

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Sistema inteligente de mapeo y visualización geoespacial de áreas verdes en  
ESPOL

TECH-447

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

Presentado por:

Christopher Iván Acosta Varela

Robespierre Triviño Román

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

Dedico esta tesis, en primer lugar, a la memoria de mi madre. Su amor, sus enseñanzas y su inspiración siguen acompañándome y han sido mi guía, especialmente en los momentos en que pensé en rendirme.

A Dios, por darme fortaleza y sostenerme en cada etapa de este camino.

A mi padre y a mi abuelo, por ser un apoyo incondicional y un pilar fundamental durante todo este proceso.

A mis tíos, por creer en mí; a mi abuela, por sus oraciones y su fe; y a mis hermanas, por ser una de mis mayores razones para seguir adelante.

De manera muy especial, dedico también este logro a mi novia, Brithany, por formar parte importante de este camino y de esta etapa de mi vida.

**Robespierre Triviño Román**

## **Dedicatoria**

---

A Dios y a mis padres Iván y Alexandra, quienes me dieron su apoyo incondicional en esta etapa y me acompañaron en todo momento. A mi tío Jaime quien formó parte fundamental de mi crianza. A la memoria de mi abuelita Edith quien considero que estaría orgullosa de verme graduado de Ingeniero, pero que no le fue posible llegar al final de mi carrera. Por último, a mis amigos que conocí en la ESPOL que también fueron importantes en esta etapa de mi vida.

**Christopher Iván Acosta Varela**

## Agradecimientos

---

Agradezco a Dios por la fortaleza, la salud y la claridad necesarias para culminar esta etapa.

Expreso mi gratitud a mi tutor, PhD. Miguel Realpe, por su guía, disposición y acompañamiento académico durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a la ESPOL y a sus docentes por la formación recibida a lo largo de mi carrera.

A mis amigos Joel y Ángel, gracias por influir de manera decisiva en mi elección de estudiar Computación y por motivarme a mantenerme firme en ese camino.

A mi compañero de tesis, Christopher, gracias por el trabajo en equipo, el compromiso y el apoyo compartido a lo largo de este proceso.

Finalmente, agradezco a mi familia y a todas las personas que estuvieron a mi lado en los momentos más difíciles; su apoyo, confianza y acompañamiento hicieron posible este logro.

**Robespierre Triviño Román**

## Agradecimientos

---

Doy gracias a Dios y a mis padres por todo el sacrificio que hicieron para que lograra esta meta de mi vida. Luego, agradezco a mi compañero por siempre esforzarse en participar en cada avance del proyecto a pesar de tener que viajar y cumplir con otras responsabilidades. Para finalizar, agradezco al PhD. Miguel Realpe por su apoyo constante y a la Ph. D. Lucía Marisol Villacrés por su guía y comentarios durante la elaboración del presente proyecto.

**Christopher Ivan Acosta Varela**

## Declaración Expresa

---

Nosotros **Robespierre Triviño Román y Christopher Iván Acosta Varela** acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, **17 de octubre del 2025.**

---

Christopher Iván Acosta  
Varela

---

Robespierre Triviño  
Román

## **Evaluadores**

---

**PhD. Lucia Marisol Villacrés Falconi**

Profesor de Materia

---

**PhD. Miguel Andrés Realpe Robalino**

Tutor de proyecto

## Resumen

La gestión sostenible del campus Gustavo Galindo Velasco de la ESPOL demanda información precisa sobre sus áreas verdes. En la actualidad, estas carecen de un inventario digital actualizado para su monitoreo. El proyecto presentado a continuación construye un sistema de mapeo y visualización geospacial enfocado en la automatización de la planificación territorial del campus universitario. Para lograr esto, se creó un sitio web que combine tanto tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como algoritmos de aprendizaje profundo. Se procesaron imágenes aéreas capturadas por drones utilizando la red neuronal U-Net para la segmentación semántica de usos del suelo y se validó el sistema mediante pruebas funcionales. Los resultados evidenciaron que el modelo alcanzó una precisión de segmentación del 85.91%. Asimismo, las pruebas funcionales demostraron que los analistas completaron sus tareas en menos de 5 minutos con una tasa de éxito superior al 90 %. De esta forma, el sistema integra eficazmente la inteligencia artificial y la geoinformática al proporcionar una herramienta robusta que apoye la toma de decisiones basada en evidencia geoespacial.

**Palabras Clave:** Segmentación Semántica, Aprendizaje Profundo, Gestión Ambiental, Redes Neuronales Convolucionales.

## **Abstract**

*The sustainable management of the Gustavo Galindo Velasco campus at ESPOL requires precise information regarding its green areas. Currently, these lack an up-to-date digital inventory for monitoring. This project develops an intelligent system for geospatial mapping and visualization to support territorial planning. To this end, an interactive web platform integrating Geographic Information Systems and deep learning was implemented. Drone images were processed using the U-Net network for semantic segmentation, and the system was validated through functional tests. The results showed that the model achieved an accuracy of 85.91%. Furthermore, functional tests demonstrated that users completed tasks in less than 5 minutes with a success rate exceeding 90%. Thus, the system effectively integrates artificial intelligence and geoinformatics, providing a robust tool to support evidence-based decision-making.*

**Keywords:** *Semantic Segmentation, Deep Learning, Environmental Management, Neural Networks.*

## ÍNDICE GENERAL

Resumen .....	VIII
Abstract .....	IX
Índice general.....	X
Abreviaturas.....	XIV
Simbología.....	XV
Índice de figuras .....	XVI
Índice de tablas.....	XVII
Capítulo 1 .....	1
1.1 Introducción .....	2
1.2 Descripción del Problema.....	4
1.3 Justificación del Problema .....	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general .....	6
1.4.2 Objetivos específicos .....	7
1.5 Marco teórico .....	7
1.5.1 Importancia Ecológica y Social de la Vegetación en Entornos Universitarios .....	7
1.5.2 Desafíos de la Gestión de Áreas Verdes .....	8
1.5.3 Tecnologías para el Mapeo y la Visualización Geoespacial .....	9
1.5.3.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección .....	9
1.5.3.2 Aprendizaje Profundo para la Segmentación Semántica .....	10
1.5.3.3 Tecnologías Web para la Plataforma Interactiva .....	10
Capítulo 2 .....	12
2. Metodología. ....	13
2.1 Análisis.....	13
2.1.1 Usuarios del sistema .....	13
2.2 Requerimientos.....	14

2.2.1 Funcionales .....	14
2.2.2 No Funcionales.....	16
2.2.3 Alcance de la solución .....	16
2.2.4 Beneficios de la solución.....	17
2.2.5 Riesgos de la solución.....	18
2.3 Diseño de la solución .....	19
2.3.1 Vista de Escenarios.....	19
2.3.1.1 Diagrama de Casos de Uso.....	19
2.3.2 Vista Lógica .....	20
2.3.2.1 Diagrama de Clases .....	20
2.3.2.2 Diagramas de Estados.....	21
2.3.3 Vista de Procesos.....	23
2.3.3.1 Diagrama de Actividades .....	23
2.3.3.2 Diagrama de Secuencia.....	24
2.3.3.3 Diagrama de Comunicación .....	26
2.3.4 Vista de Desarrollo .....	27
2.3.4.1 Diagrama de Componentes .....	27
2.3.5 Vista Física .....	28
2.3.5.1 Diagrama de Despliegue .....	28
2.4 Prototipo .....	29
2.4.1 Primera iteración .....	29
2.4.2 Pruebas de usuario con primera iteración.....	30
2.4.2.1 Prueba de usuario con el tutor (PhD. Miguel Realpe).....	31
2.4.2.2 Prueba de usuario con la clienta (PhD. María Fernanda Calderón).....	32
2.4.2.3 Prueba de usuario con invitado 1 (Estudiante Cassini Castillo).....	33
2.4.2.4 Prueba de usuario con invitado 2 (Estudiante Bryan Villalobos).....	34
2.4.2 Segunda iteración .....	35

Capítulo 3 .....	41
3. Resultados y análisis .....	42
3.1 Descripción del sistema.....	42
3.2 Prototipo funcional .....	43
3.3 Plan de evaluación .....	45
3.3.1 Propósito de la evaluación .....	45
3.3.2 Participantes evaluados .....	46
3.3.3 Aspectos evaluados.....	46
3.3.3.1 Aspectos técnicos evaluados .....	46
3.3.3.1.1 <i>Precisión de la segmentación semántica</i> .....	46
3.3.3.1.2 <i>Consistencia de las estadísticas del dashboard</i> .....	47
3.3.3.2 Aspectos humanos evaluados .....	47
3.3.3.2.1 <i>Tiempo de ejecución</i> .....	47
3.3.3.2.2 <i>Errores cometidos</i> .....	47
3.3.4 Metodología de evaluación.....	47
3.3.4.1 Diseño de pruebas de usuario .....	48
3.3.4.2 Instrumentos de recolección de datos.....	48
3.3.4.3 Plan de recolección de datos.....	48
3.3.4.4 Análisis cuantitativo .....	49
3.3.4.5 Análisis cualitativo .....	49
3.3.4.7 Presentación de resultados .....	49
3.4 Resultados de evaluación .....	50
3.4.1 Precisión de la segmentación semántica .....	50
3.4.2 Consistencia de las estadísticas del dashboard .....	51
3.4.3 Tiempo de ejecución .....	52
3.4.4 Errores cometidos .....	58
3.4.5 Comentarios de los usuarios .....	58

Capítulo 4 .....	60
4.1 Conclusiones y recomendaciones .....	61
4.1.1 Conclusiones .....	61
4.1.2 Recomendaciones .....	62
Bibliografía .....	63
Apéndices .....	67
Apéndice A. Historias de Usuario.....	68
Apéndice B. Protocolo de aplicación de pruebas de usuario .....	69
Apéndice C. Guía de observación para evaluadores .....	71
Apéndice D. Caso práctico para validar los indicadores del dashboard.....	78
Apéndice E. Instrumento para medir precisión de segmentación.....	80
Apéndice F. Formato de entrevista breve de salida .....	81

## Abreviaturas

API	Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)
CNN	Redes Neuronales Convolucionales (Convolutional Neural Networks)
CSV	Valores Separados por Comas (Comma-Separated Values)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SIG	Sistemas de Información Geográfica (Geographic Information Systems)
IA	Inteligencia Artificial
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NIR	Infrarrojo Cercano (Near Infrared)
OGC	Open Geospatial Consortium
PDF	Formato de Documento Portátil (Portable Document Format)
REST	Transferencia de Estado Representacional (Representational State Transfer)
SIGMA	Sistema Integrado de Gestión y Monitoreo de Áreas Verdes
UML	Lenguaje de Modelado Unificado (Unified Modeling Language)
VANT	Vehículos Aéreos no Tripulados
WFS	Servicio de Características Web (Web Feature Service)
WMS	Servicio de Mapas Web (Web Map Service)

## **Simbología**

%	Porcentaje
.keras	Extensión de archivo para guardar modelos entrenados, incluyendo arquitectura, pesos y configuración de entrenamiento en un solo archivo
.tiff	Formato de archivo de imagen con etiquetas (Tagged Image File Format)

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama de Casos de Uso .....	20
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Clases .....	21
<b>Figura 3.</b> Diagrama de Estados de Carga de imagen aérea .....	22
<b>Figura 4.</b> Diagrama de Estados de Visualización de mapa y Generación de informe .....	23
<b>Figura 5.</b> Diagrama de Actividades.....	24
<b>Figura 6.</b> Diagrama de Secuencia de Visualizar mapa segmentado.....	25
<b>Figura 7.</b> Diagrama de Comunicación de Visualizar mapa segmentado .....	26
<b>Figura 8.</b> Diagrama de Componentes .....	28
<b>Figura 9.</b> Diagrama de Despliegue.....	29
<b>Figura 10.</b> Visión general primera iteración .....	29
<b>Figura 11.</b> Vista de inicio primera iteración.....	30
<b>Figura 12.</b> Prueba de usuario con tutor .....	31
<b>Figura 13.</b> Paso de subida de imagen aérea (tutor) .....	31
<b>Figura 14.</b> Visualizador de mapas (tutor).....	32
<b>Figura 15.</b> Filtro temporal de mapas (tutor) .....	32
<b>Figura 16.</b> Prueba de usuario con clienta .....	32
<b>Figura 17.</b> Prueba de Usuario de Cassini Castillo.....	33
<b>Figura 18.</b> Modal de descarga (invitado 1) .....	34
<b>Figura 19.</b> Prueba de Usuario de Bryan Villalobos.....	34
<b>Figura 20.</b> Filtro de zonas (invitado 2).....	35
<b>Figura 21.</b> Visión general segunda iteración.....	36
<b>Figura 22.</b> Pantalla inicial segunda iteración .....	36
<b>Figura 23.</b> Imagen cargada.....	37
<b>Figura 24.</b> Mapa segmentado .....	37
<b>Figura 25.</b> Filtro temporal aplicado.....	38
<b>Figura 26.</b> Filtro clase aplicado .....	38
<b>Figura 27.</b> Descarga del informe parte 1 .....	39
<b>Figura 28.</b> Descarga del informe parte 2 .....	40
<b>Figura 29.</b> Selección de subregión del mapa.....	40
<b>Figura 30.</b> Ejemplo de efecto al pasar el ratón por encima de una de las zonas del mapa.....	40
<b>Figura 31.</b> Prototipo funcional parte 1 .....	44
<b>Figura 32.</b> Prototipo funcional parte 2 .....	44

<b>Figura 33.</b> Prototipo funcional parte 3 .....	45
<b>Figura 34.</b> Pérdida de entrenamiento y validación .....	50
<b>Figura 35.</b> Coeficiente de Sørensen-Dice en entrenamiento y validación .....	51
<b>Figura 36.</b> Consistencia de estadísticas del dashboard.....	51

### **Índice de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Tiempos para Cargar imagen aérea .....	52
<b>Tabla 2.</b> Tiempos para Consultar mapa segmentado.....	53
<b>Tabla 3.</b> Tiempos para Aplicar filtro temático (clases específicas) .....	54
<b>Tabla 4.</b> Tiempos para Aplicar filtro temporal.....	55
<b>Tabla 5.</b> Tiempos para Interpretar indicador en dashboard.....	56
<b>Tabla 6.</b> Tiempos para Descargar informe de análisis .....	57



# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

La importancia del manejo sostenible de los terrenos de las ciudades e instituciones educativas ha ido aumentando a nivel mundial. Este incremento ha ocurrido gracias al desarrollo de tecnologías geoespaciales, pero también por la necesidad de cuidar los recursos naturales ante la expansión urbana acelerada. En cantones como Guayaquil que tienen una presión urbana constante, tanto jardines y parques de las instituciones son indispensables para proteger el medio ambiente y mejorar la vida de los habitantes. Los estudios [1], [2] y [3] han comprobado que los árboles y plantas de las zonas urbanas colaboran en el control de la temperatura ambiental, la mejora de la calidad del aire, el mantenimiento de la flora y fauna y la salud pública. A pesar de esto, para organizarlos y cuidarlos bien, se requiere información exacta y al día que nos indique dónde está esa vegetación. De esta forma, se podrán tomar mejores decisiones que ayuden a evitar problemas a futuro que afecten a la población.

En esta situación, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), drones y algoritmos de aprendizaje profundo han modernizado el método en que se supervisa y controla la vegetación. Dichas tecnologías posibilitan la producción de mapas con coberturas vegetales segmentadas y la visualización en tiempo real del territorio. Como resultado, se facilita la incorporación de datos de múltiples periodos y la automatización de flujos manuales. Fuera del Ecuador, ciudades como Ámsterdam, İzmir y Medellín han adquirido sistemas inteligentes para identificar y cuidar sus áreas verdes. En cambio, en las instituciones educativas, esta tendencia representa una oportunidad para emplear alternativas tecnológicas en casos de la vida real y se consolide el enlace entre academia, sostenibilidad y gestión de los territorios.

La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) de Guayaquil, Ecuador, cuenta con un territorio de gran extensión que involucra zonas verdes repartidas en distintos sectores. De hecho, el campus Gustavo Galindo Velasco posee una superficie cercana a 6.5 millones de metros cuadrados. Se estima que alrededor del 80% de esta área estaría cubierta por vegetación

forestal, lo que lo convierte en uno de los pulmones verdes más importantes de la ciudad. Sin embargo, en la actualidad no posee de un inventario digital al día ni de un sistema que pueda monitorear y estudiar cómo se encuentran distribuidas estas áreas. Esta ausencia restringe la capacidad de la universidad de planificar intervenciones, coordinar obras civiles e incentivar acciones de sostenibilidad de sus territorios.

Desde un punto de vista educativo, llevar a cabo un sistema inteligente para el mapeo y visualización geoespacial de las áreas verdes del campus constituye una notable oportunidad de aprendizaje. Este proyecto combina herramientas como el análisis de imágenes y mapas digitales con el diseño de páginas web. De este modo, se une la ingeniería con el cuidado del ambiente y la tecnología en un solo trabajo.

La propuesta se enfoca en diseñar e implementar un sitio web interactivo que recopile imágenes aéreas generadas por drones, algoritmos de aprendizaje profundo y herramientas SIG, con el objetivo de facilitar el acceso a información detallada acerca de las áreas verdes del campus. El sistema busca fomentar la toma de decisiones basada en evidencia geoespacial que se realiza por parte de unidades académicas, administrativas y de sostenibilidad. Con el tiempo, se espera que esta herramienta sirva para proteger la naturaleza de la ESPOL, nos motive a cuidar más nuestro entorno y nos permita organizar mejor el campus.

El presente reporte se organiza en cuatro capítulos. El capítulo 1 expone el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos y el marco teórico que sustenta la propuesta. El capítulo 2 describe la metodología empleada para el desarrollo del sistema, incluyendo el diseño experimental, las herramientas utilizadas y los criterios de evaluación. El capítulo 3 presenta los resultados obtenidos y su análisis, tanto en términos técnicos como funcionales. Finalmente, el capítulo 4 expone las conclusiones generales y las recomendaciones para futuras implementaciones o investigaciones relacionadas.

## 1.2 Descripción del Problema

Cuidar los parques y bosques en la ciudad no es fácil, porque las instituciones deben encontrar un equilibrio entre construir más espacios urbanos y proteger el ambiente. Estos lugares son muy importantes: ayudan a regular la temperatura, mejoran el aire y ofrecen sitios de descanso y bienestar para la gente. Para planificarlos y mantenerlos de la forma más adecuada, es necesario contar con información clara y actualizada sobre dónde están y cómo son.

En este contexto, las herramientas digitales que permiten ver y analizar el territorio hacen posible observar y medir los espacios de manera rápida y a gran escala. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un ejemplo de dichas herramientas. Gracias a ellas se pueden crear mapas, estudiar la vegetación y comparar datos de distintos momentos para apoyar decisiones importantes. Algunos estudios como [4] y [5] señalan que usar estas tecnologías en la gestión ambiental de las ciudades ayuda a trabajar con más eficiencia, gastar menos y mostrar de forma clara los recursos disponibles.

La ESPOL, universidad pública enfocada en la innovación tecnológica, tiene un campus muy extenso con varias zonas verdes. En el campus Gustavo Galindo Velasco, la superficie total es de 6.5 millones de metros cuadrados, y cerca del 80 % está cubierta por bosque, lo que lo convierte en uno de los principales pulmones verdes de Guayaquil [6]. Sin embargo, no cuenta con un inventario digital al día ni con una plataforma para ver y analizar cómo están distribuidas estas áreas. Esta falta de información limita la capacidad de la institución para planificar proyectos, medir el impacto de nuevas construcciones y promover estrategias de sostenibilidad.

El problema se entiende como la necesidad de crear un sistema que permita registrar, procesar y mostrar información sobre la ubicación y extensión de las áreas verdes del campus. Esto incluye recibir imágenes de alta calidad tomadas con drones, ejecutar programas basados en técnicas de visión por computador que identifiquen y clasifiquen automáticamente las zonas de

vegetación, y contar con una plataforma digital que muestre los datos en mapas fáciles de entender para los usuarios finales.

La importancia del problema está en que analizar con detalle los datos sobre el territorio contribuye a gestionar mejor los espacios, usar los recursos de forma más eficiente y responder más rápido a las necesidades de infraestructura y sostenibilidad. Además, el avance de tecnologías como el aprendizaje profundo y la observación con satélites o drones ha hecho que las soluciones de mapeo inteligente sean más accesibles, lo que permite aplicarlas también en universidades [7].

### **1.3 Justificación del Problema**

Este proyecto busca solucionar la falta de un sistema digital para mapear y mostrar las áreas verdes del campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). No tenerlo limita en gran medida la planificación del territorio, la gestión de la infraestructura y la toma de decisiones basadas en datos dentro de la universidad. Según [8], la ausencia de datos actualizados sobre la ubicación de estas zonas verdes impide conocer con precisión cómo están distribuidas, lo que dificulta organizar trabajos físicos, evaluar el impacto de nuevas construcciones y promover estrategias sostenibles. Esta necesidad se vuelve aún más crítica considerando que el campus Gustavo Galindo Velasco posee una superficie cercana a 6.5 millones de metros cuadrados, y alrededor del 80 % de ellos serían cobertura vegetal [6].

Resolver este problema es importante porque permite transformar un vacío de información en una herramienta tecnológica que optimiza recursos, mejora la eficiencia operativa y fortalece la capacidad institucional para planificar de forma estratégica. Además, crear mapas temáticos y plataformas interactivas basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) ayuda a que más personas puedan acceder a datos sobre el territorio. Esto facilita que distintas áreas académicas y administrativas los usen de manera práctica [5].

Aunque existen soluciones comerciales y gubernamentales orientadas al mapeo territorial, muchas de ellas no se ajustan al contexto específico de ESPOL. Por ejemplo, plataformas como Google Earth Engine ofrecen imágenes satelitales con resoluciones insuficientes para identificar detalles en zonas reducidas o con alta densidad de infraestructura. Así mismo, los sistemas de monitoreo urbano diseñados para ciudades operan a escalas macro y no contemplan la heterogeneidad funcional de un campus universitario. Estas herramientas tampoco permiten entrenar modelos propios de segmentación semántica, lo que limita su aplicabilidad en proyectos académicos con objetivos específicos [7].

En este sentido, desarrollar una solución propia que integre imágenes aéreas capturadas por drones, algoritmos de aprendizaje profundo y una plataforma SIG personalizada garantiza mayor precisión, flexibilidad y control sobre los datos generados. Esta propuesta no solo responde a una necesidad técnica, sino que también promueve el uso de tecnologías emergentes en entornos reales de aprendizaje.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Desarrollar un sistema inteligente de mapeo y visualización geoespacial de áreas verdes del campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), mediante el uso de imágenes aéreas, algoritmos de segmentación semántica y una plataforma interactiva basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de generar información precisa y actualizada que apoye la planificación territorial y la gestión institucional.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Procesar las imágenes aéreas mediante algoritmos de segmentación semántica basados en aprendizaje profundo, con el fin de identificar y clasificar zonas verdes del campus y

tipos de uso de suelo, alcanzando un nivel de precisión igual o superior al 85 % en comparación con datos de referencia validados en campo.

- Diseñar e implementar una plataforma web interactiva que integre los datos procesados en un entorno SIG, permitiendo la visualización y consulta de la información geoespacial por parte de usuarios institucionales.
- Generar un reporte técnico de pruebas funcionales y de usabilidad de la plataforma web desarrollada, con el fin de evaluar su desempeño, accesibilidad y facilidad de uso, asegurando que los usuarios institucionales puedan interactuar correctamente con los datos geoespaciales.

## **1.5 Marco teórico**

### **1.5.1 Importancia Ecológica y Social de la Vegetación en Entornos Universitarios**

La infraestructura verde en un campus universitario es un componente activo y multifuncional que provee servicios ecosistémicos y sociales indispensables para la calidad de vida de la comunidad. Más allá de lo estético, las áreas verdes son relevantes para la sostenibilidad y el crecimiento inteligente de cualquier institución [1]. En ciudades calurosas como Guayaquil, estos espacios funcionan como un auténtico soporte vital porque ayudan a refrescar el ambiente, combatiendo ese calor sofocante del asfalto gracias a la sombra y la humedad que generan. Además, actúan como filtros naturales que limpian el aire al atrapar contaminantes y absorber dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [2], sirviendo al mismo tiempo como refugios llenos de vida para plantas y animales, en especial para los polinizadores que mantienen el equilibrio de nuestro entorno [3].

Además de sus funciones ecológicas, la vegetación tiene un impacto directo en cómo nos sentimos los seres humanos. Está comprobado que estar en contacto con la naturaleza tiene un "efecto restaurador" que nos ayuda a bajar los niveles de estrés, ansiedad y cansancio mental [9]. Para quienes forman parte de una universidad y viven bajo mucha presión académica, estas

zonas verdes son el lugar ideal para desconectarse y recargar energías [1]. También nos motivan a movernos más, ya sea caminando o corriendo en un ambiente más fresco y limpio [2]. Finalmente, estos espacios sirven como puntos de encuentro que nos ayudan a socializar, fortaleciendo la comunidad y haciendo que el entorno se sienta mucho más seguro.

### **1.5.2 Desafíos de la Gestión de Áreas Verdes**

Aunque se conozcan los beneficios de las áreas verdes, gestionarlas del mejor modo no es tan fácil cuando falta información precisa y actualizada. El problema es que, sin un inventario digital que nos diga exactamente dónde está cada planta y árbol, la administración termina trabajando "sobre la marcha" y de forma poco eficiente. Esto hace que se vuelva un reto el planificar mejoras, aprovechar bien el presupuesto o saber cómo afectarán las nuevas construcciones al entorno, lo que frena la posibilidad de tener una planificación que sea realmente organizada y sostenible [10].

Para dejar atrás estos retos, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha vuelto una tendencia en todo el mundo. Hoy en día, se combina esta tecnología con sensores remotos e inteligencia artificial (IA) para mapear y analizar la vegetación de forma automática, logrando una precisión mayor al 90% y ayudando a que los parques y jardines se distribuyan de forma más justa [11]. Por ejemplo, en ciudades como İzmir, en Turquía, se usaron estas herramientas y aprendizaje automático para decidir exactamente dónde es mejor ubicar las zonas verdes, dándoles datos clave a los planificadores [12]. Algo parecido ocurrió en Indonesia, donde aprovecharon la plataforma Google Earth Engine para vigilar cómo cambian los espacios verdes usando imágenes de satélite, lo que demuestra lo útil que es esta tecnología para entender el crecimiento de las ciudades [13].

En América Latina, cada vez se usan más drones (o VANT) para vigilar el medio ambiente, aunque todavía existen trabas por las leyes y la falta de organización en las

instituciones. Países como Brasil y México han integrado con éxito los drones en sectores como la agricultura, demostrando su potencial para acelerar los esfuerzos de desarrollo sostenible [14].

En Ecuador, existen iniciativas de mapeo a gran escala que sientan un precedente. El proyecto MapBiomass Ecuador utiliza la plataforma Google Earth Engine y algoritmos de aprendizaje automático para generar mapas anuales de cobertura y uso del suelo para todo el país a partir de imágenes satelitales [15]. Asimismo, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) genera cartografía oficial para la planificación del sector agrícola [16]. Sin embargo, estas iniciativas operan con imágenes de resolución media, inadecuadas para el mapeo detallado a escala de campus. El presente proyecto complementa estos esfuerzos al proponer una metodología de microescala, abordando la necesidad de información georreferenciada actualizada a nivel local, un desafío identificado en municipios ecuatorianos [10].

### **1.5.3 Tecnologías para el Mapeo y la Visualización Geoespacial**

La solución propuesta se fundamenta en la sinergia de tres pilares tecnológicos: los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el aprendizaje profundo para el análisis de imágenes y las tecnologías web para la visualización interactiva.

#### **1.5.3.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección**

Los SIG son sistemas diseñados para capturar, almacenar, analizar y presentar datos geográficamente referenciados [17]. Operan con datos vectoriales (puntos, líneas y polígonos) y ráster (imágenes como matrices de píxeles), organizados en capas temáticas que permiten un análisis espacial complejo [18]. Por otro lado, la teledetección es básicamente la técnica de estudiar la superficie de la Tierra sin tener que tocarla, usando principalmente fotos desde aviones o satélites [19]. Lo interesante es que las plantas sanas tienen una "firma" de luz única: absorben la luz roja, pero reflejan con mucha fuerza el infrarrojo cercano (NIR). Gracias a esta característica, se puede calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), una herramienta fundamental para medir automáticamente qué tanta vegetación hay y qué tan

saludable está [18]. Al combinar estos datos de satélite con un SIG, se crea un sistema de alta potencia para vigilar y cuidar el medio ambiente [19].

### **1.5.3.2 Aprendizaje Profundo para la Segmentación Semántica**

Para clasificar automáticamente las áreas verdes en las fotos, se usa la "segmentación semántica". Es una técnica de inteligencia artificial (en particular de deep learning) que analiza cada punto o píxel de la imagen y le pone una etiqueta, como "árbol", "edificio" o "calle" [20]. Este método es superior a los sistemas antiguos, que dependían de que una persona lo hiciera a mano y eran muy subjetivos [21]. Hoy en día, lo más avanzado para esto son las redes neuronales convolucionales (CNN) llamadas U-Net y DeepLabV3+ [22]. Ambas funcionan con un sistema de "codificador y decodificador": la primera parte identifica qué hay en la imagen y la segunda dibuja un mapa detallado de los objetos [23]. La U-Net es famosa por ser muy precisa marcando los bordes, mientras que la DeepLabV3+ es excelente entendiendo el contexto de la imagen en diferentes tamaños [24].

### **1.5.3.3 Tecnologías Web para la Plataforma Interactiva**

Para hacer que los resultados sean visibles, se implementará una plataforma web SIG que funciona con un modelo de cliente-servidor. El corazón de este sistema será un componente que sea similar a GeoServer, un servidor de mapas de código abierto que es muy confiable y está diseñado para conectarse fácilmente con otras herramientas [25]. GeoServer publica datos geoespaciales (tanto vectoriales como ráster) a través de servicios web estandarizados por el Open Geospatial Consortium (OGC), como Web Map Service (WMS) y Web Feature Service (WFS). Esto permite que diferentes aplicaciones cliente consuman los datos de manera estandarizada. Los datos procesados se almacenarán en una base de datos con capacidades espaciales como PostGIS, una extensión de PostgreSQL [26].

La interfaz de usuario, que se ejecuta en el navegador web, se desarrollará utilizando librerías de JavaScript especializadas en mapeo. Las dos opciones de código abierto más

destacadas son Leaflet y OpenLayers. Leaflet es conocido por su simplicidad y ligereza, ideal para mapas interactivos rápidos y sencillos [27]. OpenLayers es una librería más completa y potente, considerada un cliente SIG completo en el navegador, con soporte nativo para múltiples proyecciones y formatos OGC, adecuada para aplicaciones que requieren funcionalidades avanzadas [28]. La elección entre ambas dependerá de los requisitos funcionales específicos de la plataforma.

## **Capítulo 2**

## 2. Metodología.

### 2.1 Análisis

El presente capítulo describe el diseño y especificación de requerimientos para el desarrollo del sistema web denominado **SIGMA** (*Sistema Integrado de Gestión y Monitoreo de Áreas Verdes*), orientado a apoyar el análisis geoespacial dentro del campus de ESPOL. La solución busca automatizar el procesamiento de imágenes aéreas mediante segmentación semántica, facilitar la visualización interactiva de mapas clasificados y permitir la generación de informes técnicos exportables. Estas funcionalidades están dirigidas principalmente al rol de *Analista Geoespacial*, quien será el usuario principal del sistema.

Como parte del proceso de levantamiento de requerimientos, se mantuvo una reunión con la clienta institucional, en la cual se definieron las **historias de usuario** que guían el diseño funcional del sistema. Estas historias recogen las necesidades operativas del analista en relación con la carga de imágenes, la visualización de mapas segmentados, la aplicación de filtros por clase y periodo, y la generación de informes técnicos. Cada historia incluye escenarios específicos con criterios de aceptación que permiten validar el comportamiento esperado del sistema ante distintas condiciones de uso.

La tabla completa de historias de usuario se encuentra documentada en el **Apéndice A** del presente reporte. A partir de este análisis inicial, se derivan los requerimientos funcionales y no funcionales que se presentan en las siguientes secciones, los cuales servirán como base para el diseño, implementación y evaluación del sistema SIGMA.

#### 2.1.1 Usuarios del sistema

El sistema web **SIGMA** está diseñado para ser utilizado principalmente por el rol de *Analista Geoespacial*, quien desempeña funciones técnicas relacionadas con el procesamiento, visualización y análisis de datos espaciales. Este usuario forma parte de unidades académicas o administrativas encargadas de la gestión ambiental y territorial dentro del campus de ESPOL, y

requiere herramientas digitales que le permitan interpretar imágenes aéreas, generar mapas temáticos y documentar hallazgos de manera estructurada.

El *Analista Geoespacial* interactúa con el sistema a través de una interfaz web que le permite subir imágenes previamente capturadas, aplicar segmentación semántica para clasificar el uso del suelo, visualizar mapas con filtros por clase y periodo, y generar informes técnicos en formatos exportables. Su perfil combina conocimientos en geoinformática, análisis ambiental y manejo de sistemas de información geográfica (SIG). Este rol fue definido en conjunto con la clienta institucional durante la fase de levantamiento de requerimientos, y constituye el eje central del diseño funcional de **SIGMA**.

## 2.2 Requerimientos

### 2.2.1 Funcionales

- *Subida de imágenes aéreas*
  - **Descripción:** El analista geoespacial puede subir imágenes aéreas previamente capturadas en formato .tiff y con resolución adecuada para su procesamiento.
  - **Condición de aceptación:** Si la imagen tiene el formato y la resolución correcta, esta se debe enviar al módulo de segmentación. Si no cumple con estos requisitos, el sistema debe lanzar un mensaje de error avisando que el formato no está permitido.
- *Procesamiento de imágenes mediante segmentación semántica*
  - **Descripción:** El sistema toma las imágenes aprobadas y las procesa usando un modelo de inteligencia artificial ya entrenado. Este modelo reconocerá y clasificará cada zona según lo que hay en el suelo, separando automáticamente qué es área verde, qué es un edificio, qué son calles o parqueaderos, entre otros.
  - **Condición de aceptación:** Para que el proceso se considere exitoso, el sistema debe terminar su trabajo sin fallos y crear un mapa ya segmentado que esté listo para que pueda ser consultado después.

- *Visualización de mapas segmentados*
  - **Descripción:** El analista debe poder ver con facilidad los mapas segmentados que se crearon a partir de las imágenes, incluyendo capas interactivas que le permitan explorar toda la información de forma dinámica.
  - **Condición de aceptación:** Si ya existen mapas listos, el sistema debe mostrarlos de inmediato en el panel de visualización. Pero si todavía no hay ninguno, debe aparecer un mensaje avisando que no hay datos disponibles por el momento.
- *Filtrado por clases segmentadas*
  - **Descripción:** El analista tiene la opción de usar filtros para elegir qué quiere ver en los mapas segmentados, como por ejemplo mostrar solo las áreas verdes, los edificios, las calles o los parqueaderos.
  - **Condición de aceptación:** Para que el filtro funcione bien, al elegir una clase específica, el sistema debe ocultar todas las demás y mostrar solo la seleccionada. Si no se aplica ningún filtro, se deben mostrar todas las clases a la vez por defecto.
- *Filtrado temporal de mapas*
  - **Descripción:** El analista puede filtrar los mapas disponibles por periodo de tiempo (mes y año), para facilitar el análisis comparativo entre distintos momentos.
  - **Condición de aceptación:** Al aplicar un filtro temporal, el sistema debe mostrar únicamente los mapas correspondientes al periodo seleccionado. Si no se aplica ningún filtro, deben mostrarse todos los mapas disponibles.
- *Generación y descarga de informes técnicos*
  - **Descripción:** El analista debe ser capaz de generar y descargar informes técnicos en formato CSV y/o PDF, con los resultados de la segmentación semántica.
  - **Condición de aceptación:** Si la segmentación se completó correctamente, el sistema debe permitir elegir el formato y descargar el informe. Si hay inconsistencias o datos

faltantes, debe mostrarse un mensaje de error indicando que no se puede generar el informe.

### 2.2.2 No Funcionales

- *Usabilidad*
  - **Descripción:** La interfaz web debe ser intuitiva, accesible y fácil de usar para analistas geoespaciales sin necesidad de capacitación técnica avanzada. Los paneles de visualización, filtros y opciones de descarga deben estar claramente identificados y organizados.
- *Rendimiento*
  - **Descripción:** El sistema debe procesar imágenes aéreas y generar mapas segmentados en un tiempo máximo de 5 minutos por imagen, bajo condiciones normales de carga. Cuando se haga una consulta para ver o filtrar los mapas, el sistema debe responder y mostrar los resultados en menos de 10 segundos.
- *Compatibilidad*
  - **Descripción:** El sistema debe funcionar correctamente en los navegadores más utilizados, como Chrome, Firefox y Edge, adaptándose además a cualquier tamaño de pantalla mediante un diseño flexible. En cuanto a su estructura interna, el backend debe conectarse sin problemas con una base de datos PostgreSQL y permitir que se carguen modelos de inteligencia artificial desarrollados en Python.
- *Seguridad*
  - **Descripción:** El sistema tiene que verificar que las imágenes tengan el formato correcto antes de empezar a trabajar con ellas. Además, debe proteger toda la información guardada en la base de datos PostgreSQL utilizando cifrado en reposo para que los datos estén siempre seguros.

### 2.2.3 Alcance de la solución

La meta principal de esta solución es que se facilite en gran medida el análisis de los espacios verdes del campus de la ESPOL usando una plataforma web interactiva. Con esta herramienta, los analistas podrán subir sus propias fotos aéreas para que el sistema las procese automáticamente con inteligencia artificial. Al final, se podrán ver los resultados en mapas detallados que muestran exactamente cómo se distribuye el suelo en la universidad. La segmentación se realizará utilizando modelos de inteligencia artificial entrenados en entornos especializados, lo que garantiza precisión en la identificación de clases como césped, vegetación, agua, área pavimentada, entre otras.

Después de procesar las fotos, estas se podrán ver en un panel donde cualquier usuario tendrá la opción de usar filtros por tipo de suelo (clase) o por fecha. Esto les será de utilidad para comparar cómo cambian los territorios con el tiempo, como por ejemplo ver cómo han evolucionado las áreas verdes de un mes a otro. Además, la plataforma permitirá descargar informes técnicos en formatos CSV y PDF con todos los resultados del análisis, lo que facilita de forma considerable el papeleo institucional y ayuda a los directivos a tomar decisiones basadas en datos reales.

El alcance funcional de la solución se limita a las operaciones realizadas por el analista geoespacial dentro de la interfaz web, sin incluir el desarrollo del sistema de captura de imágenes ni la infraestructura física de vuelo. Asimismo, el sistema no contempla la edición manual de mapas ni la modificación directa de los modelos de segmentación, aunque sí permite la carga de modelos previamente entrenados. La solución está diseñada para operar en un entorno web moderno, con un frontend desarrollado en Angular, un backend en FastAPI (Python), una base de datos PostgreSQL para almacenamiento geoespacial, y un entorno de entrenamiento IA basado en Jupyter Notebook.

En otras palabras, el sistema busca automatizar y simplificar el flujo de trabajo del analista geoespacial, desde la carga de imágenes hasta la generación de informes, promoviendo una gestión más eficiente y basada en evidencia del entorno natural del campus universitario.

#### **2.2.4 Beneficios de la solución**

- **Automatización del análisis geoespacial**

La plataforma permite procesar imágenes aéreas mediante segmentación semántica sin intervención manual, reduciendo significativamente el tiempo y esfuerzo requerido para clasificar zonas según su uso del suelo.

- **Visualización interactiva y filtrada**

Los mapas segmentados pueden ser explorados mediante filtros por clase y por periodo de tiempo, lo que facilita el análisis detallado de áreas verdes y su evolución temporal en el campus.

- **Generación de informes técnicos exportables**

El sistema ofrece la posibilidad de generar informes en formato CSV y PDF, lo que permite documentar hallazgos, respaldar decisiones administrativas y compartir resultados con otras unidades institucionales.

- **Accesibilidad desde cualquier navegador moderno**

Al estar desarrollado como una aplicación web con tecnologías modernas (Angular, FastAPI), la solución puede ser utilizada desde cualquier dispositivo con conexión a internet, sin necesidad de instalaciones locales.

#### **2.2.5 Riesgos de la solución**

- **Dependencia del formato de imagen**

El sistema requiere que las imágenes aéreas estén en formato .tiff y cumplan con una resolución mínima. Si los datos capturados no cumplen con estas especificaciones, el

procesamiento no podrá realizarse, lo que limita la flexibilidad en la adquisición de imágenes.

- **Limitaciones del modelo de segmentación**

El modelo de segmentación semántica entrenado puede presentar errores si se enfrenta a imágenes con condiciones atmosféricas adversas, sombras intensas o variaciones estacionales. Esto podría afectar la precisión de los mapas generados y, por ende, la calidad de los informes técnicos.

- **Interrupciones en la conectividad web**

Al tratarse de una solución basada en navegador, cualquier interrupción en la conexión a internet puede impedir el acceso a la plataforma, la visualización de mapas o la descarga de informes, especialmente en zonas con infraestructura limitada.

- **Riesgos de seguridad en el manejo de datos geospaciales**

Si no se implementan correctamente los mecanismos de autenticación y cifrado, existe el riesgo de exposición de datos sensibles relacionados con el campus, como mapas detallados o informes técnicos. Esto podría comprometer la privacidad institucional o facilitar usos no autorizados de la información.

## **2.3 Diseño de la solución**

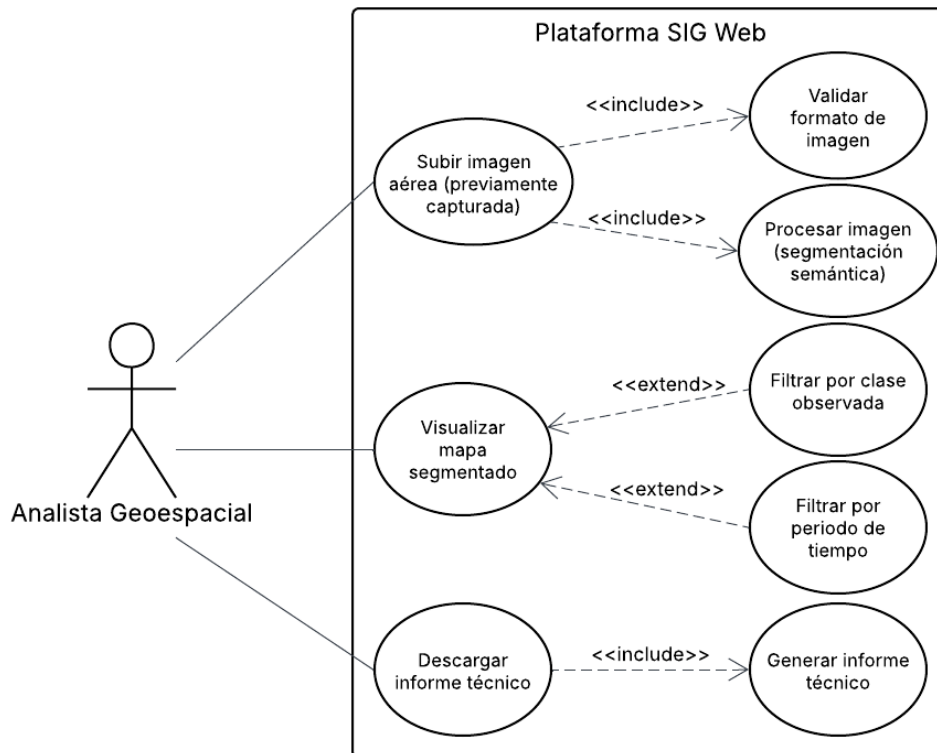
A continuación, se presentan los diagramas UML que permiten diseñar el sistema propuesto, con el objetivo de representar su arquitectura y funcionamiento desde múltiples perspectivas complementarias. Para estructurar esta representación se ha adoptado el modelo de vistas 4+1 de Kruchten [29], el cual organiza la documentación del sistema en cinco enfoques: escenarios, lógico, de procesos, de desarrollo y físico.

## 2.3.1 Vista de Escenarios

### 2.3.1.1 Diagrama de Casos de Uso

El diagrama presentado en la Figura 1, ilustra los principales casos de uso del sistema para el rol de Analista Geoespacial. Se identifican cinco funcionalidades clave: subir imágenes aéreas, procesarlas mediante segmentación semántica, visualizar mapas segmentados, aplicar filtros por clase y por periodo de tiempo, y descargar informes técnicos. Las relaciones entre los casos de uso están modeladas mediante los estereotipos `<<include>>` y `<<extend>>`, lo que permite distinguir entre funcionalidades obligatorias y opcionales dentro del flujo de interacción.

En particular, el caso de uso “Subir imagen aérea” incluye la validación del formato de imagen, mientras que “Procesar imagen” incorpora los filtros por clase observada y por periodo de tiempo como parte del procesamiento. Por otro lado, “Visualizar mapa segmentado” extiende dichos filtros como opciones adicionales que enriquecen la experiencia del usuario. Finalmente, la descarga del informe técnico incluye la generación de este como paso previo. De esta forma, es posible observar cómo se articula la funcionalidad del sistema alrededor de las necesidades del analista geoespacial.



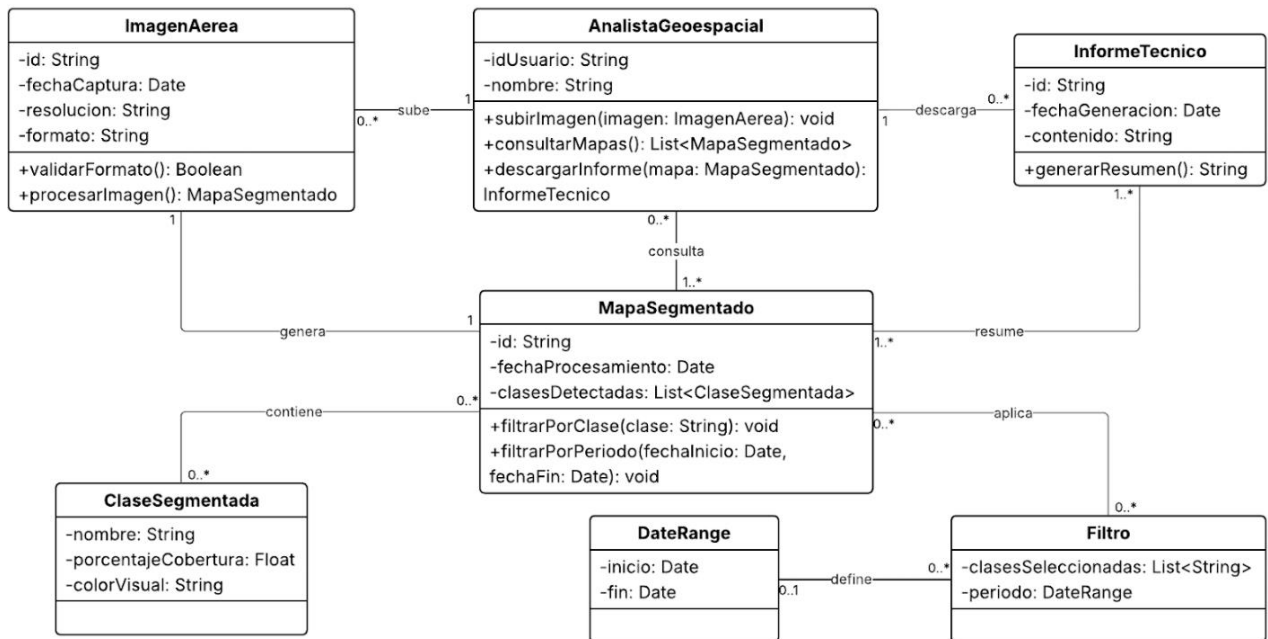
**Figura 1.** Diagrama de Casos de Uso

## 2.3.2 Vista Lógica

### 2.3.2.1 Diagrama de Clases

El diagrama de la Figura 2 muestra cómo están organizadas las clases del sistema para este proyecto. En él se detallan las entidades que usa el analista geoespacial, desde que se suben y revisan las fotos aéreas hasta que se crean los mapas segmentados, se aplican los filtros por tipo de suelo o fecha y se generan los informes técnicos. Cada clase tiene sus propios atributos y métodos, lo que deja claro qué tarea le corresponde a cada parte del software.

El sistema se organiza a partir de las siguientes clases destacadas: *ImagenAerea* se encarga de guardar los datos de las fotos y de los procesos para validarlas y segmentarlas; *MapaSegmentado* almacena las categorías detectadas y permite filtrarlas; y *AnalistaGeoespacial* es el usuario principal, con funciones para subir archivos, ver mapas y bajar reportes. También se incluyen clases de apoyo como *ClaseSegmentada*, *DateRange* y *Filtro*, que sirven para ordenar la información y aplicar los criterios de búsqueda de manera estructurada.

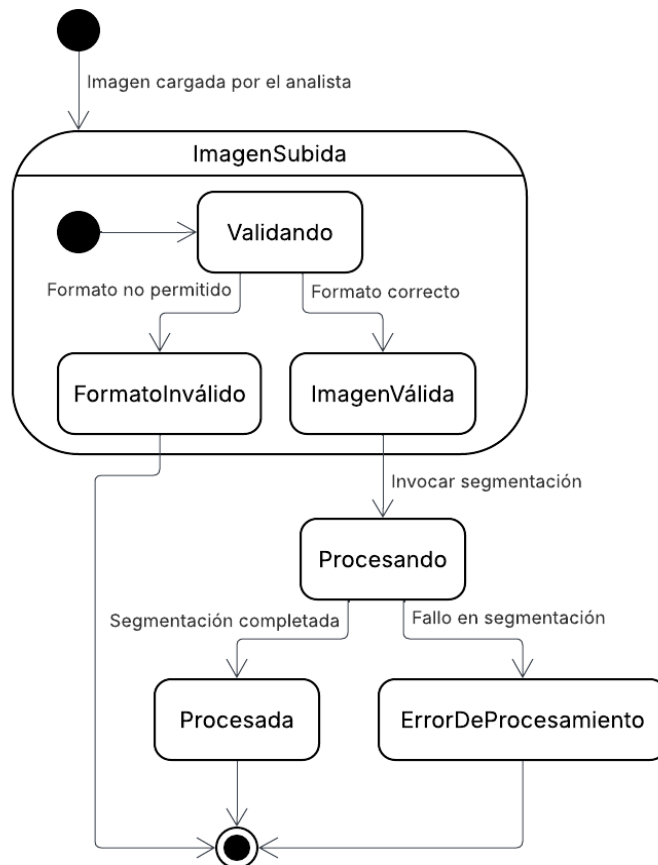


**Figura 2.** Diagrama de Clases

### 2.3.2.2 Diagramas de Estados

El esquema de la Figura 3 detalla cómo cambia el estado del proceso de *Carga de imagen aérea* dentro del sistema de mapeo geoespacial. El ciclo inicia cuando el analista geoespacial sube una imagen al sistema, lo que activa el estado *ImagenSubida*. A partir de allí, el sistema entra en una fase de validación donde se verifica el formato del archivo. Si el formato no es permitido (por ejemplo, distinto de .tiff), el flujo transita al estado *FormatoInválido*, generando un mensaje de error. En cambio, si la imagen cumple con los requisitos, se considera *ImagenVálida* y se procede con la segmentación semántica.

Una vez que la imagen es válida, el sistema invoca el modelo de segmentación, entrando en el estado *Procesando*. Este estado puede derivar en dos resultados: si la segmentación se completa exitosamente, se alcanza el estado *Procesada*, indicando que el mapa segmentado está listo para su visualización. Si ocurre un error durante el procesamiento, el flujo se desvía al estado *ErrorDeProcesamiento*, lo que implica que la imagen no pudo ser segmentada correctamente. De esta forma, se observan los puntos críticos del proceso, incluyendo validaciones, transiciones condicionales y manejo de errores.

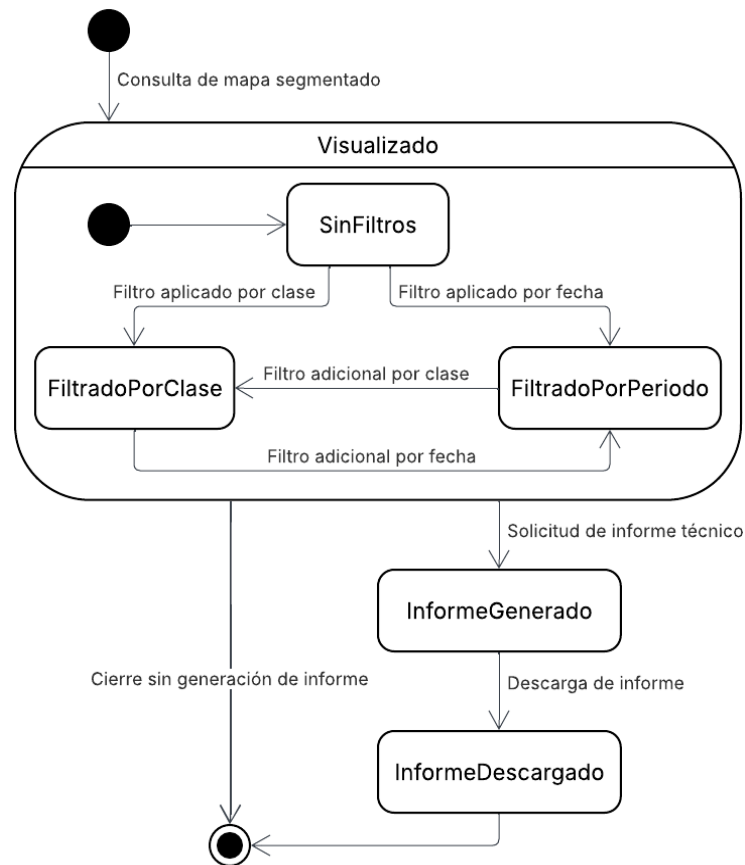


**Figura 3.** Diagrama de Estados de Carga de imagen aérea

El diagrama presentado en la Figura 4, modela el flujo de estados asociado a los procesos de *Visualización de mapa segmentado* y *Generación de informe técnico* dentro del sistema web propuesto. El ciclo inicia con la consulta del mapa segmentado por parte del analista geoespacial, lo que activa el estado *Visualizado*. Desde allí, el sistema puede permanecer en un estado sin filtros (*SinFiltros*) o transitar hacia estados filtrados por clase (*FiltradoPorClase*) o por periodo de tiempo (*FiltradoPorPeriodo*, según el criterio aplicado por el usuario). Cada uno de estos estados permite aplicar filtros adicionales, lo que refleja la flexibilidad del sistema para realizar análisis más específicos.

Una vez que el mapa ha sido visualizado, el analista puede solicitar la generación de un informe técnico, lo que activa el estado *InformeGenerado*. Si el informe se genera correctamente, el flujo continúa hacia *InformeDescargado*, indicando que el archivo ha sido entregado al usuario. En caso de que el analista cierre el proceso sin generar el informe, se alcanza el estado *Cierre sin generación de informe*. De esta forma, se muestra cómo se

encadenan las acciones de visualización y documentación técnica, incluyendo las decisiones intermedias que afectan el comportamiento del sistema.



**Figura 4.** Diagrama de Estados de Visualización de mapa y Generación de informe

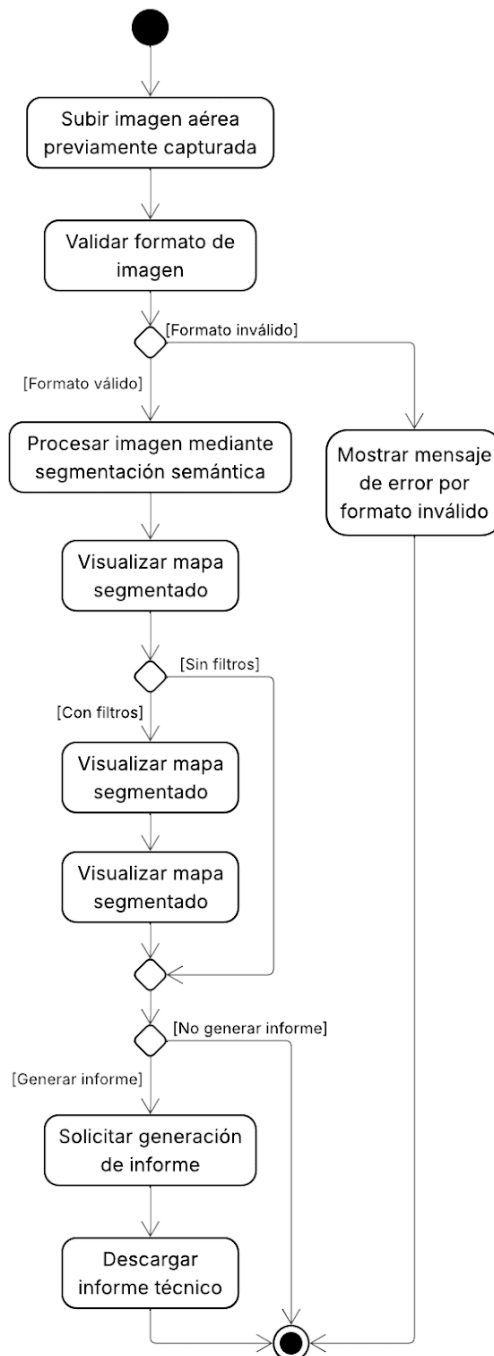
### 2.3.3 Vista de Procesos

#### 2.3.3.1 Diagrama de Actividades

El diagrama presentado en la Figura 5, modela el flujo de actividades del sistema del proceso completo de *Carga, procesamiento y generación de informe técnico* a partir de imágenes aéreas. El flujo inicia con la acción del analista geoespacial de subir una imagen previamente capturada. A continuación, el sistema valida el formato del archivo: si es inválido, se muestra un mensaje de error; si es válido, se procede al procesamiento mediante segmentación semántica.

Una vez segmentada la imagen, el sistema permite visualizar el mapa resultante, ya sea sin filtros o con filtros aplicados por clase y/o por fecha. Desde este punto, el analista puede optar por no generar informe y cerrar el proceso, o bien solicitar la generación del informe técnico. Si se elige esta última opción, el sistema produce el archivo correspondiente y lo pone a disposición para su descarga. De esta forma, se observa todo el flujo operativo del sistema,

incluyendo decisiones condicionales, bifurcaciones y puntos de finalización, lo que permite validar la lógica funcional del sistema.



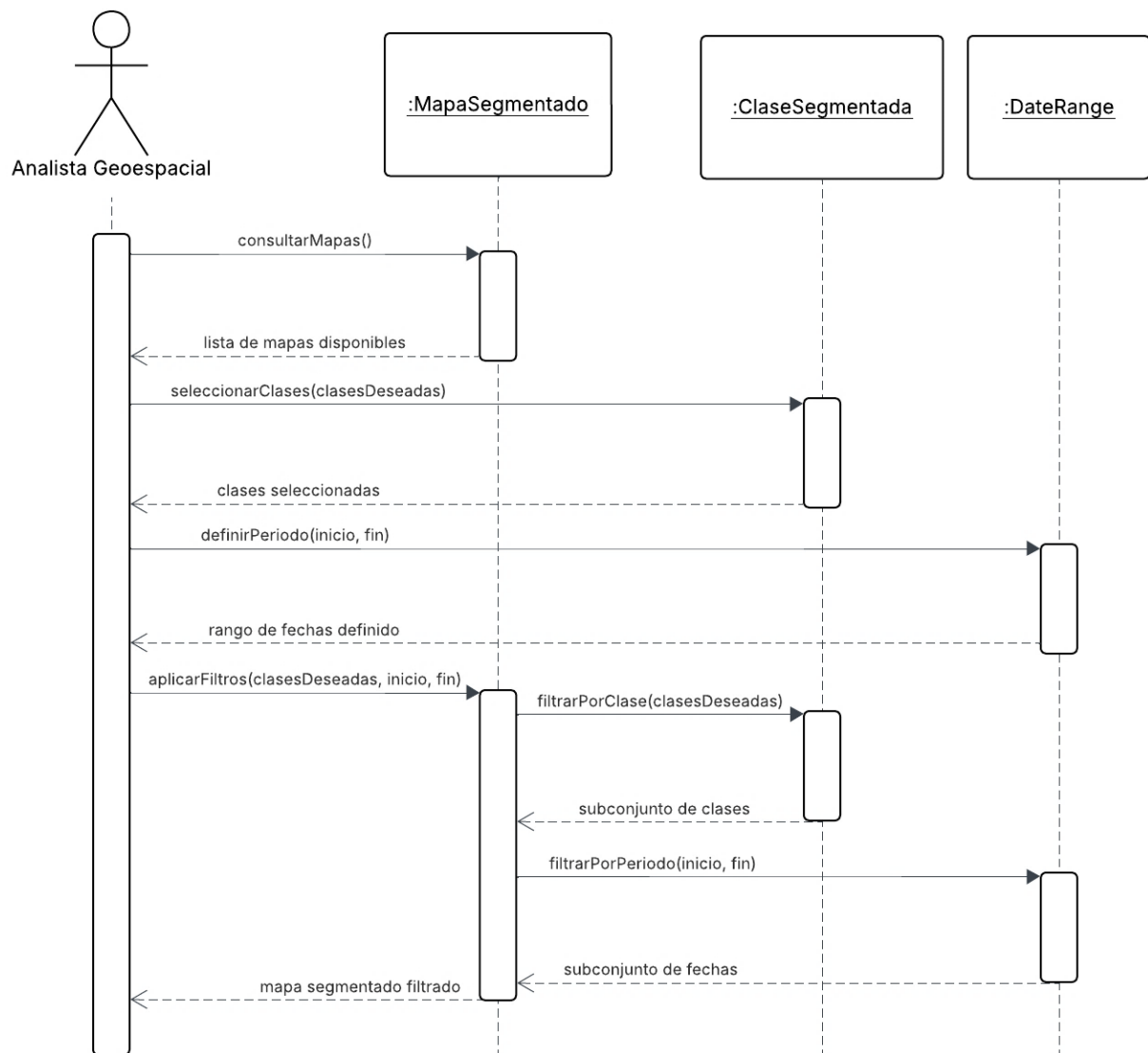
**Figura 5.** Diagrama de Actividades

### 2.3.3.2 Diagrama de Secuencia

El diagrama presentado en la Figura 6, modela la secuencia de interacciones necesarias para el caso de uso *Visualizar mapa segmentado* del rol *Analista Geoespacial*. El flujo inicia con la consulta de mapas disponibles, a lo que el componente *MapaSegmentado* responde con una lista de opciones. Posteriormente, el analista selecciona las clases de interés mediante

*seleccionarClases(clasesDeseadas)*, y el componente *ClaseSegmentada* devuelve las clases seleccionadas. A continuación, se define un rango temporal con *definirPeriodo(inicio, fin)*, confirmado por el componente *DateRange*.

Una vez definidos los criterios, el analista aplica los filtros combinados con *aplicarFiltros(clasesDeseadas, inicio, fin)*. Esto activa dos procesos internos: *ClaseSegmentada* filtra por clase y devuelve el subconjunto correspondiente, mientras que *DateRange* filtra por periodo y responde con el intervalo definido. Finalmente, *MapaSegmentado* entrega el mapa segmentado filtrado según los parámetros establecidos. De esta forma, se visualiza la lógica de interacción entre los componentes del sistema, destacando su modularidad y la secuencia ordenada de operaciones requeridas para una visualización personalizada.



**Figura 6.** Diagrama de Secuencia de Visualizar mapa segmentado

### 2.3.3.3 Diagrama de Comunicación

El diagrama presentado en la Figura 7, modela las interacciones entre objetos del sistema durante el caso de uso *Visualizar mapa segmentado*. En este modelo, se representan los objetos *AnalistaGeoespacial*, *MapaSegmentado*, *ClaseSegmentada* y *DateRange*, junto con los mensajes numerados que describen el flujo de operaciones entre ellos. La secuencia inicia con la solicitud de consulta de mapas (*consultarMapas()*), seguida por la selección de clases (*seleccionarClases(clasesDeseadas)*) y la definición del periodo de análisis (*definirPeriodo(inicio, fin)*).

Posteriormente, el analista aplica los filtros combinados (*aplicarFiltros(clasesDeseadas, inicio, fin)*), lo que desencadena dos procesos paralelos: el filtrado por clase (*filtrarPorClases(clasesDeseadas)*) y el filtrado por periodo (*filtrarPorPeriodo(inicio, fin)*). Finalmente, el objeto *MapaSegmentado* responde con el mapa segmentado filtrado, listo para ser visualizado. De esta manera, se observa cómo se distribuyen las responsabilidades entre los objetos del sistema y cómo se encadenan los mensajes para lograr una visualización personalizada, resaltando la colaboración entre componentes en tiempo de ejecución.

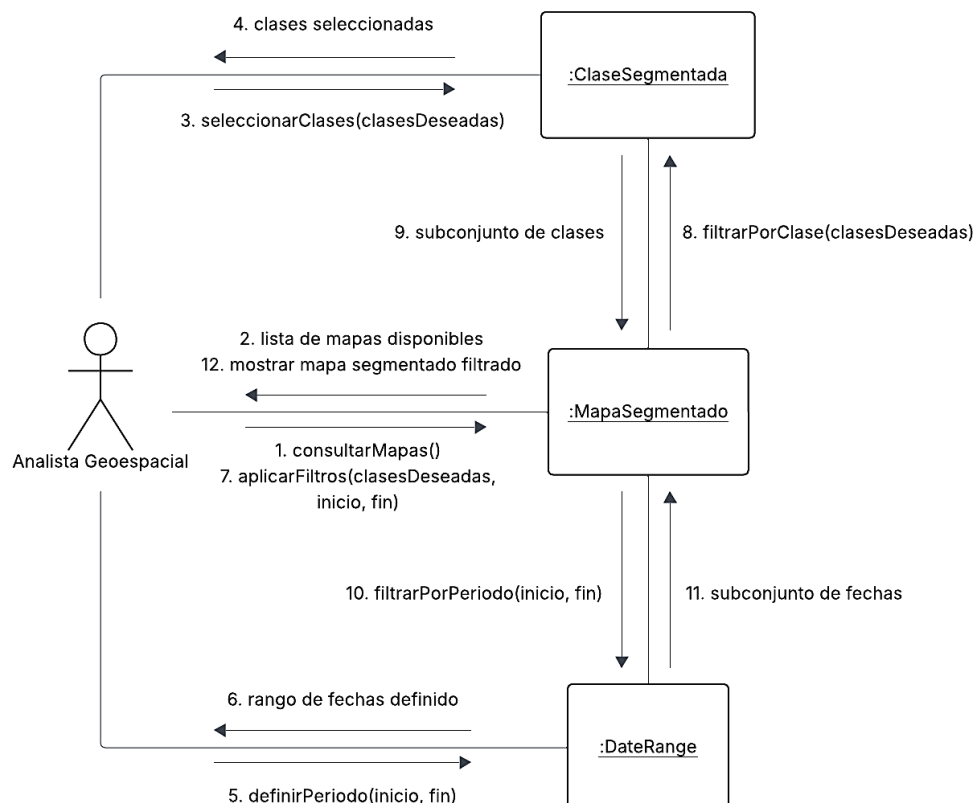


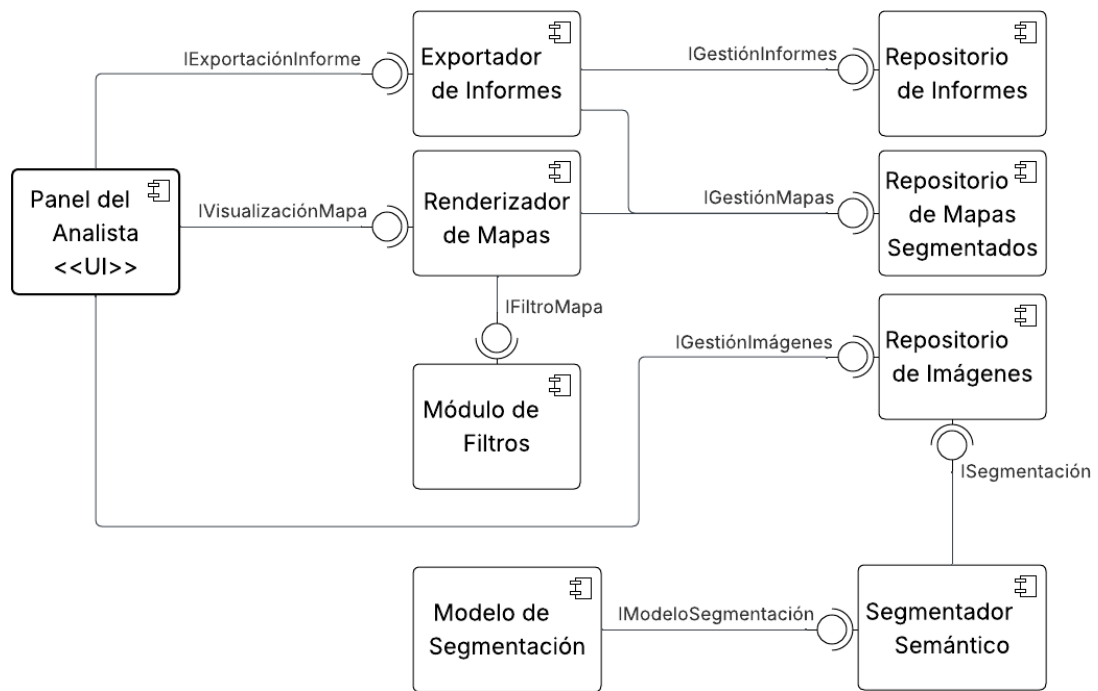
Figura 7. Diagrama de Comunicación de Visualizar mapa segmentado

## 2.3.4 Vista de Desarrollo

### 2.3.4.1 Diagrama de Componentes

El diagrama presentado en la Figura 8, modela la arquitectura de componentes del sistema propuesto del presente proyecto. La estructura está organizada en módulos funcionales que interactúan entre sí mediante interfaces bien definidas, lo que permite una separación clara de responsabilidades y facilita la escalabilidad del sistema. En el extremo de la interfaz de usuario se encuentra el *Panel del Analista*, que accede a funcionalidades de visualización de mapas e informes mediante las interfaces *IVisualizaciónMapa* e *IExportaciónInforme*.

El procesamiento de datos se distribuye entre componentes especializados: el *Renderizador de Mapas* se encarga de la visualización y aplica filtros a través del *Módulo de Filtros*, mientras que el Exportador de Informes genera los documentos técnicos con apoyo del *Repositorio de Informes*. Los datos segmentados se almacenan en el *Repositorio de Mapas Segmentados*, y las imágenes originales en el Repositorio de Imágenes. El componente *Segmentador Semántico* realiza el procesamiento de imágenes con ayuda del *Modelo de Segmentación*, ambos encapsulados en el módulo de análisis. Las interfaces como *IGestiónMapas*, *IGestiónInforme*, *IFiltroMapa*, *ISegmentación* e *IModeloSegmentación* permiten que los componentes se comuniquen de forma modular y desacoplada. De esta forma, se puede observar la arquitectura lógica del sistema, destacando su orientación a componentes reutilizables y su alineación con principios de diseño robusto.



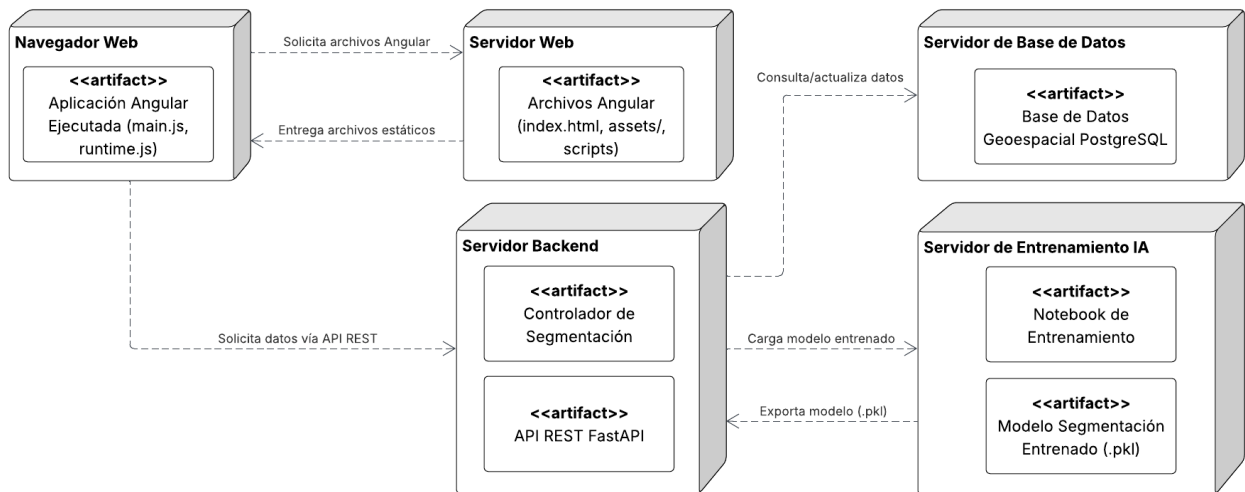
**Figura 8.** Diagrama de Componentes

## 2.3.5 Vista Física

### 2.3.5.1 Diagrama de Despliegue

El diagrama presentado en la Figura 9, modela la arquitectura de despliegue del sistema web propuesto del presente proyecto. La estructura refleja una solución distribuida compuesta por cinco nodos principales: el navegador web del analista, el servidor web que hospeda la aplicación Angular, el servidor backend desarrollado en FastAPI, el servidor de base de datos con PostgreSQL geoespacial, y el servidor de entrenamiento de inteligencia artificial que contiene el modelo de segmentación.

El flujo de interacción inicia en el navegador web, donde se ejecuta la aplicación Angular descargada desde el servidor web. Esta aplicación se comunica con el backend a través de una API REST, enviando solicitudes para procesar imágenes, consultar mapas y generar informes. El backend se encarga de gestionar la lógica del sistema, conectándose a la base de datos PostgreSQL para guardar y consultar información geoespacial. Además, es el responsable de cargar el modelo de segmentación, el cual se aloja como un archivo .keras generado previamente en un entorno especializado de Jupyter Notebook. Esta organización muestra cómo los componentes se reparten en distintos servidores, lo que resalta la modularidad, la capacidad de crecimiento (escalabilidad) y la especialización de cada parte de la solución.

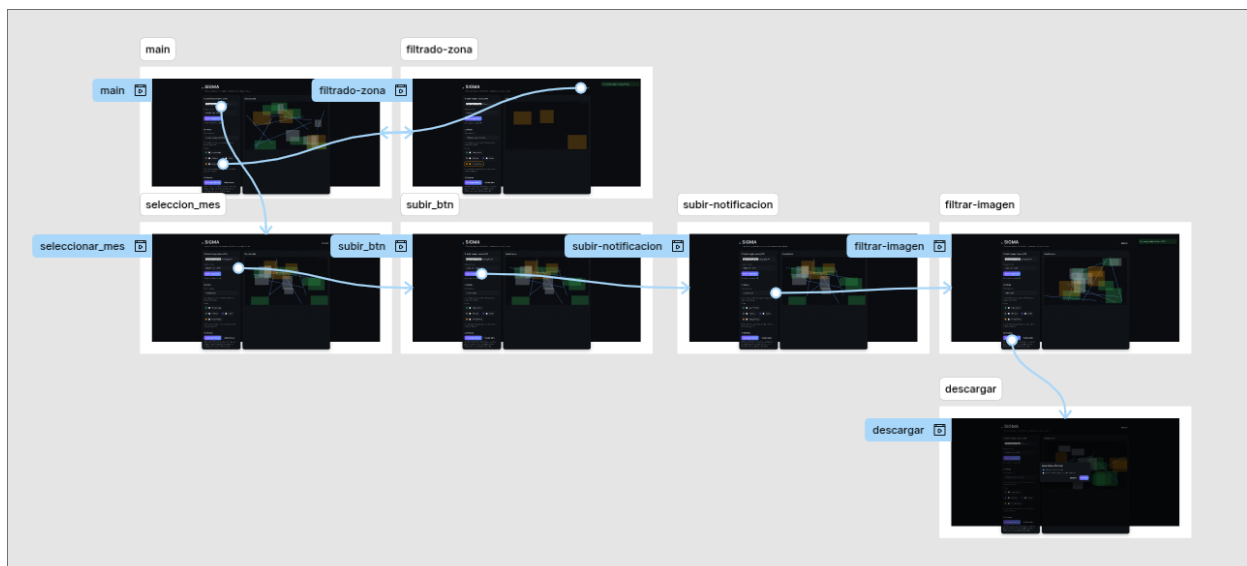


**Figura 9.** Diagrama de Despliegue

## 2.4 Prototipo

### 2.4.1 Primera iteración

La Figura 10 muestra la vista general de la primera versión del prototipo para el sistema SIG, creada en Figma. En esta imagen se detalla todo el camino que sigue el usuario a través de las pantallas, pasando por el inicio, la selección de zonas, la subida de fotos, los filtros, las alertas y la bajada de reportes. Esta perspectiva ayuda a entender cómo encajan todas las piezas y funciones del sistema antes de pasar a la etapa de programación.



**Figura 10.** Visión general primera iteración

La Figura 11 muestra la vista de inicio del prototipo del sistema SIG, desarrollada en Figma. En esta pantalla se presenta la interfaz principal del sistema, donde el usuario puede seleccionar zonas geográficas, aplicar filtros y visualizar los resultados en un mapa interactivo.

Esta vista constituye el punto de entrada al sistema, facilitando el acceso a las funcionalidades clave de análisis y manejo de información geoespacial.

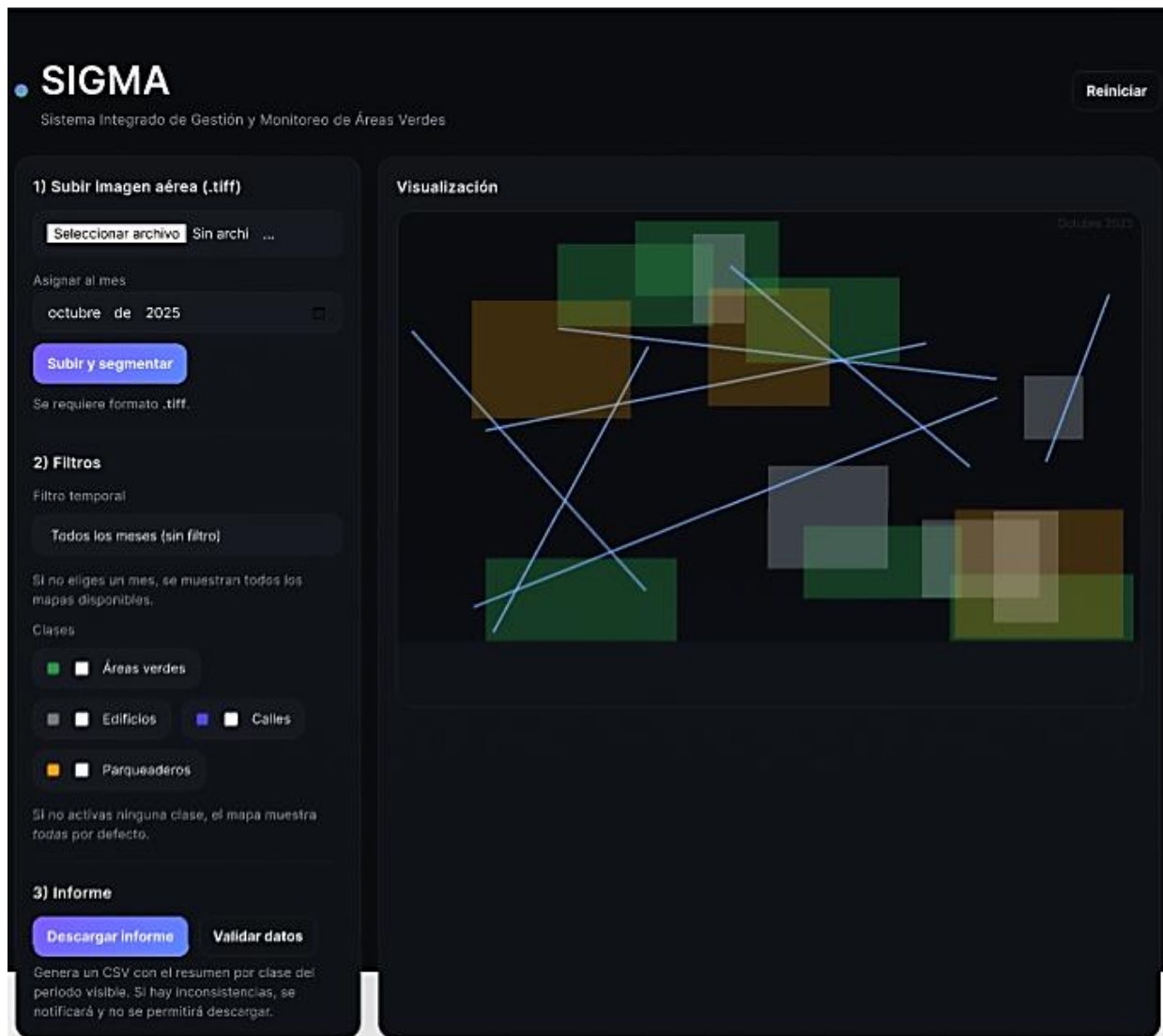
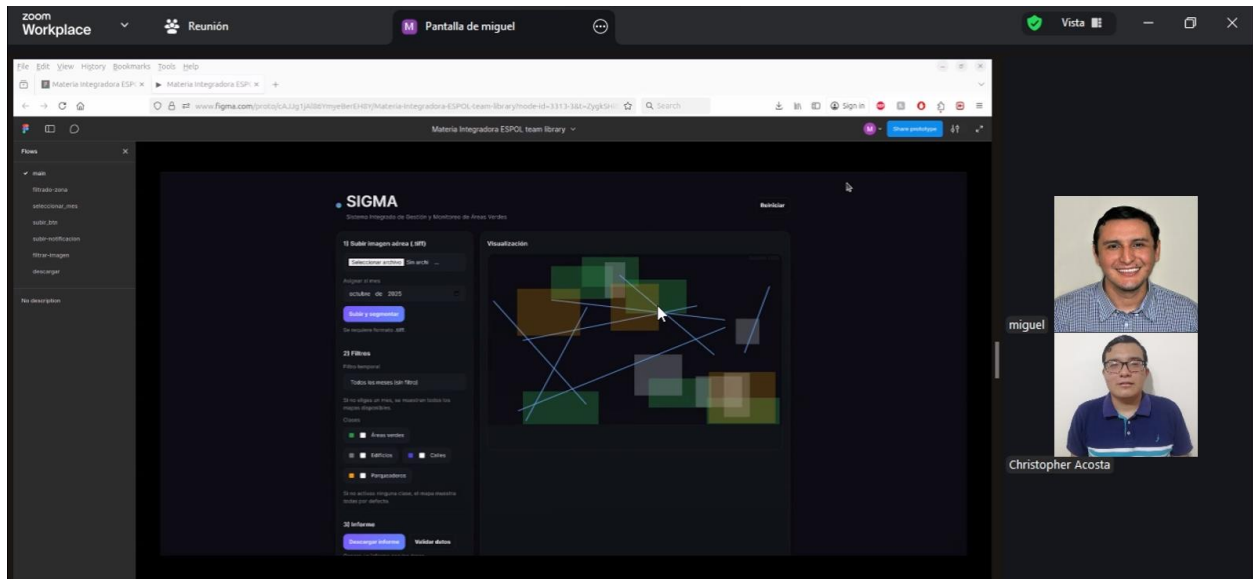


Figura 11. Vista de inicio primera iteración

## 2.4.2 Pruebas de usuario con primera iteración

Se invitó a 4 personas a participar en las pruebas de usuario de la primera versión del prototipo construido en Figma y así obtener retroalimentación que permita mejorar el sistema. Entre las 4 personas se encuentran el tutor y la clienta quienes revisaron si las funcionalidades ofrecidas en el prototipo cumplían con las expectativas del proyecto, y 2 invitados adicionales que nos ayudaron a evaluar la usabilidad del sistema a construir.

### 2.4.2.1 Prueba de usuario con el tutor (PhD. Miguel Realpe)



**Figura 12.** Prueba de usuario con tutor

Primero, el tutor mencionó que una vez que se suba la imagen aérea del dron como se observa en la Figura 13, el sistema debería automáticamente identificar la fecha de captura a partir de los datos del archivo .tiff y no tener que seleccionar manualmente en la barra lateral.



**Figura 13.** Paso de subida de imagen aérea (tutor)

Segundo, el tutor mencionó el visualizador de mapas mostrado en la Figura 14, debe permitir ver diferentes capas o regiones del campus. Es decir, que la imagen a mostrar sea el resultado de la unión en el espacio de todas las imágenes capturadas por el dron similar a lo que ocurre en la herramienta web Google Earth.

Tercero, el analista geoespacial debería ser capaz de seleccionar una subregión de todo el mapa visualizado para que se muestren estadísticas relevantes por cada clase identificada en la segmentación con apariencia de dashboard en la medida de lo posible.

Cuarto, el tutor comentó que quisiera que el filtro temporal en vez de ser una lista desplegable como se ve en la Figura 15, en su lugar sea una lista con casillas de verificación para que se puedan seleccionar varios meses a la vez y así mostrar todos sus respectivos mapas.

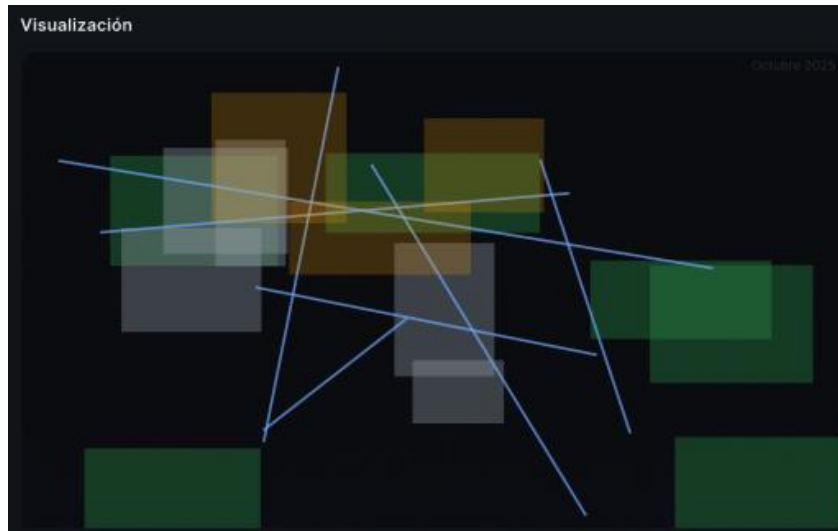


Figura 14. Visualizador de mapas (tutor)



Figura 15. Filtro temporal de mapas (tutor)

#### 2.4.2.2 Prueba de usuario con la cliente (PhD. María Fernanda Calderón)

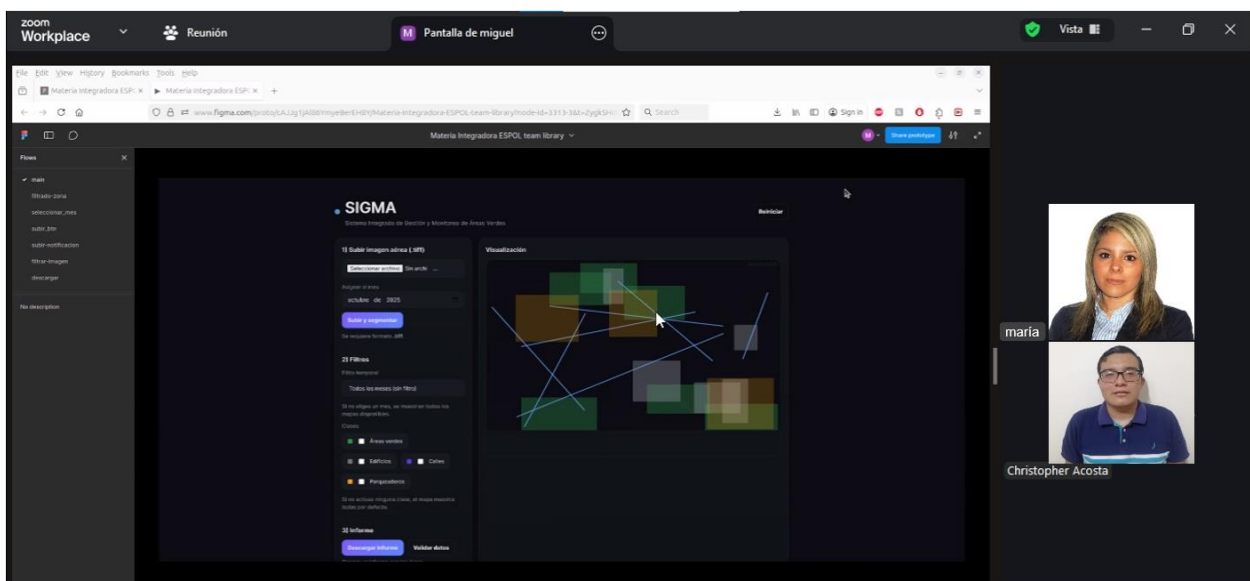
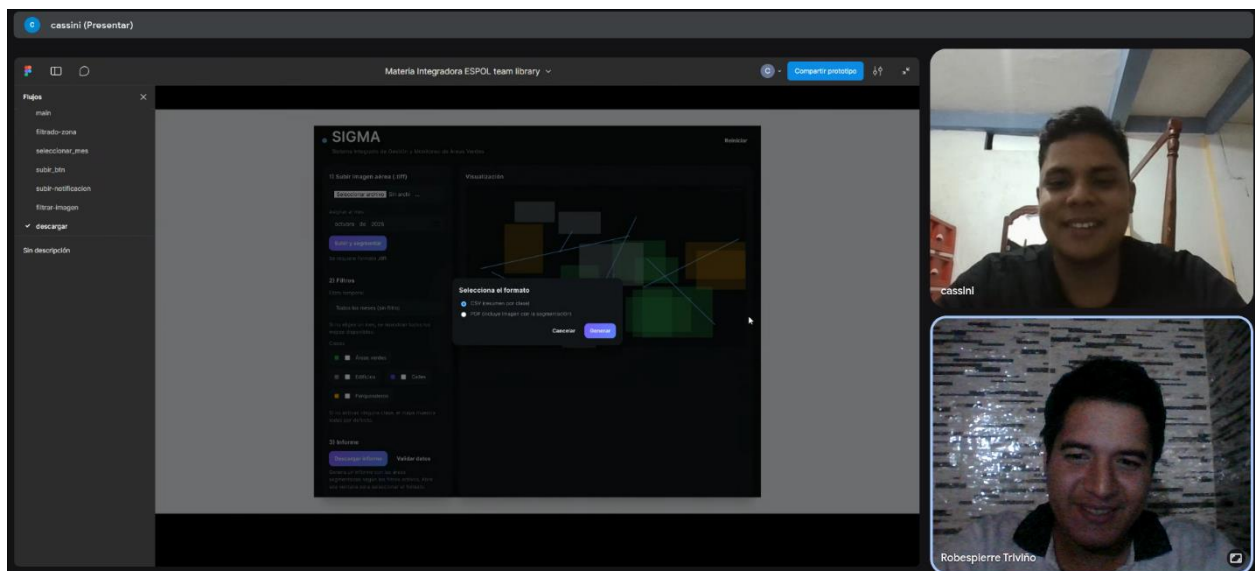


Figura 16. Prueba de usuario con cliente

En la prueba de usuario realizado con la clienta se mostró que el prototipo contenía todas las funcionalidades ofrecidas en las historias de usuario que se le habían compartido en una reunión anterior. La clienta interactuó un rato con cada una de estas funcionalidades y le pareció que el prototipo sí estaba acorde con las historias de usuario que había firmado antes.

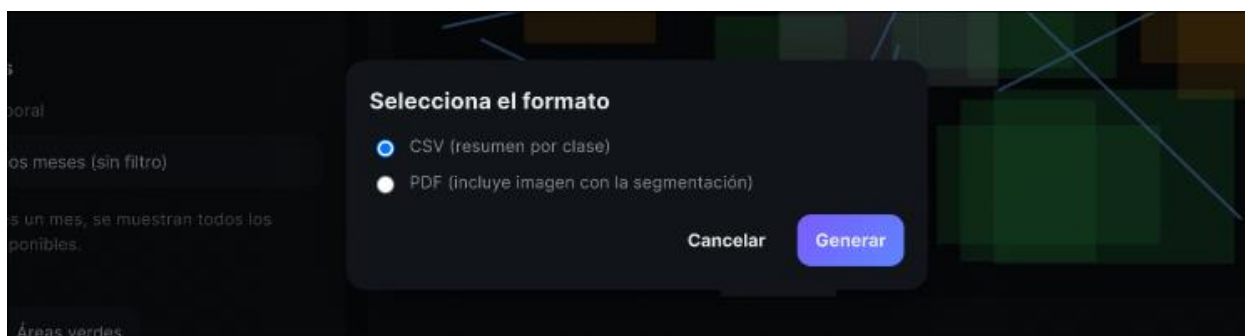
### 2.4.2.3 Prueba de usuario con invitado 1 (Estudiante Cassini Castillo)

Se llevó a cabo una prueba de usuario con el estudiante de Ingeniería Civil, Cassini Castillo, con el objetivo de evaluar la claridad del flujo de interacción y la comprensión de las funcionalidades disponibles en el prototipo. Durante la sesión, se le solicitó descargar el informe generado por el sistema. Tal como se muestra en la Figura 17, se registró la interacción del estudiante mientras ejecutaba esta acción dentro del visualizador.



**Figura 17.** Prueba de Usuario de Cassini Castillo

La Figura 18 muestra la ventana emergente que se despliega cuando el usuario intenta descargar un informe. En este cuadro de diálogo, el sistema pide que se elija el formato de archivo deseado, siendo este el paso más importante que se analizó durante las pruebas de usuario.

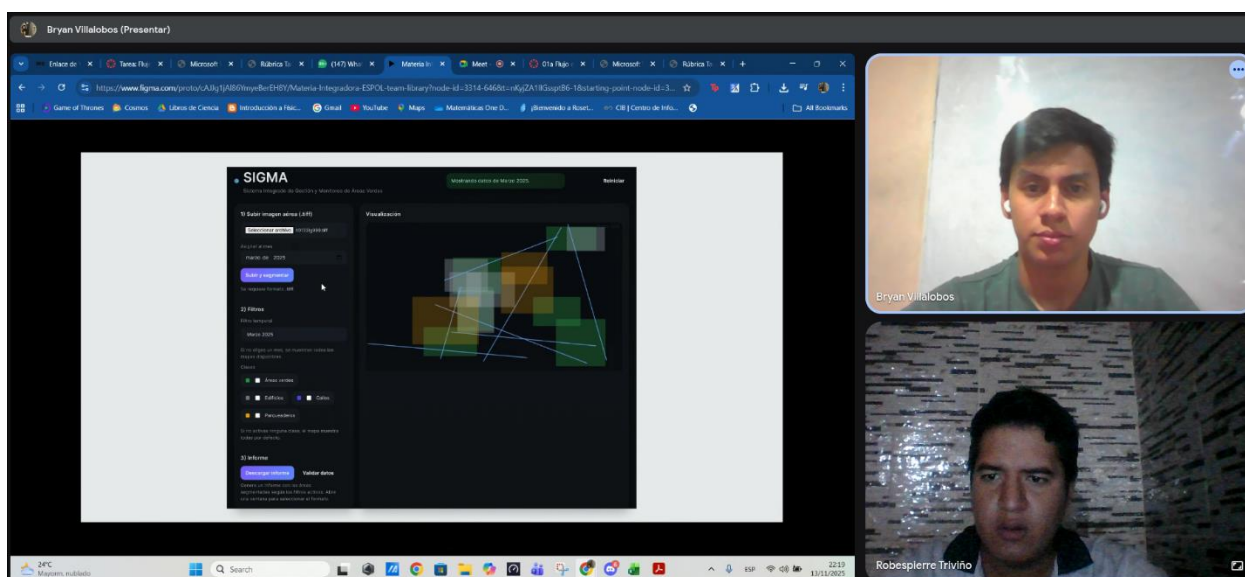


**Figura 18.** Modal de descarga (invitado 1)

A pesar de la funcionalidad actual, el estudiante señaló que la interfaz no explica con suficiente claridad qué datos específicos contendrá el informe final. Desde su punto de vista, el usuario ganaría mucho si tuviera más visibilidad y control sobre la información que se va a exportar. Por esta razón, sugirió que el mismo cuadro de diálogo incluya una sección extra para que se puedan elegir explícitamente las áreas de interés o los elementos del mapa que deben aparecer en el documento descargado.

#### 2.4.2.4 Prueba de usuario con invitado 2 (Estudiante Bryan Villalobos)

Para evaluar la usabilidad del prototipo, se llevó a cabo una segunda prueba de usuario con el estudiante de Ingeniería Civil, Bryan Villalobos. En esta sesión se analizó cómo se comportan los filtros al aplicarlos a las distintas zonas del mapa, un proceso que queda registrado en la Figura 19. Durante la sesión, se solicitó al participante explorar el visualizador y utilizar los filtros disponibles para identificar áreas específicas dentro de la imagen segmentada.



**Figura 19.** Prueba de Usuario de Bryan Villalobos

Como se observa en la Figura 20, la barra lateral cuenta con un recuadro diseñado para seleccionar las diferentes zonas identificadas en la imagen segmentada. Este panel actúa como un listado de filtros donde el usuario puede activar o desactivar áreas específicas del mapa. Sin embargo, el participante comentó que, aunque esta opción cumple su función, la experiencia sería más intuitiva si se pudieran realizar acciones directamente sobre la imagen en lugar de depender solo del menú lateral.



**Figura 20.** Filtro de zonas (invitado 2)

Al interactuar con la herramienta, el estudiante señaló que sería ideal que los filtros se activaran también al pasar el puntero sobre las zonas de la imagen segmentada. Según comentó, recibir una respuesta visual inmediata, como el resaltado del área o la aparición de su nombre al situar el cursor, mejoraría mucho la claridad de la interfaz. Esto facilitaría la exploración y permitiría una navegación más fluida y eficiente por todo el mapa.

#### **2.4.2 Segunda iteración**

En la Figura 21, se muestra de forma general todas las pantallas de la segunda iteración del prototipo elaborado en Figma. Esta segunda iteración ya considera las retroalimentaciones recibidas durante las pruebas de usuario ejecutadas en la sección 2.4.1 de este reporte.

La Figura 22 corresponde a la pantalla inicial de la segunda iteración del prototipo en caso de que no haya imágenes aéreas cargadas previamente. Aquí el usuario puede subir una nueva imagen en el apartado “Cargar imagen aérea” de la barra lateral izquierda.

Una vez que la imagen es subida correctamente, se muestran los datos del archivo .tiff de la imagen como nombre, resolución, tamaño y la fecha de captura de la imagen como se observa

en la Figura 23. Este último dato se usará más adelante cuando el usuario quiera aplicar filtros temporales (mes y año) a los mapas segmentados.

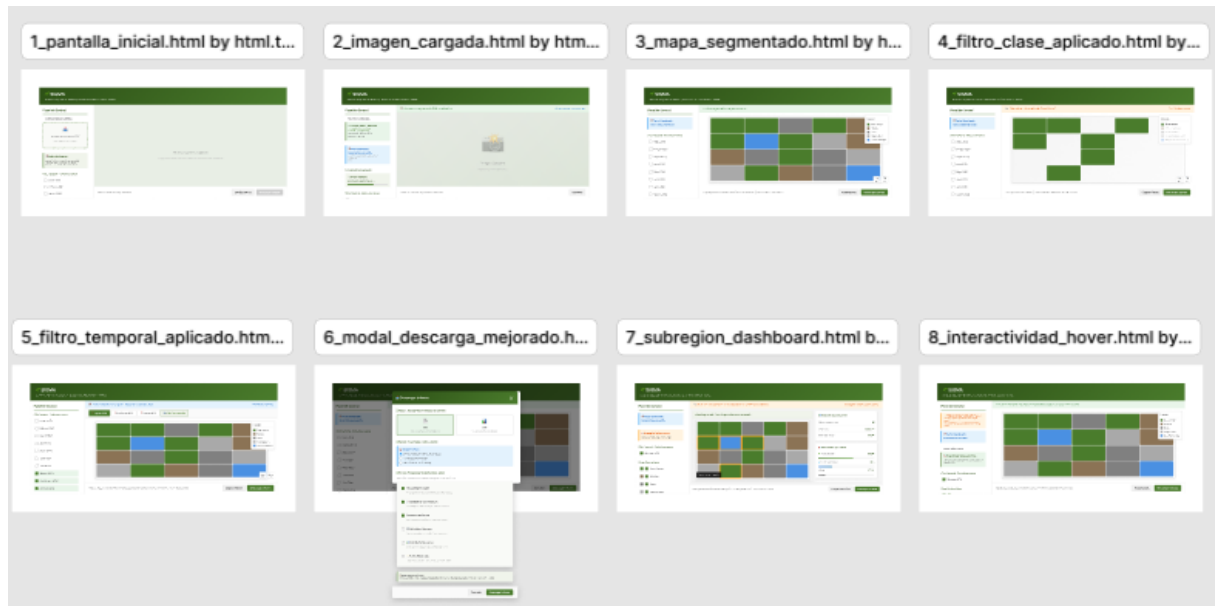


Figura 21. Visión general segunda iteración

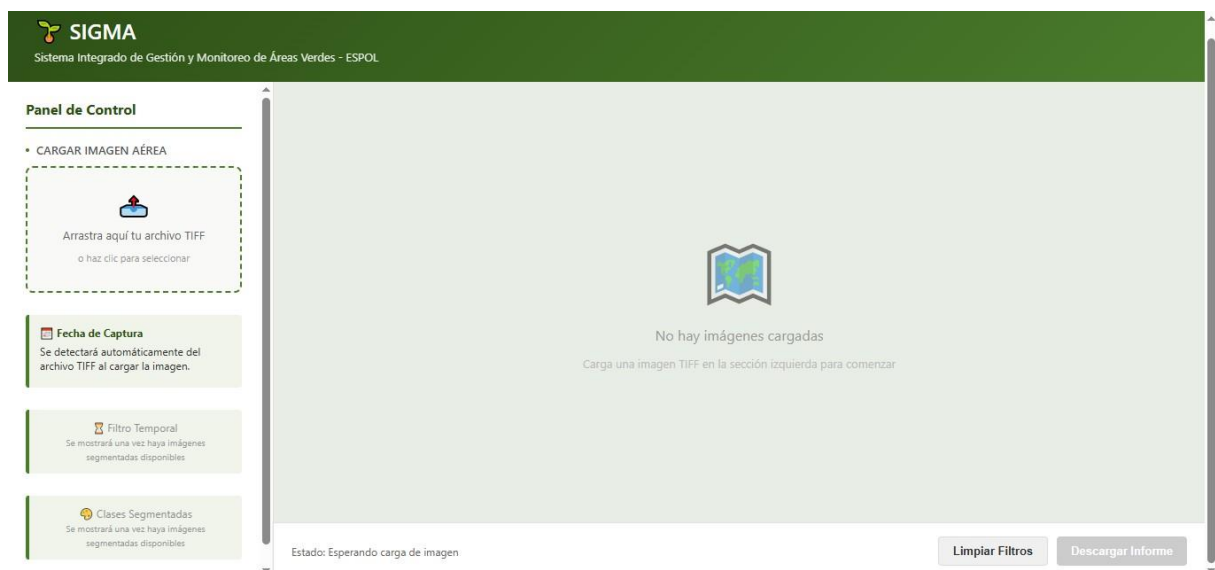
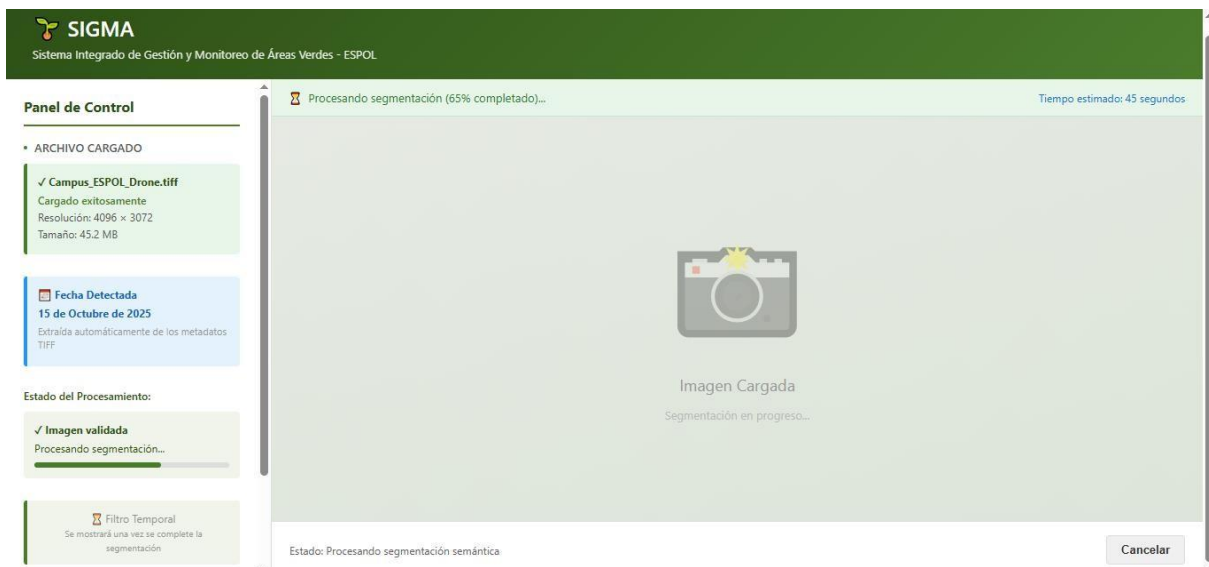


Figura 22. Pantalla inicial segunda iteración



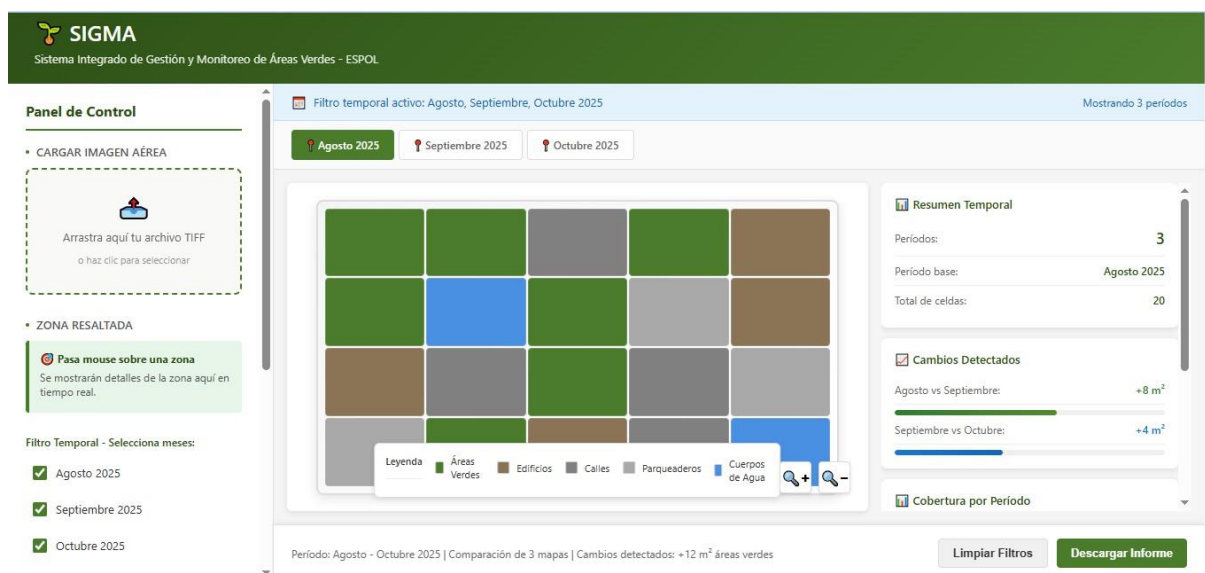
**Figura 23.** Imagen cargada

La Figura 24 muestra la notificación de éxito de la segmentación dentro del prototipo del sistema SIG. Una vez finalizado el análisis de la imagen, el sistema emite un mensaje en la parte superior que indica “Mapa segmentado listo para visualizar”. Esta alerta confirma que el procesamiento fue exitoso y que los resultados pueden visualizarse en el mapa interactivo.



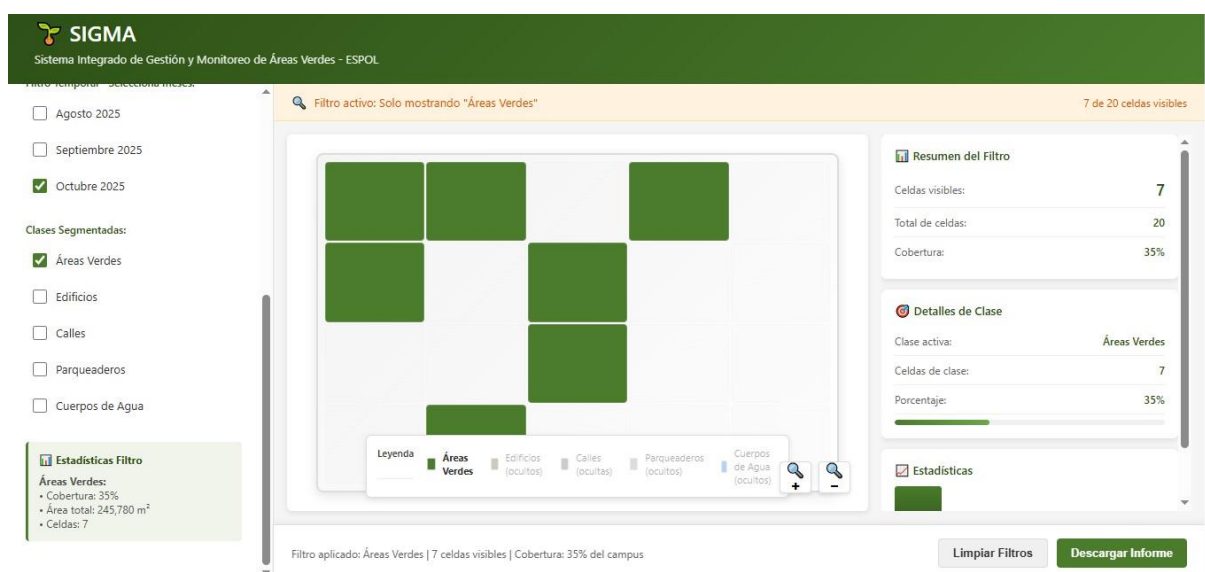
**Figura 24.** Mapa segmentado

La Figura 25 muestra la función de filtrado por fecha de subida dentro del prototipo del sistema SIG. Esta herramienta permite al usuario visualizar los mapas de uno o varios meses específicos. En la parte superior se muestra una barra que contiene los meses seleccionados para que el usuario vea los cambios del mapa entre distintos meses.



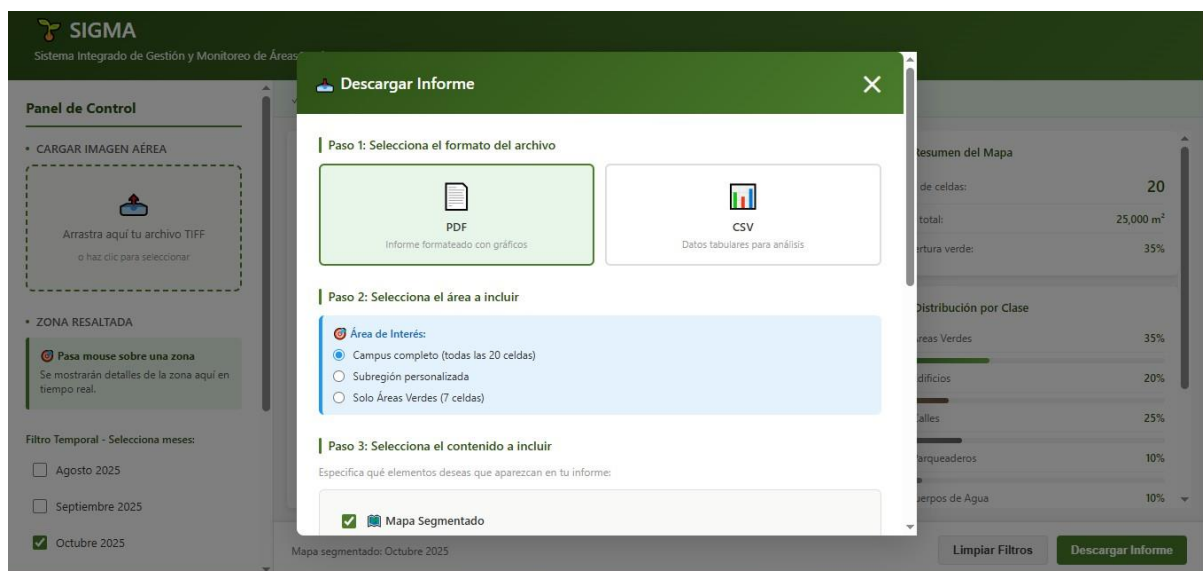
**Figura 25.** Filtro temporal aplicado

La Figura 26 presenta la funcionalidad de filtrado por clase de uso de suelo del prototipo del sistema SIG. En este ejemplo, el usuario ha activado la categoría “Áreas Verdes”, lo que permite visualizar exclusivamente las áreas correspondientes a esa clase en el mapa.



**Figura 26.** Filtro clase aplicado

Las Figuras 27 y 28 muestran la ventana de descarga de informes del prototipo del sistema SIG. En la Figura 27, el usuario puede elegir el formato de salida entre CSV o PDF. También, puede elegir si quiere un análisis del mapa completo, una subregión personalizada del mismo o solo de alguna clase en particular como por ejemplo la de “Áreas Verdes” que sería la clase de mayor interés en el presente proyecto.



**Figura 27.** Descarga del informe parte 1

En cambio, en la Figura 28 se muestran algunos posibles elementos a incluir en el informe descargado de los mapas segmentados. La versión final de las opciones disponibles en esta ventana se decidirá durante la implementación del prototipo funcional en base a los datos originales de las imágenes y los obtenidos durante la segmentación de los mapas.

En caso de que el usuario desee un análisis de una subregión del mapa, podrá seleccionar las zonas del mapa que quiera incluir en el informe descargado como se observa en la Figura 29.

Por otro lado, durante la visualización del mapa segmentado, el usuario podrá ver información de cada una de las zonas de cada clase encontrada durante la segmentación como se observa en la Figura 30. De este modo, el usuario podría ver detalles de la zona como su tipo (clase) y un tamaño aproximado del área de cobertura que tiene dentro del mapa. Durante la implementación del prototipo funcional se evaluará la posibilidad mostrar este dato como un valor en metros cuadrados o solo como porcentaje del área total en píxeles de la imagen.

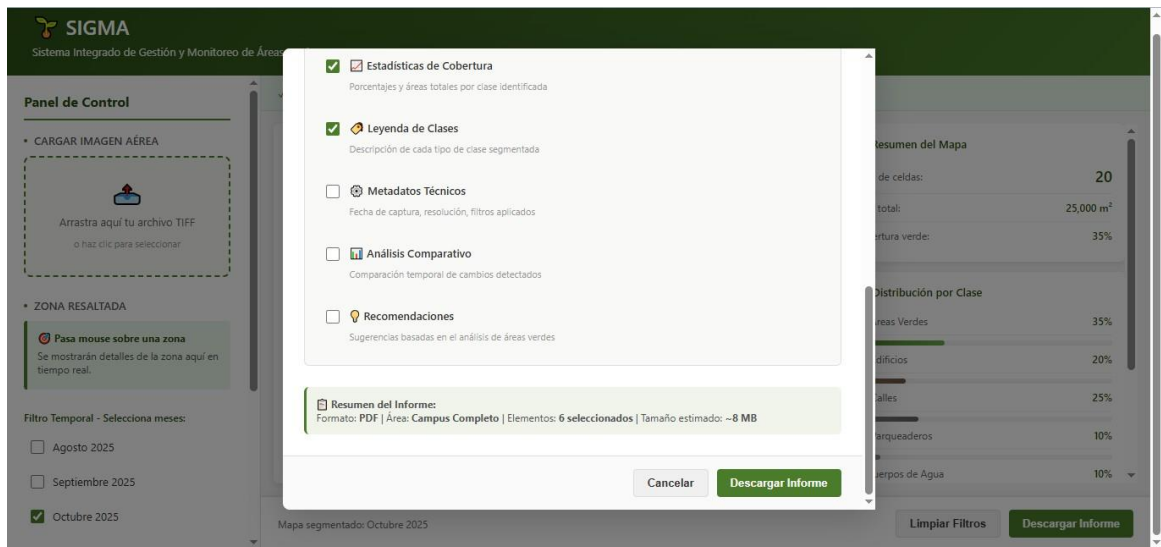


Figura 28. Descarga del informe parte 2



Figura 29. Selección de subregión del mapa

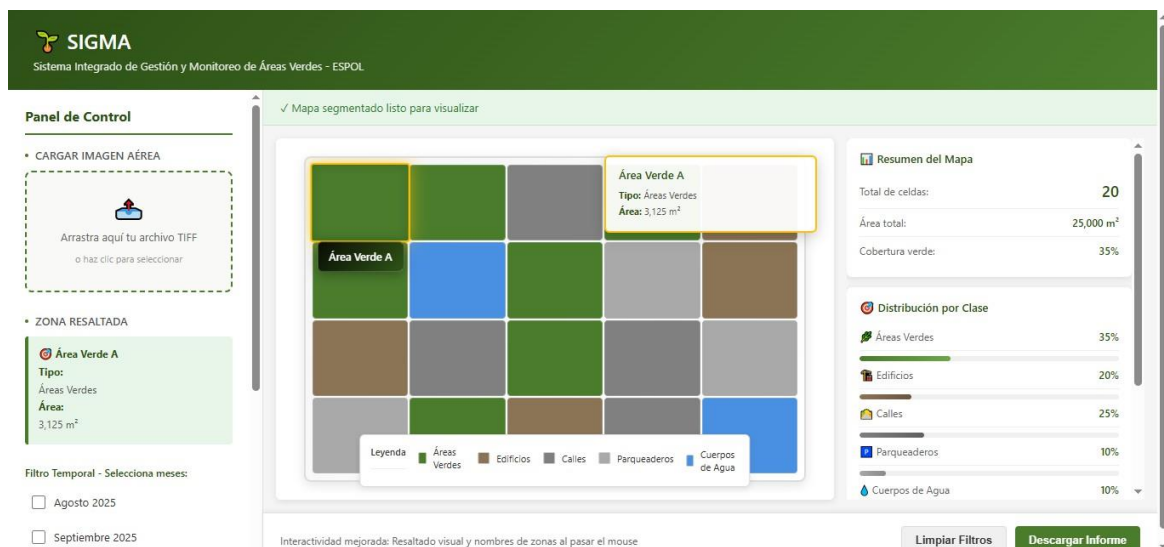


Figura 30. Ejemplo de efecto al pasar el ratón por encima de una de las zonas del mapa

## **Capítulo 3**

### 3. Resultados y análisis

En este capítulo se presenta la versión implementada del sistema, el Plan de Evaluación para medir la calidad del sistema, y los resultados obtenidos durante las pruebas con usuarios reales. Primero, se describe el propósito y los aspectos principales que componen el sistema implementado. Segundo, se explican las partes de la interfaz del prototipo funcional y se incluyen algunas capturas de pantalla de este. Tercero, se detalla el Plan de Evaluación indicando su propósito, participantes involucrados, aspectos evaluados del sistema y la metodología que se siguió en su ejecución. Al final, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con los usuarios que emplearon el prototipo funcional y emitieron su respectiva retroalimentación.

#### 3.1 Descripción del sistema

El sistema **SIGMA** ha sido diseñado con el objetivo de proporcionar una plataforma interactiva que integre imágenes aéreas capturadas mediante drones, algoritmos de segmentación semántica basados en aprendizaje profundo y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La solución permite identificar, clasificar y visualizar de manera precisa las áreas verdes del campus Gustavo Galindo Velasco de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), ofreciendo información georreferenciada actualizada y accesible para la planificación territorial y la gestión institucional.

El sistema se compone de tres pilares tecnológicos principales:

- **Procesamiento de imágenes aéreas** para la detección y clasificación de coberturas vegetales, con un nivel de precisión esperado igual o superior al 85 % respecto a datos de referencia validados en campo.
- **Plataforma web interactiva** que habilita la consulta y exploración de mapas segmentados con filtros temporales y temáticos.

- **Dashboard estadístico** que permite identificar y analizar datos relevantes derivados de la segmentación semántica, como porcentajes de cobertura por clase, evolución temporal y distribución espacial de las áreas verdes, que sirven como apoyo para la toma de decisiones institucionales basadas en datos.

### 3.2 Prototipo funcional

En las Figuras 31, 32 y 33 se presenta la apariencia final que tendrá el prototipo funcional que será utilizado durante la ejecución del Plan de Evaluación descrito en la sección 3.2.

Primero, se observa cómo luce la máscara obtenida de la predicción realizada por el modelo de segmentación semántica cuya entrada fue la imagen aérea capturada por un dron en formato .tiff. Además, se agregó un diálogo para mostrar/ocultar la máscara y configurar su opacidad en el mapa.

Segundo, se muestra que el panel de control ubicado en el lado izquierdo de la pantalla contiene secciones para la carga de la imagen aérea y aplicación de filtros tanto temporales (mes y año por el momento), como temáticos (clases específicas con las que el modelo de segmentación semántica fue entrenado). Cabe recalcar que cada vez que se suba una nueva imagen aérea, se tendrá que indicar su respectiva fecha de captura para que sea asignada al periodo pertinente.

Tercero, el dashboard ubicado en el lado derecho de la pantalla ha sido dividido en 2 secciones principales. La primera sección, Datos Generales, contiene los valores del área total en metros cuadrados de todas las máscaras mostradas en el mapa, el área general de las áreas verdes tanto en metros cuadrados y porcentaje, el periodo (mes y año) seleccionado y la cantidad de clases específicas seleccionadas. La segunda sección, Cobertura de Área (m<sup>2</sup>), contiene el área total en metros cuadrados de todas las clases seleccionadas en el filtro temático, y por cada una de ellas se indica el color, nombre, área en metros cuadrados, porcentaje de cobertura y una barra del color de la clase para observar este porcentaje de forma visual.

Cuarto, la barra de estado ubicada al final del mapa y dashboard contiene algunos de los datos mostrados en la sección “Datos Generales” del dashboard. También, se incluyeron 3

botones con funciones relevantes para el sistema. El botón “Borrar Datos” reestablece el estado del sistema al eliminar todos los datos en la base de datos para que el sistema quede limpio al finalizar cada prueba realizada del Plan de Evaluación. El botón “Limpiar Filtros” desmarca todas las casillas de verificación seleccionadas en los filtros temporales y temáticos. Por último, el botón “Descargar Informe” permite seleccionar el formato del informe (PDF o CSV) y los elementos a incluir en el informe antes de realizar su respectiva descarga en el ordenador del usuario.

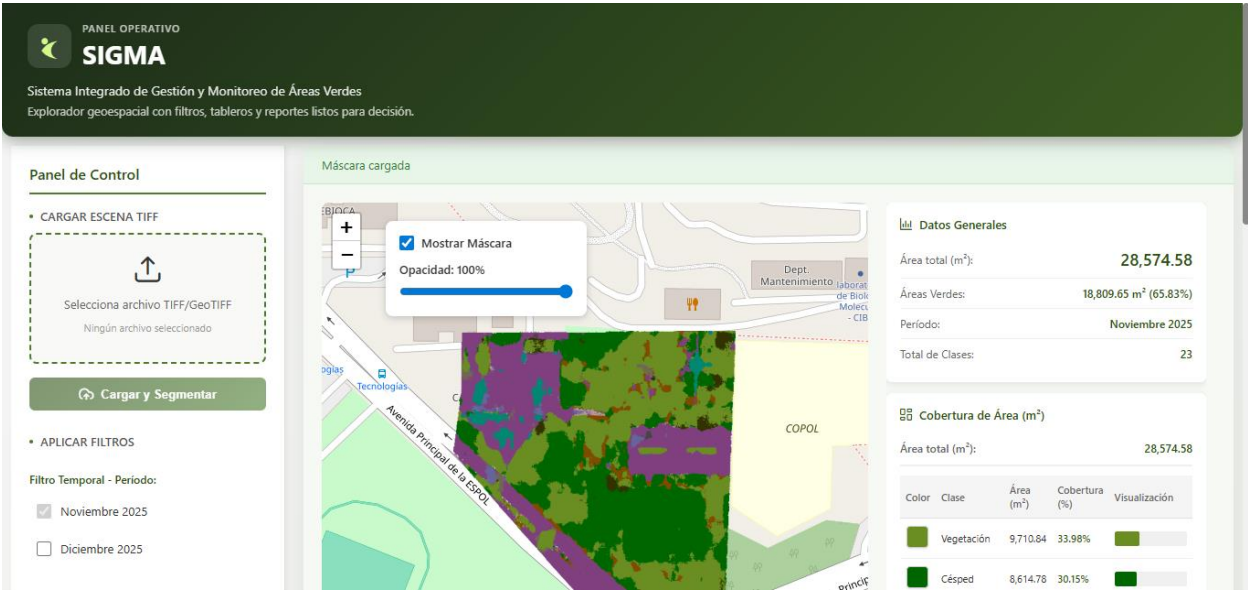


Figura 31. Prototipo funcional parte 1

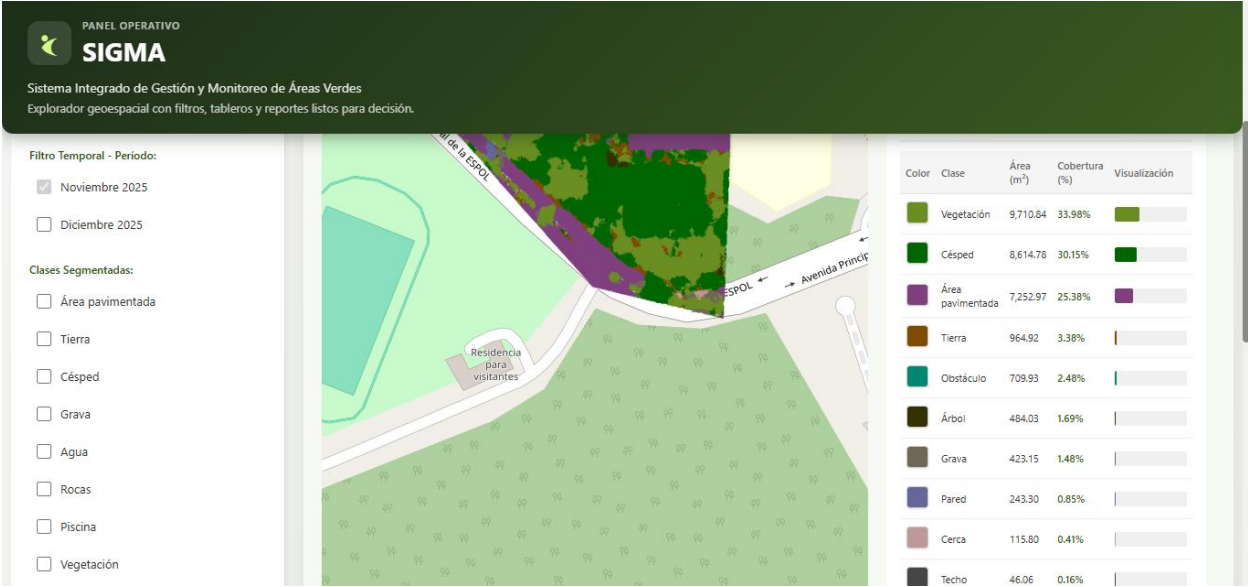
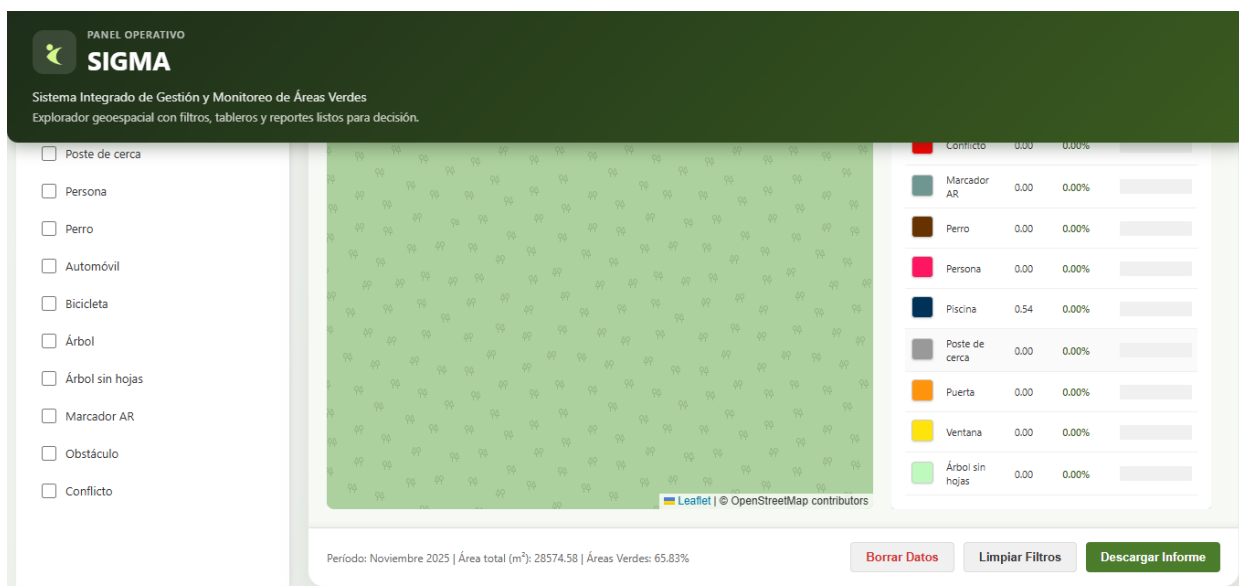


Figura 32. Prototipo funcional parte 2



**Figura 33.** Prototipo funcional parte 3

### 3.3 Plan de evaluación

#### 3.3.1 Propósito de la evaluación

El objetivo de la evaluación fue medir en qué nivel cumple **SIGMA** con los objetivos específicos y las historias de usuario establecidas. Estos objetivos se dividen en tres puntos clave: primero, el procesamiento de fotos aéreas mediante algoritmos de segmentación con aprendizaje profundo; segundo, el diseño y la creación de una plataforma web interactiva que funcione como un entorno SIG; y tercero, la elaboración de un informe técnico sobre las pruebas de funcionamiento y facilidad de uso del sistema.

Para medir el cumplimiento de estos objetivos, se buscó validar tres puntos clave: la calidad técnica, enfocada en la precisión de la segmentación y el desempeño general; la usabilidad, analizando qué tan fácil es para los usuarios consultar los mapas mediante el registro de sus tiempos y errores; y la consistencia, asegurando que el sistema entregue siempre los mismos resultados ante las mismas imágenes. Gracias a esta evaluación, se detectaron tanto los puntos fuertes como las oportunidades de mejora, garantizando que la herramienta ayude realmente a los usuarios y a la gestión sostenible del campus.

#### 3.3.2 Participantes evaluados

Para probar el sistema **SIGMA**, se contó con la ayuda de un grupo inicial de 3 personas que ya saben trabajar con mapas y datos geográficos. Se eligió este perfil porque ellos son

quienes realmente usarán la plataforma en su día a día para organizar el territorio y planificar el cuidado de las áreas verdes de la institución.

A los participantes se les encargó subir y procesar fotos aéreas, explorar los mapas usando filtros de clases y fechas, y revisar las estadísticas que muestra el tablero de control. Gracias a su experiencia, se confirmó que el sistema es preciso y que la información que entrega es confiable para que la institución pueda usarla al tomar decisiones importantes.

Al elegir a un grupo que hace el mismo tipo de trabajo, se aseguró que los resultados reflejen exactamente lo que necesitan quienes usarán la herramienta en su día a día profesional. Después de estas primeras pruebas, se amplió el grupo a 20 personas para tener datos más variados, lo que dejó en evidencia cómo usa la gente el sistema y qué partes de la plataforma todavía se pueden mejorar.

### **3.3.3 Aspectos evaluados**

La evaluación del sistema SIGMA se centró en analizar dimensiones clave para validar tanto la calidad técnica como la facilidad de uso y la coherencia de la solución. Los aspectos que evaluar se establecieron según los objetivos específicos y las historias de usuario del sistema.

#### ***3.3.3.1 Aspectos técnicos evaluados***

##### *3.3.3.1.1 Precisión de la segmentación semántica*

Se midió qué tan precisos son los algoritmos de inteligencia artificial al identificar y separar las zonas verdes de los distintos tipos de suelo en las fotos aéreas. Este aspecto permitió verificar el cumplimiento de la meta de alcanzar una precisión igual o superior al 85 % respecto a datos de referencia validados en campo.

##### *3.3.3.1.2 Consistencia de las estadísticas del dashboard*

Se evaluó la capacidad del sistema en replicar los mismos resultados de segmentación semántica cuando se analiza varias veces la misma imagen aérea. De esta forma, el dashboard debía mostrar siempre idénticos indicadores generados (por ejemplo, porcentaje de cobertura por clase, evolución temporal de áreas verdes) para el mismo conjunto de imágenes aéreas. Para ello,

si el puntaje promedio obtenido por los participantes el caso práctico de gestión territorial era al menos 80/100; entonces el sistema sería calificado como “consistente”.

### **3.3.3.2 Aspectos humanos evaluados**

Los aspectos mencionados a continuación fueron seleccionados porque permiten medir de manera objetiva la usabilidad del sistema. Para el caso de SIGMA, el nivel de usabilidad alcanzado se determina según la capacidad que tuvieron los usuarios para consultar y explorar mapas segmentados en la plataforma.

#### **3.3.3.2.1 Tiempo de ejecución**

Se midió la duración promedio que los usuarios requirieron para completar las tareas definidas (ej. cargar una imagen, aplicar un filtro, consultar un mapa, interpretar un resultado en el dashboard). Se fijó como objetivo que los usuarios no tardaran más de 5 minutos, en promedio, para terminar estas actividades.

#### **3.3.3.2.2 Errores cometidos**

Se registró la cantidad y el tipo de errores que ocurrieron durante el uso del sistema (como clics equivocados, problemas para navegar o intentos que no funcionaron). El objetivo era que estos fallos fueran mínimos, buscando que los usuarios logaran completar con éxito al menos el 90% de las tareas asignadas.

### **3.3.4 Metodología de evaluación**

La evaluación del sistema SIGMA se realizó usando una mezcla de datos numéricos y opiniones detalladas para obtener una visión completa de su precisión técnica, qué tan fácil es de usar y qué tan confiables son sus estadísticas. Para esto, la metodología se organizó de la siguiente forma:

#### **3.3.4.1 Diseño de pruebas de usuario**

Los participantes completaron una serie de actividades específicas en la plataforma, como subir fotos aéreas, usar filtros, revisar los mapas segmentados y analizar los datos en el panel de control. Durante este proceso, se vigiló cómo trabajaba cada usuario, anotando cuánto tiempo tardaban, qué errores cometían y si lograban terminar cada tarea con éxito.

#### 3.3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

- **Protocolos de observación:** Los evaluadores documentaron cómo interactuaban los usuarios con la plataforma. En estos registros, anotaron cuánto tiempo tardaban en completar cada tarea, qué errores surgieron al consultar o explorar los mapas segmentados y qué porcentaje de las actividades se logró terminar con éxito.
- **Caso práctico de gestión territorial:** los participantes analizaron 1 imagen aérea de noviembre 2025 y 1 imagen de diciembre 2025. Luego, respondieron a 1 formulario de 5 preguntas de opciones múltiple (ej. A, B, C, D) utilizando la información que se presentaba en el dashboard del sistema. Esto permitió evaluar la consistencia del sistema al analizar con segmentación semántica las imágenes capturadas por los drones.
- **Registros automáticos del sistema:** se recopilaron mediciones generadas por la propia plataforma, tales como precisión de la segmentación semántica lograda durante el entrenamiento y validación del modelo IA. La métrica empleada para medir la precisión fue el coeficiente de Sørensen-Dice, la cual es una medida estadística de similitud entre dos conjuntos. Esta da una puntuación entre 0 (sin superposición) y 1 (coincidencia perfecta), calculada como 2 veces la intersección de los conjuntos dividido por el número total de elementos en ambos conjuntos.

#### 3.3.4.3 Plan de recolección de datos

- La recolección de datos se realizó en sesiones controladas, con grupos de 4–5 participantes por jornada, hasta completar los 20 usuarios previstos. Cada sesión incluyó:
  - Introducción al sistema y explicación de las tareas.
  - Ejecución de las pruebas de usuario.
  - Aplicación de encuestas y entrevista breve de salida.
- Cronograma de aplicación:
  - **Semana del 5 al 9 de enero de 2026:** Sesiones diarias con grupos de 4–5 participantes.

- **Días 10 y 11 de enero de 2026:** Consolidación de datos recolectados y análisis de resultados.

#### *3.3.4.4 Análisis cuantitativo*

Los datos obtenidos de los protocolos de observación (tiempos de ejecución y errores cometidos, tasa de éxito en tareas) y de los registros automáticos del sistema (precisión de la segmentación semántica) fueron procesados con cálculos estadísticos básicos: promedios, porcentajes y desviaciones estándar. Se compararon los valores obtenidos con los criterios de éxito previamente definidos (ej. precisión  $\geq 85\%$ , tasa de éxito  $\geq 90\%$ , tiempo promedio  $\leq 5$  minutos). Se elaboraron tablas y gráficos que permitan visualizar de manera clara el cumplimiento de los umbrales establecidos.

#### *3.3.4.5 Análisis cualitativo*

Las observaciones anotadas por los evaluadores durante las sesiones se clasificaron en temas recurrentes (ej. dificultades técnicas, errores frecuentes, patrones de navegación). Se identificaron comportamientos comunes que complementen los resultados numéricos y ayuden a explicar los tiempos y errores detectados. Se destacaron fortalezas y áreas de mejora señaladas por los participantes en relación con la interacción con la plataforma y la interpretación de estadísticas del dashboard.

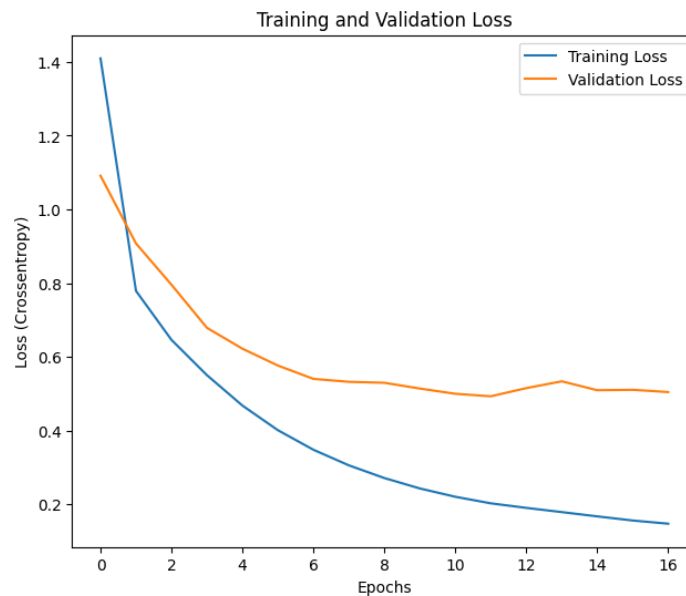
#### *3.3.4.7 Presentación de resultados*

Después de comparar los datos cuantitativos y cualitativos con la finalidad de evaluar el nivel de cumplimiento de los criterios de éxito, los resultados se organizaron en secciones correspondientes a cada aspecto evaluado. Se añadieron gráficos estadísticos, tablas y comentarios para ilustrar los hallazgos. Por último, se incluyeron las fortalezas y áreas de mejora obtenidas del análisis cualitativo que resumen las observaciones de los temas recurrentes y los comportamientos comunes manifestados por los participantes.

### 3.4 Resultados de evaluación

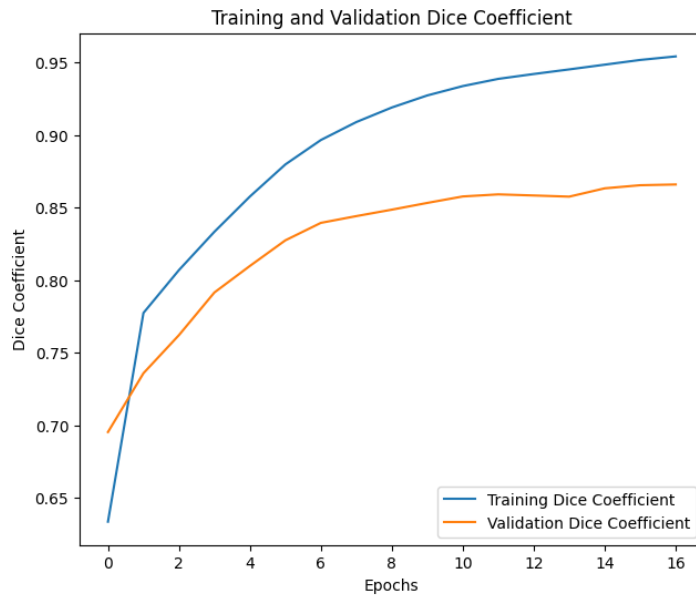
#### 3.4.1 Precisión de la segmentación semántica

Durante el entrenamiento del modelo, se observó que este alcanzó la menor pérdida de validación (Validation Loss) en la época 12 (índice 11) como se aprecia en la Figura 34. En las siguientes épocas no se logró un menor valor, por lo que este número fue utilizado para determinar la época en la que se obtuvo la mayor precisión del modelo de segmentación semántica.



**Figura 34.** Pérdida de entrenamiento y validación

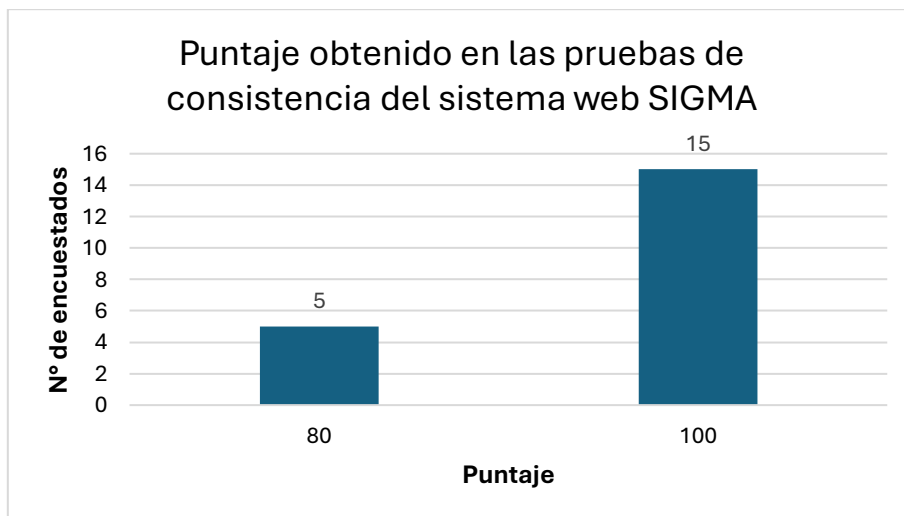
Al revisar la gráfica de la métrica de coeficiente de Sørensen-Dice que se muestra en la Figura 35, se observa que en la época 12 el valor de la métrica fue de 0.8591. Es decir, el nivel de precisión de la segmentación semántica logrado fue del 85.91%. Por lo tanto, se cumplió con el criterio de éxito de conseguir una precisión igual o mayor al 85%.



**Figura 35.** Coeficiente de Sørensen-Dice en entrenamiento y validación

### 3.4.2 Consistencia de las estadísticas del dashboard

En la Figura 36, se muestran los puntajes que obtuvieron los participantes al responder el caso práctico de validación de los indicadores del dashboard (cuyas preguntas se encuentran en el Apéndice D). El puntaje más bajo conseguido fue 80/100 y el más alto fue 100/100. Al calcular el promedio de los puntajes logrados por los 20 participantes, se obtuvo una media de 95/100 puntos y una desviación estándar de 8.89 puntos. Por lo tanto, esto significa que el sistema es consistente el 95% del tiempo en las tareas de segmentación semántica y cálculo de indicadores del dashboard. De este modo, se cumplió con creces la meta establecida de lograr un promedio mayor o igual a 80/100 puntos.



**Figura 36.** Consistencia de estadísticas del dashboard

### 3.4.3 Tiempo de ejecución

A continuación, se presentan los tiempos de ejecución de cada una de las tareas que los participantes realizaron en las pruebas con el prototipo funcional. En la tabla 1, se exponen los tiempos en segundos que les tomó a los 20 participantes en completar la tarea “Cargar imagen aérea”. Al realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un promedio de 172.85 segundos (2 minutos y 52.85 segundos) con una desviación estándar de 115.70 segundos (1 minutos y 55.70 segundos).

**Tabla 1.** Tiempos para Cargar imagen aérea

<b>Participante</b>	<b>Tiempo (segundos)</b>
1	283
2	294
3	294
4	30
5	50
6	50
7	50
8	63
9	293
10	70
11	88
12	88
13	90
14	90
15	130
16	285
17	287

18	294
19	313
20	315

En la tabla 2, se detallan los tiempos en segundos que les tomó a los 20 participantes en completar la tarea “Consultar mapa segmentado”. Al realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un promedio de 59.85 segundos con una desviación estándar de 47.44 segundos.

**Tabla 2.** Tiempos para Consultar mapa segmentado

Participante	Tiempo (segundos)
1	5
2	5
3	8
4	9
5	10
6	10
7	12
8	15
9	15
10	85
11	90
12	90
13	90
14	94
15	98
16	100
17	107

18	109
19	115
20	130

En la tabla 3, se comparten los tiempos en segundos que les tomó a los 20 participantes en completar la tarea “Aplicar filtro temático (clases específicas)”. Al realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un promedio de 84.5 segundos (1 minuto y 24.5 segundos) con una desviación estándar de 73.85 segundos (1 minuto y 13.85 segundos).

**Tabla 3.** Tiempos para Aplicar filtro temático (clases específicas)

Participante	Tiempo (segundos)
1	5
2	5
3	5
4	5
5	8
6	8
7	10
8	10
9	15
10	100
11	125
12	125
13	130
14	130
15	154
16	158

17	165
18	167
19	170
20	195

En la tabla 4, se comparten los tiempos en segundos que les tomó a los 20 participantes en completar la tarea “Aplicar filtro temporal”. Al realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un promedio de 65.4 segundos (1 minuto y 5.4 segundos) con una desviación estándar de 50.49 segundos.

**Tabla 4.** Tiempos para Aplicar filtro temporal

Participante	Tiempo (segundos)
1	2
2	8
3	10
4	10
5	10
6	15
7	15
8	15
9	40
10	70
11	80
12	95
13	100
14	105
15	109

16	114
17	120
18	130
19	130
20	130

En la tabla 5, se comparten los tiempos en segundos que les tomó a los 20 participantes en completar la tarea “Interpretar indicador en dashboard”. Al realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un promedio de 85.85 segundos (1 minuto y 25.85 segundos) con una desviación estándar de 71.51 segundos (1 minuto y 11.51 segundos).

**Tabla 5.** Tiempos para Interpretar indicador en dashboard

Participante	Tiempo (segundos)
1	3
2	5
3	10
4	10
5	10
6	15
7	15
8	15
9	30
10	80
11	125
12	130
13	139
14	140

15	145
16	154
17	162
18	164
19	170
20	195

En la tabla 6, se comparten los tiempos en segundos que les tomó a los 20 participantes en completar la tarea “Descargar informe de análisis”. Al realizar los respectivos cálculos, se obtuvo un promedio de 59.95 segundos con una desviación estándar de 23.15 segundos.

**Tabla 6.** Tiempos para Descargar informe de análisis

Participante	Tiempo (segundos)
1	20
2	30
3	30
4	40
5	40
6	40
7	45
8	45
9	50
10	60
11	62
12	65
13	75
14	80

15	80
16	87
17	90
18	90
19	95
20	75

Tras comparar los promedios de tiempos de ejecución antes mencionados, se reveló que ninguno de ellos supera los 5 minutos. Por lo tanto, se cumplió la meta establecida de que cada tarea tenga un tiempo de ejecución promedio menor o igual a 5 minutos.

#### 3.4.4 Errores cometidos

Los tipos de errores más comunes que se presentaron fueron los siguientes:

- Confundir el término “Áreas Verdes” con alguna de las 23 clases específicas.
- Mostrar símbolos raros en las posiciones que iban caracteres especiales como la tilde al ser abierto el informe CSV por ciertos usuarios.
- Confundir el separador de miles con el separador de decimales. En este caso, los usuarios prefieren que no se utilice un separador de miles.
- No observar la aparición de las pestañas de los periodos seleccionados. Para ciertos usuarios les hacía parecer que el filtro temporal no se había aplicado.

Sin embargo, los usuarios que experimentaron uno o varios de estos errores, al reintentar la respectiva tarea la pudieron completar exitosamente. Por lo tanto, la tasa de éxito de ejecución de las tareas planificadas fue del 100% superando así la meta establecida del 90%.

#### 3.4.5 Comentarios de los usuarios

Durante la manipulación del prototipo funcional, los usuarios destacaron las fortalezas que posee el sistema, pero también expusieron posibles áreas de mejora para que la interacción sea aún más amigable. En cuanto a las fortalezas, se mencionó primero que la disposición de las

secciones de la interfaz favoreció la rápida comprensión de la mayoría de estas. Segundo, vieron útil la posibilidad de aplicar tanto filtros temporales como temáticos (clases específicas) y luego ver en tiempo real cómo cambia la máscara de segmentación mostrada en el mapa en función de los filtros aplicados. Tercero, les agradó que el dashboard contenga la cobertura de las áreas verdes y de cada clase particular expresada en porcentaje cuando se tiene que comparar entre varios meses. Por último, estuvieron de acuerdo que los informes PDF y CSV respeten los filtros que se habían aplicado en el sistema web.

En cambio, en cuanto a las áreas de mejora se indicó primero cambiar el cronómetro por un temporizador que muestre el tiempo restante estimado para finalizar el procesamiento de la imagen subida. Segundo, agregar la vista satelital del mapa para comparar las zonas originales con las clasificadas en la máscara segmentada. Tercero, incluir una opción que agrupe las 23 clases específicas en unas 5 o 6 categorías generales tanto en los filtros temáticos como en el dashboard. Cuarto, añadir la opción de expresar las áreas de las clases en metros cuadrados o hectáreas. Quinto, permitir que se pueda modificar el color de las clases específicas. Sexto, ubicar la barra de estado dentro de la pantalla en vez de al final del contenido del sitio web. Para finalizar, habilitar en el mapa la selección de una subregión de la máscara para que las comparaciones entre periodos sean más equitativas y coherentes.

## Capítulo 4

## 4.1 Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo del sistema SIGMA representa un avance significativo para la gestión territorial de la ESPOL, al transformar la carencia de un inventario digital en una herramienta tecnológica que permite la toma de decisiones basada en evidencia geoespacial. La importancia de este trabajo radica en su capacidad para integrar aprendizaje profundo y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo preciso de los 6.5 millones de metros cuadrados del campus Gustavo Galindo Velasco. A diferencia de herramientas comerciales como Google Earth Engine, esta solución ofrece un nivel más fino de detalle, ideal para la infraestructura de la universidad. Esto permite tener el control total de la información y entrenar modelos diseñados específicamente para las necesidades del campus.

### 4.1.1 Conclusiones

Después de seguir todos los pasos de la propuesta y probar cómo funciona el prototipo, se llegó a las siguientes conclusiones principales:

- Se logró procesar las imágenes aéreas usando algoritmos de segmentación semántica (específicamente la red neuronal U-Net), alcanzando una precisión mayor al 85%. Esto significa que el sistema identificó correctamente las zonas verdes y los tipos de suelo al compararlos con lo que realmente hay en el terreno.
- Se creó y puso en marcha con éxito la plataforma web interactiva SIGMA. Para ello, se utilizaron herramientas como Angular (para la interfaz), FastAPI (para el manejo de datos) y Leaflet (para los mapas), lo que permite a los usuarios de la institución ver capas de mapas y consultar las imágenes segmentadas de manera rápida y sencilla.
- Las pruebas funcionales confirmaron que el sistema permite al rol del Analista Geoespacial completar tareas básicas en un tiempo promedio menor a 5 minutos y lograr una tasa de éxito superior al 90% en la exploración de datos.
- El dashboard estadístico demostró ser una herramienta que genera información de manera consistente, permitiendo que más del 80% de los evaluadores obtuviera

valores idénticos de porcentaje de cobertura, distribución espacial y evolución temporal en los indicadores al analizar las mismas imágenes aéreas.

#### ***4.1.2 Recomendaciones***

Tras culminar lo planificado en la propuesta, se obtienen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y la mejora continua del sistema:

- Se recomienda ampliar el alcance del sistema integrando un módulo de captura automatizada, que permita la conexión directa con la infraestructura de vuelo de los drones para agilizar la carga de archivos .tiff.
- Para futuras investigaciones, es necesario fortalecer la robustez del modelo de segmentación ante condiciones atmosféricas adversas o sombras intensas, factores que fueron identificados como limitaciones que podrían afectar la precisión en variaciones estacionales.
- Se sugiere implementar funcionalidades de edición manual de mapas dentro de la plataforma, permitiendo al analista corregir posibles errores de la IA y retroalimentar el modelo para re-entrenamientos futuros.

## Bibliografía

- [1] Z. Barnett-Itzhaki *et al.*, “Strategies and challenges for green campuses,” 2025, *Frontiers Media SA*. doi: 10.3389/frsc.2025.1469274.
- [2] M. Vashist, T. V. Kumar, and S. K. Singh, “A comprehensive review of urban vegetation as a Nature-based Solution for sustainable management of particulate matter in ambient air,” Apr. 01, 2024, *Springer*. doi: 10.1007/s11356-024-33089-0.
- [3] J. Llodrà-Llabrés and P. Cariñanos, “Enhancing pollination ecosystem service in urban green areas: An opportunity for the conservation of pollinators,” *Urban For. Urban Green.*, vol. 74, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ufug.2022.127621.
- [4] Interempresas, “El impacto de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) en la gestión urbana y ambiental,” Interempresas. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: [https://www.interempresas.net/Smart\\_Cities/Articulos/579863-impacto-de-Sistemas-de-Informacion-Geografica-\(GIS\)-en-gestion-urbana-y-ambiental.html](https://www.interempresas.net/Smart_Cities/Articulos/579863-impacto-de-Sistemas-de-Informacion-Geografica-(GIS)-en-gestion-urbana-y-ambiental.html)
- [5] Geoinnova, “Los SIG y la gestión del Medio Ambiente,” Geoinnova. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://geoinnova.org/blog-territorio/los-sig-aplicados-al-medio-ambiente/>
- [6] ESPOL, “Entorno e infraestructura | Sostenibilidad ESPOL,” Sostenibilidad ESPOL. Accessed: Oct. 09, 2025. [Online]. Available: <https://sostenibilidad.espol.edu.ec/entorno-e-infraestructura>
- [7] BibLus, “SIG Medio Ambiente: análisis, aplicaciones y prácticas,” BibLus. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://biblus.accasoftware.com/es/sig-medio-ambiente-analisis-aplicaciones-y-practicas/>
- [8] Universidad Técnica Particular de Loja, “La geoinformación es la clave para la planificación territorial con innovación tecnológica | Blog,” UTPL Blog. Accessed: Oct.

- 09, 2025. [Online]. Available: <https://noticias.utpl.edu.ec/la-geoinformacion-es-la-clave-para-la-planificacion-territorial-con-innovacion-tecnologica>
- [9] R. Kaplan and S. Kaplan, *The Experience of Nature A Psychological Perspective*, First. Cambridge, 1989.
- [10] A. Bressane, A. I. S. Loureiro, L. C. de C. Medeiros, R. G. Negri, and A. P. G. Goulart, “Overcoming Barriers to Managing Urban Green Spaces in Metropolitan Areas: Prospects from a Case Study in an Emerging Economy,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.3390/su16167019.
- [11] C. Matyukira and P. Mhangara, “Advances in vegetation mapping through remote sensing and machine learning techniques: a scientometric review,” 2024, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/22797254.2024.2422330.
- [12] M. Başeğmez, A. Doğan, and C. C. Aydın, “Management of sustainable urban green spaces through machine learning–supported MCDM and GIS integration,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, no. 18, pp. 11466–11487, Apr. 2025, doi: 10.1007/s11356-025-36367-7.
- [13] A. Agustiyara, D. Mutiarin, A. Nurmandi, A. N. Kasiwi, and M. F. Ikhwalı, “Mapping Urban Green Spaces in Indonesian Cities Using Remote Sensing Analysis,” *Urban Science*, vol. 9, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.3390/urbansci9020023.
- [14] E. Alba *et al.*, “Advances in Semi-Arid Grassland Monitoring: Aboveground Biomass Estimation Using UAV Data and Machine Learning,” *Grasses*, Nov. 2025.
- [15] MapBiomias, ecociencia, and RAISG, “MapBiomias Ecuador,” Home. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://ecuador.mapbiomas.org/>
- [16] Ministerio de Agricultura y Ganadería tiene el Sistema de Información Pública Agropecuaria, “Geoportal del Agro Ecuatoriano,” Visor Geográfico. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>

- [17] P. A. Burrough and R. A. Mcdonnell, “Principles of Geographical Information Systems,” 1998.
- [18] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer, and J. W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation*, Seventh. Hoboken, 2015.
- [19] J. B. Campbell and R. H. Wynne, *Introduction to Remote Sensing*, Fifth. New York, 2011. [Online]. Available: [www.GISman.ir](http://www.GISman.ir)
- [20] V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, “SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 12, pp. 2481–2495, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2644615.
- [21] L. Ma, Y. Liu, X. Zhang, Y. Ye, G. Yin, and B. A. Johnson, “Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review,” Jun. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015.
- [22] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Springer Verlag, 2015, pp. 234–241. doi: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28.
- [23] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrel, “Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation,” *UC Berkeley*, 2015.
- [24] L. C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, “Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Springer Verlag, 2018, pp. 833–851. doi: 10.1007/978-3-030-01234-2\_49.
- [25] GeoSolutions, GeoCat BV, AfriGIS, and Camptocamp, “GeoServer,” Home. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://geoserver.org/>

- [26] PostGIS PSC and OSGeo, “PostGIS,” Home. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online].  
Available: <https://postgis.net/>
- [27] V. Agafonkin and OpenStreetMap, “Leaflet - a JavaScript library for interactive maps,”  
Overview. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://leafletjs.com/>
- [28] OpenLayers, “OpenLayers - Welcome,” Home. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online].  
Available: <https://openlayers.org/>
- [29] P. Kruchten, “Architectural Blueprints-The ‘4+1’ View Model of Software Architecture,”  
1995.

## **APÉNDICES**

## Apéndice A. Historias de Usuario

Identificador (ID) de la Historia	Enunciado de la Historia			Criterios de Aceptación				
	Rol	Característica / Funcionalidad	Razón / Resultado	Número (#) de Escenario	Criterio de Aceptación (Título)	Contexto	Evento	Resultado / Comportamiento esperado
HU-001-SEGMENTACION	Como analista geoespacial	Necesito subir imágenes aéreas previamente capturadas para procesarlas mediante segmentación	Con la finalidad de generar mapas clasificados según el uso del suelo.	1	Imagen válida	La imagen cumple con el formato y resolución requeridos.	Cuando el analista sube la imagen al sistema.	El sistema acepta la imagen y la envía al módulo de segmentación.
				2	Imagen con formato incorrecto	La imagen no cumple con el formato requerido (.tiff).	Cuando el analista intenta subir la imagen.	El sistema muestra un mensaje de error indicando el formato no permitido.
HU-002-VISUALIZACION	Como analista geoespacial	Necesito visualizar los mapas segmentados en la plataforma web.	Para evaluar la distribución de zonas verdes y tomar decisiones de mantenimiento.	1	Mapa disponible	El sistema ya procesó la imagen y generó el mapa.	Cuando el analista accede al panel de visualización.	El sistema muestra el mapa segmentado con capas interactivas.
				2	Mapa no disponible	No se ha procesado ninguna imagen aún.	Cuando el analista accede al panel de visualización.	El sistema muestra un mensaje indicando que no hay mapas disponibles.
HU-003-FILTRO-CLASES	Como analista geoespacial	Necesito filtrar las clases observadas en los mapas segmentados (áreas verdes, edificios, calles, parqueaderos,	Para analizar con mayor detalle zonas específicas según su uso del suelo.	1	Filtrado por clase activa	El analista selecciona una clase específica en el panel de filtros.	Cuando el analista activa el filtro de clase 'áreas verdes'.	El sistema oculta las demás clases y muestra únicamente las áreas verdes en el mapa.
				2	Sin clases seleccionadas	El analista no ha activado ningún filtro de clase.	Cuando accede al mapa sin aplicar filtros.	El sistema muestra todas las clases segmentadas por defecto.
HU-004-FILTRO-TEMPORAL	Como analista geoespacial	Necesito filtrar los mapas disponibles por periodo de tiempo.	Para comparar la evolución de las áreas verdes entre distintos meses.	1	Filtrado por mes específico	El analista selecciona 'Octubre 2025' en el filtro temporal.	Cuando aplica el filtro de fecha.	El sistema muestra únicamente los mapas correspondientes a Octubre 2025.
				2	Sin filtro temporal aplicado	El analista no ha seleccionado ningún periodo.	Cuando accede al panel de mapas.	El sistema muestra todos los mapas disponibles sin restricción temporal.
HU-005-INFORME	Como analista geoespacial	Necesito descargar un informe técnico en formato CSV y/o PDF con los resultados de la segmentación.	Para documentar los hallazgos y compartirlos con unidades administrativas.	1	Informe generado correctamente	La segmentación se completó sin errores.	Cuando el analista solicita la descarga del informe.	El sistema muestra una ventana donde se elige el formato a generar y descarga el informe con los datos clasificados.
				2	Error en la generación del informe	La segmentación presenta inconsistencias o datos faltantes.	Cuando el analista solicita la descarga del informe.	El sistema muestra un mensaje indicando que no se puede generar el informe.

Firma:



Ph. D. María Fernanda Calderón Vega

Cienta

## Apéndice B. Protocolo de aplicación de pruebas de usuario

### 1. Objetivo general de la sesión

El propósito de las pruebas de usuario es evaluar de manera integral el desempeño del sistema SIGMA en tres dimensiones clave:

- **Precisión técnica** de la segmentación semántica.
- **Usabilidad de la plataforma web**, medida en tiempos de ejecución y errores cometidos durante las tareas.
- **Consistencia de las estadísticas del dashboard**, que evalúa la capacidad de generar los mismos resultados a lo largo de varios intentos.

### 2. Duración estimada y condiciones del entorno

- **Duración total de cada sesión:** entre 15 y 20 minutos.
- **Condiciones del entorno:**
  - Sala equipada con computadores de escritorio o portátiles con acceso estable a internet.
  - Supervisión permanente de los evaluadores para garantizar el cumplimiento del protocolo.
  - Ambiente controlado que minimice interrupciones externas y asegure la concentración de los participantes.

### 3. Secuencia general de la sesión

#### 3.1 Bienvenida e introducción:

- Presentación breve del sistema SIGMA y de los objetivos de la sesión.
- Explicación de las reglas básicas de participación.

#### 3.2. Explicación de las tareas:

- El facilitador describe cada escenario de prueba y las acciones esperadas.
- Se aclaran dudas iniciales de los participantes.

#### 3.3. Ejecución de pruebas:

- Los participantes realizan las tareas definidas en la plataforma.
- El observador registra tiempos de ejecución, errores cometidos y tasa de éxito.

#### 3.4 Cierre con entrevista breve:

- Se recogen impresiones generales sobre la interacción.
- Se documentan comentarios cualitativos sobre fortalezas y áreas de mejora.

### 4. Roles de los evaluadores

- **Facilitador:**
  - Explica las tareas y guía el inicio de cada prueba.

- Responde dudas iniciales, sin intervenir en la ejecución.
- **Observador:**
  - Registra tiempos de ejecución, número y tipo de errores, y tasa de éxito en cada tarea.
  - Documenta comportamientos relevantes (dudas, bloqueos, estrategias espontáneas).

## 5. Escenarios de prueba definidos

Los participantes deberán completar las siguientes tareas en la plataforma SIGMA:

1. Cargar una imagen aérea.
2. Consultar un mapa segmentado.
3. Aplicar un filtro temporal.
4. Aplicar un filtro temático (clases específicas).
5. Interpretar un indicador en el dashboard.
6. Descargar el informe de análisis.

## 6. Resultados esperados

- **Tiempos de ejecución:** las tareas básicas deben completarse en  $\leq 5$  minutos en promedio.
- **Tasa de éxito:** al menos el 90 % de las tareas deben ser completadas exitosamente por los participantes.
- **Errores:** los errores cometidos deben ser mínimos y no impedir la finalización de las tareas.
- **Consistencia de las estadísticas del dashboard:** los participantes deben obtener los mismos resultados en al menos el 80% del tiempo. Para ello, deberán haber conseguido un promedio igual o mayor a 80/100 en el caso práctico del dashboard.

## Apéndice C. Guía de observación para evaluadores

Enlace al formulario: <https://forms.gle/azqHvAXbqyTKSS5S6>

Este formulario se utiliza para registrar el desempeño por tarea, indicadores de comportamiento observados y comentarios emitidos por los participantes durante la ejecución de las pruebas del prototipo funcional.

*\* Indica que la pregunta es obligatoria*

---

### 1. Fecha de la sesión \*

*Ejemplo: 7 de enero del 2019*

### Tarea – Cargar imagen aérea

Como analista geoespacial necesito subir imágenes aéreas previamente capturadas para procesarlas mediante segmentación semántica con la finalidad de generar mapas clasificados según el uso del suelo.

### 2. Tiempo de ejecución (minutos/segundos) \*

### 3. Tipo de errores cometidos

*Selecciona todos los que correspondan.*

- Seleccionar un archivo con formato no compatible (ej. JPG en lugar de GeoTIFF).
- Intentar cargar un archivo demasiado pesado que exceda el límite permitido.
- No ubicar correctamente el botón de carga en la interfaz.
- Interrumpir el proceso antes de que finalice (cerrar ventana, refrescar página).
- Confundir la carpeta o elegir un archivo equivocado.
- No esperar la confirmación de carga y pasar a la siguiente tarea.
- Otro: \_\_\_\_\_

4. **Observaciones sobre dificultades técnicas/patrones de interacción**

---

---

---

---

---

5. **¿La tarea fue completada exitosamente? \***

*Marca solo un óvalo.*

Sí

No

**Tarea – Consultar mapa segmentado**

Como analista geoespacial necesito visualizar los mapas segmentados en la plataforma web para evaluar la distribución de zonas verdes y tomar decisiones de mantenimiento.

6. **Tiempo de ejecución (minutos/segundos) \***

---

7. **Tipo de errores cometidos**

*Selecciona todos los que correspondan.*

- No encontrar la opción de visualización.
- No visualizar el mapa segmentado.
- Error al aplicar zoom o desplazamiento.
- Cerrar la vista antes de interpretar resultados.

Otro: \_\_\_\_\_

8. **Observaciones sobre dificultades técnicas/patrones de interacción**

---

---

---

---

---

9. **¿La tarea fue completada exitosamente? \***

*Marca solo un óvalo.*

Sí

No

**Tarea – Aplicar filtro temático (clases específicas)**

Como analista geoespacial necesito filtrar las clases observadas en los mapas segmentados (áreas verdes, edificios, calles, parqueaderos, etc.) para analizar con mayor detalle zonas específicas según su uso del suelo.

10. **Tiempo de ejecución (minutos/segundos) \***

---

11. **Tipo de errores cometidos**

*Selecciona todos los que correspondan.*

- Escoger clase equivocada
- No activar correctamente el filtro.
- Confundir símbolos o colores de las clases.
- Intentar aplicar múltiples filtros sin limpiar anteriores.
- Otro: \_\_\_\_\_

12. **Observaciones sobre dificultades técnicas/patrones de interacción**

---

---

---

---

---

13. **¿La tarea fue completada exitosamente? \***

*Marca solo un óvalo.*

Sí

No

**Tarea – Aplicar filtro temporal**

Como analista geoespacial necesito filtrar los mapas disponibles por periodo de tiempo para comparar la evolución de las áreas verdes entre distintos meses.

14. **Tiempo de ejecución (minutos/segundos) \***

---

15. **Tipo de errores cometidos**

*Selecciona todos los que correspondan.*

Seleccionar rango de meses incorrecto.

No aplicar el filtro después de elegirlo.

Confundir el orden cronológico.

Restablecer filtros sin intención.

Otro: \_\_\_\_\_

16. **Observaciones sobre dificultades técnicas/patrones de interacción**

---

---

---

---

---

17. **¿La tarea fue completada exitosamente? \***

*Marca solo un óvalo.*

Sí

No

**Tarea – Interpretar indicador en dashboard**

Como analista geoespacial necesito interpretar correctamente los indicadores estadísticos del dashboard para tomar decisiones informadas sobre la gestión de áreas verdes, priorizar intervenciones y justificar acciones institucionales de manera clara y objetiva.

18. **Tiempo de ejecución (minutos/segundos) \***

---

19. **Tipo de errores cometidos**

*Selecciona todos los que correspondan.*

- Leer mal el porcentaje de cobertura.
- Confundir evolución temporal con distribución espacial.
- No identificar correctamente la clase representada.
- Otro: \_\_\_\_\_

20. **Observaciones sobre dificultades técnicas/patrones de interacción**

---

---

---

---

---

21. **¿La tarea fue completada exitosamente? \***

*Marca solo un óvalo.*

Sí

No

**Tarea – Descargar informe de análisis**

Como analista geoespacial necesito descargar un informe técnico en formato CSV y/o PDF con los resultados de la segmentación para documentar los hallazgos y compartirlos con unidades administrativas.

22. **Tiempo de ejecución (minutos/segundos) \***

---

23. **Tipo de errores cometidos**

*Selecciona todos los que correspondan.*

- No ubicar el botón u opción de descarga en la interfaz.
- Seleccionar un formato incorrecto (ej. CSV en lugar de PDF, o viceversa).
- Interrumpir el proceso antes de que finalice (cerrar ventana, refrescar página).
- Visualizar un archivo vacío o incompleto al finalizar la decarga.
- No verificar que el contenido del informe corresponde a la segmentación solicitada.
- Otro: \_\_\_\_\_

24. **Observaciones sobre dificultades técnicas/patrones de interacción**

---

---

---

---

---

25. **¿La tarea fue completada exitosamente? \***

*Marca solo un óvalo.*

Sí

No

## Apéndice D. Caso práctico para validar los indicadores del dashboard

Enlace al formulario: <https://forms.gle/N7WuCfcWeEMq5LK78>

Este formulario busca evaluar si el dashboard de SIGMA muestra correctamente los datos derivados de las imágenes aéreas capturadas por drones. Lea cada pregunta y seleccione la opción que corresponda según la información presentada en el dashboard.

\* Indica que la pregunta es obligatoria

---

1. ¿Cuál fue el porcentaje general de Áreas Verdes en **Noviembre 2025**? \* 20 puntos

Marca solo un óvalo.

- 65.83 %
- 53.76 %
- 33.98 %
- 28.96 %

2. En **Diciembre 2025**, ¿cuál fue el área en m<sup>2</sup> correspondiente a la clase **Césped**? \* 20 puntos

Marca solo un óvalo.

- 6,601.97 m<sup>2</sup>
- 4,982.95 m<sup>2</sup>
- 6,277.57 m<sup>2</sup>
- 1,964.61 m<sup>2</sup>

3. Comparando ambos períodos, ¿qué **tendencia** se observa en el **porcentaje general de Áreas Verdes** según el dashboard? \* 20 puntos

Marca solo un óvalo.

- Se mantuvo estable: 65.83 % en noviembre y 65.83 % en diciembre
- Aumentó: 53.76 % en noviembre y 65.83 % en diciembre
- Disminuyó: 65.83 % en noviembre y 53.76 % en diciembre
- No se registraron datos en ninguno de los períodos

4. En **Noviembre 2025**, ¿cuál fue el área en m<sup>2</sup> correspondiente a la clase **Vegetación**? \* 20 puntos

*Marca solo un óvalo.*

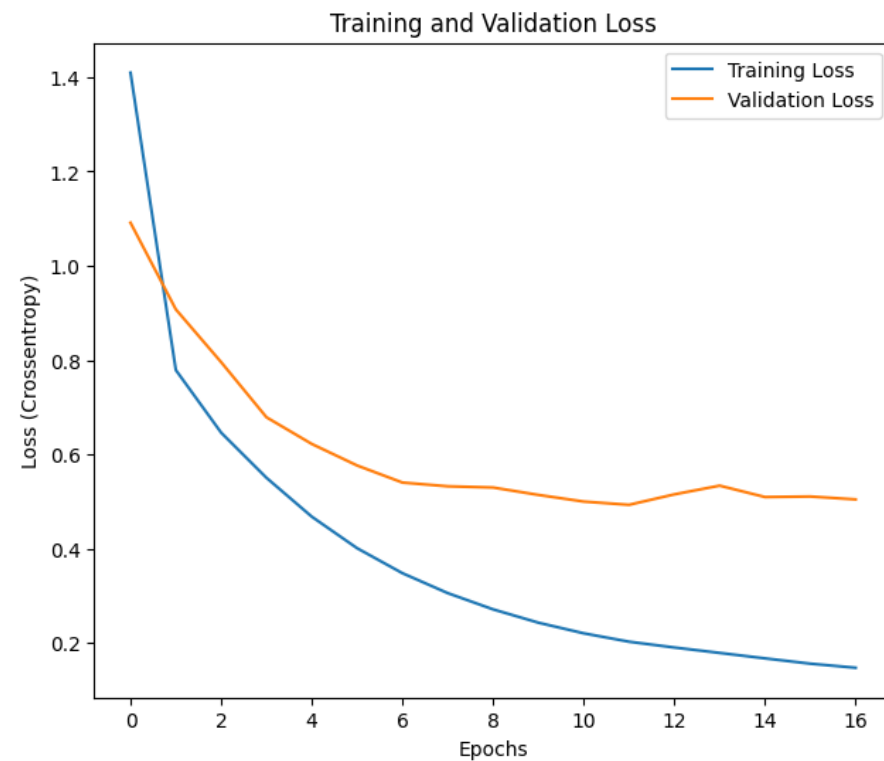
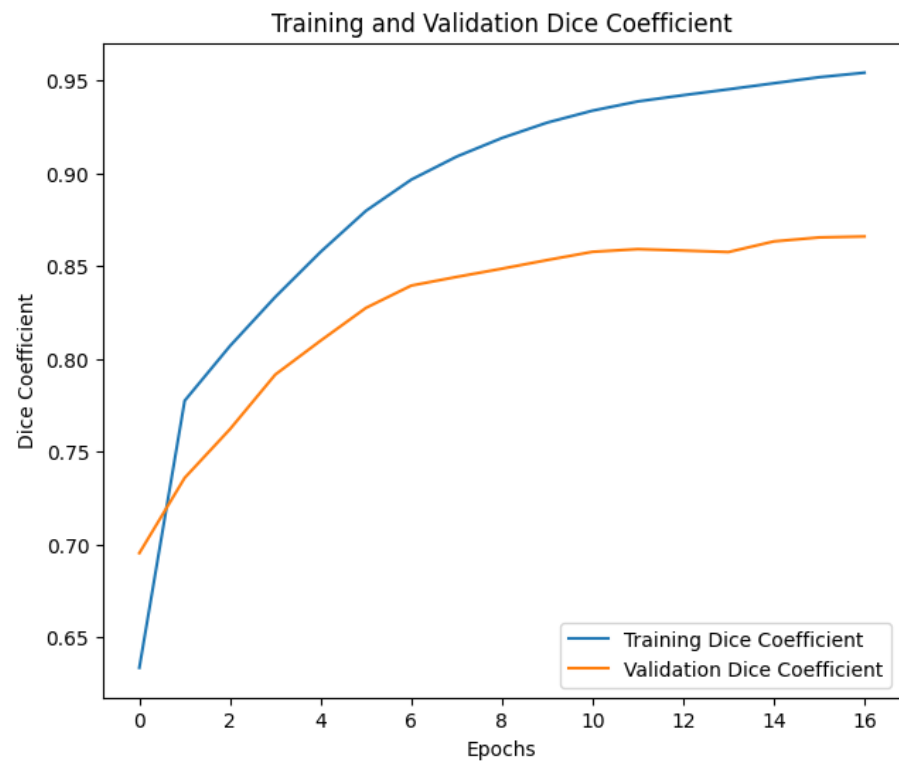
- 9,710.84 m<sup>2</sup>
- 8,614.78 m<sup>2</sup>
- 7,252.97 m<sup>2</sup>
- 964.92 m<sup>2</sup>

5. En general, ¿Cuál fue el área total analizada en **Diciembre 2025**? \* 20 puntos

*Marca solo un óvalo.*

- 28,574.58 m<sup>2</sup>
- 22,794.77 m<sup>2</sup>
- 18,809.65 m<sup>2</sup>
- 12,253.46 m<sup>2</sup>

## Apéndice E. Instrumento para medir precisión de segmentación



## Apéndice F. Formato de entrevista breve de salida

**Enlace al formulario:** <https://forms.gle/azqHvAXbqyTKSS5S6> (las preguntas de la entrevista de salida están en la última sección del formulario)

**Objetivo:** Recoger impresiones finales sobre fortalezas y áreas de mejora del prototipo funcional SIGMA.

### 26. ¿Qué tarea resultó más fácil/sencilla?

*Marca solo un óvalo.*

- Cargar imagen aérea
- Consultar mapa segmentado
- Aplicar filtro temporal
- Aplicar filtro temático (clases específicas)
- Interpretar indicador en el dashboard
- Descargar informe de análisis

### 27. ¿Qué tarea resultó más difícil/complicada?

*Marca solo un óvalo.*

- Cargar imagen aérea
- Consultar mapa segmentado
- Aplicar filtro temporal
- Aplicar filtro temático (clases específicas)
- Interpretar indicador en el dashboard
- Descargar informe de análisis

28. **¿Qué información del dashboard le resultó más útil para tomar decisiones?**

*Selecciona todos los que correspondan.*

- Porcentaje de cobertura
- Evolución temporal
- Distribución espacial
- Otro: \_\_\_\_\_

29. **¿Qué mejoras recomendaría para facilitar la interacción?**

---

---

---

---

---