



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE
VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

Desarrollo de Herramientas de Simulación para
Sistemas de Cultivo de Cerezos

MIGUELANGEL PEÑA

Profesor Guía: BENJAMIN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

Talca – Chile
Enero, 2026



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN DESARROLLO DE
VIDEOJUEGOS Y REALIDAD VIRTUAL

Desarrollo de Herramientas de Simulación para
Sistemas de Cultivo de Cerezos

MIGUELANGEL PEÑA

Profesor Guía: BENJAMIN INGRAM

Memoria para optar al título de
Ingeniero en Desarrollo de Videojuegos y Realidad Virtual

El presente documento fue calificado con nota: _____

Talca – Chile

Enero, 2026

Dedicado a: Mis padres Daniel y Marta que siempre me han apoyado en todas las locuras que se me ocurren, han estado ahí en las buenas y en las malas, y darían la vida por su hijo. Mi pareja Diego Castro, que ha sido el mejor apoyo en todo durante este proceso. Y por supuesto a mis amigos que conocí en la universidad, por todas esas tardes de juegos en discord y los buenos momentos que hemos tenido a lo largo de esta aventura.

TABLA DE CONTENIDOS

	página
Dedicatoria	I
Tabla de Contenidos	II
Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VI
Resumen	VII
 1. Introduccion	 1
1.1. Contexto	1
1.1.1. Hipótesis	2
1.1.2. Objetivos	3
1.2. Estructura del Documento	3
 2. Marco Teorico	 4
2.1. El Cerezo Dulce (Prunus avium L.): Fundamentos Agrícolas	4
2.1.1. Taxonomía y Morfología del Cerezo Dulce o Cherry Sweet	5
2.1.2. Cultivo del Cerezo en Chile: Zonificación y Especies Prioritarias	7
2.2. Sistema Lindenmayer o L-Systems	10
2.2.1. Tipos de L-Systems	11
2.2.2. L-Systems y su aplicación en Agronomía y Agricultura	14
2.3. Blender como plataforma de Simulación Agrícola	15
2.3.1. Nodos Geométricos en Blender	15
2.3.2. Fundamentos Técnicos de Blender para Aplicaciones Agrícolas	17
2.3.3. Aplicaciones en Agricultura de Precisión	18
 3. Estado del Arte	 19
3.1. Sistemas de Conducción	20
3.1.1. Sistema Kym Green Bush (KGB)	20
3.1.2. Upright Fruiting Offshoots (UFO)	21

3.1.3. Tall Spindle Axe (TSA)	22
3.2. Plugins para Blender	23
3.2.1. Definición y Tipos de Plugins	23
3.2.2. Desarrollo y Codificación	24
3.2.3. Plugins de Blender y su aplicación en las Industria Agrícola	24
4. Metodología	26
4.1. Desarrollo del plugin	27
4.2. Validación	32
4.3. Resultados Esperados	32
4.4. Carta Gantt	32
5. Pruebas y Resultados	34
5.1. Descripción de Pruebas	34
5.2. Resultados	36
5.2.1. Efectividad: Capacidad para lograr el objetivo	36
5.2.2. Eficiencia: Tiempo y esfuerzo requeridos	37
5.2.3. Satisfacción del usuario: Percepción de usabilidad	38
6. Conclusión	42
Bibliografía	43
A: Archivos importantes	49
A.1. Plugin simulación de cerezos con sistema de conducción UFO para Blender	49
A.2. Preguntas relacionadas con el Cuestionario de Usabilidad de Sistemas (SUS) aplicadas a los participantes	49
A.3. Instructivo y Cuestionario aplicado a los participantes	50

ÍNDICE DE FIGURAS

	página
3.1. Esquema visual de la estructura de árboles de cerezos con sistema de conducción KGB	20
3.2. Foto de árboles de cerezos reales con sistema de conducción KGB . .	21
3.3. Esquema visual de la estructura de árboles de cerezos con sistema de conducción UFO	22
3.4. Foto de árboles de cerezos reales con sistema de conducción UFO . .	22
3.5. A la izquierda: Foto de árboles de cerezos reales con sistema de conducción TSA. A la derecha: Esquema visual de la estructura de árboles de cerezos con sistema de conducción TSA	23
4.1. Foto de Metodología Kanban aplicada a través de la plataforma Trello .	27
4.2. Foto de implementación L-System estocástico	28
4.3. Implementación de menú con nodos geométricos	29
4.4. Foto del menú personalizable del plugin	30
4.5. Imagen comparativa. A la izquierda un cerezo real con sistema UFO. A la derecha un cerezo simulado con el plugin a partir de la imagen del cerezo real de la izquierda como referencia.	30
4.6. Árbol de cerezo en sistema de conducción UFO en etapa 'Joven' realizado usando el plugin	31
4.7. Árbol de cerezo en sistema de conducción UFO etapa 'Adulto' realizado usando el plugin	31
4.8. Árbol de cerezo en sistema de conducción UFO personalizado usando el panel del plugin	31
4.9. Carta Gantt del proyecto.	33
5.1. Foto Referencia del árbol de cerezo solicitado	35
5.2. A la izquierda: Imagen de referencia creada para las pruebas de árbol de cerezo en sistema UFO. A la derecha: Imagen de árbol de cerezo modelado con el plugin por uno de los participantes.	37

5.3.	A la izquierda: Imagen de referencia creada para las pruebas de árbol de cerezo en sistema UFO. Al centro: Imagen de árbol de cerezo modelado de forma manual por uno de los participantes dentro de los 5 minutos recomendados. A la derecha: Imagen de árbol de cerezo modelado con el plugin por el mismo participante dentro de los 5 minutos recomendados.	38
5.4.	A la izquierda: Imagen de referencia creada para las pruebas de árbol de cerezo en sistema UFO. Al centro: Imagen de árbol de cerezo modelado de forma manual por uno de los participantes excediendo el tiempo predestinado para realizar la prueba. A la derecha: Imagen de árbol de cerezo modelado con el plugin por el mismo participante dentro de los 5 minutos recomendados.	38
5.5.	Diagrama de caja de los puntajes SUS. La línea central representa la mediana (82.5), la caja abarca del primer al tercer cuartil (72.5-92.5), y los bigotes muestran el rango completo (67.5-97.5).	40
5.6.	Histograma de frecuencias de los puntajes SUS. Los intervalos (bins) son de 5 puntos. Se observa una distribución bimodal con concentraciones alrededor de 72.5 y 97.5.	41

ÍNDICE DE TABLAS

	página
2.1. Morfología del árbol de cerezo dulce (<i>Prunus avium</i> L.) [1, 2, 3] . . .	6
2.2. Morfología de las hojas del cerezo dulce [3, 1, 4, 2]	6
2.3. Morfología de las flores del cerezo dulce [5, 3, 6, 7]	7
2.4. Variedades establecidas	9
2.5. Nuevas Variedades estratégicas	10
2.6. Principales tipos de nodos en el sistema Geometry Nodes de Blender [8]	16
3.1. Sistemas conducción cerezos[9]	23
3.2. Plugins destacados en la industria 3D	24
5.1. Puntajes individuales y promedio del Cuestionario de Usabilidad (SUS).	39

RESUMEN

Chile es el principal exportador mundial de cereza dulce (*Prunus avium*), una industria que enfrenta desafíos de eficiencia en la cosecha. Los sistemas de entrenamientos modernos, como el UFO (Upright Fruiting Offshoots), permiten alta densidad de plantación y facilitan la cosecha, pero el diseño y prueba de soluciones automatizadas para estos sistemas requieren de modelos 3D precisos. Crear estos modelos manualmente en software como Blender es una tarea compleja y que requiere mucho tiempo, siendo una barrera para investigadores, ingenieros y agricultores sin experiencia necesaria en modelado 3D. El objetivo general fue desarrollar un plugin para Blender que permitiera modelar y simular el sistema de entrenamiento UFO para cerezos. La hipótesis central sostuvo que este plugin haría accesible la creación de dichos modelos a usuarios con experiencia básica o intermedia, mejorando la eficacia, eficiencia y la satisfacción en comparación con los métodos manuales. El proyecto se ejecutó utilizando la metodología Kanban personalizada para el trabajo individual. El desarrollo del plugin se realizó dentro del sistema Geometry Nodes de Blender, partiendo de una base de L-systems y extendiéndola con un L-system estocástico que incorporó símbolos personalizados para controlar algunos parámetros como los ángulos de ramificaciones, la variabilidad aleatoria y la estructura específica del sistema UFO. La validación de este plugin se realizó mediante una prueba comparativa con 11 usuarios. Cada participante debió crear un modelo de cerezo UFO, primero de forma manual y luego utilizando el plugin, para finalmente contestar el cuestionario de usabilidad (SUS). Este proyecto sienta las bases metodológicas y técnicas para una herramienta de simulación que puede contribuir al diseño de algoritmos robóticos de cosecha.

1. Introduccion

1.1. Contexto

Chile es el tercer productor mundial de cerezas, con 61.559 hectáreas plantadas, el país es el mayor exportador de cerezas del mundo, representando el 97 por ciento de las exportaciones del hemisferio sur [10]. Por consiguiente, se abre una problemática a la hora de cultivar la fruta de dichos árboles, ya que estos de forma natural pueden crecer hasta 18 metros de altura, con ramificaciones largas con pocas ramas laterales y brotes fructíferos, además los cerezos suelen tener ángulos de ramas muy estrechos lo que puede causar debilidad en cuanto a su estructura y una mayor susceptibilidad a enfermedades. Todos estos problemas son obstáculos para los productores que desean tener árboles más pequeños y productivos. En ayuda a estas problemáticas se han creado diversos sistemas de entrenamiento en función a la forma de crecimiento y cultivo de cerezos para lograr una producción de fruta de alta calidad que varían según las necesidades del productor[11].

Actualmente existen tres principales sistemas o métodos de entrenamiento diseñados para optimizar la eficiencia laboral durante la cosecha, ya que permiten plantar cerezos con mayor densidad que los sistemas de crecimiento natural y ubican la fruta en posiciones estratégicas a favor de la conveniencia de los recolectores. Estos sistemas son: el sistema UFO, donde los árboles son plantados en un ángulo de aproximadamente 45 - 60 grados respecto a la vertical con el tronco o eje de las plantas ubicado horizontalmente, el cual es fijado a un alambre ubicado cercano al suelo[12]; el sistema KGB, produce un árbol que no necesita soporte, por lo que tiene un menor costo de implementación, el vigor de la planta se controla dividiendo en el eje en varios ejes verticales temporales, permitiendo el uso de una amplia gama

de portainjertos[13]; y el sistema TSA, produce árboles de un solo eje central con la capacidad de crecer sin soporte[11];

La siguiente investigación tiene como objetivo principal la realización de un proyecto cuya finalidad es desarrollar una herramienta de simulación para el sistema de cultivo de cerezos, dirigidos a la elaboración de entornos de prueba para los diferentes sistemas robóticos de cosecha. La gran variedad de métodos que se ocupan en el cultivo de cerezos, como el sistema UFO o el KGB, dentro de los que se puede mencionar, presentan un desafío importante para la automatización de la cosecha. Este proyecto busca proponer un plugin para la plataforma de Blender que permita tanto modelar como simular estos sistemas generando árboles de cerezos de forma similar a uno real enfocados en personas con conocimiento básico o intermedio de la plataforma.

Para este proyecto se decidió enfocar el desarrollo exclusivamente en el sistema UFO, sin embargo, uno de los objetivos a largo plazo es permitir la implementación de otros sistemas de entrenamiento. El modelado de este plugin pretende integrar criterios referente a la morfología como los ángulos de ramificación, la longitud de las ramas y distribución de yemas y frutos.

El método para la creación de este plugin incluirá la utilización del sistema-Lindenmayer para implementar en conjunto del sistema UFO en la plataforma Blender, permitiendo simular la evolución temporal de los árboles, y asegurar la precisión fisiológica de la formación del cerezo. El sistema-Lindenmayer (o sistema-L para acortar) es un término matemático propuesto por el biólogo húngaro Aristid Lindenmayer como fundamento de una teoría axiomática del desarrollo biológico [14]. Tiene la particularidad de basarse en el método de aplicación de las producciones, las cuales se pueden aplicar en paralelo para plasmar las divisiones celulares en organismos multicelulares como las plantas, donde pueden ocurrir varias divisiones de forma simultánea. [15]

1.1.1. Hipótesis

La hipótesis principal para esta investigación se basa en el objetivo principal que es la creación de un plugin para Blender que simule con precisión los sistemas de entrenamiento de cultivo de cerezos, por ende la hipótesis sería que el plugin de simulación de cerezos para Blender permite una mayor accesibilidad y una mejor

experiencia en cuanto a eficacia, rapidez y satisfacción en usuarios con experiencia básica o intermedia en Blender.

1.1.2. Objetivos

Objetivo general: Desarrollar un plugin para Blender que permita modelar y simular lo más parecido posible el sistema de entrenamiento UFO haciéndolo fácil de entender y utilizar.

Objetivo específico 1: Implementar el sistema-L en conjunto con uno de los sistemas principales de entrenamiento de cerezos (UFO) dentro de la plataforma Blender.

Objetivo específico 2: Simular el crecimiento y desarrollo temporal de los árboles, incorporando parámetros morfológicos.

Objetivo específico 3: Validar la usabilidad del plugin mediante pruebas con usuarios con experiencia básica o intermedia en Blender.

1.2. Estructura del Documento

El documento está dividido en varios capítulos, comenzando con una introducción para contextualizar el problema, donde se define la hipótesis, se aclaran los objetivos y se dejan en evidencia los alcances del documento. Luego continúa el marco teórico, donde se detallan conceptos importantes, iniciando con la descripción del cerezo dulce (*Prunus avium*), su taxonomía y morfología, además de definir el estado del cultivo de cerezos en Chile, junto con algunas variedades de cerezos presentes en el país. En esta parte del informe también se habla sobre los diferentes tipos de sistemas de Lindenmayer. El documento continúa con el estado del arte, el cual explica conceptos acerca de los sistemas de entrenamiento principales que se usan para cultivar el cerezo dulce. Siguiendo con la metodología, donde se describen los pasos a seguir y las pruebas que se realizarán. Luego pasamos a una sección donde se detalla el proceso de creación de este plugin. Para terminar se presentan las pruebas y resultados de la investigación y por consiguiente se presenta las conclusiones del proyecto.

2. Marco Teorico

2.1. El Cerezo Dulce (*Prunus avium* L.): Fundamentos Agrícolas

Los cerezos como tal son originarios tanto de Europa como de Asia occidental, y actualmente se cultivan a nivel mundial [16]. Los cerezos son pertenecientes a la familia *Rosaceae* o Rosáceas y se clasifican dentro del género *Prunus*, al igual que otras frutas como los ciruelos, almendras, albaricoques, entre otros [17]. Entre las especies de cerezos más importantes o relevantes destacan:

1. Cerezo Dulce o *Sweet Cherry* (*Prunus avium* L.).
2. Cerezo Ácido o Guindo (*Prunus cerasus*).
3. Cerezo Enano (*Prunus fruticosa* Pall.).

De las variedades o especies mencionadas, las variedad dulce (*Prunus avium* L.) y la ácida (*Prunus cerasus*) son las que tienen una mayor importancia en el comercio global. El cultivo de cerezo dulce necesita de cuidados intensos durante toda la cadena de suministro para asegurar una fruta de muy alta calidad que está destinada al mercado, lo que la hace más compleja y costosa que su contraparte ácida [16].

En cuanto a las variedades comerciales, existen cientos de cultivos de cerezo dulce. Entre las variantes más relevantes a nivel mundial se incluyen:

- **Picota** (España): De fruto sin pedúnculo, originaria del Valle del Jerte (Ambrunés).
- **Lapins**: Tamaño grande, susceptible al agrietamiento o *cracking*

- **Bing y Chelan:** Usadas en estudios de NIR para predecir SSC.
- **Krodia:** Esta variedad es analizada por relación entre tamaño/color y composición química.
- **Van y Celeste:** Evaluadas en postcosechas por firmeza y vida útil. [16][18]

2.1.1. Taxonomía y Morfología del Cerezo Dulce o Cherry Sweet

Taxonomía

- Reino: Plantae.
- División: Magnoliophyta.
- Clase: Magnoliopsida.
- Orden: Rosales.
- Familia: Rosaceae.
- Género: *Prunus*.
- Especie: *Prunus avium* L.
- Cromosomas: Diploide ($2n=2x=16$). [16][19][18]

Morfología

Árbol

Característica	Descripción
<i>Hábito de crecimiento y tamaño</i>	Árbol caducifolio que alcanza 5-30 m de altura. Tronco recto de hasta 1.5 m de diámetro. Los jóvenes presentan dominancia apical y copa cónica; adultos adquieren forma redondeada o irregular.
<i>Corteza</i>	En árboles jóvenes: lisa, gris-violácea con lenticelas horizontales marrón-grisáceas. En árboles maduros: fisurada, marrón oscuro.
<i>Sistema Radicular</i>	Raíces adventicias, profundas. Estabilizan pendientes y reducen erosión del suelo.
<i>Longevidad</i>	Pueden vivir hasta 200 años en condiciones óptimas.

Tabla 2.1: Morfología del árbol de cerezo dulce (*Prunus avium* L.) [1, 2, 3]

Hojas

Característica	Descripción
<i>Forma y Tamaño</i>	Hojas alternas, simples, ovaladas u oblongas con ápices acuminados. Dimensiones: 6-15 cm de largo × 3-8 cm de ancho.
<i>Margen y Nervadura</i>	Bordes serrados con dientes glandulares. Nervadura pinnada con nervadura central prominente.
<i>Pecíolo</i>	2-5 cm de largo, con 2-5 glándulas nectarías rojizas en la base de la lámina.
<i>Color y Textura</i>	Glabras (sin pelos), verde brillante (más claro en el envés). En otoño cambian a amarillo, naranja o rojo.

Tabla 2.2: Morfología de las hojas del cerezo dulce [3, 1, 4, 2]

Flores

Característica	Descripción
<i>Inflorescencia</i>	2-6 flores blancas fragantes dispuestas en racimos sobre pedúnculos de 2-5 cm.
<i>Pétalos</i>	5 pétalos por flor, con forma de huevo (más ancha en el ápice). Largo: 10-15 mm.
<i>Estambres</i>	Menos de 13 estambres por flor, con 8 antenas amarillas.
<i>Pistilo</i>	Ovario superior con un solo estilo receptivo durante la antesis (apertura floral).
<i>Floración y Polinización</i>	Florece a inicios de primavera (coincide con el brote de hojas). Polinización por abejas; la mayoría de cultivos son autoincompatibles (no pueden autofecundarse).

Tabla 2.3: Morfología de las flores del cerezo dulce [5, 3, 6, 7]

2.1.2. Cultivo del Cerezo en Chile: Zonificación y Especies Prioritarias
Producción y Relevancia Económica

Chile es el principal exportador de cerezas en cuanto al hemisferios sur se habla, con más del 95 % de las exportaciones regionales. Cada temporada, Chile exporta toneladas de cerezas hacia el extranjero, principalmente hacia China quien concentra el 88 % de las exportaciones, proyectando para la temporada 2024-2025 casi un 60 % más que la temporada anterior[20][21][22].

Las cerezas representan un poco más del 40 % del valor total de las exportaciones frutícolas chilenas[22], lo que conlleva a una expansión de la superficie a plantar, con solo decir que el 2023 alcanzó una superficie plantada de 74.148 hectáreas, superando a la uva de mesa, ya que las regiones vinícolas como el Maule y O’higgins concentran el 80 % de la producción[23][24]. Como dato adicional, la producción de cerezas en Chile genera alrededor de 200.000 empleos de forma directa[22].

Zonificación Agroclimática

La producción de cerezos se estructura en base a las **horas de frío (HF)**, la **acumulación de calor** y la **época en la cual se cosecha**, lo cual determina tres

principales zonas:

1. Zonas Tempranas:

- Cosecha: Semanas 42-48.
- Regiones: Costas de Valparaíso y Coquimbo.
- Condiciones:
 - Horas de frío: 300-500 HF[24].
 - Variedades: Santina, Royal Down, entre otras de bajo requerimiento[25][26].
- Ventaja competitiva: Permiten cosechas entre octubre y noviembre, captando precios elevados o premium de comercio[26][23].

2. Zonas Intermedias:

- Cosecha: Semanas 49-52.
- Regiones: Valles centrales de O'higgins y Maule.
- Condiciones:
 - Horas de frío: 800-1.200 HF[24].
 - Variedades: Lapins (25 % de la producción nacional) y Regina[27][23].
- Riesgos: Tiene una mayor exposición a lluvias primaverales que incrementan el cracking (agrietamiento)[27].

3. Zonas Tardías:

- Cosecha: Enero - Febrero.
- Regiones: Chile Chico (Aysén) y Patagonia.
- Condiciones:
 - Horas de frío: Mayor a 1.300 HF.
 - Variedades: Kordia y Regina, con excelente calibre y firmeza[28].
- Estrategia: Nicho de mercado tanto en U.S.A como en Europa cuando no hay oferta global alguna[28][22].

Especies Prioritarias

Tabla 2.4: Variedades establecidas

Variedad	Zona Óptima	Características	Limitaciones
Santina	Temprana	<ul style="list-style-type: none"> ■ 38 % volumen nacional ■ 500 HF ■ Cosecha semana 45-46 ■ Calibre 26-28 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Susceptible a lluvias ■ Calibre medio
Lapins	Intermedia	<ul style="list-style-type: none"> ■ 25 % producción ■ 800-1,000 HF ■ Estabilidad productiva 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Problemas postcosecha en alta producción
Regina	Tardía	<ul style="list-style-type: none"> ■ 19 % exportaciones ■ Vida útil ¿30 días ■ Sólidos solubles 18-24°Brix 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pardeamiento interno ocasional

Fuente: Centro de Pomáceas UTalca (2022)[29]

Tabla 2.5: Nuevas Variedades estratégicas

Variedad	Características
Nimba cv.	Programa: SMS (EE.UU.). Época: 16-18d pre-Santina. Innovaciones: Calibre 30-32mm, Firmeza ≥ 80 UD, Bajo frío (400HF), Ideal Ovalle
Pacific Red cv.	Programa: SMS (EE.UU.). Época: 13-16d pre-Santina. Innovaciones: Autofértil, Calibre 28-30mm, Polinizante Nimba cv.
Sweet Aryana®	Programa: UNIBO (Italia). Época: 12-14d pre-Santina. Innovaciones: Autofértil, Sólidos $\geq 20^\circ$ Brix, Firmeza ≥ 85 UD, Poliniza serie Sweet
Areko cv.	Programa: UNIBO (Italia). Época: Similar Kordia. Innovaciones: Cruz. Kordia $\times$ Regina, Calibre 30mm, Pedúnculo ancho
Sweet Stephany®	Programa: UNIBO (Italia). Época: 3d pre-Regina. Innovaciones: Autofértil, Calibre ≥ 30 mm, Firmeza como Regina

Fuente: Centro de Pomáceas UTalca (2022)[29]

2.2. Sistema Lindenmayer o L-Systems

Los *Sistemas de Lindenmayer* (L-Systems), fueron desarrollados por el biólogo húngaro *Aristid Lindenmayer* en 1968. Estos sistemas son gramáticas formales que pueden modelar el crecimiento de organismos, como plantas y algas, mediante reglas de reescritura paralela[30][31]. Se definen por:

- **Alfabeto:** Variables y constantes representadas con símbolos[31].
- **Axioma:** Es la cadena inicial que representa el estado embrionario[31].
- **Reglas de producción:** Transformar nuevas variables en nuevas cadenas[31].

La aplicación repetitiva y paralela de reglas generan patrones complicados, como fractales o estructuras vegetales, donde se captura la autosemejanza en el desarrollo biológico[32][33].

2.2.1. Tipos de L-Systems

Los L-systems se clasifican según la naturaleza de sus reglas. Las categorías más comunes son:

L-System D0L (Determinista y Libre de Contexto)

Es el tipo más básico y fundamental, constituyendo la esencia del modelo en su forma original, siendo *determinista* porque cada símbolo del alfabeto tiene una única regla de producción asociada, además es *libre de contexto* porque la aplicación de una regla depende únicamente del símbolo a reescribir, sin considerar los símbolos que lo rodean. Esta simplicidad lo hace potente para generar estructuras fractales perfectamente autosimilares y para modelar el desarrollo de organismos con patrones de crecimiento muy regulares. El ejemplo más adecuado, propuesto por el mismo Aristid Lindenmayer, modela el crecimiento de algas con las reglas $A \rightarrow AB$ y $B \rightarrow A$, generando secuencias de cadenas que siguen un patrón específico [31].

- **Definición Formal:** $G_{D0L} = (V, \omega, P)$ donde $\forall A \in V$, existe exactamente una producción $A \rightarrow \chi \in P$, con $\chi \in V^*$.
- **Ejemplo (Algas de Lindenmayer) [31]:**
 - **Alfabeto** (V): $\{A, B\}$
 - **Axioma** (ω): A
 - **Reglas** (P): $(A \rightarrow AB), (B \rightarrow A)$

$$n = 0 : A$$

$$n = 1 : AB$$

$$n = 2 : ABA$$

$$n = 3 : ABAAB$$

$$n = 4 : ABAABABA$$

L-System Estocásticos

Utilizado principalmente para modelar la variabilidad y riqueza de las formas de las plantas. Estos sistemas relajan la condición del determinismo al permitir que un

símbolo tenga más de una regla de producción posible. La aplicación de una u otra se rige por una distribución de probabilidad predefinida. Esta introducción del azar controlado es crucial en gráficos por computadora para generar poblaciones de plantas que parezcan naturales, donde ningún individuo es idéntico a otro. Por ejemplo, una regla como $A \rightarrow F[+A]F[-A]$ (creación de una rama simétrica) podría tener una alternativa $A \rightarrow F[+A]$ (creación de una rama asimétrica) con una probabilidad del 30 %, simulando las pequeñas variaciones debido a factores ambientales o genéticos en el desarrollo de un árbol [31]. Este sistema extiende el modelo D0L al asignar probabilidades a un conjunto de reglas para el mismo símbolo. La suma de probabilidades para todas las reglas de un símbolo debe ser 1.

- **Definición Formal:** Para una variable $A \in V$, existe un conjunto de producciones $\{(p_1 : A \rightarrow \chi_1), (p_2 : A \rightarrow \chi_2), \dots\}$ tal que $\sum p_i = 1$.
- **Ejemplo Ilustrativo:**
 - **Alfabeto** (V): $\{F, [,], +, -, A, B\}$
 - **Axioma** (ω): A
 - **Reglas** (P): $(0,5 : A \rightarrow F[+A][-A]), (0,3 : A \rightarrow F[+A]F[-A]), (0,2 : A \rightarrow FB)$

L-System Sensible al Contexto

Son sistemas de complejidad superior, los cuales si una regla se aplica o no a un símbolo determinado depende de los símbolos vecinos (su contexto). Esto permite modelar interacciones entre las células o módulos adyacentes en un organismo en desarrollo, un fenómeno que los sistemas libres de contexto no pueden capturar. La notación típica es del tipo $A < B > C \rightarrow D$, que se lee como 'el símbolo B se reemplazará por D si y solo si está precedido por A y seguido por C'. Este mecanismo puede simular, por ejemplo, la diferenciación celular inducida por señales de células vecinas o el flujo de hormonas en una planta que inhibe o promueve el crecimiento en ciertas posiciones.

- **Definición Formal:** Una regla se escribe como $\alpha < A > \beta \rightarrow \chi$, donde $\alpha, \beta \in V^*$ son el contexto izquierdo y derecho. La regla se aplica a A solo si está inmediatamente precedida por α y seguida por β .

■ **Ejemplo Formal:**

- **Alfabeto** (V): $\{X, A, B\}$
- **Axioma** (ω): $XAAAX$
- **Reglas** (P): $(X < A > X \rightarrow B)$

Solo las instancias de ‘A’ que están *entre* dos ‘X’ se transforman en ‘B’.

L-System Paramétricos

Este sistema extiende el paradigma al dotar a cada símbolo de uno o varios parámetros numéricos (como longitud, edad, grosor o ángulo). Las reglas de producción no solo reescriben, sino que también pueden evaluar condiciones sobre estos parámetros y calcular nuevos valores para la siguiente generación. Esto permite un control geométrico y temporal extremadamente preciso. Un axioma como $F(10)$ (un segmento de longitud 10) puede seguir una regla $F(x) : \text{if } x > 2 \rightarrow F(x/2)$, acorta el segmento a la mitad en cada paso hasta que su longitud sea menor o igual a 2. Esta capacidad es indispensable para modelos botánicos realistas que simulan el alargamiento de internodos, la reducción progresiva del tamaño de las ramas o la apertura de flores tras un corto ‘tiempo’ de desarrollo simulado, y es la base técnica de muchos softwares modernos de diseño generativo y arquitectura [31].

- **Definición Formal:** Los símbolos son de la forma $A(t_1, t_2, \dots)$. Una regla tiene la forma: $A(\mathbf{x}) : \text{condición}(\mathbf{x}) \rightarrow \xi$, donde ξ es una cadena que puede incluir símbolos con nuevos valores paramétricos calculados (e.g., $B(f(\mathbf{x}))$).

■ **Ejemplo (Rama que se acorta):**

- **Alfabeto** (V): $\{F, A\}$
- **Axioma** (ω): $A(10)$
- **Reglas** (P): $(A(l) : l > 2 \rightarrow F(l)[+A(l \cdot 0,7)][-A(l \cdot 0,5)])$, $(A(l) : l \leq 2 \rightarrow F(l))$

El parámetro l (longitud) se reduce en cada recursión hasta que deja de cumplirse la condición.

2.2.2. L-Systems y su aplicación en Agronomía y Agricultura

Modelado de crecimiento vegetal

- *Simulación de arquitectura vegetal:* Este sistema pueden reproducir la morfología de cultivos en 3D, incluyendo la distribución de las hojas, ramas y raíces[34][33].
- *Análisis de eficiencia fotosintética:* Modelos aleatorios con este sistema pueden predecir la captación de luz en árboles frutales. Al modificar los ángulos de las ramas y el tamaño de las hojas mediante reglas probabilísticas, se pueden identificar configuraciones que pueden maximizar la exposición solar[32][33].

Agricultura de precisión

- *Optimización de recursos:* Al combinarse con otros sistemas, pueden generar mapas de variabilidad espacial en suelos. Esto puede permitir el riego de *tasa variable* o aplicar fertilizantes, reduciendo la cantidad de insumos hasta un 30 % al adaptarse a microzonas específicas[35].
- *Manejo de plagas y enfermedades:* En viñedos, estos modelos pueden simular la propagación de hongos según la temperatura y humedad. Las reglas pueden variar los patrones de crecimiento en respuesta a ataques facilitando estrategias de poda o de fumigación localizada[33][35].

Fitomejoramiento y Adaptación Climática

- *Selección de genética asistida:* Los sistemas de Lindenmayer evolutivos, generados mediante algoritmos genéticos, indagan diseños de vegetales más resilientes[32].
- *Predicción de rendimiento:* En cafetales, existen modelos acoplados a datos climáticos que proyectan las cosechas bajo a determinados escenarios de calentamiento. Las reglas pueden modificar las flores y frutos según el estrés hídrico, pudiendo anticipar pérdidas de 10 - 15 % en zonas más tropicales[33].

2.3. Blender como plataforma de Simulación Agrícola

Blender es un software de creación 3D de carácter gratuito y de código abierto. Es utilizado para diferentes funciones en los que destacan el modelado, animación, simulación, renderizado, entre otras más. Este software fue desarrollado por la *Blender Foundation* y una comunidad global. Entre una de sus principales características es que soporta formatos como **FBX**, **OBJ** y **3DS**. Su interfaz es de carácter intuitivo y tiene actualizaciones constantes lo que hacen que sea accesible tanto para principiantes como para profesionales. La popularidad de esta herramienta se debe que su uso es aplicable en un sinnúmero de áreas como el cine, videojuegos, arquitectura, efectos visuales, etc. También se ha hecho popular en áreas como la agricultura de precisión, ya que este software tiene la capacidad de procesar datos espaciales, simular entornos y crear modelos fotorrealistas permitiendo poder optimizar prácticas agrícolas por medio de tecnologías de nivel superior[36][37].

2.3.1. Nodos Geométricos en Blender

Los **Nodos Geométricos** (Geometry Nodes) de Blender son un sistema de procedimiento no destructivo que permite la creación, manipulación y análisis de geometría 3D mediante una red visual de nodos. Este sistema es central para el modelado y la generación de activos procedurales en Blender [8].

Tipos de Nodos y Estructura de Datos

El sistema organiza los nodos en categorías que operan sobre diferentes tipos de datos geométricos [8].

Tipo de Nodo	Descripción y Función Principal	Ejemplos Comunes
Nodos de Entrada (Input)	Introducen datos, valores o información de la escena en el sistema.	Object Info, Collection Info, Value.
Nodos de Geometría (Geometry)	Realizan operaciones fundamentales sobre la geometría, independientes del tipo específico.	Join Geometry, Transform, Bounding Box, Delete Geometry.
Nodos de Malla (Mesh)	Operaciones específicas para la topología de malla (estructuras poligonales).	Mesh Primitive, Subdivide, Boolean, Triangulate.
Nodos de Curva (Curve)	Crean y manipulan curvas, que son la base para superficies y desplazamientos.	Curve Primitive, Resample Curve, Curve to Mesh.
Nodos de Instancia (Instances)	Duplican y gestionan eficientemente instancias de objetos.	Point Instance, Geometry to Instance, Realize Instances.
Nodos de Volumen (Volume)	Trabajan con campos de densidad para efectos como niebla, humo o nubes.	Points to Volume, Volume to Mesh, Volume Cube.
Nodos de Utilidad (Utilities)	Operaciones matemáticas, lógicas y de conversión para controlar el flujo de datos.	Math, Compare, Map Range, Vector Math.

Tabla 2.6: Principales tipos de nodos en el sistema Geometry Nodes de Blender [8]

Flujo de Datos y Dominios de Atributo

Una red de nodos procesa un flujo de datos de geometría. Cada elemento geométrico, ya sea vértice, borde, cara o instancia, tiene un dominio donde residen los atributos (datos como la posición, el color o los valores personalizables) [8]. Manipular estos atributos en sus dominios correctos es clave para un control preciso.

Campos y Grupos

Un concepto central es el de campos. Un campo representa una operación o un valor que puede calcularse de manera diferente para cada elemento del dominio (ejemplo, la distancia de cada punto al origen). Los grupos de nodos permiten encapsular y reutilizar redes complejas como nodos personalizados [8].

Aplicaciones Prácticas

- **Modelado Procedural:** Crear arquitectura, vegetación o terrenos con parámetros ajustables.
- **Efectos y Simulaciones:** Distribuir objetos (scattering), deformar geometría con ruido o crear patrones complejos.
- **Optimización de Trabajo:** Automatizar tareas repetitivas y crear herramientas personalizadas para pipelines de producción.

2.3.2. Fundamentos Técnicos de Blender para Aplicaciones Agrícolas

Blender es un programa gratuito de código abierto compatible con Windows, macOS y Linux. Este programa brinda herramientas más avanzadas para el modelado en 3D, animación, renderizado (usando motores como *Cycler* para un realismo fotométrico y Eevee para tiempo real) y simulaciones[36][38]. Su estructura permite ampliar funciones por medio de complementos y scripts en *Python*, lo cual es crucial para poder adaptarlo a necesidades agrícolas específicas[36][37].

Blender tiene un complemento llamado *BlenderGIS* que actúa como un puente entre el software y los diferentes sistemas de información geográfica (GIS). Este complemento permite importar datos como:

- Shapefiles (curvas de nivel, parcelas, etc).
- Imágenes georreferenciadas
- Modelos Digitales de Terreno (MDT) Estos datos se convierten en mallas 3D mediante la triangulación de Delaunay (red de triángulos conexa y convexa que cumple con la condición de que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo), aplicando texturas más realistas para visualizar suelos o cultivos[37].

2.3.3. Aplicaciones en Agricultura de Precisión

1. Reconstruccion 3D de Terrenos y Cultivos:
 - Modelado Topográfico: A partir de datos LIDAR o curvas de nivel, el software genera modelos 3D de forma precisa del terreno. Esto ayuda al análisis de pendientes, rugosidad y zonas de inundación, esto es importante para poder planificar drenajes o riegos[37].
2. Simulacion de Crecimiento Vegetal: El uso de sistemas de partículas para replicar patrones de desarrollo bajo variables climáticas y nodos geométricos para alterar la morfología de las hojas/raíces[39][40].
3. Efectos Ambientales en Cultivos: Los diferentes motores de renderizado simulan como los relieves topográficos o invernaderos puede afectar la fotosíntesis al bloquear la luz[40].
4. Generación de datos artificiales para IA: La creación de imágenes en 3D de cultivos bajo diferentes condiciones evita las costosas capturas en campo[40].

3. Estado del Arte

Antes de hablar de los sistemas de conducción debemos conocer como es el crecimiento natural de un cerezo (*Prunus avium*). Este crece a partir de un eje central, y lo hace rápidamente alcanzando una altura de 60 pies, demostrando una dominancia apical fuerte. Es por esta razón que el árbol de cerezo tiende a producir sus ramas justo debajo de la yema terminal del crecimiento anual[11]. El manejo o conducción del cerezo es compleja y presenta todo un desafío, por lo que hay que tener ciertas consideraciones, como, por ejemplo:

- **Exceso de crecimiento vigoroso:** Por su naturaleza el cerezo tiende a ser grande y vigoroso, por lo que, si un cerezo joven no es sometido a un proceso de formación, este puede producir largos brotes con menos ramas laterales o con una menor cantidad de flores. Esto dificultaría el desarrollo del dosel y la producción del fruto se ve limitada[11].
- **Ángulos de inserción agudos:** Los ángulos de inserción que producen los cerezos tienden a ser agudos. Estos tipos de ángulos son frecuentemente débiles y son propensos a que la corteza se incluya entre el tronco y la rama, es decir, que la corteza quede totalmente atrapada. Esto es perjudicial ya que puede producir roturas y/o enfermedades. Otro problema es que estos ángulos pueden producir brotes verticales vigorosos los cuales compiten con el eje central, pero estos producen un numero inferior de frutos[11].
- **Retraso en la producción:** Los cerezos pueden tardar entre 5 – 6 o más años en producir frutos sin el uso de portainjertos. La poda de estos árboles tiende a modificar el vigor y aumenta la producción de ramas, pero retrasa la producción del fruto, sobre todo en los árboles más jóvenes. Hay otros factores

como un suelo profundo o un abuso de fertilizantes, que aumentan el vigor considerablemente retrasando el inicio de la floración[11].

Se debe considerar todos estos factores antes de elegir un sistema de conducción, como también tener en cuenta los requisitos de cada uno. Se debe considerar también los componentes de cada sistema y como estos se interrelacionan para promover de cierta forma la producción de yemas florales, crecimiento vegetativo y madera nueva.

3.1. Sistemas de Conducción

3.1.1. Sistema Kym Green Bush (KGB)

El sistema de conducción Kym Green Bush (KGB) produce un árbol que no necesita soporte. Varias formaciones frutíferas temporales crecen en vertical y disminuyen el vigor del árbol, así permitiendo el uso de portainjertos estándar. Para mantener jóvenes y productivos los espolones, las formaciones frutíferas verticales se renuevan con regularidad. El KGB es el único sistema que produce un huerto verdaderamente peatonal, es decir, que se puede realizar la cosecha sin escaleras o plataformas ya que la altura máxima del árbol es de 2,5 metros. La formación del árbol es fácil y exige poca mano de obra[11][41][9].

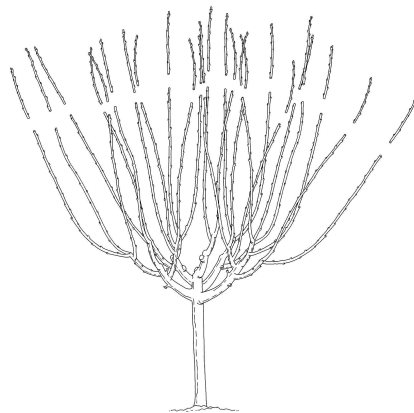


Figura 3.1: Esquema visual de la estructura de árboles de cerezos con sistema de conducción KGB



Figura 3.2: Foto de árboles de cerezos reales con sistema de conducción KGB

3.1.2. Upright Fruiting Offshoots (UFO)

El sistema de conducción Upright Fruiting Offshoots (UFO) depende totalmente del uso de un sistema de soporte. Este sistema optimiza no solo la eficiencia de mano de obra, si no también la calidad del fruto mediante la formación de un “muro” poco profundo de ramas fructíferas precoces. Este diseño arquitectónico facilita la cosecha y la poda. Al igual que el sistema KGB, el UFO produce fruto en las formaciones fructíferas verticales renovables, estas salen de un tronco o cordón bajo y horizontal. Este sistema semipeatonal ofrece las ventajas de alta productividad (tanto en los árboles jóvenes como en los maduros), buen movimiento de aire y buena distribución de luz. De este modo se minimizan enfermedades y se promueve la producción de frutos uniformes de alta calidad en todo el dosel. Los árboles maduros son fáciles de cuidar y podar. Sin embargo, la guía de las ramas verticales en el soporte requiere más tiempo y cuesta más que otros sistemas[11][41][9].

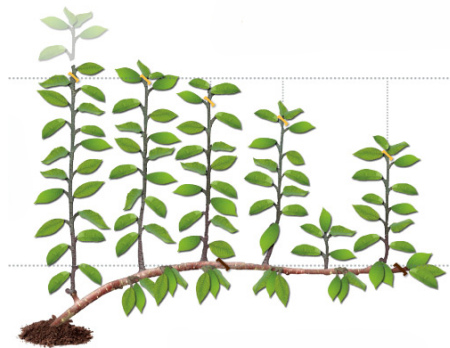


Figura 3.3: Esquema visual de la estructura de árboles de cerezos con sistema de conducción UFO



Figura 3.4: Foto de árboles de cerezos reales con sistema de conducción UFO

3.1.3. Tall Spindle Axe (TSA)

Este sistema de conducción es una modificación de otros sistemas de conducción antiguos: Vogel Central Leader y Zahn Spindle. Este sistema integra conceptos nuevos a estos sistemas antiguos, los cuales producían árboles de un solo eje con la capacidad de crecer sin soporte. El dosel de un árbol TSA se caracteriza por una espiral continua de ramas laterales de vigor medio. Esta espiral se desarrolla mediante la activación de yemas específicas (a través del uso de incisiones, el raleo de yemas o reguladores de crecimiento). Por lo general se utilizan portainjertos semienanizantes para crear un huerto semipeatonal. El TSA además se distingue por dos conceptos claves: El

recorte anual de los brotes laterales para mantener un buen equilibrio entre follaje, fruto y la carga frutal futura; y la renovación anual de las ramas fructíferas más viejas para que el eje central sea la única estructura permanente[11][41][9].



Figura 3.5: A la izquierda: Foto de árboles de cerezos reales con sistema de conducción TSA. A la derecha: Esquema visual de la estructura de árboles de cerezos con sistema de conducción TSA

Tabla 3.1: Sistemas conducción cerezos[9]

Sist.	Rend. (kg/ha)	Eff. Cosecha (kg/h)	Poda	Dens. (árb/ha)
KGB	Alto	36.5	Mod.	1k-1.2k
UFO	Alto	36.1	Bajo	1.2k-1.5k
TSA	Alto	NR	Mod.	1.5k-2k

3.2. Plugins para Blender

3.2.1. Definición y Tipos de Plugins

Los **plugins** o (*addons* en *Blender* son complementos que aumentan las capacidades del software, integrando herramientas para modelado, animación, simulación, renderizado, etc. Se clasifican en:

- **Oficiales:** Incluidos en *Blender* pero están desactivados por defecto[42][43].

- **Comunitarios:** Desarrollados por usuarios, pueden ser gratuitos o de pago[44][45].
- **Comerciales:** Son de pago. Tienen funciones avanzadas, la mayoría viene con el término "Pro" en el nombre[46][47].

Tabla 3.2: Plugins destacados en la industria 3D

Plugin	Función Principal	Costo
BoxCutter	Modelado booleano	\$38
Animation Nodes	Animación procedural	Gratuito
Flip Fluids	Simulaciones de fluidos	\$76
Geo Scatter	Vegetación procedural	\$99
Texel Density	Optimización de UVs	Gratuito

3.2.2. Desarrollo y Codificación

Los *plugins* se programan usando **Python**, a través de la *API* de *Blender* para interactuar con el núcleo del software. Para desarrollar y/o codificar estos *plugins* se requiere:

- **Estructura de archivos:** Se necesita de un archivo `__init__.py` para hacer el registro del *plugin*, y de scripts para definir operadores, paneles y propiedades[43].
- **Componentes claves:**
 - Operadores: Son las clases que ejecutan las acciones.
 - Paneles: Son las interfaces en la UI de *Blender*.
 - Propiedades: Son las variables que el usuario ajusta o edita.
- **Pruebas y distribución:** Estos *plugins* se empaquetan en archivos tipo .zip y se instalan a través del menú de *Preferencias* de *Blender*[42][43].

3.2.3. Plugins de Blender y su aplicación en las Industria Agrícola

Tanto *Blender* como sus *plugins* se usan para poder visualizar datos agrícolas y también para optimizar diseños. Algunas de las áreas dentro de la industria agrícola donde se utilizan *plugins* determinados de *Blender* son:

- **Diseño de Maquinaria:** Algunos *plugins* como *Hard Ops* y *BoxCutter* permiten al usuario modelar equipos agrícolas con mayor precisión, simulando los ensamblajes y piezas[44][45].
- **Simulación de Cultivos:** Se destaca el uso de *Geo Scatter* para generar distribuciones más realistas de plantas basadas en datos de suelo y densidad[46]. Por otro lado, *Stylized TreeGen* puede crear vegetación la cual es adaptada según la estación, esto sirve para poder ver el impacto que tienen ciertos climas en cosechas[44].
- **Análisis de Terrenos:** Los *plugins* más reconocido en esta área son los de *GIS (Sistemas de Información Geográfica)* los cuales importan datos de tipo topográficos para poder crear mapas en 3D, los cuales son útiles en la planificación de riego[48]. Otro *plugin* que se usa en esta área es el *Erode II*, este puede simular la erosión del suelo para predecir degradaciones[45].
- **Capacitación:** Se uso de *Blender Render Queue* destaca dentro de esta área ya que puede generar animaciones educativas sobre las técnicas de cultivo[44].

4. Metodología

El desarrollo del proyecto se realizó a través de la metodología **Kanban**. Esta es una metodología de gestión de trabajo visual y adaptativa, centrada en la optimización del flujo de trabajo [49]. A diferencia de otras metodologías con sprints fijos, Kanban es continuo y evolutivo, ideal para proyectos con una demanda variable o para un trabajo individual. Su esencia práctica se basa en tres principios fundamentales: *visualizar el trabajo, limitar la carga en proceso y gestionarl el flujo* [49]. Lo principal de esta metodología es el tablero visual, una herramienta que divide el proceso en columnas que representan cada estado por el que pasa una tarea (ejemplo, 'Por Hacer', 'En Proceso', 'En Pruebas', 'Hecho'). Cada una tarea se escribe en una tarjeta que avanza por este flujo. Este simple acto de visualización proporciona una transparencia inmediata sobre el estado del proyecto, los avances y, crucialmente, los cuellos de botella donde el trabajo se estanca [49].

Una de sus reglas más importantes es la limitación del *Trabajo en Progreso* o WIP (*Work in Progress*). Esto significa establecer un número máximo de tareas permitidas en cada columna especialmente en la etapa inicial ('En Progreso'). Esta limitación 'obliga' a la persona a terminanr antes de empezar algo nuevo, reduciendo el tiempo de entrega y forzando a resolver los bloqueos de inmediato. Para proyectos en solitario, imponer un límite de una o dos tareas en progreso maximiza el enfoque [50].

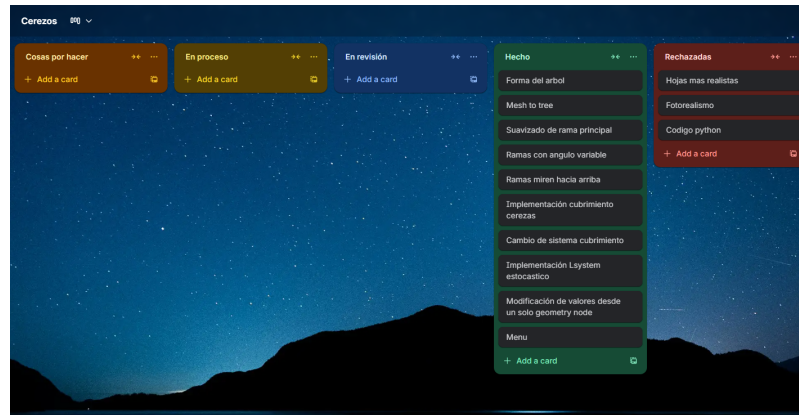


Figura 4.1: Foto de Metodología Kanban aplicada a través de la plataforma Trello

La metodología se completa con un ciclo de mejora continua. Al observar el tablero y medir métricas como el tiempo del ciclo, se puede identificar ineficiencias de manera objetiva. La metodología Kanban fomenta el hacer pequeños ajustes evolutivos en el proceso de forma regular, basándose en datos y no en suposiciones. No requiere cambios radicales; se aplica sobre la forma de trabajo actual para mejorarla de forma gradual [50].

Esta metodología se aplicó esencialmente en el desarrollo del plugin, haciendo una investigación previa sobre los plugin relacionados al L-system y generación de árboles para poder generar una versión de acuerdo a lo requerido en esta investigación y definiendo las tareas más importantes como especificar la forma, la integración de elementos característicos, la aleatoriedad a través del L-system estocástico, la morfología y estructura de frutos, etc.

Cuando el plugin esté listo, en su forma más optima, se procede a validar con pruebas de evaluación de usabilidad (con pruebas del plugin forma remota y un cuestionario) y se analizan los resultados de estas prueba y se da un veredicto al respecto.

4.1. Desarrollo del plugin

El plugin fue desarrollado en la plataforma Blender en la versión 5.0 a partir de un plugin ya existente llamado *Systems Blender Geometry-Nodes*. Este permite dibujar L-system con parámetros puestos por usuarios (Reglas, axioma, ángulo y largo de

línea), además tiene una función para tapizar los árboles con texturas para las ramas y hojas. Todo esto siguiendo las características del sistema de entrenamiento UFO.

Para la forma del L-system, se hizo un bosquejo en papel para formular las reglas que permiten generar el árbol de la forma más realista posible, las cuales son las siguientes:

- **Alfabeto:** {F, R, X, S, +, -, :, ;, ?, ", ~, , /, [,]}
- **Axioma:** R
- **Reglas:**
 - R → +F+X
 - X → :F[;S]X
 - S → ?F (probabilidad: 0.25)
 - S → ?F[~/F]F (probabilidad: 0.25)
 - S → ?[-~F]F (probabilidad: 0.25)
 - S → ?["~/F]F["~F]F["~\F]F (probabilidad: 0.25)

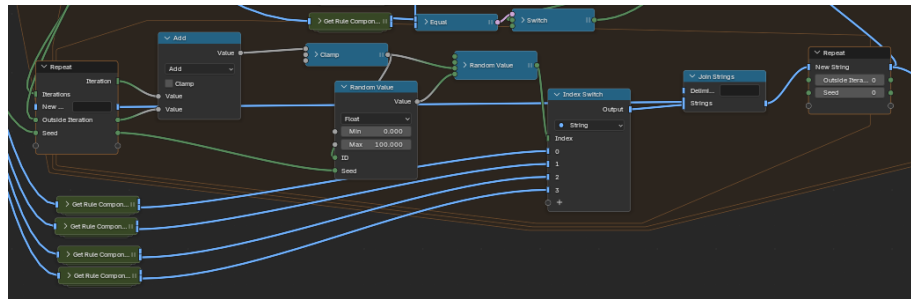


Figura 4.2: Foto de implementación L-System estocástico

Para el desarrollo del plugin se usaron los *Geometry Nodes* de Blender, tomando como base el plugin de L-system, pero añadiendo caracteres personalizados para algunas funciones.

Caracteres ya incluidos en el plugin:

- **F:** Dibuja una línea.
- **+ o -:** Gira derecha o izquierda según el ángulo dado.

- $\&$ o $\wedge$: Subir o bajar según el ángulo dado (en el eje de inclinación).
- $\backslash$ o $/$: Rota en sentido o en contra del sentido del reloj (alrededor del eje de avance).
- $\sim$: Gira, sube o rota en un grado aleatorio (variación estocástica).
- $"$ o $_$: Multiplica o divide el largo de línea por un valor (incremento/decremento del paso).
- $[$ o $]$: Empieza o termina una rama (guarda/restaura el estado gráfico).

Caracteres que se integraron al plugin en la etapa de desarrollo:

- $;$: Los caracteres que vienen después de este símbolo siempre apuntan hacia arriba.
- $::$: Suaviza el valor del ángulo para que la rama principal tenga un mejor aspecto.
- $?$: Varía ligeramente el valor del ángulo, entre -2 a 2 grados, para que la rama no sea completamente recta hacia arriba.

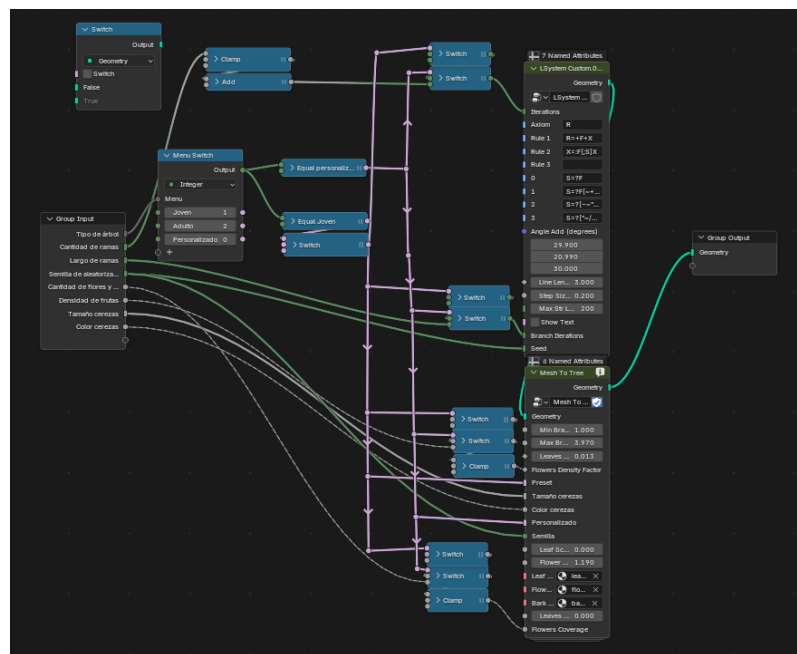


Figura 4.3: Implementación de menú con nodos geométricos

Una vez listos los nodos, tanto los de L-System Renderer como los que tapizan el árbol con texturas, se hace un tercer modificador de nodos geométricos que funciona como una especie de menú o panel que le otorga los valores a ambos plugins para que puedan funcionar con datos que el usuario proporcionará.

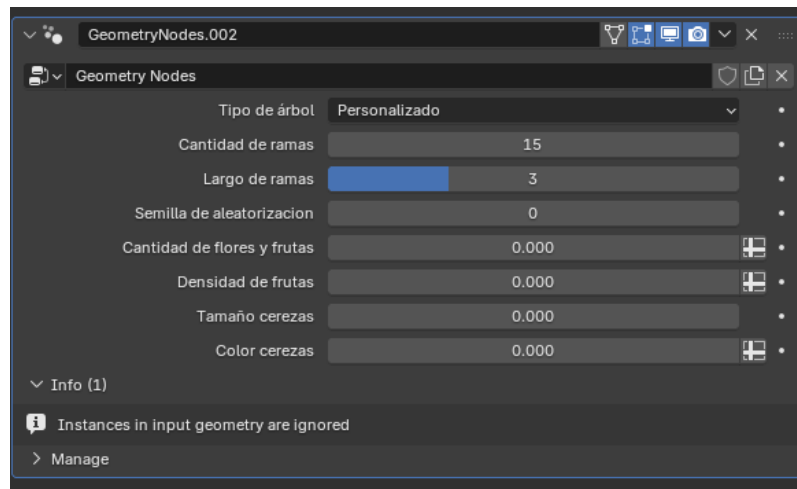


Figura 4.4: Foto del menú personalizable del plugin



Figura 4.5: Imagen comparativa. A la izquierda un cerezo real con sistema UFO. A la derecha un cerezo simulado con el plugin a partir de la imagen del cerezo real de la izquierda como referencia.

En base a esto el usuario tiene completa libertad de realizar un árbol de cerezo en 3D siguiendo el sistema de conducción UFO. Este puede ser de cierta forma predeterminada, escogiendo una etapa de crecimiento (joven o adulto) o bien, puede

usar el panel para crear un árbol de cerezo totalmente desde 0 y personalizarlo según las características que el usuario le entregue al plugin.

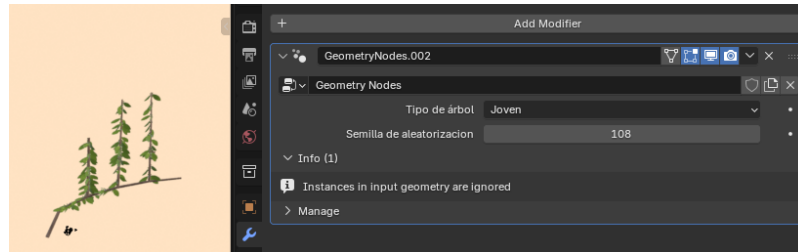


Figura 4.6: Árbol de cerezo en sistema de conducción UFO en etapa 'Joven' realizado usando el plugin

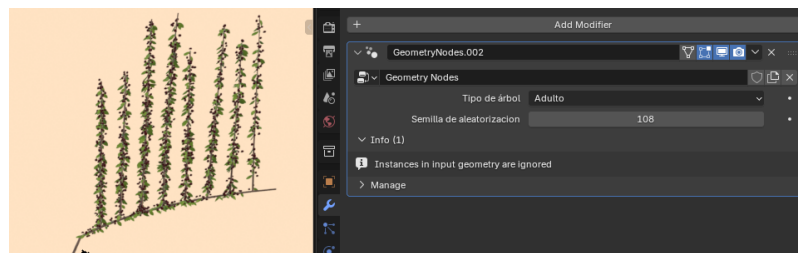


Figura 4.7: Árbol de cerezo en sistema de conducción UFO etapa 'Adulto' realizado usando el plugin

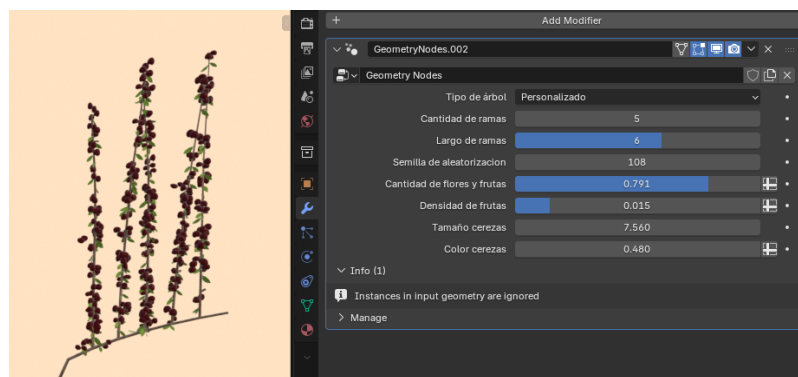


Figura 4.8: Árbol de cerezo en sistema de conducción UFO personalizado usando el panel del plugin

4.2. Validación

Para validar este plugin se realizarán dos pruebas prácticas donde el usuario deberá realizar una simulación de árbol de cerezo con la forma de sistema de entrenamientos UFO en la plataforma de Blender usando ciertos parámetros dados por el investigador. Se realizará una prueba usando el plugin desarrollado y la otra sin él. Luego contestará, a través de un formulario de Google Forms, un cuestionario de medición de usabilidad (SUS) el cual proporciona un puntaje de 0 a 100, donde las puntuaciones más altas indican una mejor usabilidad. Además, en este formulario el usuario tendrá que subir imágenes de las pruebas realizadas.

4.3. Resultados Esperados

Se espera que al recopilar y analizar las respuestas, el plugin tenga una respuesta positiva por parte de los usuarios en cuanto al nivel de efectividad y satisfacción, indicando una usabilidad aceptable, por ende, el plugin debe obtener, de las preguntas del cuestionario, un puntaje de satisfacción del 70 o más.

4.4. Carta Gantt

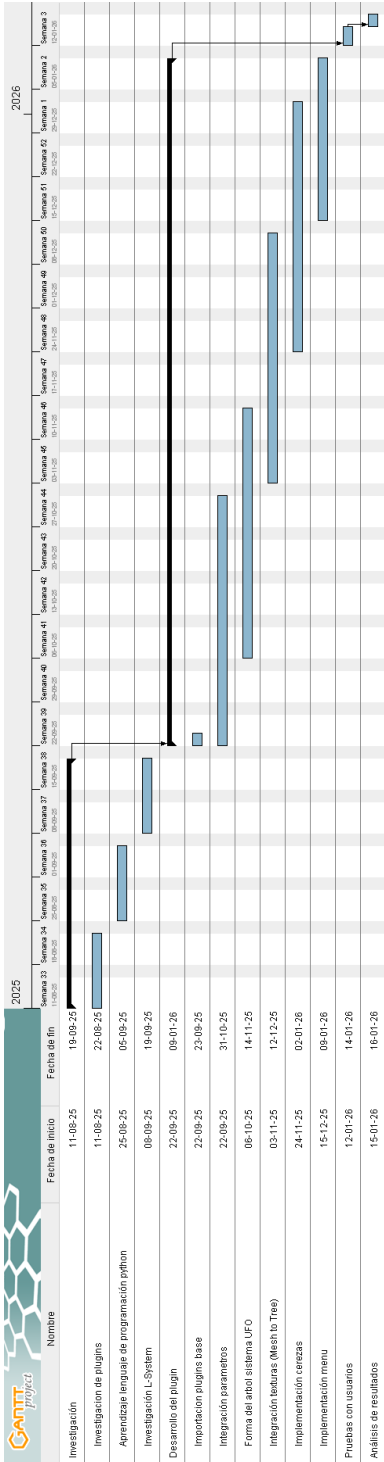


Figura 4.9: Carta Gantt del proyecto.

5. Pruebas y Resultados

5.1. Descripción de Pruebas

Las pruebas consistieron en realizar dos pruebas prácticas las cuales los usuarios debían elaborar, mediante la plataforma de Blender en la versión 5.0 o superior, un árbol de cerezo siguiendo la forma del sistema de entrenamiento UFO y con ciertos parámetros entregados por el evaluador. Luego contestar un cuestionario de usabilidad (SUS).

Las instrucciones de las pruebas fueron entregadas a través de la plataforma de Google Forms donde también está el cuestionario a responder. También en la plataforma se le entregó al participante información sobre lo que son los sistemas de entrenamiento UFO junto con imágenes de referencia para una mayor comprensión y contextualización.

Para la prueba 1 el usuario tuvo que modelar un árbol de cerezo sin el uso del plugin, se le dio al participante una imagen de referencia del árbol de cerezo a modelar. Todos los participantes recibieron la misma imagen a replicar. En la imagen se puede ver un árbol de cerezo siguiendo el sistema de entrenamiento UFO con ciertos parámetros definidos: cantidad de ramas, largo de ramas, ángulo de la rama principal y secundarias, cantidad de las frutas, densidad de las frutas, tamaño de las frutas y color de las mismas. Todo esto en un límite de tiempo de 5 a 7 minutos controlados por el usuario.

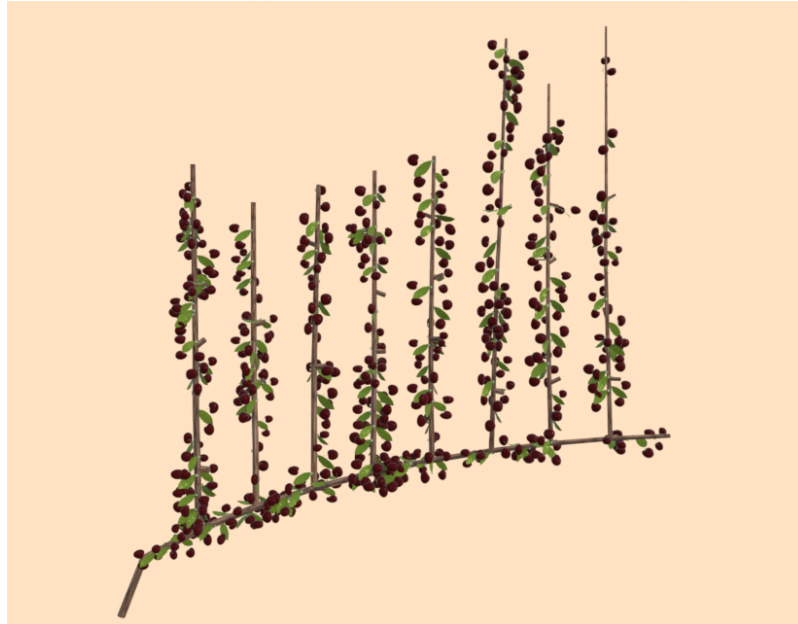


Figura 5.1: Foto Referencia del árbol de cerezo solicitado

Una vez terminado el modelado, los participantes debían subir a la plataforma una imagen mostrando el resultado de su prueba. Luego procedían a realizar la segunda prueba.

La prueba 2 era realizar el mismo árbol de cerezo de referencia, pero esta vez usando el plugin desarrollado. Al finalizar los usuarios nuevamente tenían que subir sus resultados a la plataforma.

Una vez terminadas ambas pruebas, los participantes debían responder un cuestionario sobre usabilidad (SUS), este es un cuestionario de 10 preguntas y se usa para medir la usabilidad de un sistema, interfaz, etc, a través de una escala de puntuación que va del 0 al 100. Cada una de las diez preguntas tiene una escala que va del 1 al 5 (donde 1 es en desacuerdo y 5 en total acuerdo) en función de la respuesta. Para calcular el puntaje se realiza de la siguiente forma:

- Se suman los puntajes de las respuestas impares y al resultado se le resta 5.
- Se suman los puntajes de las respuestas pares y luego resta ese resultado a 25.
- Finalmente sumar ambos resultados y se multiplica por 2,5.

El puntaje final obtenido se analiza a través de la escala de puntuación (la que va de 0 a 100) donde se ve si el resultado obtenido es menor a 50 significa que el

plugin es inaceptable indicando problemas serios de usabilidad, por lo tanto falló rotundamente. Si el resultado está entre 50 y 70 significa que el plugin está bien pero tiene aspectos importantes a corregir. Por último, si el puntaje obtenido se encuentra entre el 71 y 100, significa que el plugin tiene buena usabilidad, que es fácil de entender y usar [51].

Para estas pruebas se necesitaron un mínimo de 10 personas, esto se determinó basándose en el principio establecido por Nielsen y Landauer (1993) quienes demostraron que realizar pruebas con un mínimo de 5 usuarios es suficiente para identificar hasta el 85 % de los problemas de usabilidad en una interfaz o similar [52]. Por lo que siguiendo este principio se reclutó a un mínimo de 10 personas (el doble), con un total de 11 participantes, esto para tener un mayor peso en los resultados a obtener.

5.2. Resultados

Tras la recolección y análisis de los datos obtenidos en las pruebas de usabilidad se presentan a continuación los resultados organizados en tres dimensiones: *efectividad*, *eficiencia* y *satisfacción del usuario*.

5.2.1. Efectividad: Capacidad para lograr el objetivo

La efectividad del plugin se midió mediante la **tasa de éxito** en la replicación del modelo de referencia del cerezo en sistema UFO. De los 11 participantes, 8 lograron reproducir el modelo con alta fidelidad, lo que corresponde a una tasa de éxito del 73 %. Los 3 participantes restantes presentaron diferencias menores pero notorias en cuanto a la reproducción del árbol según la imagen de referencia, como en la distribución de ramas o en la densidad de frutos, atribuibles a la curva de aprendizaje inicial del plugin.

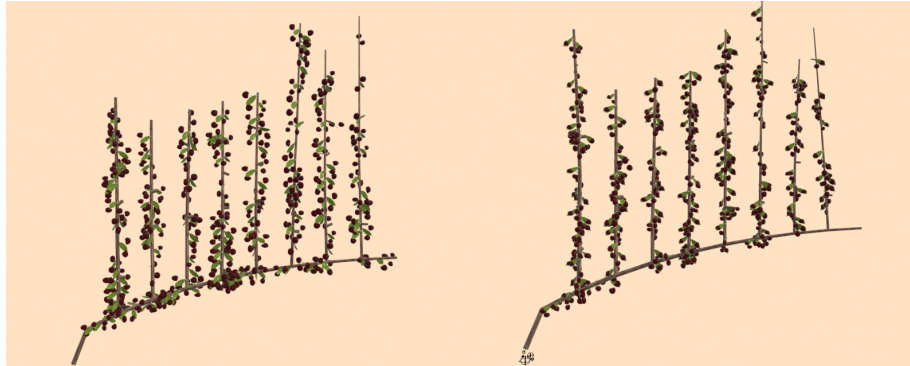


Figura 5.2: A la izquierda: Imagen de referencia creada para las pruebas de árbol de cerezo en sistema UFO. A la derecha: Imagen de árbol de cerezo modelado con el plugin por uno de los participantes.

Como se puede apreciar en la figura 5.2, se observa que el árbol realizado por el participante tiene una estructura coherente y muy similar a la imagen de referencia proporcionada. Lo que indica que el plugin tiene la capacidad de 'guiar' de forma efectiva al usuario hacia la creación de un modelo complejo y válido estructuralmente aún tendiendo una experiencia básica en Blender.

5.2.2. Eficiencia: Tiempo y esfuerzo requeridos

Si bien en las pruebas no se midió el tiempo de forma concreta, los reportes cualitativos de los participantes indicaron que la creación del modelo con el plugin tomó entre 3 a 5 minutos, mientras que el modelado manual, si bien algunos trabajaron en el tiempo recomendado (5 minutos) dando resultados incompletos, hay quienes se tomaron mucho más del tiempo recomendado llegando a estar 10 minutos a 1 hora completando la prueba. Por lo que utilizar el plugin reduce significativamente el tiempo promedio de modelado.

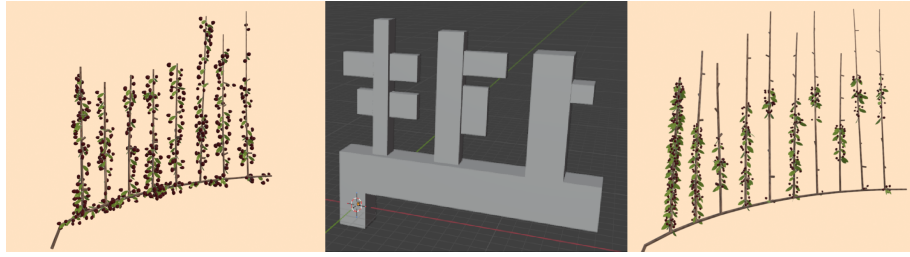


Figura 5.3: A la izquierda: Imagen de referencia creada para las pruebas de árbol de cerezo en sistema UFO. Al centro: Imagen de árbol de cerezo modelado de forma manual por uno de los participantes dentro de los 5 minutos recomendados. A la derecha: Imagen de árbol de cerezo modelado con el plugin por el mismo participante dentro de los 5 minutos recomendados.

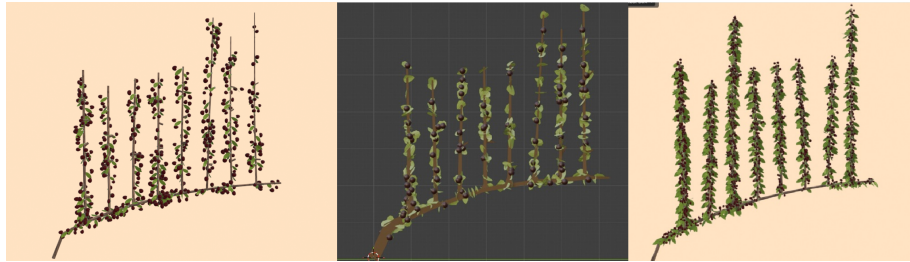


Figura 5.4: A la izquierda: Imagen de referencia creada para las pruebas de árbol de cerezo en sistema UFO. Al centro: Imagen de árbol de cerezo modelado de forma manual por uno de los participantes excediendo el tiempo predestinado para realizar la prueba. A la derecha: Imagen de árbol de cerezo modelado con el plugin por el mismo participante dentro de los 5 minutos recomendados.

Además, los participantes señalaron que el proceso con el plugin fue menos laborioso y requirió menos intervención manual, lo que sugiere una optimización significativa del flujo de trabajo.

5.2.3. Satisfacción del usuario: Percepción de usabilidad

La satisfacción se cuantificó mediante el **Cuestionario de Usabilidad del Sistema (SUS)**, aplicado tras la finalización de ambas pruebas. Se realizó un análisis estadístico descriptivo de los 11 puntajes del cuestionario SUS obtenidos. La media fue de 82.05, clasificada como 'Excelente'. Se calculó una desviación estandar de 10.61

puntos y un coeficiente de variación de 12.9% indican una baja dispersión realtiva, lo que se traduce en una alta homogeneidad en las respuestas, lo que quiere decir que la mayoría de los usuarios experimentó una usabilidad similarmente alta. Esta consistencia se aprecia en el diagrama de caja (Figura 5.5), donde el 50% centrar de los puntajes se concentra entre 72.5 y 92.5 puntos. En conjunto, estas métricas refuerzan que la excelente valoración no es el resultado de unos pocos puntajes altos atípicos, sino la experiencia predominante del grupo evaluado.

Participante	Puntaje SUS	Clasificación
Usuario 1	97,50	Excelente
Usuario 2	70,00	Aceptable
Usuario 3	95,00	Excelente
Usuario 4	97,50	Excelente
Usuario 5	77,50	Buena
Usuario 6	80,00	Excelente
Usuario 7	72,50	Aceptable
Usuario 8	90,00	Excelente
Usuario 9	82,50	Excelente
Usuario 10	67,50	Aceptable
Usuario 11	72,50	Aceptable
Promedio	82,05	Excelente

Tabla 5.1: Puntajes individuales y promedio del Cuestionario de Usabilidad (SUS).

Nota: Clasificación según escala SUS estándar: menor o igual a 50 (Inaceptable), 51–70 (Aceptable), 71–80 (Buena), 81–100 (Excelente).

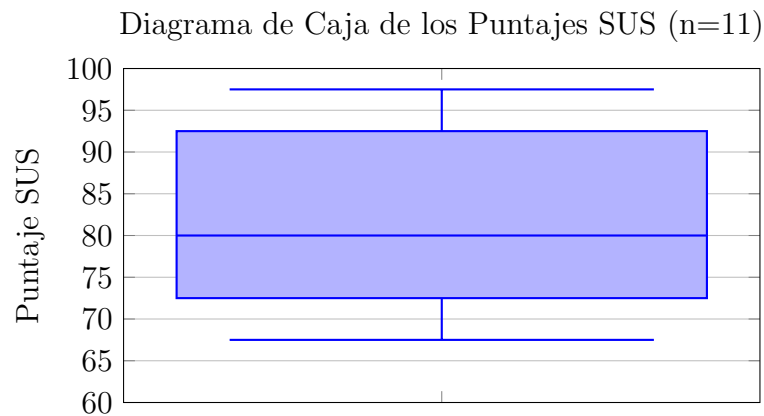


Figura 5.5: Diagrama de caja de los puntajes SUS. La línea central representa la mediana (82.5), la caja abarca del primer al tercer cuartil (72.5-92.5), y los bigotes muestran el rango completo (67.5-97.5).

El histograma de frecuencia de los puntajes del cuestionario SUS (figura 5.6) revela una distribución bimodal, con agrupaciones principales alrededor de los 72.5 y 97.5 puntos. Este patrón indica la existencia de dos percepciones predominantes dentro de la muestra: un grupo de usuarios (36 %) que experimentó una usabilidad 'Excelente' (97.5 %), y otro grupo (36 %) que la calificó como 'Buena' (72.5 %). La ausencia de puntajes por debajo de 68 confirma que ningún usuario consideró el plugin como 'Inaceptable'. Esta bimodalidad explica la desviación estándar moderada (10.61), lo que sugiere que, si bien la herramienta es efectiva y accesible en su conjunto (promedio 82.05), existe una cierta oportunidad para investigar y mejorar los elementos que hicieron que el plugin no alcanzara la máxima valoración.

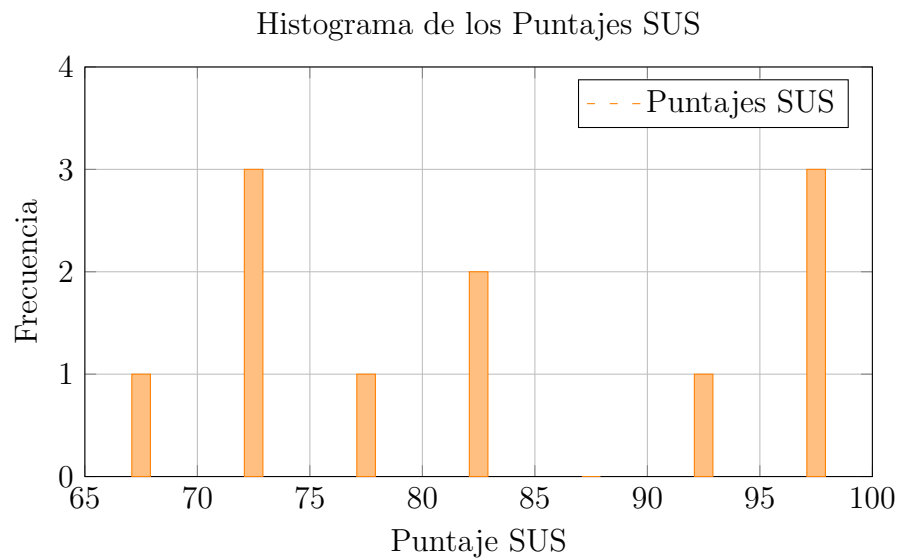


Figura 5.6: Histograma de frecuencias de los puntajes SUS. Los intervalos (bins) son de 5 puntos. Se observa una distribución bimodal con concentraciones alrededor de 72.5 y 97.5.

6. Conclusión

Los resultados del estudio proporcionaron evidencia sólida que respalda la hipótesis central de este proyecto: *El plugin de simulación de cerezos para Blender permite una mayor accesibilidad y una mejor experiencia en cuanto a eficacia, eficiencia y satisfacción en usuarios con experiencia básica o intermedia en Blender.* La efectividad quedó demostrada ante una elevada tasa de éxito alcanzando el 73 %, demostrando que el plugin tiene la capacidad de guiar a los usuarios con poca experiencia a un resultado concreto, complejo y completo. La satisfacción y la percepción de la usabilidad medidas con el Cuestionario de Usabilidad (SUS) arrojaron un puntaje de 82.05 que lo clasifica como 'Excelente' y muy por encima del umbral de aceptabilidad. Un análisis estadístico detallado revela que este resultado es además consistente (coeficiente de variación del 12.9 %).

A pesar de los grandes logros obtenidos, el plugin también revela limitaciones y áreas de mejora que trazan el camino para trabajos futuros. Por ejemplo, la validación se centró en la usabilidad y accesibilidad, dejando para una siguiente oportunidad una posible validación agronómica contra datos reales proporcionadas por expertos en el área para asegurar la precisión fisiológica. Otro ejemplo sería la generalización del plugin para soportar otros sistemas de entrenamiento como KGB o TSA, esto representaría un desafío técnico para escalar la utilidad del plugin. En un contexto más amplio, este proyecto sienta las bases técnicas para una herramienta de simulación agrícola accesible y reproducible, que puede ser adaptada a otros tipos de cultivos de interés regional o incluso global.

Bibliografía

- [1] Plants for a Future. *Prunus avium* - L. wild cherry, sweet cherry. Base de datos de plantas PFAF, 2025. Accedido el 2025-06-05.
- [2] E. Welk, D. de Rigo, and G. Caudullo. *Prunus avium in Europe: distribution, habitat, usage and threats*, chapter *Prunus avium*, pages 140–141. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016. e01491d+.
- [3] Native Plant Trust. *Prunus avium* (l.). Go Botany: Plant Identification through Science and Conservation, 2025. Accedido: 2025-06-05.
- [4] North Carolina State University. *Prunus avium* (sweet cherry). Plant Database, College of Agricultural and Life Sciences, 2023. Accedido: 2025-06-05.
- [5] Ali Khadivi, Mahsa Mohammadi, and Kimiya Asgari. Morphological and pomological characterizations of sweet cherry (*prunus avium* l.), sour cherry (*prunus cerasus* l.) and duke cherry (*prunus* × *gondouinii* rehd.) to choose the promising selections. *Scientia Horticulturae*, 257:108719, 2019.
- [6] Ali Khadivi, Somayeh Goodarzi, and Mostafakamal Shams. Genetic relationships between sweet cherry (*prunus avium* l.) and sour cherry (*p. cerasus* l.) as revealed using fruit characterizations and chloroplast microsatellites. *Food Science & Nutrition*, 12:1647–1654, 2024.
- [7] A. Wünsch and J.I. Hormaza. Molecular characterisation of sweet cherry (*prunus avium* l.) genotypes using peach [*prunus persica* (l.) batsch] ssr sequences. *Heredity*, 89:56–63, 2002.

- [8] Blender Online Community. Geometry nodes. Blender Documentation, 01 2026. Consultado el 2026-01-04.
- [9] D. Soysal, L. Demirsoy, and D.E. Doğan. Training system effect on fruit quality, yield, harvest efficiency, pruning times and growth in sweet cherries. *Applied Fruit Science*, 67(6), 2025. Artículo divulgativo basado en la investigación original. Publicado en línea el 7 de abril de 2025. Accedido el 7 de junio de 2025. Incluye material adicional de Greg Lang (Growing Produce) y análisis de Melissa Venturi (Universidad de Bolonia).
- [10] BASF. Protección de cultivos y semillas: Cerezos, 2023.
- [11] L. E. Long, Gregory A. Lang, Stefano Musacchi, and Matthew David Whiting. Cherry training systems, 2015.
- [12] Miguel Ellena, Adolfo Montenegro, et al. Formación y sistemas de conducción del cerezo dulce. Technical Report 247, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional Carillanca, Km 10 camino Cajón Vilcun, Chile, 2012. ISSN: 0717-4829.
- [13] Dolores Raffo and M. Curetti. Preliminary results of pedestrian training systems for cherry production in the río negro and neuquen valleys. *Agrociencia Uruguay*, 25(NE1):397, 2021. VIII Encuentro Latinoamericano Prunus sin Fronteras.
- [14] Aristid Lindenmayer. Developmental algorithms for multicellular organisms: A survey of l-systems. *Journal of Theoretical Biology*, 54(1):3–22, 1975.
- [15] Gabriela Ochoa. An introduction to lindenmayer systems, 1992. Interactive tutorial on L-systems with biological and graphical applications. Part of Gabriela Ochoa’s academic materials during her PhD research.
- [16] Suwimol Chockchaisawasdee, John B. Golding, Quan V. Vuong, Konstantinos Papoutsis, and Costas E. Stathopoulos. Sweet cherry: composition, postharvest preservation, processing and trends for its future use. *Trends in Food Science & Technology*, 55:72–83, 2016. Accepted manuscript licensed under CC BY-NC-ND 4.0.
- [17] Universität Hamburg, Fachbereich Biologie. Rosaceae, 2006. Archivado por Internet Archive el 5 de noviembre de 2006. Contenido original del proyecto Botanica Online (1999).

- [18] Sara Ricardo-Rodrigues, Marta Laranjo, and Ana Cristina Agulheiro-Santos. Methods for quality evaluation of sweet cherry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(1):463–478, 2023. Online publication date: 15 August 2022.
- [19] R. Pérez-Sánchez, M. A. Gómez-Sánchez, and R. Morales-Corts. Agromorphological characterization of traditional spanish sweet cherry (*prunus avium* l.), sour cherry (*prunus cerasus* l.) and duke cherry (*prunus x gondouinii* rehd.) cultivars. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(1):42–55, 2008. Disponible en: <http://revistas.inia.es/index.php/sjar/article/view/2551627>.
- [20] Cristóbal Chávez Bravo. Chile prevé aumentar en 59 % sus exportaciones de cerezas en la temporada 2024-2025. Xinhua News Agency, 10 2024. Accedido: 2025-06-05.
- [21] Sebastián Ramírez. Understanding the importance of cherries for chile to face the challenges of the future. FreshFruitPortal, 5 2025. Accedido: 2025-06-05.
- [22] CherryTimes Editorial Team. Chilean cherries 2025: China export strategy and global market expansion. CherryTimes, 2025. Accedido: 2025-06-05.
- [23] Sarah Ilyas. Producción chilena de cerezas crecerá un 6,8 % en 2024-2025. Portal-Fruticola.com, 8 2024. Accedido: 2025-06-05.
- [24] Michelle Morales. Zonificación productiva y seguimiento de variedades de cerezo. *Redagráfica*, 8 2019. Accedido: 2025-06-05.
- [25] CherryTimes Editorial Team. The valparaíso region (chile) challenges the ovalle region on early cherry production. CherryTimes, 2024. Accedido: 2025-06-05.
- [26] Luis Elías. There is still a world to explore and potential for cherry cultivation in areas without cold weather. FreshPlaza, 2025. Accedido: 2025-06-05.
- [27] Beatriz Parra. Zonificación de variedades: Cuáles y cuándo producir. Smartcherry, 2024. Entrevista a Walter Masman; Accedido: 2025-06-05.
- [28] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Cerezas en chile chico: investigación, producción y comercialización que da frutos. Reporte Técnico RT-145/2025, INIA, Santiago, Chile, 1 2025. Accedido: 2025-06-05.

- [29] Centro de Pomáceas, Universidad de Talca. Manejos y novedades varietales en cerezos. Boletín Técnico 126, Universidad de Talca, Talca, Chile, 12 2022. Contiene contribuciones de Patricio Espinosa (PEC Consulting), Walter Masman, Lorena Pinto (A.N.A. Chile), y equipo del Centro de Pomáceas.
- [30] Christopher Jennings. L-systems, 2023. Artículo sobre sistemas de Lindenmayer con ejemplos gráficos y aplicaciones.
- [31] Przemysław Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, New York, 1990. With 150 illustrations, 48 in color. Electronic version (2004) produced from original L^AT_EX files.
- [32] Job Talle. Evolving lindenmayer systems, 2023.
- [33] Frédéric Boudon, Christophe Pradal, Thomas Cokelaer, Przemyslaw Prusinkiewicz, and Christophe Godin. L-py: An l-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language. *Frontiers in Plant Science*, 3:76, 2012.
- [34] Allen Pike. Modeling plants with L-Systems. <https://allenpike.com/modeling-plants-with-l-systems>, sep 2023.
- [35] U.S. Government. Agriculture, 2024. Sitio oficial del gobierno de Estados Unidos sobre aplicaciones GPS en agricultura.
- [36] Piotr Kurpiewski. Blender 3d: ¿qué programa es y para qué sirve? guía tutorial, 2024. Artículo educativo sobre aplicaciones de Blender.
- [37] Jesús Gómez Fernández. Modelos 3d de terreno en blender, February 2016. Artículo técnico sobre generación de modelos digitales de terreno con BlenderGIS.
- [38] Judit Figueras. Blender, el programa de modelado y animación 3d que se ha llevado el oscar, 2025. Artículo sobre el reconocimiento de Blender en la industria cinematográfica.
- [39] Comunidad de Blender. *Manual de Blender*. Blender Foundation, 2023.
- [40] Kimia Aghamohammadesmaeliketabforoosh, Joshua Parfitt, Soodeh Nikan, and Joshua M. Pearce. From blender to farm: Transforming controlled environment

agriculture with synthetic data and swinunet for precision crop monitoring. *PLOS ONE*, 20(4):e0322189, 2025. Artículo de investigación sobre aplicaciones agrícolas de Blender.

- [41] Alicia Namesny. Sistemas de conducción en cerezo para maximizar los beneficios y la calidad. *Tecnología Hortícola*, 2024. Accedido el 7 de junio de 2025. La fecha de publicación original no está especificada en el recurso; el año 2024 se estima basado en la actividad reciente de la autora [cit. en premio ASFPLANT 2024].
- [42] Aura Prods. Addons: Cómo instalarlos en blender paso a paso, 2023. Guía técnica oficial de Aura Prods sobre instalación de addons en Blender.
- [43] Blender Documentation Team. *Add-ons Preferences*. Blender Foundation, v4.2 edition, June 2025. Documentación oficial de Blender.
- [44] Fox Renderfarm. Useful plugins and addons for blender, August 2023. Artículo técnico sobre plugins de Blender.
- [45] BlenderHub Team. Top free and paid blender addons in 2024, March 2024. Análisis comparativo de plugins para Blender.
- [46] Art Department, KitBash3D. Best plugins for blender: Professional tools for 3d artists. Blog especializado en producción 3D, May 2024.
- [47] Technical Writers, Vagon. Top blender plugins: Essential tools for efficient 3d workflows. Blog técnico especializado en renderizado en la nube, October 2023.
- [48] V. Stadnikov, N. Likhva, N. Miroshnichenko, V. Kostiuk, and Y. Dorozhko. How GIS algorithms automate digital topographic mapping. *African Journal of Applied Research*, 11(1):146–156, 2025.
- [49] Lean Kanban University Inc. Kanban guide, 2023. This work is an official publication of the Lean Kanban University.
- [50] Asana. ¿qué es kanban? aprende cómo usar el sistema kanban de gestión de proyectos, 2024.
- [51] Daniel Torres Burriel. El System Usability Scale (SUS) y la usabilidad de tu página web, 1 2022.

- [52] Jakob Nielsen and Thomas K. Landauer. A mathematical model of the finding of usability problems. In *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 206–213, apr 1993.

A. Archivos importantes

A.1. Plugin simulación de cerezos con sistema de conducción UFO para Blender

- Enlace: [Plugin Simulación de Cerezos](#)

A.2. Preguntas relacionadas con el Cuestionario de Usabilidad de Sistemas (SUS) aplicadas a los participantes

- ¿Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia?
- ¿Encontré el sistema innecesariamente complejo?
- ¿Pensé que el sistema era fácil de usar?
- ¿Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder utilizar este sistema?
- ¿Encontré que las diversas funciones de este sistema estaban bien integradas?
- ¿Pensé que había demasiada inconsistencia en este sistema?
- ¿Me imagino que la mayoría de la gente aprendería a utilizar este sistema muy rápidamente?
- ¿Encontré el sistema muy complicado de usar?
- ¿Me sentí muy seguro usando el sistema?
- ¿Necesitaba aprender muchas cosas antes de empezar con este sistema?

A.3. Instructivo y Cuestionario aplicado a los participantes

- Enlace: [Cuestionario Participantes](#)

Cuestionario de usabilidad para plugin de simulación para sistemas de cultivo de cerezo

El siguiente cuestionario se enfoca en medir la eficiencia, eficacia y satisfacción de un plugin de modelado de cerezos para Blender. Por favor siga las instrucciones, y lea las preguntas con atención.

Recuerde que para esta prueba es necesario tener instalado Blender 5.0 o superior, por favor en caso de no tenerlo, instálelo.

El nombre, el correo y la foto asociados a tu cuenta de Google se registrarán cuando subas archivos y envíes este formulario

Edad

Tu respuesta

Cuestionario de usabilidad para plugin de simulación para sistemas de cultivo de cerezo

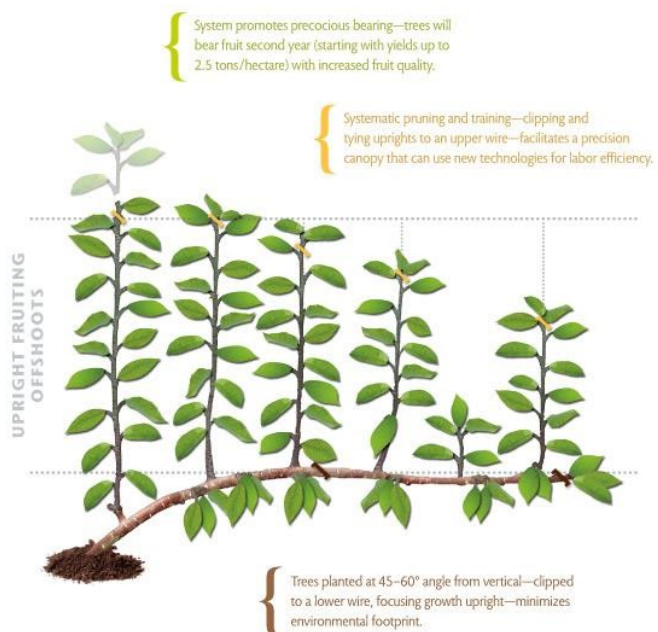
El nombre, el correo y la foto asociados a tu cuenta de Google se registrarán cuando subas archivos y envíes este formulario

Instrucciones generales

Para esta prueba se le proporcionará una descripción acerca de un árbol de cerezos en sistema ufo, el cual tendrá 5 minutos para replicarlo de la manera más fiel posible a mano, sin utilizar el plugin, luego, tendrá 5 minutos más para replicar el mismo árbol usando el plugin proporcionado.

Los árboles solicitados deben seguir la forma del sistema de entrenamiento de cerezos "UFO". Se presentan algunas fotos de referencia.

Referencia N°1



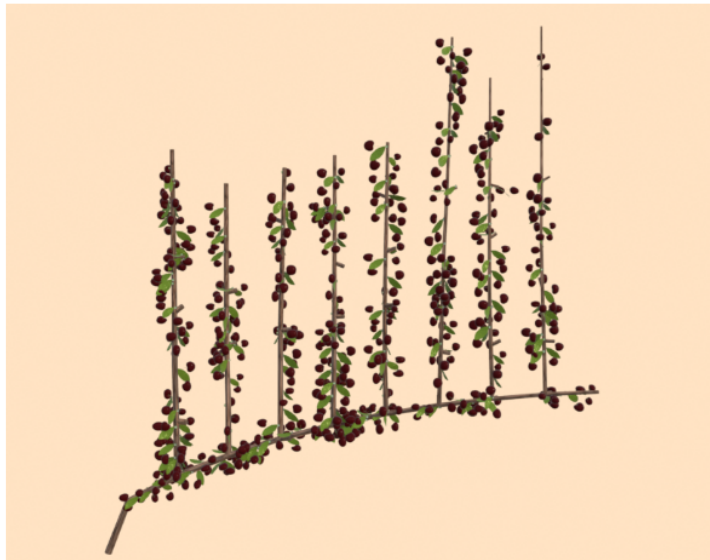
Referencia N°2



Prueba N°1

Para comenzar, inicie un proyecto nuevo en Blender, luego intente replicar el siguiente árbol a mano, según la referencia, luego suba un screenshot con el resultado.

Imagen de referencia



Subir resultado aquí en formato .jpg o .png *

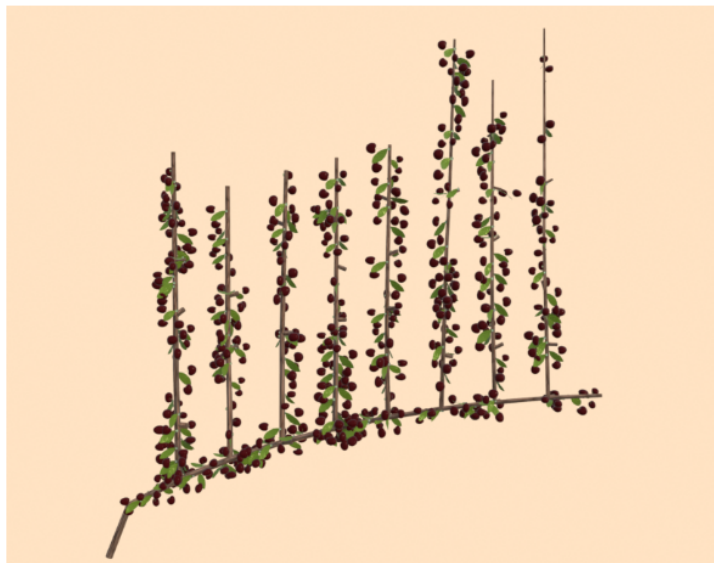
Sube 1 archivo compatible: image. Tamaño máximo: 10 MB.

[📁 Añadir archivo](#)

Prueba N°2

Ahora, para esta prueba, abra el archivo proporcionado dentro de blender, e intente replicar el mismo árbol usando el plugin, y luego suba un screenshot del resultado.

Para usar el plugin solo se deben modificar los valores que aparecen en el panel de modificadores a la derecha de la pantalla. En caso de que el panel no esté visible, reiniciar Blender sin guardar, o descargar el plugin nuevamente.

Imagen de referencia

Subir resultado aquí en formato .jpg o .png *

Sube 1 archivo compatible: image. Tamaño máximo: 10 MB.

[📁 Añadir archivo](#)

Encuesta de usabilidad

Ahora responda las siguientes preguntas en cuanto a su experiencia usando el plugin de modelado de cerezos para Blender.

Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia *

1 2 3 4 5

Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Encontré el sistema innecesariamente complejo *

1 2 3 4 5

Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Pensé que el sistema era fácil de usar *

1 2 3 4 5

Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para poder utilizar este sistema *

1 2 3 4 5
Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Encontré que las diversas funciones de este sistema estaban bien integradas *

1 2 3 4 5
Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Pensé que había demasiada inconsistencia en este sistema *

1 2 3 4 5
Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Me imagino que la mayoría de la gente aprendería a utilizar este sistema muy rápidamente *

1 2 3 4 5
Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Encontré el sistema muy complicado de usar *

1 2 3 4 5

Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Me sentí muy seguro usando el sistema *

1 2 3 4 5

Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo

Necesitaba aprender muchas cosas antes de empezar con este sistema *

1 2 3 4 5

Muy en desacuerdo ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Totalmente de acuerdo