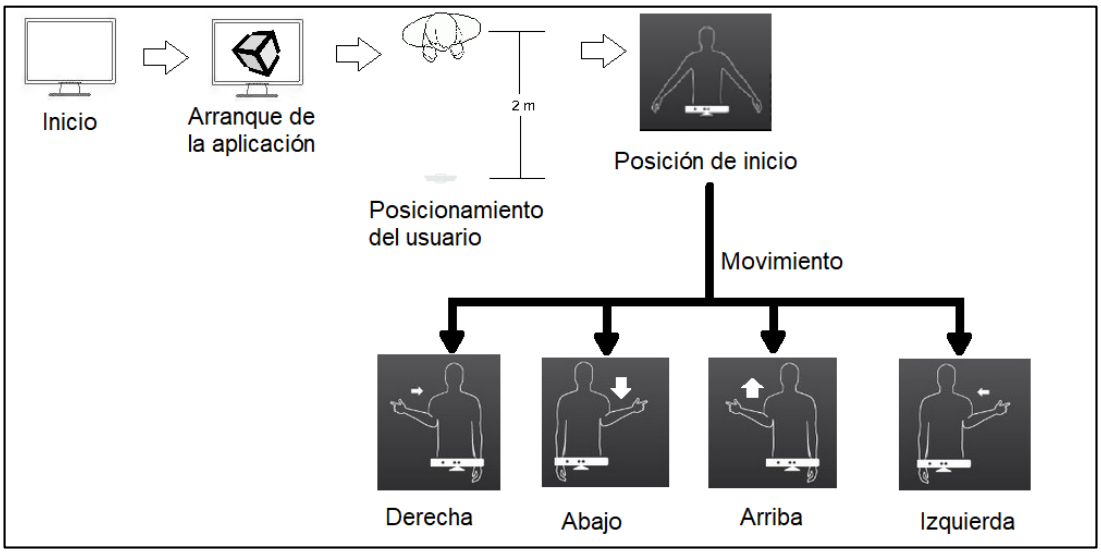

Ilustración 29. Diagrama de movimientos del usuario.

Los principales movimientos que realiza el avatar dentro del entorno virtual serán sobre los ejes x y z, (es decir izquierda, derecha, adelante y atrás) para ello el sensor capturará el movimiento del usuario, se requerirá que este tenga una postura inicial como la mostrada en la Ilustración 30.

Ilustración 30. Posición inicial del usuario. [35]

para los movimientos básicos reconocerá un cambio en el estado de los brazos, (Ilustración 31), donde del antebrazo izquierdo indica un movimiento lateral hacia

dicha dirección, y un movimiento lateral del antebrazo derecho indicará un movimiento hacia la derecha.

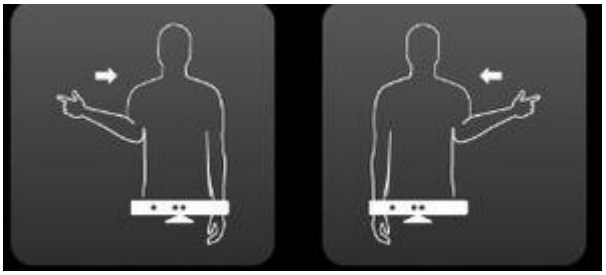

Ilustración 31. Gestos para desplazamiento a la derecha e izquierda. [35]

Así mismo para los movimientos hacia el frente y hacia atrás reconocerá un cambio en el estado de los brazos, esto se muestra en la Ilustración 32, donde del antebrazo izquierdo indica un movimiento de abajo hacia arriba generará un movimiento hacia el frente y un movimiento de arriba hacia abajo del antebrazo derecho indicará un movimiento hacia atrás.

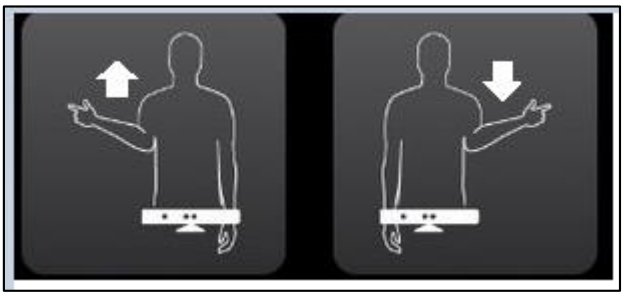

Ilustración 32. Gestos para desplazamiento de arriba hacia abajo. [35]

Validación

Se realizó una interfaz sencilla en Unity mediante la cual se pudiera probar los sensores del Kinect para la detección del usuario haciendo los gestos planteados para el presente proyecto, donde se parte de una pantalla que espera detectar a un usuario (Ilustración 33) para corroborar la posición de arranque del usuario (Ilustración 34) y después comenzar la detección de los múltiples gestos como se muestra en la Ilustración 35, Ilustración 36, Ilustración 37, Ilustración 38 y finalmente corroborar que con ayuda del sensor de profundidad solo detecte los gestos del primer usuario Ilustración 39.

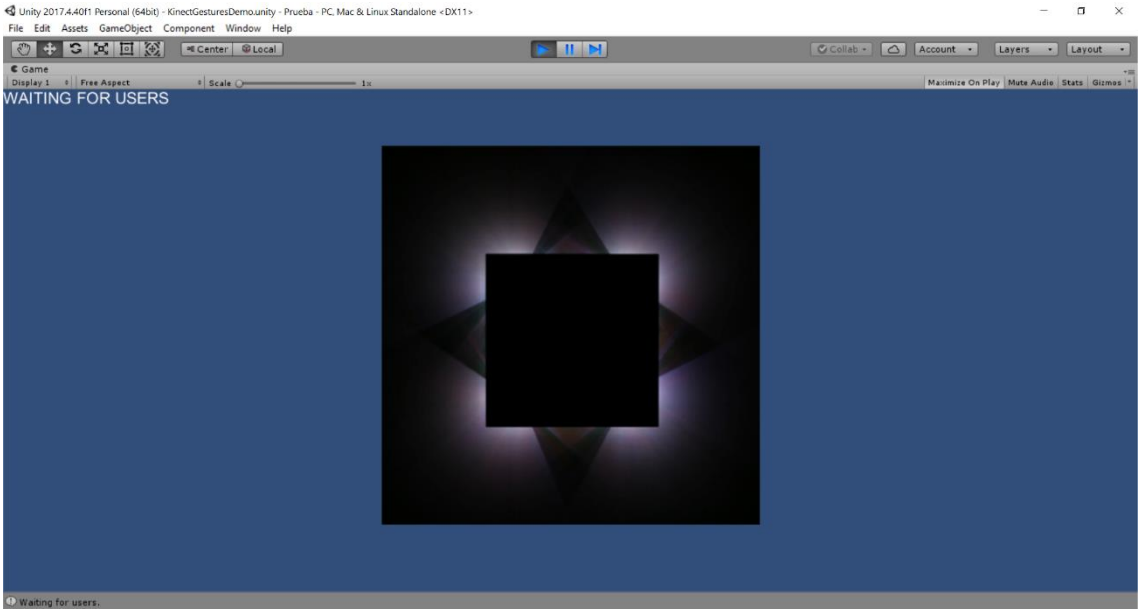

Ilustración 33. Pantalla de esperando usuario.

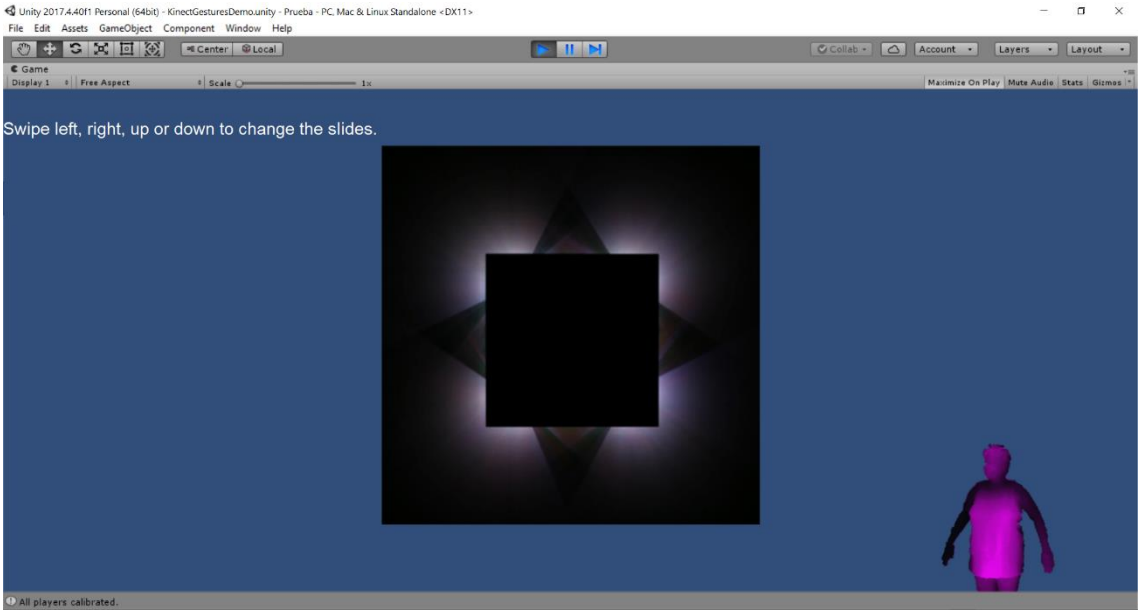

Ilustración 34. Detección de usuario para comenzar el programa.

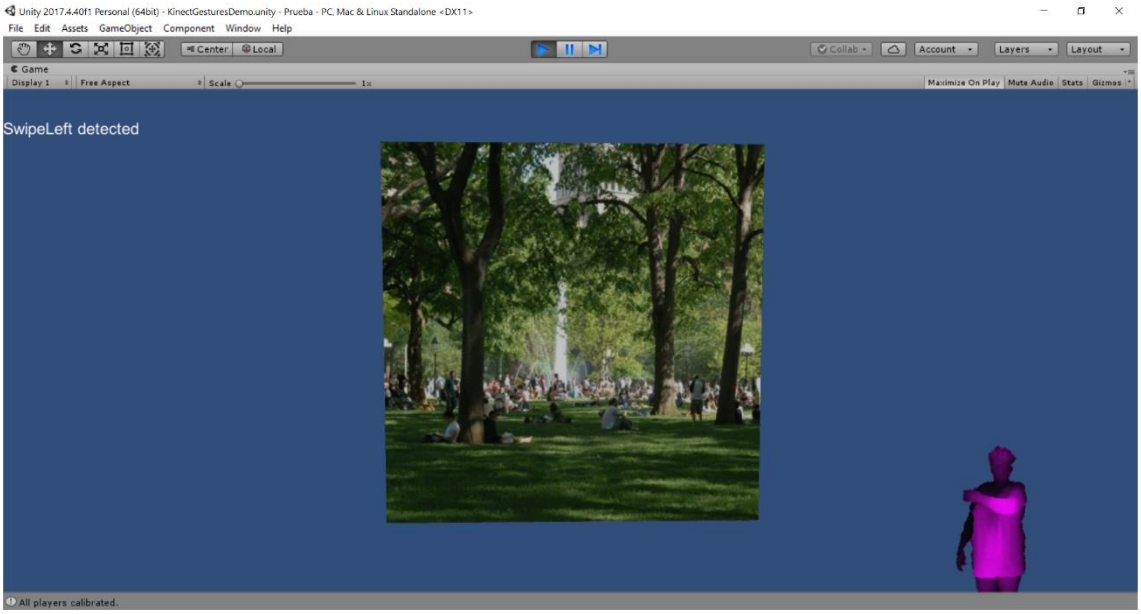

Ilustración 35. Desplazamiento hacia la izquierda

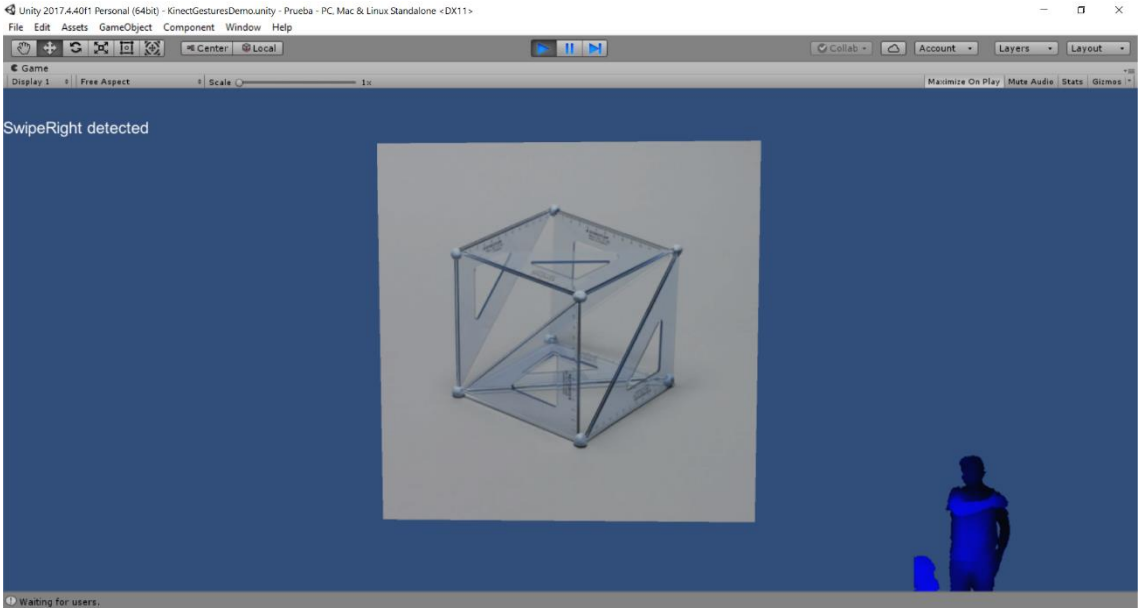

Ilustración 36. Desplazamiento hacia la derecha.

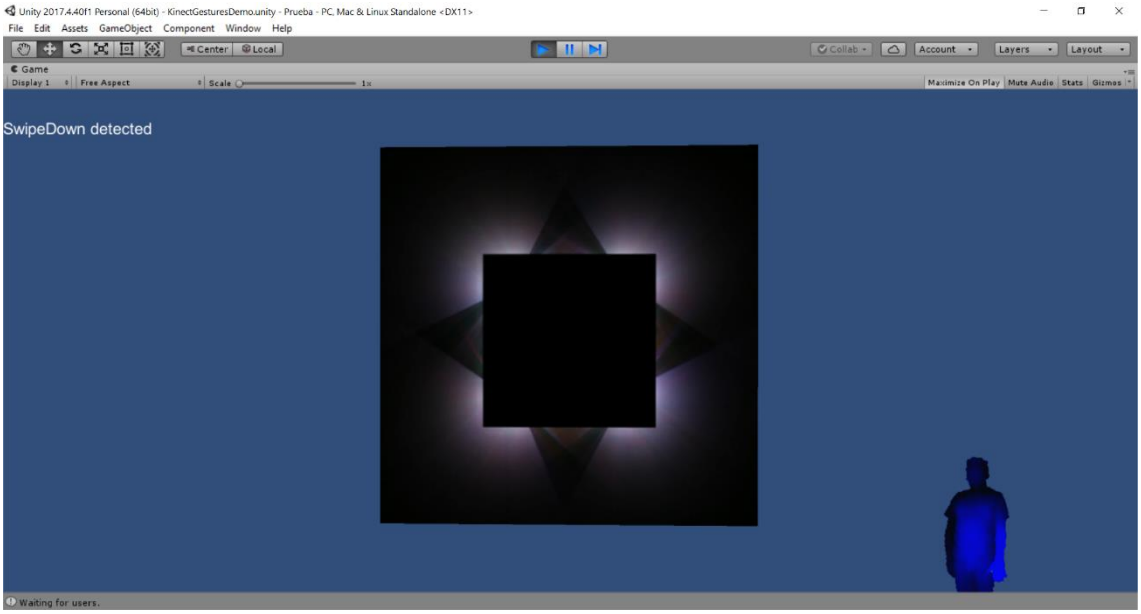

Ilustración 37. Desplazamiento hacia abajo

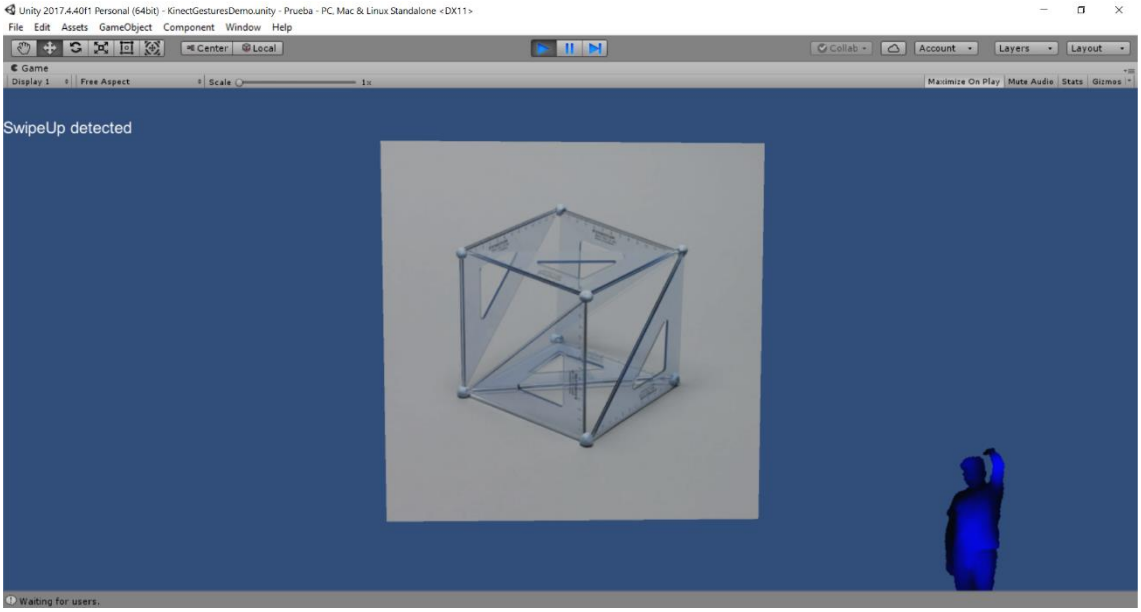

Ilustración 38. Desplazamiento hacia arriba.

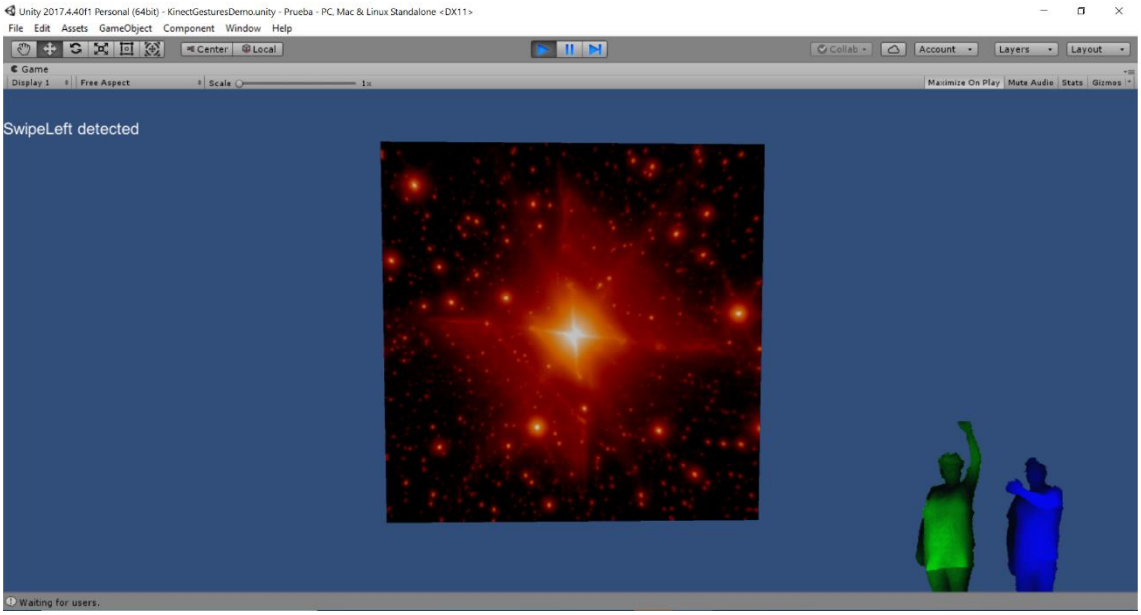

Ilustración 39. Detección de un único usuario a pesar de haber más personas presentes.

2.2.1.2 Comunicación

La comunicación entre el sensor Kinect con la computadora se lleva a cabo mediante el protocolo de conexión USB (Universal Serial Bus), ya que éste cuenta con USB 2.0 tal como se puede observar en el anexo Kinect.

El dispositivo Kinect requiere un adaptador que le provea 12 Volts y 1.06 Amperes, como alimentación interna para poder dividir los datos de la alimentación, este adaptador se muestra en la Ilustración 40.

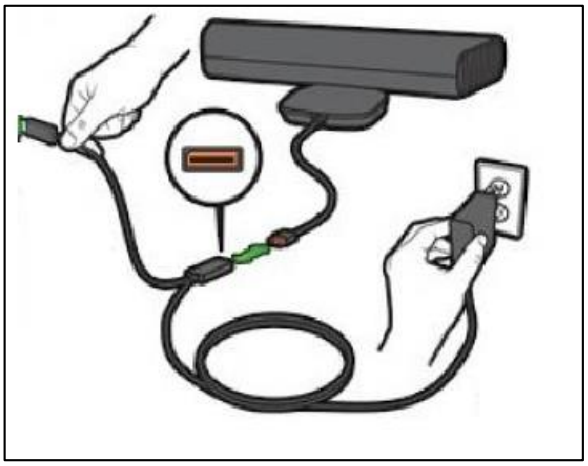

Ilustración 40. Adaptador eliminador USB Para Kinect 1. [36]

Validación

La comunicación se realizó como se muestra en la Ilustración 41 donde el Kinect se encuentra señalado en verde, la comunicación vía USB en color cian, la

alimentación en color naranja y el cable divisor de datos y alimentación de color rojo.

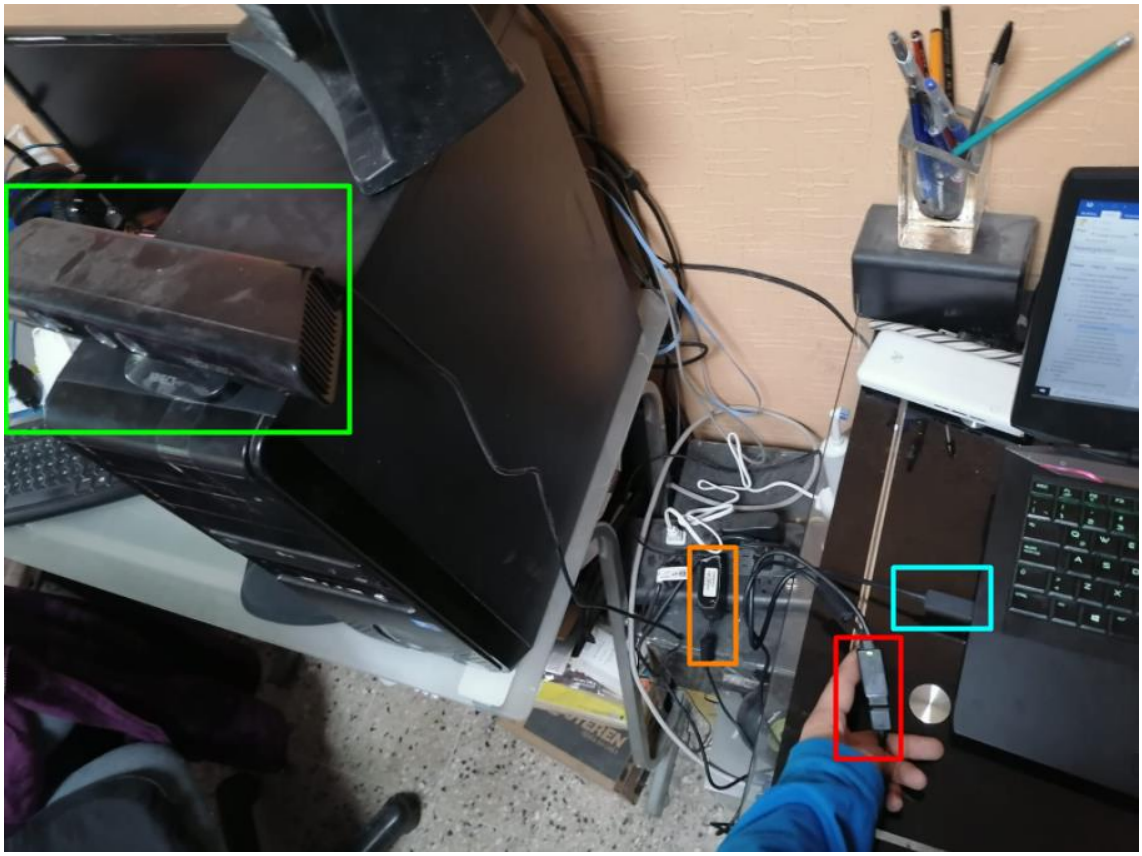

Ilustración 41. Conexión del Kinect a la computadora para su correcta comunicación.

2.2.1.3 Procesamiento

El procesamiento es el módulo correspondiente que genera elementos toma de decisiones, en la Ilustración 42 se muestra un diagrama que representa la secuencia de operación del sistema de procesamiento.

Ilustración 42. Diagrama de flujo del procesamiento.

Validación

Se realizó un código que utilizara la cámara RGB del Kinect para posteriormente binarizar la imagen y obtener un contorno del usuario en cuestión, al cual con ayuda de la detección de bordes es posible obtener el centroide del mismo y con ello escalar mediante momentos de Hu el esqueleto al tamaño adecuado y asignarlo a su imagen, para realizar la correcta detección del usuario (Ilustración 43).

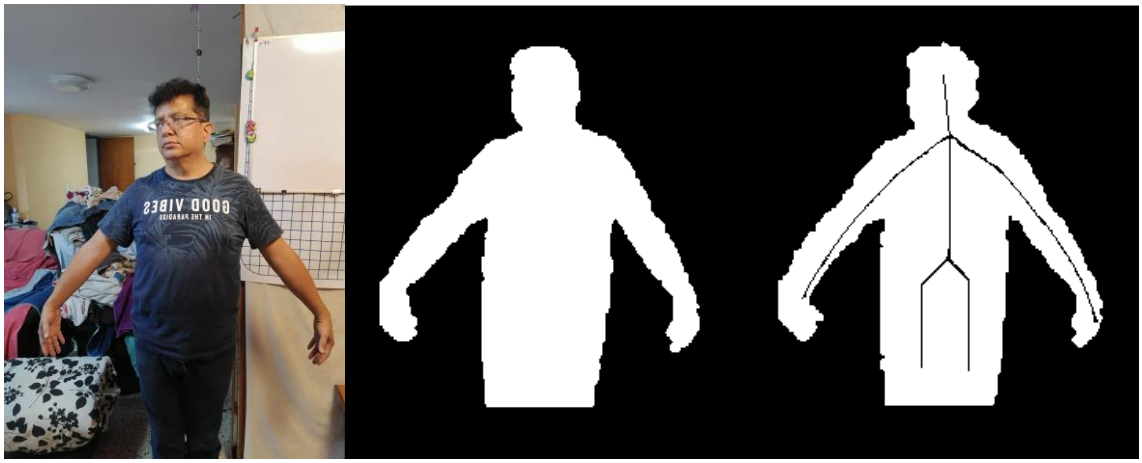

Ilustración 43. Usuario frente a la cámara RGB, binarización del usuario y asignación del esqueleto en la imagen binarizada del usuario.

2.2.1.4 Toma de Decisión

Este bloque es el encargado de asignar a cada entrada de datos, mediante el sensor, una salida que se reflejará como una decisión, buscando que los gestos mantengan similitudes con alguno de los patrones almacenados en la base de datos. Este proceso es llevado gracias a un control difuso el cual funciona como se muestra en la Ilustración 44.

Ilustración 44. Diagrama a bloques de un control difuso.

2.2.1.5 Control del EV3D

Este módulo define el movimiento que realizará el avatar y la manipulación de la cámara virtual dentro del el entorno virtual tridimensional como se muestra en la Ilustración 45.

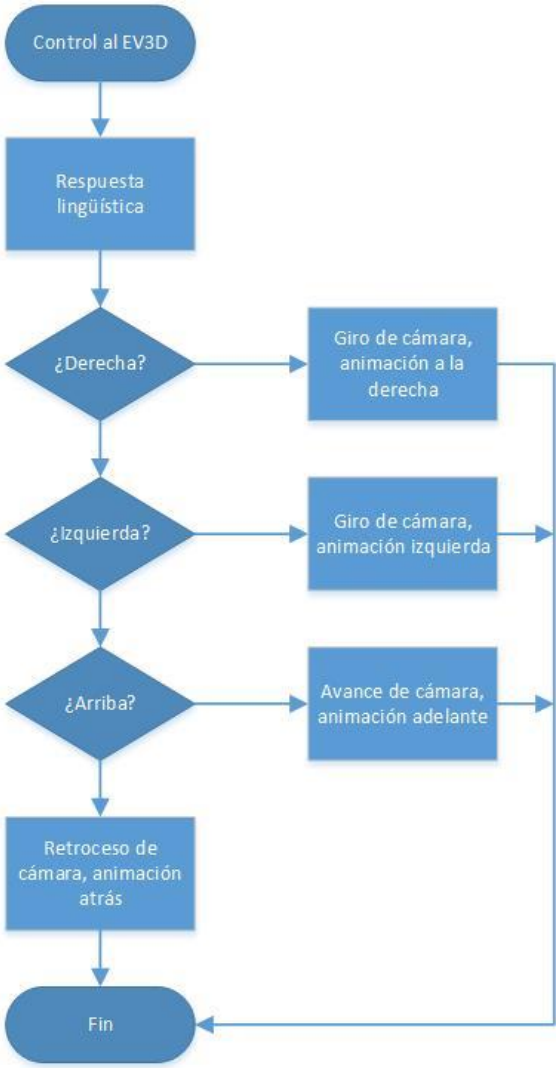

Ilustración 45. Diagrama de flujo del control al EV3D.

2.2.2 Gestión del entorno virtual tridimensional

La gestión del Entorno Virtual Tridimensional estará compuesta de tres submódulos, los cuales comprenden la Visualización y Modelado del entorno completo, la navegación dentro de éste y la interfaz entre el sistema y el usuario.

2.2.2.1 Visualización y modelado

Dentro de la visualización se encuentra el entorno, la arquitectura, y la alfarería e ídolos (Ilustración 46) correspondientes a la zona arqueológica de Cacaxtla en el período Epiclásico, los modelos y la arquitectura, el modelado de la zona se ahonda en el apartado Reconstrucción virtual hipotética.

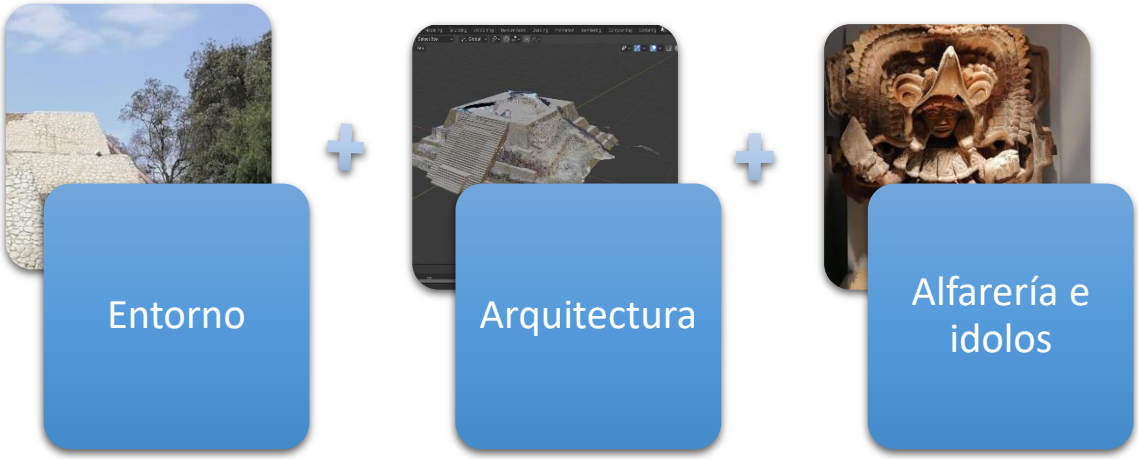

Ilustración 46. Elementos de la visualización.

Dentro de la visualización es primordial que el entorno sea correspondiente al periodo histórico referenciado, y que tanto los ídolos como la alfarería se encuentren en los lugares que de acuerdo con las investigaciones arqueológicas se ubicaban o donde fueron hallados.

Validación

Una vez validado el modelo de la reconstrucción hipotética del Gran basamento de Cacaxtla se inició el proceso de crear el entorno virtual tridimensional en el cual se fueron añadiendo los renders tridimensionales de la arquitectura como se muestra en la Ilustración 47.

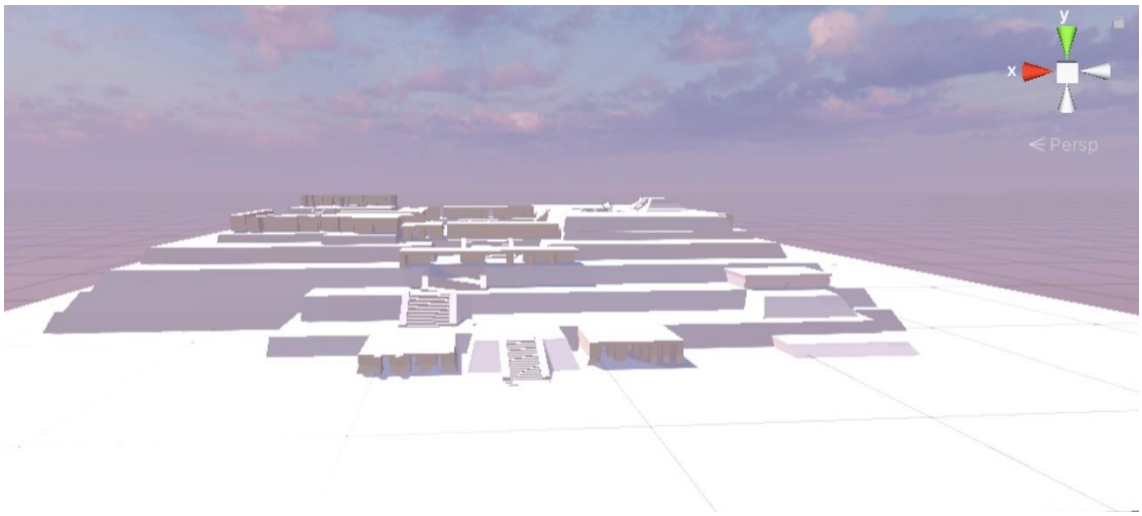

Ilustración 47. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla realizada para el presente proyecto en el ambiente de Unity.

2.2.2.2 Navegación

Este módulo está encargado de la navegación del usuario dentro del EV3D, Este módulo es fundamental para entender la disposición del entorno virtual.

2.2.2.3 Interfaz con el usuario

Finalmente, la Interfaz de usuario estará compuesta de distintas pantallas, instrucciones de uso y efectos de sonido (Ilustración 48).

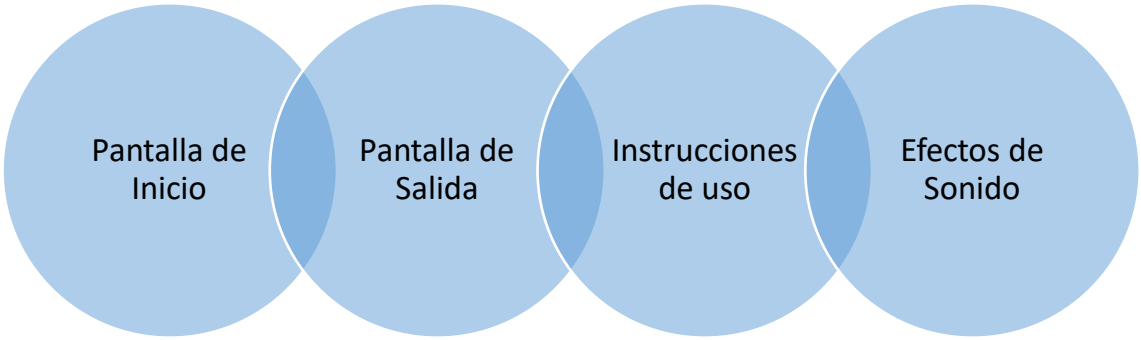

Ilustración 48. Elementos de la interfaz de usuario.

2.2.3 Protección y ubicación del sistema

Se contempla la implementación de una caja de acrílico de 30x10x10 cm para la protección del Kinect como se muestra en la Ilustración 49, el acrílico es un material transparente que no genera reflejo ni a la cámara RGB ni al sensor de profundidad del Kinect.

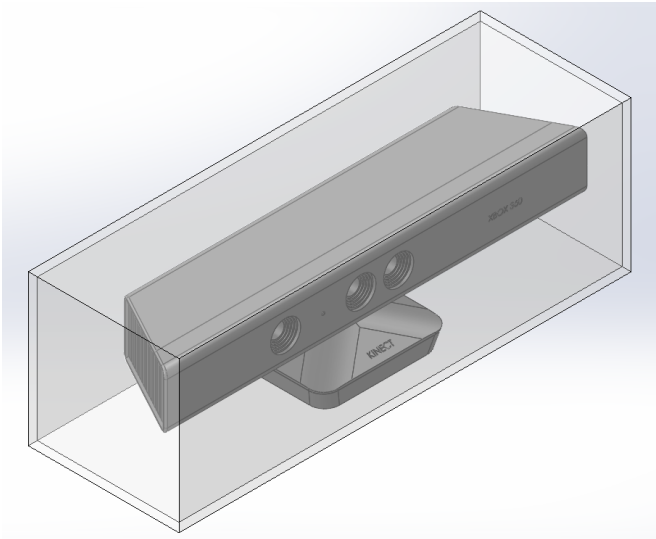

Ilustración 49. Estructura propuesta para resguardar al Kinect.

2.2.4 Reconstrucción virtual hipotética

La documentación histórica y arqueológica, es fundamental para determinar las características volumétricas, superficiales y ornamentales que deben ser representadas en la reconstrucción virtual. Por ello, deben ser consultados planos o fotografías del sitio para poder empezar el modelado del Gran Basamento de Cacaxtla un ejemplo de los planos se puede apreciar en la Ilustración 50 así como en el anexo El Gran Basamento de Cacaxtla, los cuales es importante mencionar es una reconstrucción hipotética parcial.

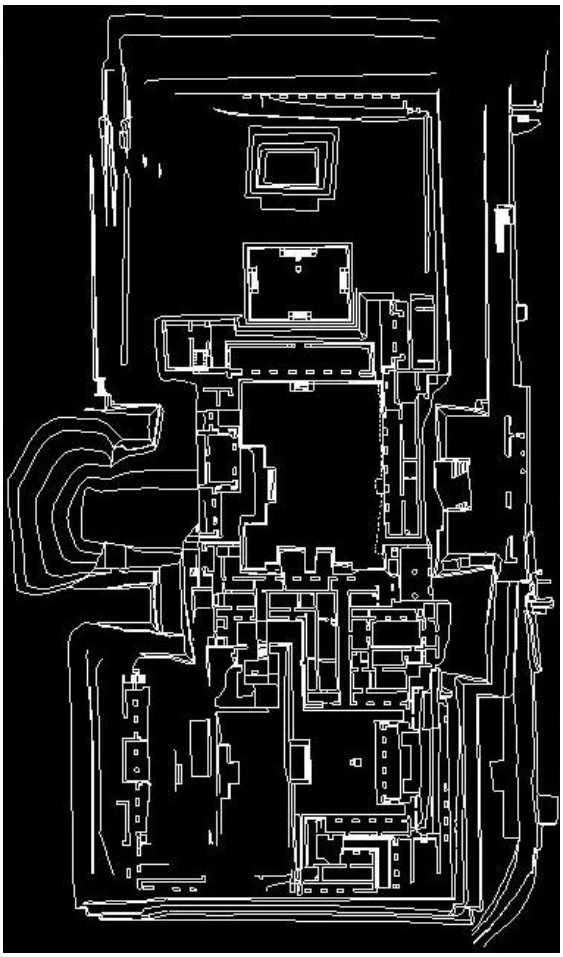

Ilustración 50. Plano del Gran Basamento de Cacaxtla. [37]

En el caso del Gran basamento no se cuenta con planos de levantamiento completos, que permitan una reconstrucción clara por lo cual se puede optar por usar un *software* de fotogrametría. La aplicación de este en el presente proyecto pretende reconstruir los elementos que conservan la mayor parte de su estructura, por lo que en este apartado se menciona el procedimiento para realizar la reconstrucción del Gran Basamento de Cacaxtla.

La metodología propuesta se puede observar en la Ilustración 51.

Ilustración 51. Procedimiento para realizar el modelado de los diferentes elementos del Gran Basamento de Cacaxtla.

El proceso inicia tomando fotografías de los elementos a reconstruir para lo cual se ocupa la técnica mostrada en la Ilustración 52 la cual proporciona una cobertura completa del objeto a reconstruir permitiendo asi un mejor mallado dentro del *software* de fotogrametria, la cantidad de fotografias a tomar se determina por las dimensiones del objeto a reconstruir, pero el objetivo de esta tecnica es que cada imagen guarde el 60% de relación con la imagen anterior, así al introducirlas en el *software* este logra reconstruir con mayor precisión el objeto lo cual facilitará su aproximación en el *software* de modelado.

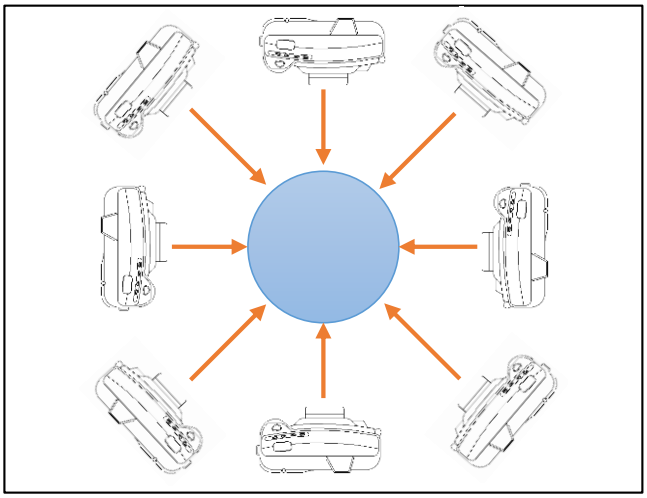

Ilustración 52. Técnica de fotografía empleada para la fotogrametría.

Un ejemplo de la captura de fotografías se puede ver en la Ilustración 53 así como su reconstrucción en el software de modelado en la Ilustración 54 y finalmente el modelo obtenido en la Ilustración 55.

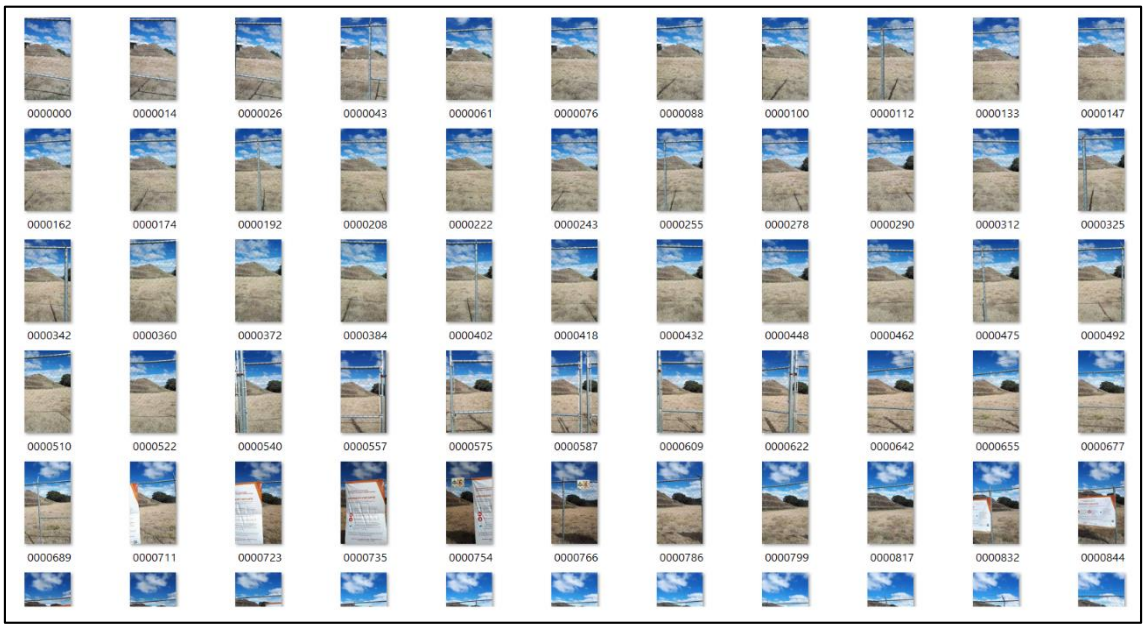

Ilustración 53. Secuencia fotográfica del basamento aledaño al Gran Basamento de Cacaxtla.

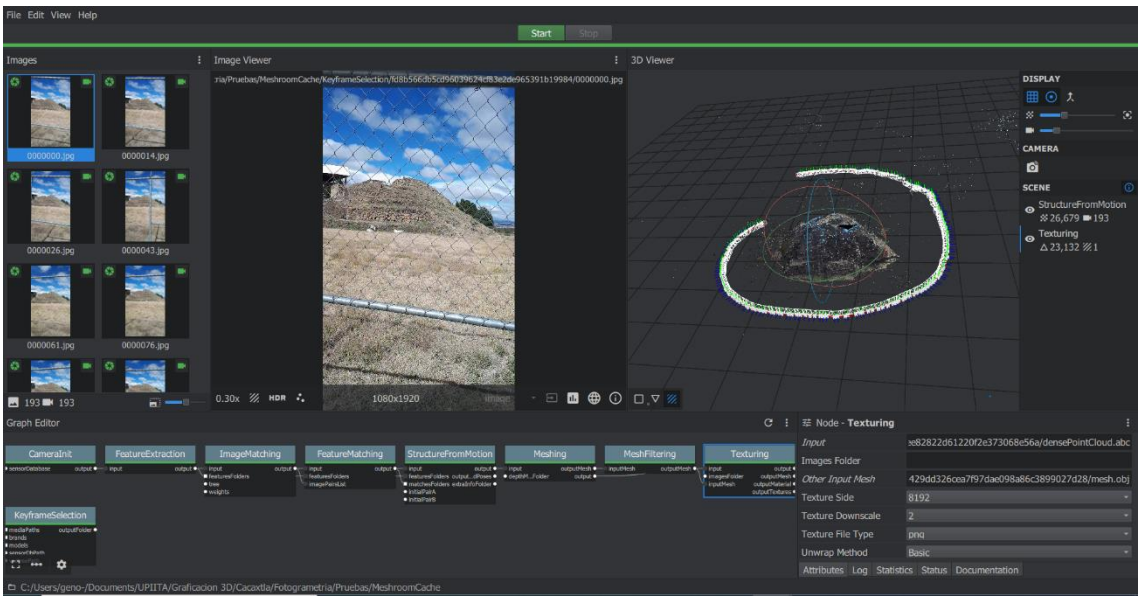

Ilustración 54. Reconstrucción generada por el software de fotogrametría.

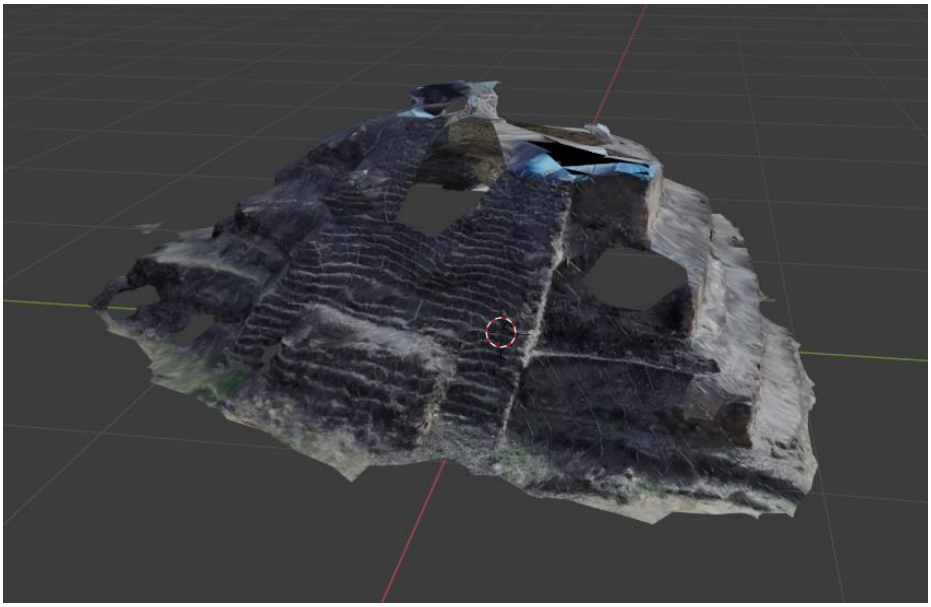

Ilustración 55. Modelo obtenido del basamento aledaño al Gran Basamento de Cacaxtla.

La fotogrametría genera un modelo tridimensional de la apariencia actual del artefacto o estructura, el cual al basarse en una técnica de mallado en triángulos (Ilustración 56) suele poseer una alta concentración de vértices, con la intención de mitigar el coste computacional, se pueden reducir esta alta concentración de vértices al realizar una aproximación del elemento con formas geométricas básicas (primitivas), llevando el modelo a poseer el mínimo de vértices que mantengan la relación del aspecto del objeto a reconstruirse. lo cual al introducirlo en un entorno virtual tridimensional representa una carga en el motor de videojuegos.

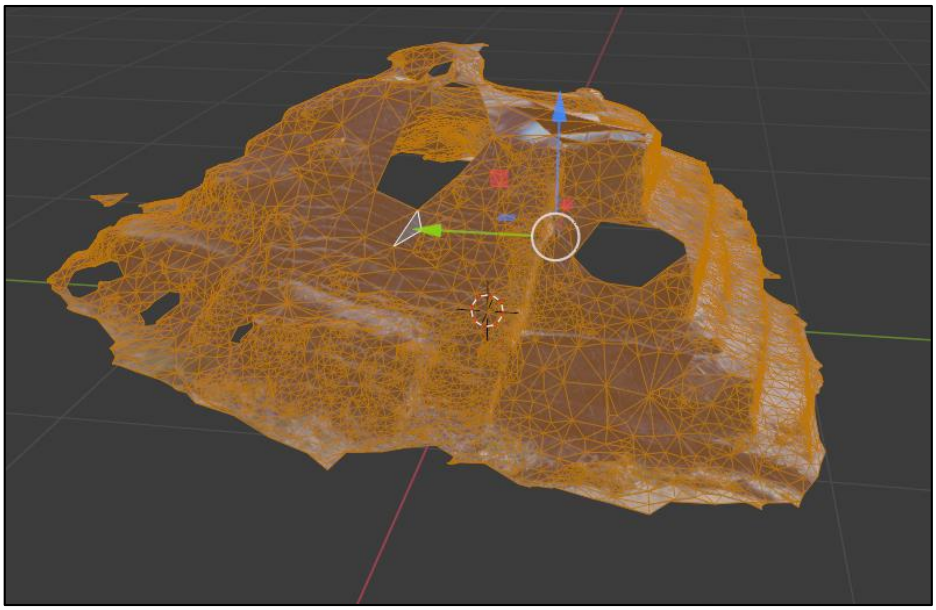

Ilustración 56. Malla de triángulos del modelo obtenido a través de fotogrametría.

Para realizar este proceso se coloca una forma geométrica primitiva básica con la que se irán aproximando los vértices a las dimensiones principales del modelo obtenido a través de la fotogrametría, no existe ningún lineamiento del número de vértices o primitivas que se puedan utilizar para realizar la reconstrucción, pero para los fines del presente trabajo se busca que sea la cantidad mínima que mantengan una correcta relación entre el aspecto original y el reconstruido.

Un ejemplo de esto se puede ver en la Ilustración 57 en la cual se puede apreciar como hay una disminución significativa de vértices, pero se mantiene la relación de aspecto.

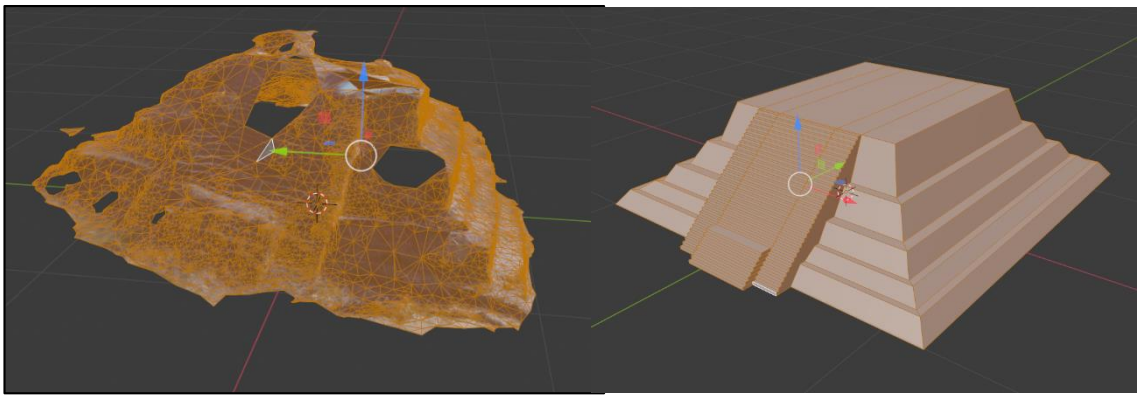

Ilustración 57. Reconstrucción basada en el modelo fotogramétrico.

Finalmente, el último paso del modelado es realizar la texturización de los objetos virtuales obtenidos para presentar una correcta visualización de los mismos.

Para realizar esto se pueden generar las texturas en *software* de diseño o tomando las muestras de textura en el sitio.

El procedimiento de fotogrametría ya fue realizado, se hizo una visita al sitio para tomar las fotografías pertinentes de los diferentes edificios que conforman al Gran Basamento, así como algunos de sus elementos que son necesarios para la comprensión del sitio.

Validación

Con ayuda de la fotogrametría y los planos del sitio se logró realizar un modelo virtual del Gran basamento de Cacaxtla como se muestra en la Ilustración 58.

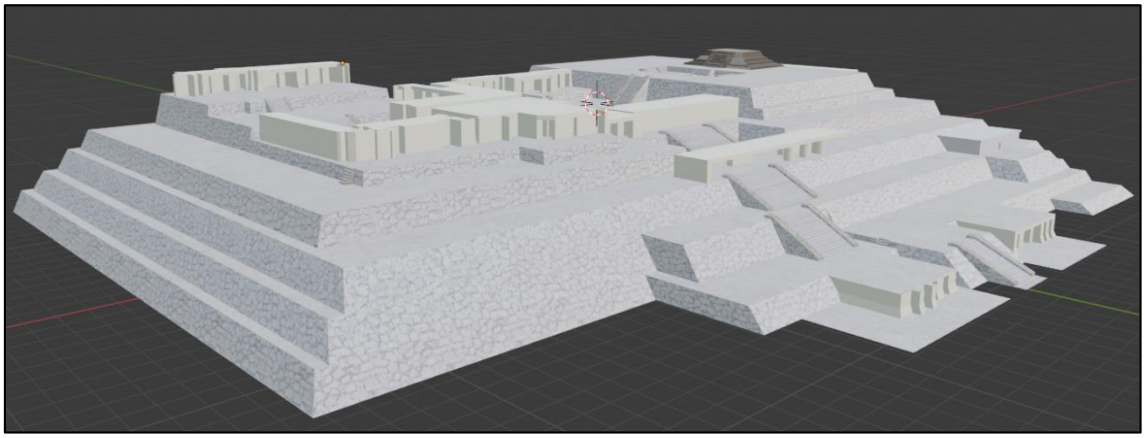

Ilustración 58. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla realizada para el presente trabajo.

El gran Basamento posee muchas estructuras con diversos niveles de deterioro, donde es difícil proponer una extrapolación reconstructiva, en este marco se consultaron las propuestas de la arquitecta Geneviève Lucet algunas de sus propuestas arquitectónicas se pueden ver en la Ilustración 59 y la Ilustración 60.

Ilustración 59. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla sector centro. [37]

Ilustración 60. Reconstrucción hipotética del Gran Basamento de Cacaxtla sector sur. [37]

Conclusiones

La presente investigación se desarrollado de manera satisfactoria abarcando en su totalidad los objetivos correspondientes a la asignatura de TT1.

Siendo así se desarrolló el sistema de adquisición de datos de manera satisfactoria, así como la reconstrucción hipotética del gran basamento de Cacaxtla mediante el software Blender, basado en planos e investigaciones previas.

Así mismo se empezó el desarrollo de la programación el entorno virtual y la delimitación de las acciones del usuario, estas acciones involucran los límites de movimiento y las colisiones dentro del espacio, las cuales evitaran que el usuario se superponga ante el modelo 3D del gran basamento de Cacaxtla, si no que interactúe con este como si fuera una estructura.

Trabajo futuro

Para efectos de cumplir con el cronograma del presente proyecto, se establece que en el periodo 2022-1 se realizará el diseño y desarrollo del sistema neurodifuso, así como su incorporación al motor de videojuegos, el cual será el encargado de que el usuario pueda moverse dentro del entorno virtual tridimensional con los gestos que realice, también se generará la base de datos necesaria para la identificación de los gestos y el entrenamiento del sistema neurodifuso.

Así mismo se plantea que para dicho periodo se añadan los elementos de fauna, alfarería e ídolos, así como el desarrollo de los mecanismos de juego y la interfaz para la manipulación de la reconstrucción hipotética del gran basamento.

Apéndices

AHP

Proceso de jerarquía analítica por sus siglas en inglés *AHP* fue desarrollado en la década de los 70's por el profesor Thomas L. Saaty. Inicialmente, este método fue utilizado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos para resolver una serie de problemas específicos en el proceso de toma de decisiones.

Se trata de un método de toma de decisiones multicriterio que permite elegir entre distintas alternativas en función de una serie de criterios o variables de selección (normalmente jerárquicas), que a menudo entran en conflicto entre sí.

Para realizar la comparación se utiliza la Escala Fundamental de Saaty Ilustración 61, esta escala permite transformar aspectos cualitativos en cuantitativos.

Puntaje	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente al objetivo.
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio están ligeramente a favor de uno los elementos.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio están fuertemente a favor de uno de los elementos.
7	Importancia muy fuerte o demostrable	Un elemento es preferido sobre el otro en un grado muy fuerte y esta preferencia puede demostrarse en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia favorece a una alternativa sobre la otra extremadamente.
2,4,6,8	Para valores intermedios entre las definiciones	Algunas veces se necesita interpolar un juicio, porque no hay una palabra que lo describa la relación entre los elementos

Ilustración 61. Escala Fundamental de Saaty. [38]

Este método hace una comparación por pares de cada nivel, primero determina el peso de cada criterio o variable acomodándolos en una matriz de valoración de criterios, una vez obtenidos estos, se compararán las distintas alternativas existentes para cada criterio o estándar. El resultado es la ponderación de las alternativas para cada una de las variables ponderadas previamente, para definir finalmente definir el peso global de la prioridad. [39]

AHP del *software* de modelado

Tabla 10. Ponderaciones asignadas a los software de modelado.			
Software de modelado	Blender	Maya	Cinema 4D
Precio de licencia (deseable el más bajo)	5	3	1
Funcionalidad	4	4	4
Portabilidad	5	2	2
Bajo poligonaje	5	4	3
Soporte	5	5	3

En la Tabla 10 se puede observar las ponderaciones asignadas a los distintos factores que se consideraron. Blender al ser un *software* libre [40] obtiene un 5 en el precio de licencia, su funcionalidad se evalúa en las características del *software* [40] las cuales son óptimas pero no ideales por lo cual adquiere un valor de 4, su portabilidad referente a como exporta sus archivos y los importa, según el manual de usuario disponible en su página web y la experiencia propia se puede definir un 5 para este aspecto, el bajo poligonaje del programa se refiere a cuantos polígonos poseen los modelos 3D y las herramientas que posee el *software* para ayudarnos a reducir estos polígonos, Blender se lleva un 5 debido a que posee tres alternativas para este proceso y por último en soporte la cantidad de documentación, foros o maneras de contactar al fabricante para que ayude con algún problema o duda Blender tiene su propia página de soporte, más sus páginas especializadas de foros aunado a eso la posibilidad de enviar un correo con nuestro problema específico, por lo cual obtiene una calificación de 5.

Maya es un *software* de Autodesk y su licencia tiene un costo en el caso de una licencia mensual tiene costo de $2,713.00 MXN o una licencia anual de $21,698.00 MXN [41] en el caso de este proyecto, al estar planeado a un año lo que comprende trabajo terminal I y II se contemplaría comprar una licencia anual, también se toma en cuenta que Autodesk otorga una licencia estudiantil gratuita al ser alumnos inscritos en Instituto Politécnico Nacional por estos motivos es por lo cual se pondera en un 3 ya que se considera el caso de que se tenga que

pagar licencia una vez donado este trabajo al INAH, su funcionalidad al igual que Blender son óptimas pero no ideales y también se le asigna un valor de 4, en cuanto a su portabilidad, ésta se encuentra un poco complicada aparte de necesitar varios procesos para generar los archivos necesarios para el motor de juegos [41] por lo cual se le asigna una calificación de 2, en cuestión de bajo poligonaje cuenta con dos herramientas para poder reducir polígonos [41] por lo cual se le asigna un 4, por último en cuestión de soporte Maya posee su propia página de soporte, sus propias páginas de foros y la posibilidad de enviar correo a Autodesk en caso de problemas por lo cual, tiene un valor de 5.

Cinema 4D es un *software* de Maxon y su licencia tiene un costo de $94 USD y la licencia anual en $718.92 USD [42] que según la tasa de cambio el dólar se vende en $20.84 MXN [43] por lo que la licencia mensual tendría un costo de $1,958.96 MXN y la licencia anual un costo de $14,982.29 MXN este es el motivo por el cual recibe un valor de 1, su funcionalidad al igual que Blender son óptimas pero no ideales y también se le asigna un valor de 4, en cuanto a su portabilidad, se encuentra un poco complicada aparte de necesitar varios procesos para generar los archivos necesarios para el motor de juegos [42], por esa razón se le asigna una calificación de 2, en cuestión de bajo poligonaje cuenta con una herramientas para poder reducir polígonos [42] así se le asigna un 3, por último en cuestión de soporte no cuenta con una página especializada, cuenta con algunos foros y la posibilidad de enviar un correo a fabricante, por lo que se le asigna un valor de 3.

Resultados de las prioridades

Se realizaron un total de diez comparaciones, que dieron un rango de consistencia de 18.0%, se generó la siguiente matriz de decisión (Tabla 11), con un valor de eigen vector principal de 5.811

Tabla 11. Matriz de decisión para software de modelado.

	1	2	3	4	5
1	1	0.25	9.00	7.00	8.00
2	4.00	1	8.00	7.00	8.00
3	0.11	0.12	1	0.11	1.00
4	0.14	0.14	9.00	1	5.00

5	0.12	0.12	1.00	0.20	1

Finalmente, como se observa en la Tabla 12, la funcionabilidad es el aspecto más decisivo seguido del precio de la licencia y el bajo poligonaje, finalmente la portabilidad y el software tienen porcentajes de prioridad muy bajos, que aun así se deben considerar.

Tabla 12. Resultados de las prioridades mediante el método AHP.

Prioridad	Porcentaje de prioridad	Rango
Precio de la Licencia	30.3%	2
Funcionabilidad	52.1%	1
Portabilidad	3.0%	5
Bajo Poligonaje	11.4%	3
Soporte del software	3.2%	4

AHP del motor de videojuegos

Tabla 13. Ponderaciones asignadas a los software para EV3D.

Software para EV3D	Unity 3D	Unreal Engine
Recursos	4	3
Conocimiento anterior del software	4	3
Soporte	5	4

En la Tabla 13 se puede observar las ponderaciones asignadas a los distintos elementos que se tomaron en cuenta. Unity 3D en cuestión de recursos se le otorga un valor de 4 ya que posee un amplio repertorio pero muchos de ellos son de paga [44], debido al conocimiento anterior del software se le asigna una calificación de cuatro ya que ambos miembros del equipo tienen un cierto dominio sobre el software, por último en cuestión de soporte Unity posee su propia página de soporte, sus propias páginas de foros y la posibilidad de enviar correo a Unity en caso de problemas por lo cual tiene un valor de 5.

Unreal Engine en cuestión de recursos se le otorga 3 ya que tiene un catálogo menor y muchos de ellos son de paga [45], el conocimiento del software tiene un valor de 3 ya que se posee un nivel mínimo de conocimientos para su manejo, por último, en cuestión de soporte Epic Games posee su propia página de soporte, sus propias páginas dentro de foros aunque son pocas y la posibilidad de enviar correo a Unreal Engine en caso de problemas, por lo cual tiene un valor de 4.

Resultados de las prioridades

Se realizaron un total de tres comparaciones, que dieron un rango de consistencia de 48.9% se generó la siguiente matriz de decisión (Tabla 14), con un valor de eigen vector principal de 3.469.

Tabla 14. Matriz de decisión para Motor de Videojuegos.

	1	2	3
1	1	5.00	0.17
2	0.20	1	0.25
3	6.00	4.00	1

En la Tabla 15 se observa que el conocimiento previo del software es el aspecto más importante para tomar en cuenta, seguido de los recursos y finalmente el soporte.

Tabla 15. Resultados de las prioridades mediante el método AHP.

Prioridad	Porcentaje de prioridad	Rango
Recursos	22.4%	2
Soporte	8.8%	3
Conocimiento previo del software	68.8%	1

AHP del *software* de programación

Tabla 16. Ponderaciones asignadas a los software de programación.			
Software de programación	Visual Studio	MATLAB	Python
Precio de licencia (deseable el más bajo)	5	2	5
Soporte	5	5	3
Librerías	5	5	4
Tratamiento de datos	4	3	3
Interfaz con el programador	5	5	1

En la Tabla 16 se puede observar las ponderaciones asignadas a los distintos componentes que se tomaron a consideración. Visual Studio es un programa de Microsoft que se incluye en algunos motores de videojuegos y que Microsoft permite ocupar de forma gratuita siempre y cuando no se desee acceder a características empresariales del mismo [46] por lo que se le asigna un valor de 5, en cuestión de soporte Visual Studio posee su propia página de soporte, sus propias páginas de foros y la posibilidad de enviar correo a Microsoft en caso de problemas por lo cual tiene un valor de 5, en cuanto a las librerías existe una gran gama de ellas más las que desarrollan los usuario así que se le otorga un valor de 5, en cuanto al tratamiento de datos se trata de un lenguaje 0 indexado y su manejo de arreglos es bueno aunque podría mejorar, aunado a eso es necesario habilitar varias librerías para los diferentes tipos de datos así que tiene un valor de 4, por último la interfaz con el programador es muy amigable (Ilustración 62) y permite realizar los códigos de manera fluida, cuenta con un compilador que facilita encontrar los errores.

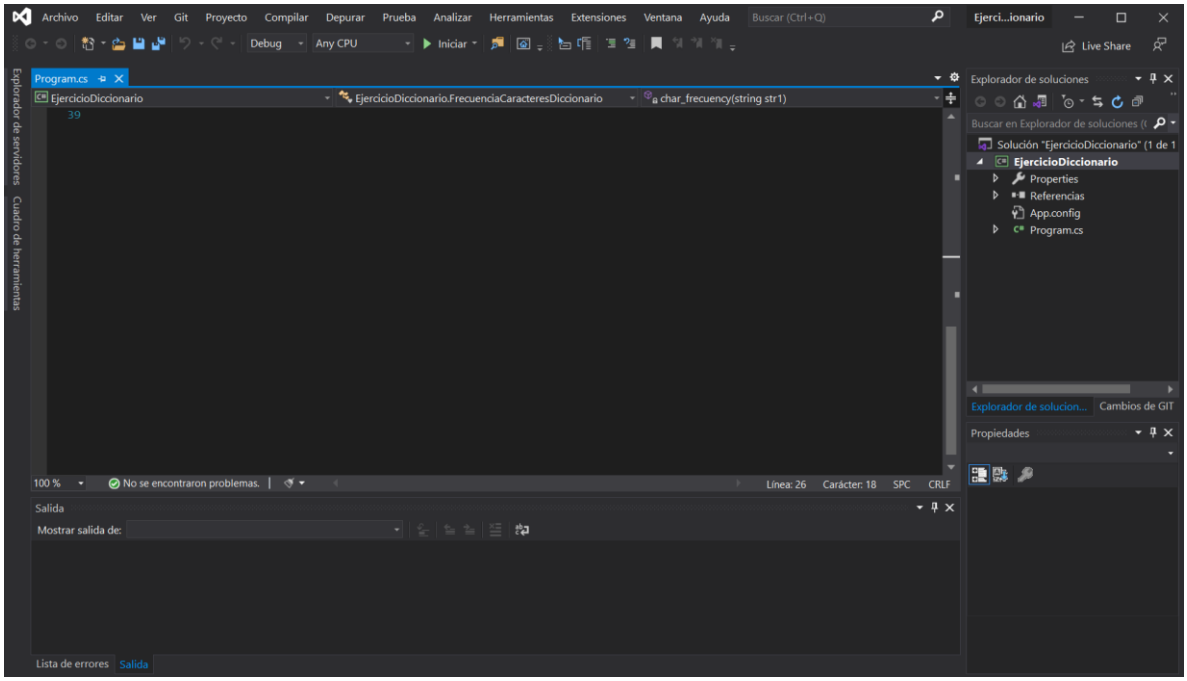

Ilustración 62. Interfaz entre el programador y Visual Studio.

MATLAB es un software de *MathWorks* que tiene un precio de $850 USD la licencia anual [47] que según la tasa de cambio el dólar se vende en $20.84 MXN [43] la licencia anual tendría un precio de $17,714.00 MXN por lo que se le otorga un valor de 2, ya que en caso de ser donado debería pagarse esta licencia, en cuestión de soporte MATLAB posee su propia página de soporte, sus propias páginas de foros y la posibilidad de enviar correo a *MathWorks* en caso de problemas por lo cual tiene un valor de 5, en cuanto a las librerías existe una gran gama de ellas más las que desarrollan los usuario así que se le da un valor de 5, en cuanto a tratamiento de datos se trata de un lenguaje 1 indexado, posee facilidades para trabajar arreglos y no es necesario incluir tantas librerías, sin embargo, posee algunas dificultadas al trabajar datos específicos de matemática muy compleja y comienza a arrojar aproximaciones lineales por lo cual tiene una calificación de 3, por último la interfaz con el programador es muy amigable (Ilustración 63) y permite realizar los códigos de manera fluida, cuenta con un compilador que facilita encontrar los errores.

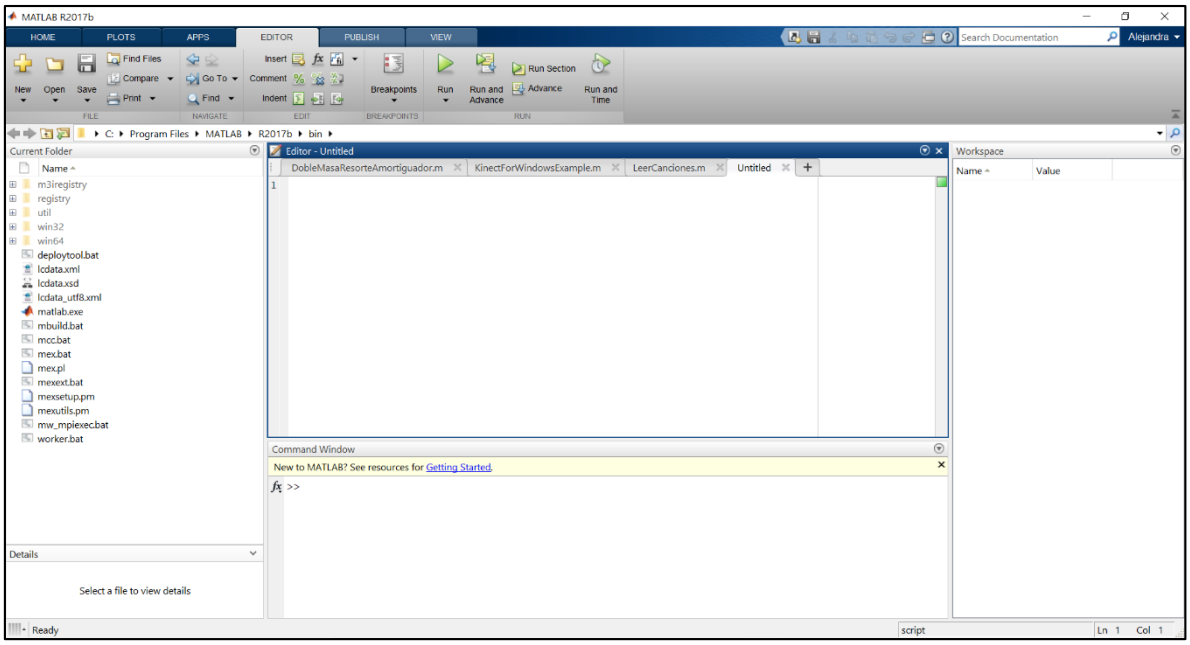

Ilustración 63. Interfaz entre el programador y MATLAB.

Python es un lenguaje cuyos compiladores son gratuitos, teniendo así un valor de 5 en el precio de la licencia, en cuestión de soporte Python posee su propia página de soporte, sus propias páginas de foros, aunque con poca información y tienen demasiadas preguntas sin resolver por lo cual tiene un valor de 3, en cuanto a tratamiento de datos es un lenguaje 0 indexado, necesita de bastantes librerías para tratar determinados tipos de arreglos y constantemente hay que mandar importar funciones por lo que se le evalúa con un valor de 3, finalmente la interfaz con el programador es escasa (Ilustración 64), tiene un compilador similar a una ventana de comandos que ayuda a darnos una idea de donde está el error pero no es preciso en por qué falla así que tiene un valor de 1.

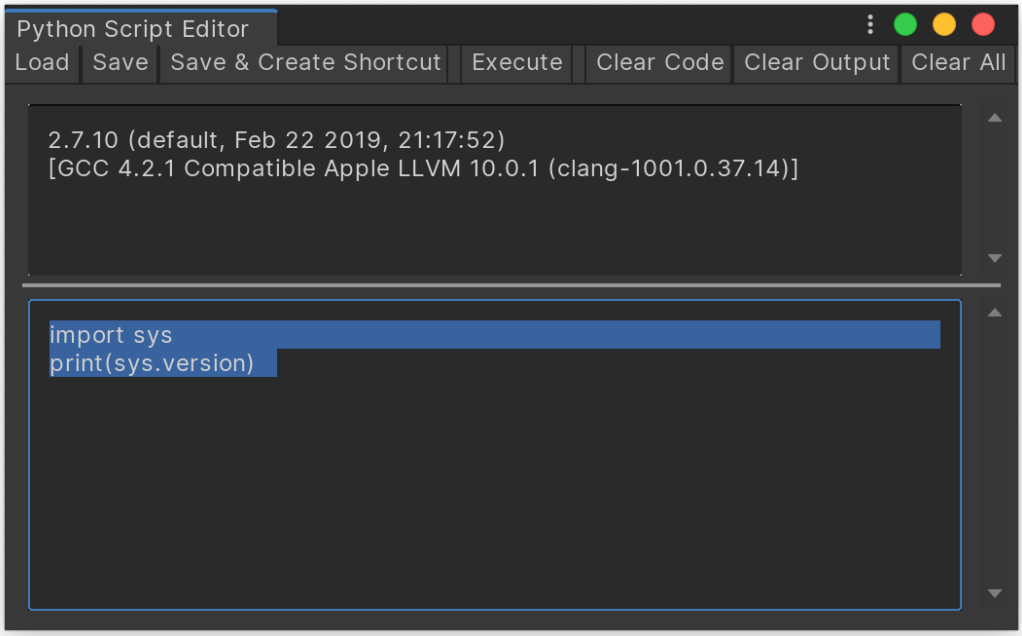

Ilustración 64. Interfaz entre el programador y Python.

Resultados de las prioridades

Se realizaron un total de diez comparaciones, que dieron un rango de consistencia de 34.1% se generó la siguiente matriz de decisión (Tabla 17), con un valor de eigen vector principal de 6.533

Tabla 17. Matriz de decisión para software de modelado.

	1	2	3	4	5
1	1	0.20	8.00	6.00	6.00
2	5.00	1	6.00	8.00	6.00
3	0.12	0.17	1	6.00	1.00
4	0.17	0.12	0.17	1	7.00
5	0.17	0.17	0.17	0.14	1

La Tabla 18, muestra que el soporte es el elemento más relevante para tomar en cuenta, seguido del precio de la licencia, y las librerías disponibles, finalmente el tratamiento de datos y la interfaz con el programador tienen porcentajes de prioridad muy bajos, que aun así se deben tener en cuenta.

Tabla 18. Resultados de las prioridades mediante el método AHP.		
Prioridad	Porcentaje de prioridad	Rango
Precio de la Licencia	28.6%	2
Soporte	50.6%	1
Librerías	11.8%	3
Tratamiento de datos	6.0%	4
Interfaz con el programador	2.9%	5

AHP de sensor de movimiento

Tabla 19. Ponderaciones asignadas a los sensores de movimiento.		
Sensor	Kinect	Leap Motion
Disponibilidad	5	1
Huesos detectables	5	4
Precio	5	3

En la se puede observar las ponderaciones asignadas a los distintos componentes que se tuvieron presentes. La disponibilidad del Kinect se determina debido a que en este momento se cuenta con 2 dispositivos para realizar las pruebas mientras que del *Leap Motion* se tendría que hacer un pedido el cual tardaría aproximadamente una semana en llegar.

El Kinect es capaz de detectar veinticinco huesos [33], lo cual es relevante para el proyecto porque determinara el tipo de gestos que podrá hacer el usuario en el caso de Kinect es capaz de detectar estos huesos en el cuerpo entero del usuario ya sea parado o sentado mientras que el *Leap Motion* es capaz de detectar veintisiete huesos, únicamente huesos de la mano, pero con una mayor precisión [48].

El último factor para tomar en cuenta es el precio de los dispositivos ya que se podría necesitar un reemplazo por lo cual se compara el precio de ambos dispositivos en una página en común encontrando que el Kinect es casi diez veces más barato que el *Leap Motion*.

Resultados de las prioridades

Se realizaron un total de tres comparaciones, que dieron un rango de consistencia de 25.0% se generó la siguiente matriz de decisión (Tabla 20), con un valor de eigen vector principal de 3.240

Tabla 20. Matriz de decisión para el sensor de movimiento.

	1	2	3
1	1	5.00	7.00
2	0.20	1	6.0
3	0.14	0.17	1

Así en la Tabla 21 se percibe que la Disponibilidad será el factor decisivo para esta toma de decisión, seguido por los huesos detectables y el precio de los sistemas.

Tabla 21. Resultados de las prioridades mediante el método AHP.		
Prioridad	Porcentaje de prioridad	Rango
Disponibilidad	70.8%	1
Huesos detectables	23.0%	2
Precio	6.2%	3

Anexos

Kinect

- Láser IR:

  Se trata del sensor CMOS monocromo de 1/2”MT9M001C12STM de marca Micrón con las siguientes características:

  - Tamaño de píxel 5.2µm
  - Formato de video 5:4 con resolución 1280 x 1024
  - 1.3 Megapíxeles
  - Rango de temperaturas de trabajo: 0°C a 70°C

  Se trata de un láser no modulado, no produce pulsos en su salida, sino que se mantiene a nivel constante, la longitud de onda es de 830nm. Consta de un sistema de difracción que subdivide el rayo en múltiples instancias, proyectando un patrón de puntos pseudoaleatorio.

- Cámara RGB

  Es un Micrón MT9M112, un sensor de imagen CMOS System-on-Chip que tiene las siguientes características:

  - Tamaño de píxel: 2,8µm x 2.8µm
  - 1.3 Megapíxeles
  - Resolución: 1.28H x 1.024V
  - Filtro de color Bayer
  - 15 fps a máxima resolución, 30 fps a 640 x 512
  - Rango de temperaturas de trabajo: -30°C a +70°C
  - Soporta VGA, QVGA, CIF, y QCIF

- Cámara de profundidad

  Se trata de un sensor CMOS que posee un filtro de paso de infrarrojos a la misma frecuencia del láser.

- Base motorizada

  La cámara está equipada con un motor que inclina arriba o abajo la cámara ±27° para poder abarcar cómodamente el cuerpo de los usuarios sin importar la altura a la que está situada la cámara. Posee un acelerómetro que indica la inclinación que posee en cada instante.

- Arreglo de micrófonos:

Está compuesto por cuatro micrófonos, que permiten la comunicación con el dispositivo y darle órdenes al mismo. Su configuración hace que sea capaz de reconocer la localización de donde proviene el audio dentro de la habitación, y están programados para captar y erradicar el posible ruido de ambiente.

(a) (b)

Ilustración 65. a) Sensores y láser empotrados en una placa metálica. b) Placas paralelas a la metálica con la electrónica y microchips que controlan el dispositivo. [49]

Estas partes descritas se encuentran montadas dentro de una caja de plástico negra y alargada, donde las cámaras y el láser permanecen unidos a una placa metálica que los mantiene situados a la distancia oportuna (Ilustración 65a). La caja va unida a la base mediante una barra móvil que es accionada por el motor de inclinación. Paralelamente a la placa metálica se sitúan dos placas con microchips que se encargan de controlar el sistema y procesar la información recogida por los sensores (Ilustración 65b). Entre ellos destaca el PS1080 SoC, el auténtico ‘cerebro’ del Kinect, que se encarga de procesar la información de profundidad, ejecutando los algoritmos necesarios dentro del propio chip, así como la de imagen RGB y microfonía (Ilustración 66). Cuenta con una interfaz USB 2.0 que es la que transmite la información procesada. El procesamiento de la profundidad se hace dentro del Kinect, y no depende de a que esté conectada. La información no se procesa en el ordenador, éste sólo la lee.

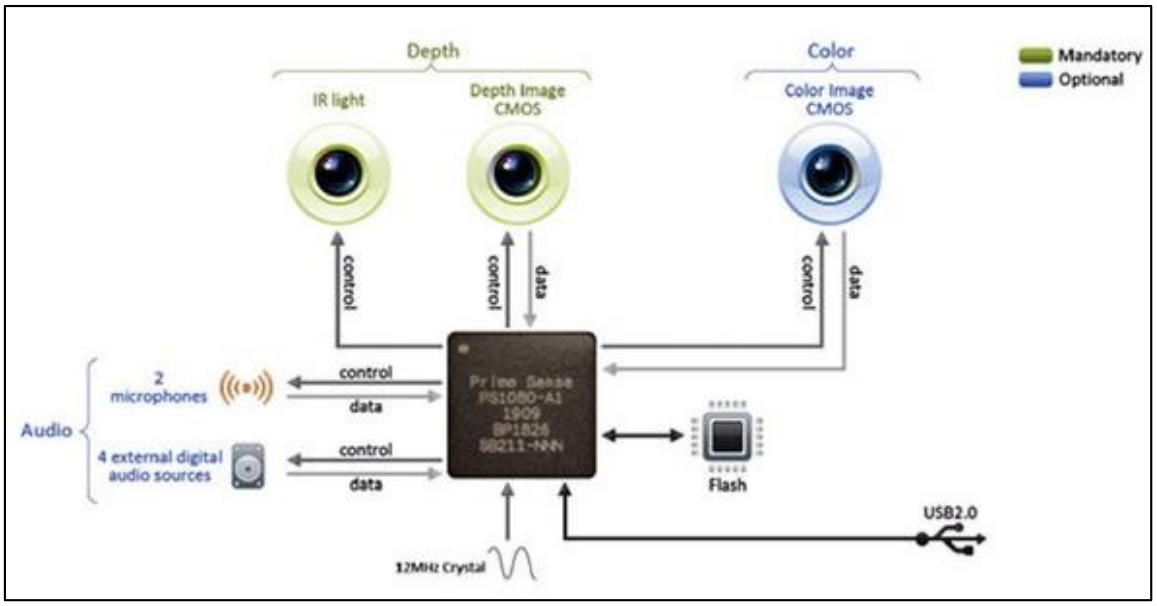

Ilustración 66. Diagrama a bloques del sensor Kinect - Arquitectura de hardware del PS1080 SoC [49]

Las especificaciones técnicas del microchip se muestran en la Tabla 22. Ahí se ponen en evidencia algunas restricciones que se han visto en cuanto a los componentes, como el campo de visión, la resolución de las imágenes de profundidad y el rango de operación.

Tabla 22. Especificaciones del PS1080

Especificación técnica	PS1080
Campo de visión	58° Horizontal, 45° Vertical, 70° Diagonal
Tamaño de la imagen de profundidad	VGA (640 x 480)
Resolución espacial en x/y a 2 metros de distancia	3 mm
Resolución en Z a 2 metros de distancia	1 cm
Fotogramas por segundos máximos	60 fps
Rango de operación	0.8m – 3.5 m
Tamaño de la imagen de color	UXGA (1600 x 1200)
Audio: Micrófonos integrados	Dos micrófonos
Audio: Entradas digitales	Cuatro entradas
Interfaz de datos	USB 2.0

Fuente de energía	USB 2.0
Consumo	2.25W
Dimensiones (Ancho x alto x espesor)	14cm x 3.5cm x 5cm
Ambiente de uso	Cerrado
Temperatura de operación	0°C – 40°C

Además, el Kinect está equipado con un ventilador que se activa cuando la temperatura alcanzada es mayor a 70°C y que se alimenta por la toma USB. [50]

Leap Motion Controller

El *Leap Motion Controller* (Ilustración 67) de *Ultraleap* es un módulo óptico de seguimiento manual que captura el movimiento de las manos y los dedos de los usuarios para que puedan interactuar de forma natural con el contenido digital. Pequeño, rápido y preciso, el *Leap Motion Controller* se puede utilizar para aplicaciones de productividad con computadoras con Windows, integrarse en pantallas o soluciones de hardware de nivel empresarial, o adjuntarse a auriculares de realidad virtual/aumentada para la creación de prototipos AR/VR/XR investigación y desarrollo.

El controlador es capaz de rastrear las manos dentro de una zona interactiva 3D que se extiende hasta 60 cm (24 ”) o más, extendiéndose desde el dispositivo en un campo de visión típico de 140x120 °. El *software* de *Leap Motion* es capaz de distinguir veintisiete elementos de la mano, incluidos los huesos y las articulaciones, y seguirlos incluso cuando están ocultos por otras partes de la mano, en la Tabla 23 se muestran todas las especificaciones del sensor Leap Motion. [51]

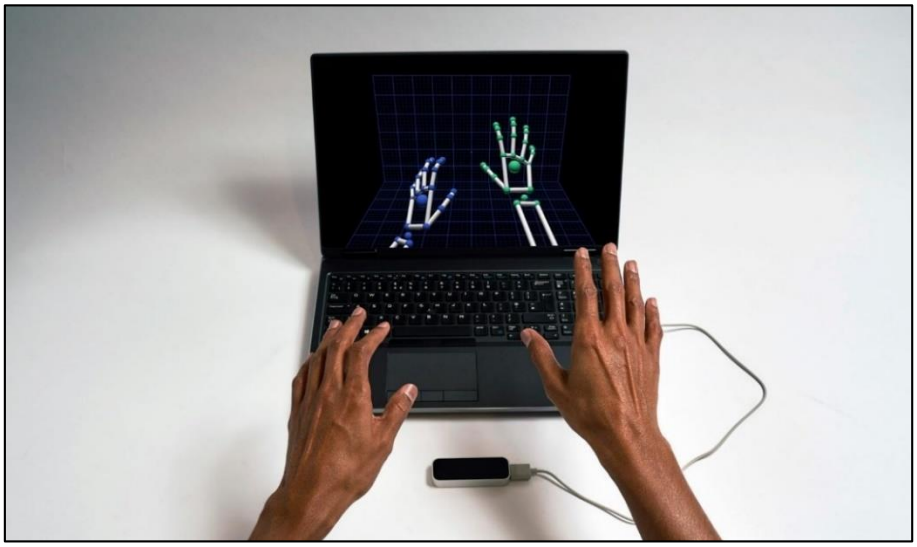

Ilustración 67. Leap Motion Controller funcionando. [51]

Tabla 23. Especificaciones del sensor Leap Motion. [51]	
Especificación técnica	*Leap Motion Controller*
Fuente de alimentación	5V DC vía USB (mínimo 0.5A)
Conexión	USB 2.0
Protección de ingreso	Resistente a salpicaduras

Métodos de montaje	Puede ser colocado en el escritorio, montado en un visor VR o empotrado en un *hardware* más grande
Zona de interacción	Profundidad de hasta 60 cm (24 "), hasta 80 cm (31") como máximo; 140 × 120 ° típico campo de visión. El seguimiento funciona en una variedad de condiciones ambientales
Cámaras	Dos cámaras de infrarrojo cercano de 640x240 píxeles; espaciados 40 milímetros; con ventana infrarroja transparente, opera en el rango espectral de 850 nanómetros +/- 25; normalmente funciona a 120 Hz; capaz de capturar imágenes en 1 / 2000th de un segundo
Interfaz de cámara	La versión Experimental Universal Video Class (UVC) proporciona acceso a controles como brillo LED, gamma, exposición, ganancia, resolución, etc.
LEDs	Tres, espaciados a ambos lados y entre las cámaras, desconcertados para evitar superposiciones
Construcción	Aluminio y vidrio resistente a los arañazos
Temperatura de operación	32º a 113º F (0º a 45ºC)
Temperatura de almacenamiento	32º a 113º F (0º a 45ºC)
Humedad relativa	5% a 85%
Altitud de operación	0 a 10,000 pies (0 a 3048 metros)
Cumplimiento	CE, FCC, CAN ICES-3, REACH, RoHS
Requerimientos mínimos del sistema	Windows® 7+ o Mac® OS X 10.7; AMD Phenom™ II o Intel® Core™ i3/i5/i7; 2 GB RAM; USB 2.0

Cabe mencionar que el *Leap Motion* tiene apenas 80 cm de rango de detección (Ilustración 68).

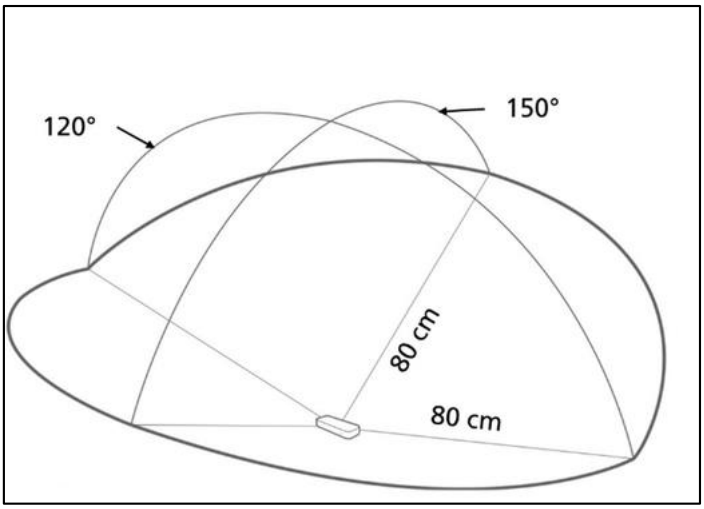

Ilustración 68. Distancia de detección del Leap Motion. [48]

Unreal Engine

Unreal Engine es un Motor de Videojuegos que tiene un conjunto de herramientas de desarrollo completo para utilizar tecnología en tiempo real. Desde visualización de diseño y experiencias cinematográficas hasta juegos de alta calidad en PC, consolas o dispositivos móviles, hasta implementar realidad virtual y realidad aumentada.

Fue creado por Epic Games en 1998. Entre las empresas que lo utilizan se encuentran Electronic Arts y Ubisoft. Utiliza el lenguaje de programación C++ o *blueprints* un lenguaje visual de programación, así como tiene una extensión para enviar comandos de consola de Python.

Unreal Engine tiene una licencia gratuita para todos, el único momento en el que se debe de pagar es cuando el proyecto genere más de un millón de dólares, haciendo así que se le deba de pagar 5% de regalías a partir de ese momento. [15]

Unity 3D

Se trata de un motor de videojuegos multiplataforma creado por Unity Technologies. Unity se puede utilizar como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, Mac OS y Linux. La plataforma de desarrollo tiene soporte de compilación para diferentes tipos de plataformas tales como:

- PC
  - Windows
  - Windows Store Apps
  - SteamOS
  - OS X
  - GNU/Linux
- Dispositivos móviles
  - iOS
  - Android
  - Windows Phone
  - Tizen
- Smart TV
  - tvOS
  - Samsung Smart TV
  - Android TV
- Consolas
  - PlayStation Vita
  - PlayStation 4
  - Xbox 360
  - Xbox One
  - Wii U
  - Nintendo 3DS
  - Nintendo Switch
- Dispositivos de realidad extendida
  - Oculus Rift
  - Google Cardboard
  - HTC Vive
  - PlayStation VR
  - Samsung Gear
  - Microsoft Hololens

Autodesk maya

Proporciona un conjunto completo de funciones creativas para síntesis, renderizado, simulación, modelado y animación 3D por computadora en una plataforma de producción altamente escalable. Maya proporciona tecnologías de visualización de próxima generación, flujos de trabajo de modelado acelerados y herramientas para procesar datos complejos.

Maya tiene una licencia gratuita que se proporciona a los estudiantes. Sin embargo, si se desea realizar un trabajo profesional o instalarlo en una empresa o estudio, se debe pagar una licencia de 21,698 pesos mexicanos por año, y una interfaz relativamente sencilla (Ilustración 69).

Hasta ahora, Maya ha sido el líder indiscutible en este campo. A pesar del alto precio, la calidad proporcionada es realmente alta. Por eso, Maya es ampliamente utilizada. [41]

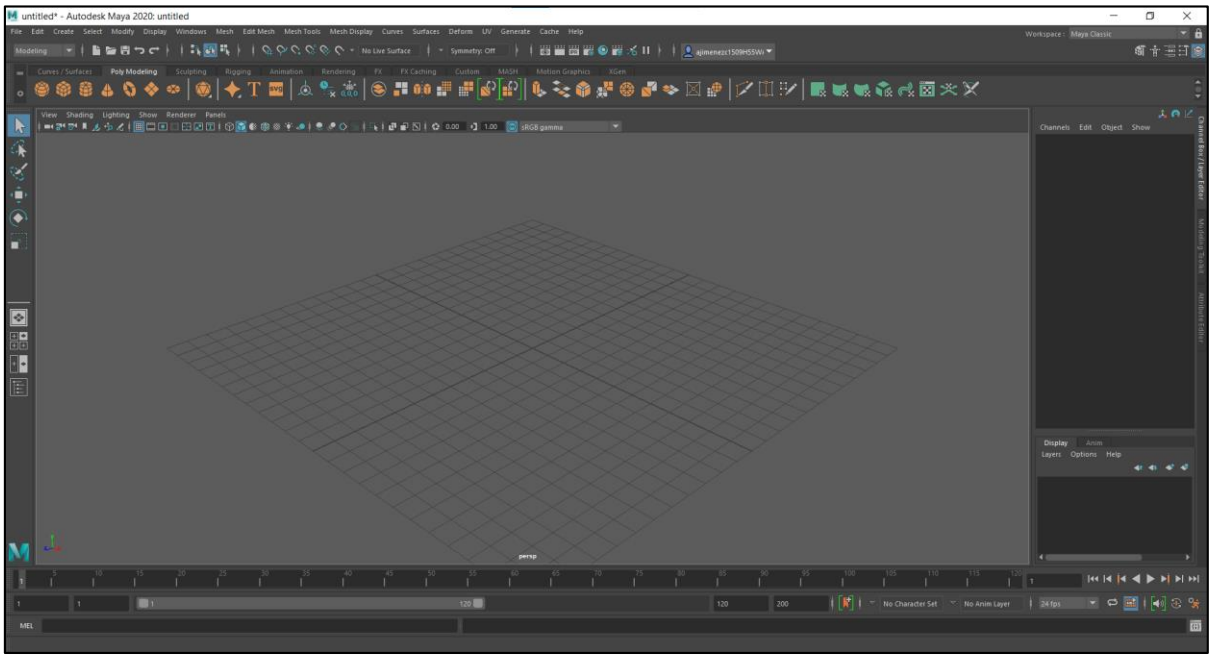

Ilustración 69. Interfaz de usuario de Maya.

Blender

Blender (Ilustración 70) es una herramienta gratuita cuyo *software* es de uso libre, y no tiene ningún tipo de licencia, 3D gratuito y de código abierto. Es compatible con modelado, montaje, animación, simulación, renderizado, composición y seguimiento de movimiento, e incluso edición de video y creación de juegos. Los usuarios avanzados utilizan la API de Blender para scripts de Python para personalizar aplicaciones y escribir herramientas especiales Blender es ideal para individuos y pequeños estudios que se benefician de su proceso de desarrollo unificado y receptivo.

Blender es multiplataforma y puede funcionar bien en computadoras Linux, Windows y Macintosh. Su interfaz usa OpenGL para brindar una experiencia consistente. [40]

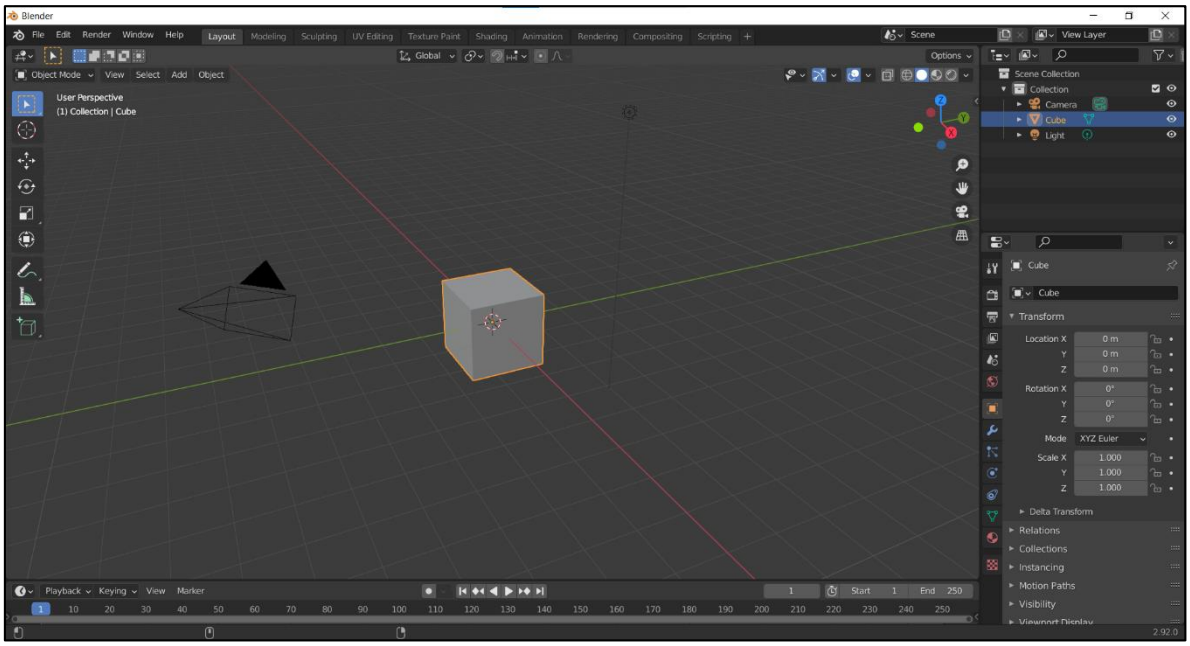

Ilustración 70. Interfaz de usuario de Blender.

Cinema 4d

Cinema 4D (Ilustración 71) es un programa para crear animación 3D, contiene un motor de modelado 3D para generación de geometría, asignación de texturas y materiales, rendering, iluminación, animación, pintado en cuerpos (3D body painting) y produce imágenes foto realistas de gran impacto.

Al igual que maya este *software* es de paga para uso profesional y tiene un costo de 14,982.29 pesos mexicano [42]

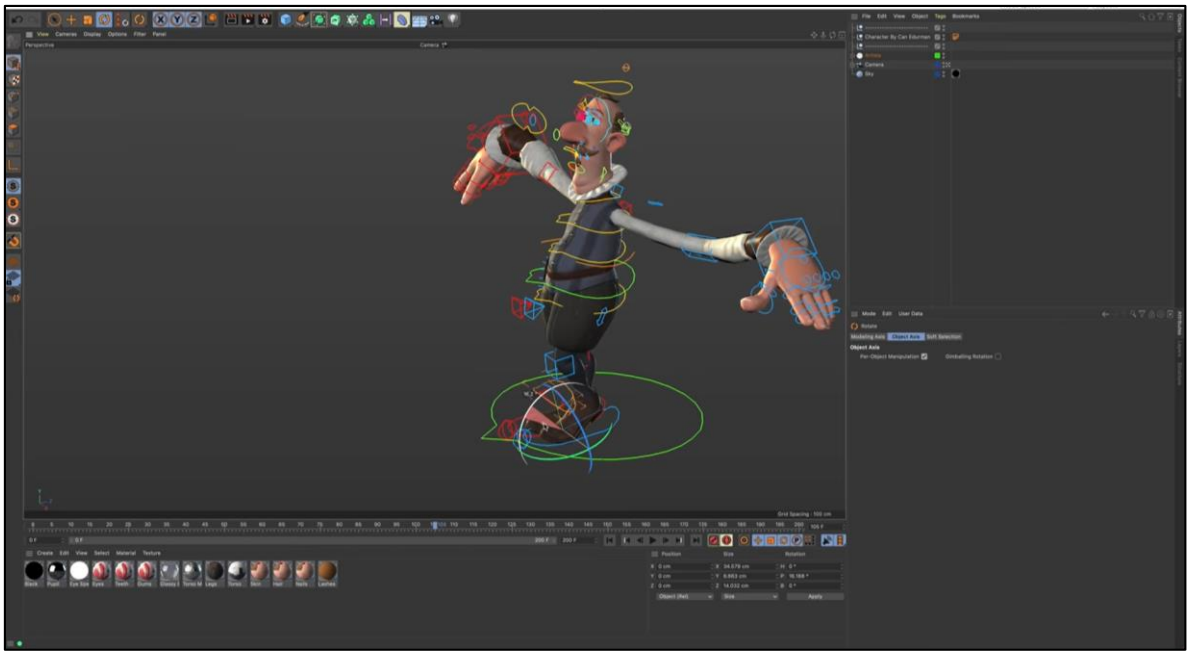

Ilustración 71. Interfaz de usuario de Cinema 4D [42].

El Gran Basamento de Cacaxtla

En la Ilustración 72 se aprecia la distribución de la zona arqueológica de Cacaxtla.

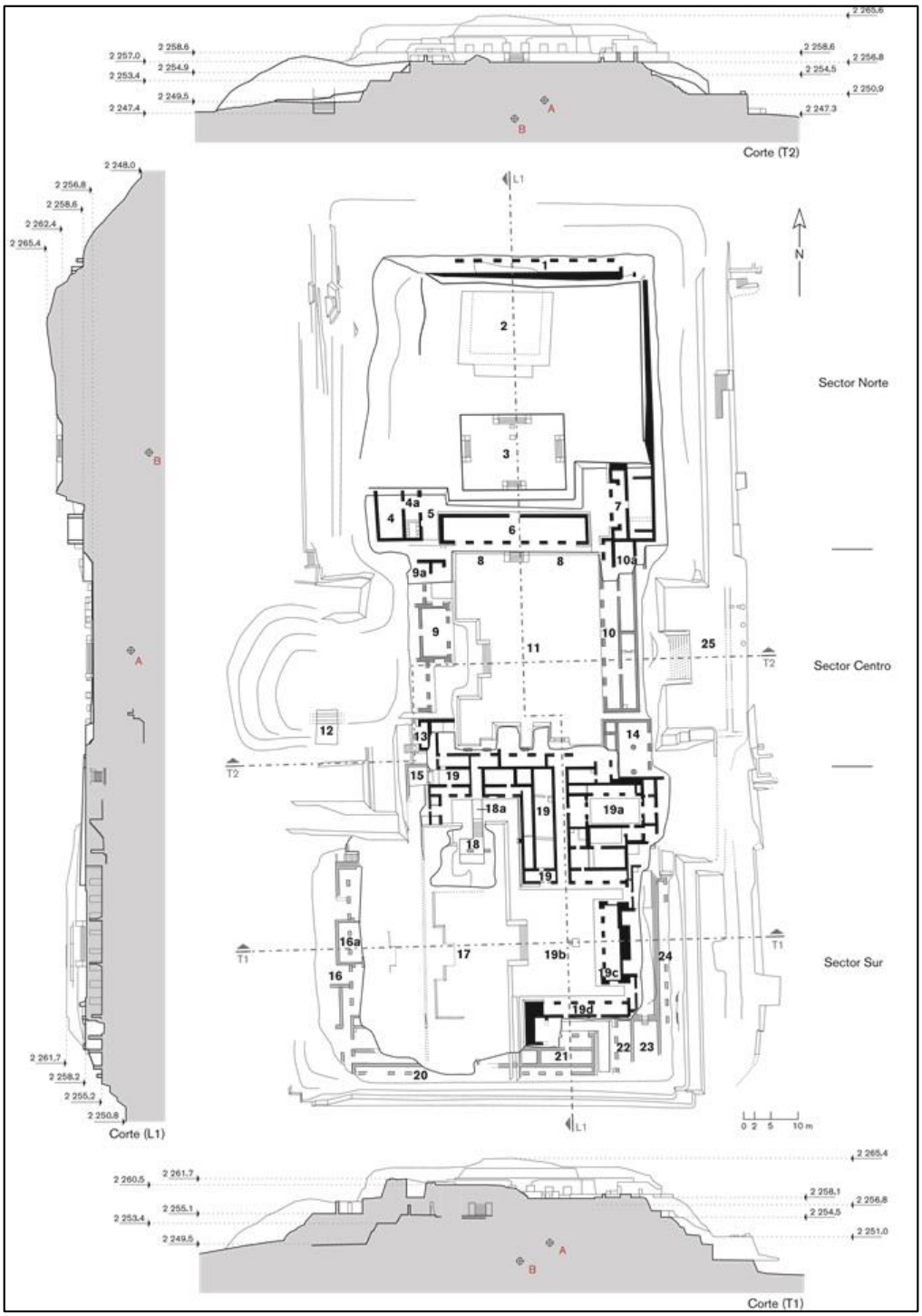

Ilustración 72. Plano general de las estructuras del Gran Basamento, cortes longitudinales y transversales. (Dibujo: G. Lucet, I. Hernández y A. Casas). [52]

Tabla 24. Distribución de la zona arqueológica de Cacaxtla. [52]			
1.	Galería Norte	15.	La Celosía
2.	Montículo Y	16.	Conjunto de Venus
3.	Patio Hundido	16a.	Templo de Venus
4.	Edificio C	17.	Pirámide Sur
4a.	Las Conejeras	18.	Templo Rojo
5.	Pasillo de los Tableros	18a.	Pasillo del Templo Rojo
6.	Edificio B	19.	El Palacio
7.	Edificio A o de las Pinturas	19a.	Patio de los Rombos
8.	Talud de la Batalla	19b.	Patio de los Altares
9.	Edificio E	19c.	Pórtico A
9a.	Superestructura del Edificio E	19d.	Pórtico B
10.	Edificio D	20.	Galería Sur
10a.	Superestructura del Edificio D	21.	Edificio F
11.	Plaza Norte	22.	Pórtico F
12.	Estructura teotihuacana	23.	Cuarto de la Escalera
13.	Cuarto Oeste	24.	Galería Oeste
14.	Edificio de las Columnas	25.	Plazo de la Escalera Este

Referencias

[1] k. Dylla, B. Frischer, P. Mueller y A. Ulmer, «Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City,» de *Making History Interactive Computer Applications and Quantitative Methods in Arqueology*, Oxford, British Archaeological Reports, 2010, pp. 62-66.

[2] C. Alvarado Leon, «Reconstrucción virtual de las zonas arqueológicas de México,» *AAPA UNAM,* vol. XI, nº 2, pp. 106-114, 2014.

[3] B. Fanini, E. d'Annibale, E. Demestrscu, D. Ferdani y A. Pagano, «Engaging and shared gesture-based interaction for museums the case study of K2R international expo in Rome.,» Digital Heritage, 2015.

[4] C. Balleti, F. Guerra, V. Sococca y Gottardi.C, «3D INTEGRATED METHODOLOGIES FOR THE DOCUMENTATION AND THE,» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* vol. XL, pp. 25-27, 2015.

[5] R. Pierdicca, E. Frontoni, E. Savina Malinverni y F. Colosi, «Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru,» *Science Direct,* vol. III, nº 3, pp. 80-90, 2016.

[6] E. Selmanovic y e. all, «VR Video Storytelling for Intangible Cultural Heritage Preservation,» *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage,* pp. 1-11, 2018.

[7] E. Huitron Ramirez, Aplicación de Realidad Aumentada pa ra la visualización del modelo reconstructivo de una zona arqueológica, Ciudad de méxico, 2019.

[8] M. H. Piste Ek, Aplicación de realidad aumentada con vision artificial para la visualización del modelo reconstructivo tridimensional de la acrópolis de Ek'Balam, Ciudad de México, 2020.

[9] B. J. García Meza y E. J. Villamizar Rueda, Sistemas neuro difusos aplicados al control automático, Cartagena, 2005.

[10] J. C. Chahuara Quispe, Control Neuro-Difuso Aplicado a una Grúa Torre, Lima: UNMSM, 2005.

[11] J. A. Lopez, «Logica Difusa,» [En línea]. Available: https://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro2.html. [Último acceso: 31 Mayo 2021].

[12] C. S. Alvarado Sánchez, Aplicación del modelo ANFIS a la sintetizacion de notas musicales y señales de voz, Guayaquil, 2019.

[13] F. S. Caparrani, «Dpto. de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial,» [En línea]. Available: http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=76. [Último acceso: 31 Mayo 2021].

[14] K. Kurd, T. P. Kelly y T. Austin, Exploiting Safety Constraints in Fuzzy Self-organising Maps for Safety Critical Applications, York, 2004.

[15] S. Sanhahuja, Sistemas de Control con L´ogica Difusa:, Castelló, 2017.

[16] D. Bravo M., C. Rengifo R. y W. Agredo R., «Comparación de dos Sistemas de Captura de Movimiento por medio de las Trayectorias Articulares de Marcha,» *Revista Mexicana de Ingeniería biomédica,* vol. 37, nº 2, pp. 149-160, 2016.

[17] U. N. A. d. México, «Portal SUAyED - FES Acatlán,» UNAM, [En línea]. Available: https://suayed.acatlan.unam.mx/ev3d.html. [Último acceso: 09 Diciembre 2020].

[18] J. Murray, Hamlet en la Holocubierta. El futuro de la narrativa en el ciberespacio., Barcelona, 1999.

[19] F. Willicks, V. Stehling, A. Richert y I. Isenhardt, «The Students' Perspective on Mixed Reality in Higher Education,» *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON),* pp. 656-660, 2018.

[20] P. Miligram, A Taxonomy of Real and Virtual, Toronto, 1999.

[21] Pixabay, Pixabay, 26 Julio 2018. [En línea]. Available: https://pixabay.com/es/photos/vr-realidad-virtual-hombre-3559837/. [Último acceso: 11 05 2021].

[22] R. J. Thierauf, Virtual Reality Systems for Business, London: Quorum Books, 1995, pp. 172-192.

[23] J. Taylor, «The Emerging Geographies of Virtual Worlds,» *Cyberspace and Geographical Space,* pp. 172-192, 1997.

[24] Universidad Politécnica de Madrid, «¿Qué es un motor de videojuegos?,» Observatorio Gate, 4 2018. [En línea]. Available: https://blogs.upm.es/observatoriogate/2018/07/04/que-es-un-motor-de-videojuegos/. [Último acceso: 21 03 2021].

[25] Unreal Engine, «Scripting and Automation,» Epic Games, [En línea]. Available: https://docs.unrealengine.com/en-US/ProductionPipelines/ScriptingAndAutomation/Python/index.html. [Último acceso: 22 03 2021].

[26] Autodesk, «¿Qué es el modelado 3d?,» Autodesk, [En línea]. Available: https://www.autodesk.mx/solutions/3d-modeling-software. [Último acceso: 2021 03 21].

[27] M. Oswald, M. Klodt, J. Stückler y D. Cremers, «Multi-View 3D Reconstruction,» Compueter Vision Group Technical University of Munich, [En línea]. Available: https://vision.in.tum.de/research/image-based_3d_reconstruction/multiviewreconstruction.

[28] H. Bonneval, PHOTOGRAMMÉTRIE GÉNÉRALE, Eyrolles, 1972.

[29] E. Q. Rosado, Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil, Cáceres: Universidad de Extremadura, 2014.

[30] G. d. México, «Secretaría de turismo,» [En línea]. Available: http://www.sectur.gob.mx/hashtag/2015/05/21/zonasarqueologicas/. [Último acceso: 28 Noviembre 2020].

[31] J. Gausemeier y S. Moehringer, «VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems,» *Elsevier,* vol. 35, nº 2, pp. 785-790, 2002.

[32] Google Sites, «INGENIERIA DEL DISEÑO,» [En línea]. Available: https://sites.google.com/site/ingenieriadeldiseno/diseno-conceptual. [Último acceso: 24 Abril 2021].

[33] Microsoft, «Ficha del Kinect,» [En línea]. Available: https://developer.microsoft.com/es-es/windows/kinect/. [Último acceso: 21 Marzo 2021].

[34] Amazon, «MOONSUN Mini Projector,» [En línea]. Available: https://www.amazon.com.mx/MOONSUN-Portable-Smart-1080P-Projector/dp/B00LBX71DE. [Último acceso: 2 Enero 2021].

[35] Intuiface, «Using Microsoft® Kinect® (unofficial),» Intuiface, 2017. [En línea]. Available: https://support.intuiface.com/hc/en-us/articles/360007181132-Using-Microsoft-Kinect-unofficial-. [Último acceso: 12 05 2021].

[36] Microsoft, «Xbox360 Kinect Sensor Not Starting Up,» Microsoft, 17 01 2019. [En línea]. Available: https://answers.microsoft.com/en-us/xbox/forum/xba_console/xbox360-kinect-sensor-not-starting-up/6771a425-2eb1-42ed-8793-c2b43703545d. [Último acceso: 12 05 2021].

[37] G. Lucet, Artist, *Plano del Gran basamento de Cacaxtla.* [Art]. Instituto de Investigaciones Estéticas, 2015.

[38] C. M. Aparicio González, «Desarrollo de un algortimo de decisión multicriterio para la gestión de listas de espera en la solicitud de Holter,» 2015. [En línea].

[39] G. Noé, «AHP: un método para fortalcer la toma de decisiones en SST,» PrevenBlog, 23 04 2019. [En línea]. Available: https://prevencontrol.com/prevenblog/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/#:~:text=Cómo%20funciona%20AHP,de%20Saaty%20(ver%20tabla).. [Último acceso: 26 04 2021].

[40] Blender, «About,» Blender, [En línea]. Available: https://www.blender.org/about/. [Último acceso: 21 03 2021].

[41] Autodesk, «Maya,» Autodesk, [En línea]. Available: https://www.autodesk.mx/products/maya/overview?term=1-YEAR. [Último acceso: 21 03 2021].

[42] Maxon, «Cinema 4D,» Maxon, [En línea]. Available: https://www.maxon.net/en/cinema-4d. [Último acceso: 21 03 2021].

[43] BBVA, «Tasa de cambio,» [En línea]. Available: https://www.bbva.mx/personas/informacion-financiera-al-dia.html. [Último acceso: 22 Marzo 2021].

[44] Unity, «Assets,» [En línea]. Available: https://assetstore.unity.com/?gclid=CjwKCAjwgOGCBhAlEiwA7FUXkpov9kms7xcfqT3wyb_4nIPhWN-7ScNNa_qLZrbIWw4pJlfrJwlPGhoCEx0QAvD_BwE. [Último acceso: 22 Marzo 2021].

[45] Epic Games, «Unreal Engine Assets,» [En línea]. Available: https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/store. [Último acceso: 22 Marzo 2021].

[46] Microsoft, «Visual Studio,» [En línea]. Available: https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/pricing/. [Último acceso: 22 Marzo 2021].

[47] Mathworks, «Princing an Licensing,» Mathworks, [En línea]. Available: https://www.mathworks.com/pricing-

licensing.html?prodcode=ML&intendeduse=undefined. [Último acceso: 22 03 2021].

[48] Leap Motion, «Especificaciones,» [En línea]. Available: https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/. [Último acceso: 21 Marzo 2021].

[49] W. Galan, «IFIXIT,» [En línea]. Available: https://es.ifixit.com/Desmontaje/Xbox+360+Kinect+Teardown/4066. [Último acceso: 28 Noviembre 2020].

[50] M. S. Magallón, Sistema interactivo para manejo de electrodomésticos en entornos domésticos, 2013.

[51] Ultraleap, «Ultraleap,» [En línea]. Available: https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/#overview. [Último acceso: 21 Marzo 2021].

[52] I. d. I. Estéticas, La pintura mural prehispánica en México V Cacaxtla, Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

[53] Delft University of Technology in the Netherlands, «Systems Engineering Summary,» [En línea]. Available: http://www.aerostudents.com/courses/systems-engineering/systemsEngineeringFullVersion.pdf. [Último acceso: 12 Diciembre 2020].

[54] Integrated DEFinition Methods (IDEF), «IDEF0 functional modeling method,» [En línea]. Available: https://www.idef.com/idefo-function_modeling_method/.

[55] S. Vahid y W. Shirui, «USING POINT CLOUD TECHNOLOGY FOR PROCESS SIMULATION IN THE CONTEXT OF DIGITAL FACTORY BASED ON A SYSTEMS ENGINEERING INTEGRATED APPROACH,» de *Conference: International Conference of Engineering Design 2017*, Vancouver, Canada, 2017.

[56] J. L. Whitten, L. D. Bentley y K. C. Dittman, Systems Analysis and Design, Irwin Professional Pub, 1997.

[57] V. D. C. Pinto, «¿Realmente estamos haciendo Mecatrónica?,» *Espacio I+D, Inovación más Desarrollo,* 2012.

[58] C. Villagómez, «USB (Bus de serie universal),» 30 12 2017. [En línea]. Available: https://es.ccm.net/contents/407-usb-bus-de-serie-universal . [Último acceso: 05 12 2021].