

SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL ARÁNDANO BILOXI MEDIANTE TERMOGRAFÍA DE BAJO COSTO

AUTOR(ES)

Juan Esteban Fuentes Rojas

Gabriel Esteban Martinez Roldan

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sistemas y Computación

Facatativá, Noviembre 2025

SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO EN EL ARÁNDANO BILOXI MEDIANTE TERMOGRAFÍA DE BAJO COSTO

AUTOR(ES)

Directora: Ing. Gina Maribel Valenzuela Sabogal

Juan Esteban Fuentes Rojas

Gabriel Esteban Martinez Roldan

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS Y TECNOLOGÍA DE FACATATIVÁ
(GISTFA)**

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sistemas

Facatativá, Noviembre 2025

Dedicatoria

Texto de la dedicatoria...

Agradecimientos

Texto de los agradecimientos...

Resumen

La producción de arándano, especialmente de la variedad Biloxi, está en expansión en el altiplano cundiboyacense (Quintana, 2020). Sin embargo, este cultivo presenta una alta sensibilidad a la disponibilidad de agua debido a su sistema radicular superficial, lo que lo hace vulnerable al estrés hídrico y puede comprometer significativamente el rendimiento y la calidad de la fruta (Morales, 2017). La termografía infrarroja (IRT) es una técnica no invasiva que permite monitorear el estado fisiológico de las plantas. Su principio se basa en que el estrés hídrico provoca un cierre estomático que reduce la transpiración, causando un aumento en la temperatura de la superficie foliar detectable con cámaras térmicas (García Tejero et al., 2015). A pesar de su potencial, el alto costo de los equipos comerciales ha limitado su adopción generalizada. Este proyecto de investigación propone el desarrollo de un sistema de bajo costo para la detección temprana de estrés hídrico en el arándano Biloxi. El objetivo es diseñar y construir una herramienta que capture y procese datos termográficos, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas sobre el manejo del riego. Con ello se busca optimizar el uso del agua, minimizar las pérdidas económicas asociadas al estrés hídrico y fomentar prácticas agrícolas más sostenibles. Para el desarrollo del proyecto se empleará una metodología de investigación mixta, combinando el análisis cuantitativo de los datos termográficos con la observación cualitativa del estado de las plantas. Adicionalmente, la construcción del sistema se gestionará bajo el marco de trabajo ágil Scrum, lo que permitirá un desarrollo iterativo y adaptable a las necesidades del proyecto.

Palabras clave: Termografía, Estrés Hídrico, Arándano Biloxi

Abstract

Blueberry production, especially of the Biloxi variety, is expanding in the Cundiboyacense highlands (Quintana, 2020). However, this crop is highly sensitive to water availability due to its shallow root system, which makes it vulnerable to water stress and can significantly compromise fruit yield and quality (Morale2017). Infrared thermography (IRT) is a non-invasive technique that allows the physiological state of plants to be monitored. Its principle is based on the fact that water stress causes stomatal closure, which reduces transpiration, causing an increase in leaf surface temperature that can be detected with thermal cameras (García Tejero et al., 2015). Despite its potential, the high cost of commercial equipment has limited its widespread adoption. This research project proposes the development of a low-cost system for the early detection of water stress in Biloxi blueberries. The objective is to design and build a tool that captures and processes thermographic data, allowing farmers to make informed decisions about irrigation management. The aim is to optimize water use, minimize economic losses associated with water stress, and promote more sustainable agricultural practices. A mixed research methodology will be used to develop the project, combining quantitative analysis of thermographic data with qualitative observation of plant condition. In addition, the construction of the system will be managed under the agile Scrum framework, which will allow for iterative development that can be adapted to the needs of the project.

Keywords: Water stress, Biloxi blueberry, Thermography.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	V
Lista de Tablas	IX
Lista de Figuras	XII
Lista de Anexos	XIII
Introducción	XIV
1 INFORME DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Estado del Arte	1
1.2 Línea de Investigación	1
1.3 Planteamiento del Problema y Pregunta de Investigación	1
1.4 Objetivo General y Objetivos Específicos	3
1.4.1 Objetivo General	3
1.4.2 Objetivos Específicos	3
1.5 Alcance e Impacto del Proyecto	3
1.6 Metodología	4
1.6.1 Metodología de Investigación	4
1.6.2 Metodología de Desarrollo	5
1.7 Marcos de Referencia	6
1.7.1 Marco Teórico	6
1.7.2 Marco Legal	6
2 DOCUMENTACIÓN SOFTWARE	7
2.1 Plan de Proyecto	7
2.2 Arquitectura del Software	7
2.2.1 Desarrollo del Frontend	7

2.2.2	Desarrollo del Backend	7
2.2.3	Integración Frontend-Backend	8
2.3	Determinación de Requerimientos	8
2.4	Especificación del Diseño	14
2.4.1	Modelo de Entidad-Relación (MER)	14
2.4.2	Diagramas de Casos de Uso	19
2.4.3	Diagramas de Secuencia	34
2.4.4	Diagramas de Actividades	64
2.4.5	Diagrama de Clases	95
2.4.6	Diagrama de Despliegue	95
2.5	Diseño de los Casos de Prueba	97
2.6	Estimación de Recursos	97
2.7	Resultados de la Implementación del Software	97
2.8	Conclusiones y Recomendaciones del software	98
3	DOCUMENTACIÓN HARDWARE	99
3.1	Introducción	99
3.2	Objetivos	99
3.3	Descripción de Componentes	99
3.3.1	Microcontrolador ESP32-S3-WROOM-1 N16R8	99
3.3.2	Cámara termográfica MLX90640	100
3.3.3	Sensor de luz BH1750	100
3.3.4	Sensor de humedad y temperatura DHT22	100
3.3.5	Cámara RGB OV2640	100
3.3.6	Regulador de voltaje LM2596	100
3.4	Metodología de Caracterización	100
3.4.1	Evaluación y verificación de componentes	100
3.4.2	Configuración e Integración del Firmware	101
3.4.3	Validación y Análisis de Resultados	101
3.5	Implementación del Sistema Integrado	102
3.6	Resultados	102
4	Estudio Experimental	103
4.1	Introducción	103
4.2	Objetivos del Estudio Experimental	104

4.2.1	Objetivo General	104
4.2.2	Objetivos Específicos	104
4.3	Materiales y Métodos	105
4.3.1	Arquitectura del Hardware	105
4.3.2	Validación Metrológica del Sensor Térmico	106
4.4	Diseño Experimental	106
4.5	Recolección y Análisis de Datos	107
4.5.1	Recolección de Datos	107
4.5.2	Procesamiento y Análisis de Datos	108
4.6	Resultados	109
5	INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA DETECCIÓN TEMPRANA	111
5.1	Introducción	111
5.2	Objetivos	111
5.3	Preprocesamiento de Datos	112
5.4	Modelos de Inteligencia Artificial Utilizados	112
5.5	Evaluación de Modelos	113
5.6	Resultados	113
6	Resultados y Conclusiones Finales	114
6.1	Respuesta a la Pregunta de Investigación	114
6.2	Discusión General	115
6.2.1	Consecución de los Objetivos Planteados	115
6.2.2	Fortalezas y Limitaciones del Sistema	116
6.2.3	Impacto Potencial	117
6.3	Recomendaciones y Trabajo Futuro	118
6.4	Conclusiones Finales	119
Bibliografía		120
Referencias		120
Anexos		122
A	Código Fuente del Módulo Principal	122
B	Manual de Usuario por Roles	122
C	Manual de Instalación	122
D	Artículos de Resultados de Investigación	122
E	Certificaciones de Ponencias y Controles de Seguimiento	123

Lista de Tablas

1	<i>Requerimiento Funcional RF01: Registro</i>	8
2	<i>Requerimiento Funcional RF02: Inicio de sesión</i>	9
3	<i>Requerimiento Funcional RF03: CRUD cámara</i>	9
4	<i>Requerimiento Funcional RF04: CRUD persona</i>	10
5	<i>Requerimiento Funcional RF05: Módulo de mediciones</i>	10
6	<i>Requerimiento Funcional RF06: Módulo de procesamiento</i>	11
7	<i>Requerimiento Funcional RF07: Reportes</i>	11
8	<i>Requerimiento Funcional RF08: Notificaciones</i>	12
9	<i>Requerimiento Funcional RF09: Gestionar Observaciones</i>	12
10	<i>Requerimiento No Funcional RNF01: Seguridad</i>	13
11	<i>Requerimiento No Funcional RNF02: Copia de seguridad</i>	13

Lista de Figuras

1	Diagrama Entidad-Relación del Sistema.	14
2	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Usuarios (RF1, RF2).	20
3	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Cámaras (RF3).	22
4	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Perfiles (RF4).	24
5	Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Mediciones (RF5).	26
6	Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Plantas (RF6).	28
7	Diagrama de Casos de Uso para la Generación de Reportes (RF7).	30
8	Diagrama de Casos de Uso para las Notificaciones (RF8).	32
9	Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Observaciones (RF9).	33
10	Diagrama de secuencia base: Envío de formulario.	37
11	Diagrama de Secuencia para el Registro (RF1.0).	39
12	Diagrama de Secuencia para Solicitar Código (RF1.1).	40
13	Diagrama de Secuencia para Iniciar Sesión (RF2.0).	41
14	Diagrama de Secuencia para Cerrar Sesión (RF2.1).	41
15	Diagrama de Secuencia para Recuperar Contraseña (RF2.2).	42
16	Diagrama de Secuencia para Crear Cámara (RF3.1).	43
17	Diagrama de Secuencia para Activar Cámara (RF3.1.1).	44
18	Diagrama de Secuencia para Consultar Cámara (RF3.2).	46
19	Diagrama de Secuencia para Editar Cámara (RF3.3).	47
20	Diagrama de Secuencia para Eliminar Cámara (RF3.4).	48
21	Diagrama de Secuencia para Consultar Perfil (RF4.1).	49
22	Diagrama de Secuencia para Editar Perfil (RF4.2).	50
23	Diagrama de Secuencia para Eliminar Perfil (RF4.3).	51
24	Diagrama de Secuencia para Cambiar Contraseña (RF4.4).	52
25	Diagrama de Secuencia para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5).	53
26	Diagrama de Secuencia para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6).	54

27	Diagrama de Secuencia para el Módulo de Mediciones (RF5.0).	55
28	Diagrama de Secuencia para Crear Planta (RF6.1).	55
29	Diagrama de Secuencia para Consultar Planta (RF6.2).	56
30	Diagrama de Secuencia para Editar Planta (RF6.3).	57
31	Diagrama de Secuencia para Eliminar Planta (RF6.4).	58
32	Diagrama de Secuencia para Generar Reporte (RF7.0).	59
33	Diagrama de Secuencia para Descargar Reporte (RF7.1).	59
34	Diagrama de Secuencia para Adjuntar Reporte (RF7.2).	60
35	Diagrama de Secuencia para Notificar Planta (RF8.1).	61
36	Diagrama de Secuencia para Notificar Seguridad (RF8.2).	62
37	Diagrama de Secuencia para Crear Observación (RF9.1).	63
38	Diagrama de Secuencia para Consultar Observación (RF9.1).	63
39	Diagrama de Actividad para el Registro (RF1.0).	66
40	Diagrama de Actividad para Solicitar Código (RF1.1).	67
41	Diagrama de Actividad para Iniciar Sesión (RF2.0).	68
42	Diagrama de Actividad para Cerrar Sesión (RF2.1).	69
43	Diagrama de Actividad para Recuperar Contraseña (RF2.2).	70
44	Diagrama de Actividad para Crear Cámara (RF3.1).	71
45	Diagrama de Actividad para Activar Cámara (RF3.1.1).	72
46	Diagrama de Actividad para Consultar Cámara (RF3.2).	74
47	Diagrama de Actividad para Editar Cámara (RF3.3).	75
48	Diagrama de Actividad para Eliminar Cámara (RF3.4).	76
49	Diagrama de Actividad para Consultar Perfil (RF4.1).	77
50	Diagrama de Actividad para Editar Perfil (RF4.2).	78
51	Diagrama de Actividad para Eliminar Perfil (RF4.3).	79
52	Diagrama de Actividad para Cambiar Contraseña (RF4.4).	80
53	Diagrama de Actividad para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5).	81
54	Diagrama de Actividad para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6).	82
55	Diagrama de Actividad para el Módulo de Mediciones (RF5.0).	83
56	Diagrama de Actividad para Crear Planta (RF6.1).	84
57	Diagrama de Actividad para Consultar Planta (RF6.2).	85
58	Diagrama de Actividad para Editar Planta (RF6.3).	86
59	Diagrama de Actividad para Eliminar Planta (RF6.4).	87

60	Diagrama de Actividad para Generar Reporte (RF7.0).	88
61	Diagrama de Actividad para Descargar Reporte (RF7.1).	89
62	Diagrama de Actividad para Adjuntar Reporte (RF7.2).	90
63	Diagrama de Actividad para Notificar Planta (RF8.1).	91
64	Diagrama de Actividad para Notificar Seguridad (RF8.2).	92
65	Diagrama de Actividad para Crear Observación (RF9.1).	93
66	Diagrama de Actividad para Consultar Observación (RF9.2).	94
67	Diagrama de Despliegue del Sistema.	96
68	Diagrama del prototipo de hardware utilizado en el experimento.	106

Lista de Anexos

1. Anexo A: Título del Anexo A
2. Anexo B: Título del Anexo B

Introducción

Texto de la introducción (2 a 4 páginas).

I. INFORME DE INVESTIGACIÓN

1.1. Estado del Arte

Texto del estado del arte...

1.2. Línea de Investigación

Texto de la línea de investigación...

1.3. Planteamiento del Problema y Pregunta de Investigación

La producción de arándanos está en aumento debido a su alta demanda, siendo la variedad Biloxi la que más se cultiva en el altiplano cundiboyacense según datos de Quintana (2020). Sin embargo, la planta requiere condiciones específicas de temperatura para dar fruto. La falta de estas condiciones la hace susceptible a enfermedades, representando un desafío significativo para los productores. Sin un manejo oportuno, las enfermedades pueden causar la muerte de las plantas, afectando el cultivo y provocando pérdidas económicas. Esto subraya la importancia de una gestión adecuada, reflejada en las exportaciones de frutos del género Vaccinium en Colombia, que alcanzaron los 2,2 millones de dólares, según la Asociación Nacional de Comercio Exterior (ANALDEX, 2022).

Respecto a las enfermedades en plantas (fitopatologías), Quintana afirma que la Botrytis Cinerea es una de las más comunes en el arándano. La Botryotinia Fuckeliana (fase asexuada: Botrytis Cinerea), comúnmente conocida como Botrytis o moho gris, es una enfermedad fúngica que afecta una amplia variedad de plantas, incluyendo la planta de arándano Biloxi (Quintana, 2020). Esta enfermedad es particularmente destructiva en condiciones de alta humedad y temperaturas moderadas, promoviendo la formación de esporas. Los síntomas típicos de la Botrytis incluyen manchas marrones en hojas, flores y frutos, que eventualmente se cubren de un moho gris característico. En las hojas, causa lesiones de color café que comienzan generalmente por el centro de la lámina y se extienden hacia los bordes, produciendo una necrosis extensiva. En condiciones de alta humedad, sobre las lesiones de las hojas se desarrollan las estructuras reproductivas del patógeno (conidióforos y conidios), que dan un aspecto plomizo (grisáceo o plateado) en los tejidos (Morales, et al. 2017).

Una técnica no invasiva ampliamente utilizada en agricultura para monitorear la salud de las plantas es la termografía infrarroja (IRT), permitiendo además gestionar el riego, detectar enfermedades y estimar la producción (Dong et al., 2024; Aux et al., 2022). Esta herramienta es fundamental para avanzar hacia una agricultura más automatizada, precisa y sostenible, permitiendo supervisar el estrés térmico en cultivos y analizar el impacto de patógenos en la transpiración de las plantas. Aunque la investigación demuestra que la IRT está superando sus limitaciones y se está convirtiendo en un método robusto, confiable y económico para determinar el estado hídrico de las plantas y detectar el estrés (Pineda et al., 2020), su alto costo actual restringe su uso principalmente a grupos de investigación y empresas especializadas (García Tejero et al., 2015).

Teniendo en cuenta las afectaciones de la Botrytis a los cultivos de arándano, es crucial explorar métodos no invasivos como la termografía. Si la termografía permite hacer una detección temprana de esta enfermedad se podría mejorar la gestión de la salud del cultivo y reducir las pérdidas. Lo cual plantea la pregunta, ¿Cómo desarrollar un sistema para aproximar la detección temprana de

Botrytis Cinerea en plantas de arándanos Biloxi mediante hardware de bajo costo?

1.4. Objetivo General y Objetivos Específicos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema basado en termografía infrarroja (IRT) y hardware de bajo costo para la detección del estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Identificar y documentar los requisitos funcionales y no funcionales del sistema.
2. Modelar la arquitectura del sistema mediante la creación de diagramas UML.
3. Integrar el hardware del módulo termográfico para la recolección de datos.
4. Desarrollar el software que recolecte los datos del módulo termográfico para su posterior procesamiento.
5. Evaluar la generación de un reporte de estado hídrico que diferencie entre plantas de arándano Biloxi con riego óptimo y con déficit, a partir de los datos recopilados por el sistema.

1.5. Alcance e Impacto del Proyecto

El presente proyecto busca ser un apoyo a la producción de arándanos a través de la implementación de tecnologías de precisión, como la termografía, para monitorear y gestionar la salud de los cultivos. Esto podría permitir a los agricultores minimizar las perdidas en los cultivos y poder “satisfacer los desafíos de seguridad alimentaria local, regional y global del siglo XXI” (Vargas Q. & Best

S., 2021). La agricultura de precisión, apoyada en tecnologías como la termografía, es fundamental para una producción más sostenible, ya que permite optimizar el uso de recursos críticos como el agua (Pineda et al., 2021). La capacidad de monitorear el estado hídrico de las plantas en tiempo real posibilita una gestión del riego más eficiente, aplicando agua solo cuando y donde es realmente necesario (García Tejero et al., 2015). Este enfoque no solo promueve la conservación del recurso hídrico, sino que también contribuye a que los agricultores sean más resilientes y competitivos (Dong et al., 2024). Este proyecto está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente con el ODS 9, que busca promover la inversión en infraestructura y la innovación para impulsar el crecimiento económico y el desarrollo sostenible. También contribuye a reducir la huella ecológica mediante la gestión eficiente de los recursos naturales compartidos y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, lo que se relaciona con el ODS 12. La implementación de este proyecto puede tener un impacto significativo en la seguridad alimentaria y la economía local. Al reducir las pérdidas económicas en la producción de cultivos y al promover la eficiencia energética, podemos crear cadenas de producción y suministro más eficientes. Además, el acceso a tecnologías de precisión puede ayudar a reducir la brecha digital entre países desarrollados y en desarrollo, lo que se relaciona con el ODS 9.

1.6. Metodología

1.6.1. Metodología de Investigación

Para llevar a cabo esta investigación se utilizará la metodología de investigación mixta, la cual combina la perspectiva cuantitativa y cualitativa, lo que permite dar profundidad al análisis y comprender mejor los procesos. Esto implica recopilar, analizar e interpretar datos tanto cualitativos

como cuantitativos para obtener una visión más completa de la problemática a estudiar. Esta metodología busca compensar las limitaciones de cada enfoque al mismo tiempo que fortalece la validez de la interpretación de los resultados (Hamui-Sutton, 2013).

La metodología mixta en este proyecto se empleará con el fin de combinar la recopilación y análisis de datos cuantitativos, como las lecturas de temperatura obtenidas a través del módulo de cámara térmica, con la exploración cualitativa de los resultados, como la descripción de las características en las plantas de arándano biloxi. Además de los datos termográficos, también se tomarán en cuenta otras variables importantes para el crecimiento de la planta y el hongo, buscando así tener una visión más completa de los factores que influyen en su desarrollo. Esto permitirá obtener una vista más amplia de la problemática a estudiar, comprendiendo así la relación entre las lecturas termográficas y la presencia de *Botrytis Cinerea*, además de aquellos factores que puedan influir en la precisión del sistema.

1.6.2. Metodología de Desarrollo

Para el desarrollo del sistema, se adoptarán elementos del marco de trabajo ágil Scrum, un enfoque de desarrollo iterativo y colaborativo diseñado para fomentar la adaptabilidad y la entrega continua de valor. Este método, reconocido por su flexibilidad y eficiencia, se basa en ciclos cortos de trabajo llamados Sprints, que permiten planificar, ejecutar y revisar tareas de manera organizada y dinámica (SCRUMstudy™, 2022).

Durante el proyecto, se trabajará en Sprints semanales, en los cuales se evaluarán los avances del Product Backlog previamente definido. Esta estructura facilita la retroalimentación constante, priorización de tareas y ajustes según las necesidades del proyecto, asegurando un desarrollo estructurado y orientado a cumplir los objetivos establecidos. La implementación de Scrum permitirá un desarrollo funcional que cumpla con las expectativas de precisión y eficacia requeridas.

1.7. Marcos de Referencia

1.7.1. Marco Teórico

Texto del marco teórico...

1.7.2. Marco Legal

Texto del marco legal...

II. DOCUMENTACIÓN SOFTWARE

2.1. Plan de Proyecto

Texto del plan de proyecto...

2.2. Arquitectura del Software

Describe la estructura global del sistema, mostrando cómo se organizan e interconectan los componentes del frontend y backend.

2.2.1. Desarrollo del Frontend

Documenta la implementación de la interfaz de usuario, detallando las tecnologías utilizadas y el diseño de la experiencia de usuario.

2.2.2. Desarrollo del Backend

Explica la lógica del servidor, la estructura de las APIs, la gestión de bases de datos y la implementación de la lógica de negocio que sustenta la aplicación.

2.2.3. Integración Frontend-Backend

Detalla los mecanismos y protocolos (por ejemplo, REST o WebSockets) que permiten la comunicación y sincronización de datos entre la interfaz y el servidor.

2.3. Determinación de Requerimientos

Tabla 1

Requerimiento Funcional RF01: Registro

Identificador	RF01
Nombre	Registro
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	El administrador puede registrarse en el sistema de detección proporcionando los datos solicitados en el formulario de registro. Para que un usuario se pueda registrar, debe solicitar el código de acceso proporcionado por el administrador para poder realizar correctamente el registro.

Tabla 2*Requerimiento Funcional RF02: Inicio de sesión*

Identificador	RF02
Nombre	Inicio de sesión
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	Permite a los diferentes roles acceder al sistema de detección con sus credenciales (usuario y contraseña), estas deben ser correctas para su acceso. Al finalizar, se podrá cerrar sesión. En caso tal de olvidar la contraseña, se tendrá la opción para recuperarla.

Tabla 3*Requerimiento Funcional RF03: CRUD cámara*

Identificador	RF03
Nombre	CRUD cámara
Roles	Administrador
Descripción	Se podrán agregar módulos termográficos al sistema de detección para poder recibir y procesar los datos que estas envíen. Además de visualizar y actualizar el estado de cada módulo termográfico. En caso de ser necesario, se podrá eliminar la cámara del sistema de detección.

Tabla 4*Requerimiento Funcional RF04: CRUD persona*

Identificador RF04	
Nombre	CRUD persona
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	Los distintos roles podrán actualizar sus datos personales o contraseña. También podrán eliminar su cuenta.

Tabla 5*Requerimiento Funcional RF05: Módulo de mediciones*

Identificador RF05	
Nombre	Módulo de mediciones
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	El sistema de detección recopilará y mostrará los datos de las mediciones tomadas por otros sensores por medio de gráficas y un histórico.

Tabla 6*Requerimiento Funcional RF06: Módulo de procesamiento*

Identificador	RF06
Nombre	Módulo de procesamiento
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	<p>El sistema de detección mostrará los datos recopilados por los módulos de cámara por medio de gráficas. Además, se debe mostrar el estado de cada planta y el histórico de datos de todas las plantas.</p> <p>El procesamiento de los datos térmicos indicará el estado de cada planta. Los roles podrán actualizar el estado proporcionado por el sistema de ser necesario.</p>

Tabla 7*Requerimiento Funcional RF07: Reportes*

Identificador	RF07
Nombre	Reportes
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	Los diferentes roles podrán generar reportes sobre el estado de las plantas en formato PDF con base en los datos recopilados por los módulos de cámara y/o por el módulo de procesamiento. Se podrá escoger distintos filtros (una o varias plantas, lapsos de tiempo).

Tabla 8*Requerimiento Funcional RF08: Notificaciones*

Identificador RF08	
Nombre	Notificaciones
Roles	Administrador, Usuario (como receptores)
Descripción	Se deben enviar notificaciones por correo electrónico a los distintos roles en el cual se puedan alertar sobre cambios de estado en las plantas y enviar notificaciones de seguridad.

Tabla 9*Requerimiento Funcional RF09: Gestionar Observaciones*

Identificador RF09	
Nombre	Gestionar Observaciones
Roles	Administrador, Usuario
Descripción	Permite a los usuarios registrar y consultar observaciones cualitativas sobre el estado de las plantas. Se utiliza una plantilla estandarizada para anotar aspectos visuales (color, textura, uniformidad, daños), asignar una calificación subjetiva y añadir notas, complementando los datos cuantitativos para la metodología mixta y el procesamiento de datos.

Tabla 10*Requerimiento No Funcional RNF01: Seguridad*

Identificador RNF01	
Nombre	Seguridad
Roles	N/A (Aplica al Sistema)
Descripción	El sistema de detección debe cumplir con los lineamientos y leyes establecidos para la protección, integridad y disponibilidad de los datos (Ley 1581 de 2012).

Tabla 11*Requerimiento No Funcional RNF02: Copia de seguridad*

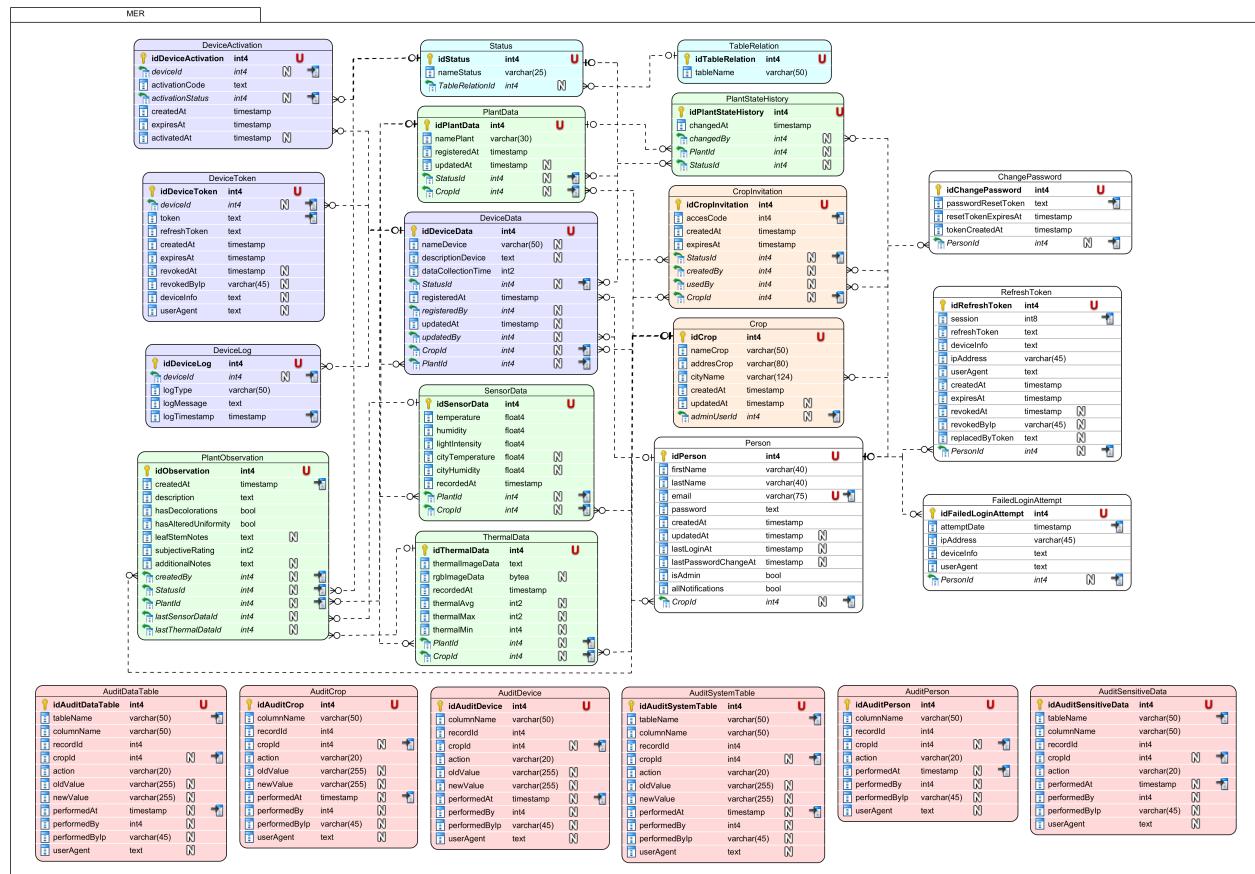
Identificador RNF02	
Nombre	Copia de seguridad
Roles	N/A (Aplica al Sistema)
Descripción	Se debe asegurar un respaldo de los datos en caso de presentarse alguna eventualidad no se vulnere la integridad de los datos. Esta copia de seguridad se debe hacer de forma automática y semanal.

2.4. Especificación del Diseño

2.4.1. Modelo de Entidad-Relación (MER)

Figura 1

Diagrama Entidad-Relación del Sistema.



El Modelo Entidad-Relación (MER), presentado en la Figura 1, define la estructura lógica de la base de datos diseñada para el sistema, organizando la información necesaria para el funcionamiento de la aplicación. Las tablas se han agrupado lógicamente (y coloreado en el diagrama) según su propósito principal para facilitar su comprensión: Diccionarios de Datos (celeste), Datos de Usuarios (verde) y Auditoría (rosa).

(blanco), Datos de Cultivos (naranja), Datos de Dispositivos (morado), Datos de Plantas (verde) y Auditoría (rojo). A continuación, se describe el propósito y las relaciones clave de cada tabla dentro de estos grupos.

Grupo 1: Diccionarios de Datos (Celeste)

Este grupo contiene tablas auxiliares que definen tipos o categorías reutilizables en otras partes del sistema.

- **TableRelation:** Almacena los nombres de las tablas principales de la base de datos. Su propósito es permitir que la tabla **Status** pueda referenciar a qué tabla pertenece un estado específico, ofreciendo un mecanismo de categorización de estados.
- **Status:** Define un conjunto genérico de estados posibles (ej. 'Activo', 'Inactivo', 'Pendiente') que pueden ser aplicados a diferentes entidades del sistema como invitaciones, plantas, dispositivos u observaciones. Se relaciona con **TableRelation** para indicar el contexto de cada estado y es referenciada por múltiples tablas (**CropInvitation**, **PlantData**, **DeviceData**, **DeviceActivation**, **PlantStateHistory**, **PlantObservation**) mediante claves foráneas.

Grupo 2: Datos de Usuarios (Blanco)

Este grupo gestiona la información y la autenticación de los usuarios del sistema.

- **Person:** Tabla central para los usuarios. Almacena información personal básica (nombre, apellido), credenciales de acceso (email, contraseña cifrada), rol (**isAdmin**), preferencias de notificación, y timestamps relevantes (creación, actualización, último login, último cambio de contraseña). Se relaciona con **Crop** para indicar a qué cultivo pertenece el usuario (si no es

administrador global). Es referenciada por múltiples tablas para indicar quién realizó una acción (`Crop`, `CropInvitation`, `DeviceData`, `PlantStateHistory`, `PlantObservation`, `RefreshToken`) y por las tablas de auditoría.

- `ChangePassword`: Gestiona las solicitudes de restablecimiento de contraseña, almacenando un token temporal, su fecha de expiración y la referencia al usuario (`PersonId`) que lo solicitó.
- `RefreshToken`: Almacena los tokens de refresco utilizados para mantener las sesiones de usuario activas de forma segura, junto con información del dispositivo y la IP asociada. Se relaciona con `Person`.
- `FailedLoginAttempt`: Registra los intentos fallidos de inicio de sesión para monitoreo de seguridad, incluyendo la IP, información del dispositivo y la referencia al usuario (`PersonId`).

Grupo 3: Datos de Cultivos (Naranja)

Define la información general sobre los cultivos gestionados.

- `Crop`: Representa un cultivo específico, almacenando su nombre, dirección, ciudad y el identificador del usuario administrador de ese cultivo (`adminUserId`, FK a `Person`). Es una entidad central referenciada por `Person`, `CropInvitation`, `PlantData`, `DeviceData`, `SensorData`, `ThermalData` y las tablas de auditoría para contextualizar los datos.
- `CropInvitation`: Gestiona los códigos de invitación que permiten a nuevos usuarios unirse a un cultivo existente. Almacena el código, fechas de validez, estado (`StatusId`), quién la creó (`createdBy`, FK a `Person`), quién la usó (`usedBy`, FK a `Person`) y a qué cultivo pertenece (`CropId`).

Grupo 4: Datos de Dispositivos (Morado)

Administra la información de los dispositivos de hardware (cámaras térmicas y otros sensores) utilizados para la recolección de datos.

- **DeviceData:** Registra cada dispositivo físico, incluyendo su nombre, descripción, intervalo de recolección de datos (`dataCollectionTime`), estado (`StatusId`), fechas y usuarios de registro/actualización (FKs a `Person`). Puede estar asociado a un cultivo (`CropId`) y opcionalmente a una planta específica (`PlantId`). Es referenciada por `DeviceLog`, `DeviceToken` y `DeviceActivation`.
- **DeviceLog:** Almacena registros (logs) de eventos o errores generados por los dispositivos, referenciando al dispositivo (`deviceId`) correspondiente.
- **DeviceToken:** Gestiona los tokens de autenticación específicos para que los dispositivos puedan enviar datos de forma segura a la API. Se relaciona con `DeviceData`.
- **DeviceActivation:** Controla el proceso de activación inicial de un dispositivo mediante un código, almacenando su estado (`activationStatus`, FK a `Status`) y fechas relevantes. Se relaciona con `DeviceData`.

Grupo 5: Datos de Plantas (Verde)

Este grupo centraliza toda la información relacionada con las plantas de arándano monitoreadas.

- **PlantData:** Representa cada planta individual dentro de un cultivo. Almacena su nombre identificador, fecha de registro, estado actual (`StatusId`, ej. 'Saludable', 'No Saludable') y a qué cultivo pertenece (`CropId`). Es referenciada por `DeviceData` (opcionalmente), `PlantStateHistory`, `SensorData`, `ThermalData` y `PlantObservation`.

- **PlantStateHistory:** Mantiene un historial de los cambios de estado de cada planta, registrando cuándo ocurrió el cambio (`changedAt`), quién lo realizó (`changedBy`, FK a `Person`) y cuál fue el nuevo estado (`StatusId`). Se relaciona con `PlantData`.
- **SensorData:** Almacena las lecturas periódicas de sensores ambientales asociados a una planta (temperatura, humedad, intensidad lumínica) y opcionalmente datos climáticos de la ciudad. Incluye la fecha de registro (`recordedAt`) y referencias a la planta (`PlantId`) y al cultivo (`CropId`).
- **ThermalData:** Guarda los datos crudos de las imágenes termográficas (en formato JSONB `thermalImageData`) y opcionalmente una imagen RGB (`rgbImageData`). Incluye la fecha de registro (`recordedAt`) y referencias a la planta (`PlantId`) y al cultivo (`CropId`).
- **PlantObservation:** Registra observaciones manuales realizadas por los usuarios sobre el estado de una planta, incluyendo descripciones textuales, indicadores visuales (decoloraciones, uniformidad), notas, una calificación subjetiva y referencias a la última toma de datos (`SensorData` y `ThermalData`) disponibles al momento de la observación. Se relaciona con `PlantData`, `Person` (`createdBy`) y `Status`.

Grupo 6: Auditoría (Rojo)

Este conjunto de tablas implementa un mecanismo detallado de auditoría para rastrear cambios en la base de datos.

- Tablas de Auditoría (`AuditCrop`, `AuditDataTable`, `AuditDevice`, `AuditPerson`, `AuditSensitiveData`, `AuditSystemTable`): Cada una de estas tablas está diseñada para registrar modificaciones (inserciones, actualizaciones, eliminaciones) en las tablas principales correspondientes a su nombre o categoría. Almacenan información crucial como la

tabla y columna modificada, el ID del registro afectado, la acción realizada ('INSERT', 'UPDATE', 'DELETE'), los valores antiguo y nuevo (cuando aplica), quién realizó el cambio (*performedBy*, FK a Person), cuándo (*performedAt*), desde qué IP (*performedByIp*) e información del dispositivo (*userAgent*). La tabla *AuditSensitiveData* se enfoca específicamente en el acceso o cambio de datos sensibles (ej. contraseñas, tokens), mientras que las otras auditán cambios en datos generales. Todas referencian al *cropId* para contextualizar la auditoría dentro de un cultivo específico.

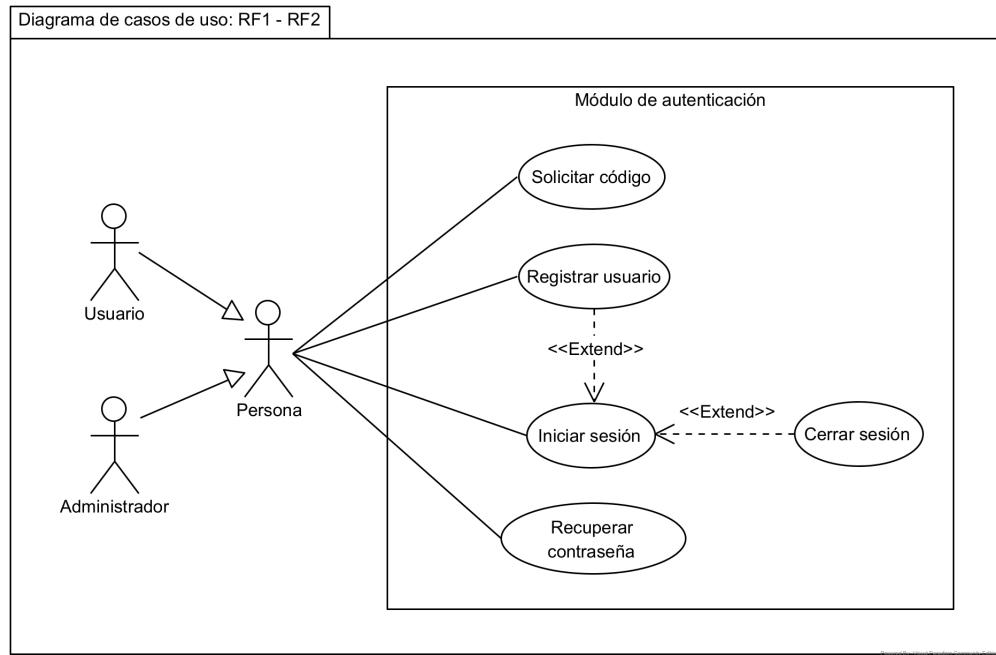
2.4.2. Diagramas de Casos de Uso

Un caso de uso es una unidad coherente de funcionalidad externamente visible proporcionada por un clasificador (denominado sistema) y expresada mediante secuencias de mensajes intercambiados por el sistema y uno o más actores de la unidad del sistema (Rumbaugh, Jacobson, y Booch, 2007). El propósito de un caso de uso es definir una pieza de comportamiento coherente sin revelar la estructura interna del sistema (Rumbaugh y cols., 2007).

Esta sección presenta los diagramas de casos de uso que modelan las funcionalidades principales ofrecidas por el sistema. Estos diagramas ilustran, desde una perspectiva de alto nivel, cómo interactúan los diferentes actores principalmente el **Usuario**, el **Administrador** y, en ciertos escenarios, el propio **Sistema** con las funcionalidades clave del sistema (representadas por elipses). Cada diagrama está generalmente asociado a un módulo funcional o a un Requerimiento Funcional (RF) específico identificado en la especificación de requisitos, utilizando la notación estándar UML para representar actores, casos de uso, límites del sistema y relaciones como «Extend» o «Include». El objetivo es proporcionar una visión clara del alcance funcional del sistema desde el punto de vista de sus usuarios.

Figura 2

Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Usuarios (RF1, RF2).



La Figura 2 detalla los casos de uso correspondientes al **Módulo de autenticación** del sistema, cubriendo las funcionalidades de registro e inicio de sesión (RF01 y RF02). Los actores que interactúan con este módulo son el **Usuario** y el **Administrador**, ambos representados mediante la generalización **Persona**. A continuación se describe cada caso de uso:

Caso de Uso: Solicitar código

Permite a un **Usuario** (actuando como **Persona**) solicitar un código de acceso. Según RF01, este código es necesario para que un **Usuario** pueda registrarse y asociarse a un cultivo existente, y debe ser proporcionado previamente por un **Administrador**.

Caso de Uso: Registrar usuario

Corresponde a la funcionalidad RF01. Permite a Persona crear una nueva cuenta en el sistema. El flujo varía según el rol: un **Administrador** puede registrarse directamente, mientras que un **Usuario** necesita ingresar un código de acceso válido (obtenido a través del caso de uso **Solicitar código**) para completar su registro dentro de un cultivo específico.

Caso de Uso: Iniciar sesión

Representa la funcionalidad principal de RF02, permitiendo a Persona acceder al sistema mediante la validación de sus credenciales (correo electrónico y contraseña). Un inicio de sesión exitoso otorga acceso a las funcionalidades correspondientes al rol del usuario (**Administrador** o **Usuario**). Este caso de uso es la base para poder interactuar con el resto del sistema y puede ser extendido por **Cerrar sesión**.

Caso de Uso: Recuperar contraseña

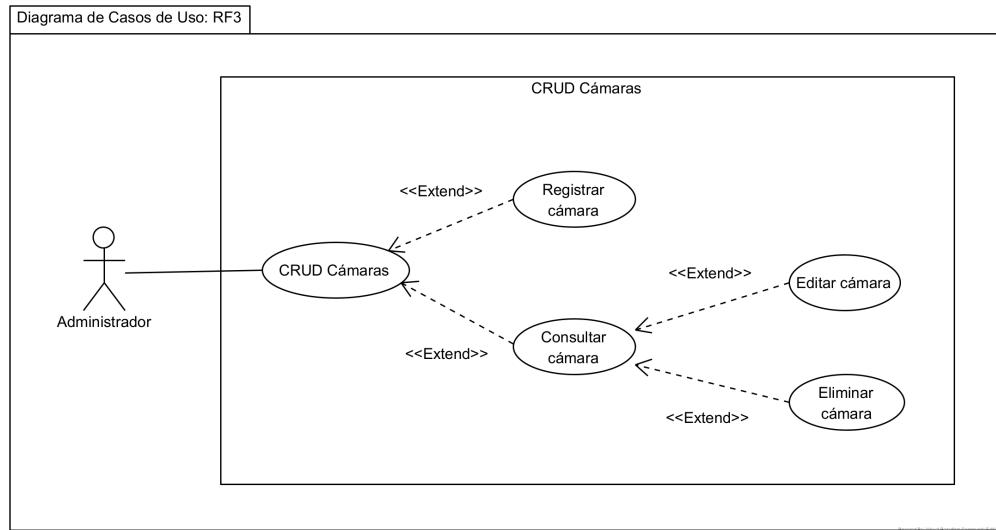
Forma parte de la funcionalidad RF02. Ofrece a Persona un mecanismo para restablecer su contraseña si la ha olvidado. Típicamente, esto implica un proceso de verificación a través del correo electrónico registrado para garantizar la seguridad.

Caso de Uso: Cerrar sesión

Este caso de uso extiende ('«Extend»') a **Iniciar sesión**, para completar su funcionamiento. Representa la acción explícita y opcional que realiza Persona para terminar de forma segura su sesión activa dentro de la aplicación, después de haber iniciado sesión y realizado otras tareas.

Figura 3

Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Cámaras (RF3).



La Figura 3 describe los casos de uso asociados a la gestión (CRUD - Crear, Leer, Actualizar, Borrar) de los dispositivos de cámara o módulos termográficos, funcionalidad identificada como RF03 y exclusiva para el actor **Administrador**. El diagrama presenta un caso de uso central y las operaciones específicas que extienden su funcionalidad:

Caso de Uso: CRUD Cámaras

Representa la funcionalidad principal o el punto de acceso para que el **Administrador** gestione los módulos termográficos registrados en el sistema. Este caso de uso, descrito en RF03, se ve extendida ('«Extend»') por operaciones más específicas como registrar o consultar cámaras.

Caso de Uso: Registrar cámara

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Cámaras. Permite al **Administrador** añadir un nuevo módulo termográfico al sistema (operación Create). Esto incluye la configuración inicial del dispositivo dentro de la plataforma.

Caso de Uso: Consultar cámara

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Cámaras. Permite al Administrador buscar y visualizar la información detallada y el estado actual de los módulos termográficos ya registrados en el sistema (operación Read). Este caso de uso sirve como punto de partida para otras acciones opcionales.

Caso de Uso: Editar cámara

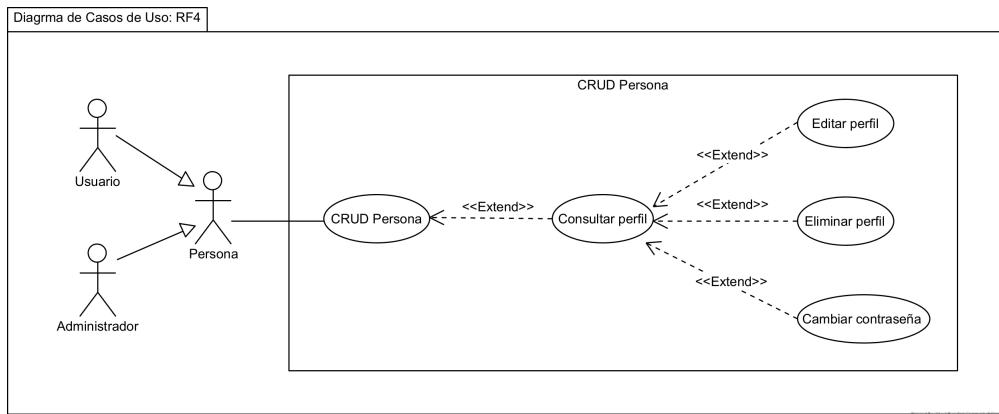
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar cámara. Una vez que el Administrador ha consultado los detalles de una cámara específica, tiene la opción de modificar su configuración, nombre, descripción o actualizar su estado dentro del sistema (operación Update).

Caso de Uso: Eliminar cámara

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar cámara. Después de consultar o seleccionar una cámara, el Administrador puede optar por eliminar permanentemente el registro de ese dispositivo del sistema (operación Delete), usualmente si el dispositivo se da de baja o ya no se utiliza.

Figura 4

Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Perfiles (RF4).



La Figura 4 detalla los casos de uso relacionados con la gestión del perfil de usuario dentro del sistema, funcionalidad descrita en RF04. Estas operaciones pueden ser realizadas tanto por el **Usuario** como por el **Administrador**, representados por la generalización **Persona**, sobre la información de su propia cuenta. El diagrama se centra en el módulo o funcionalidad **CRUD Persona**:

Caso de Uso: CRUD Persona

Este caso de uso actúa como el punto de entrada general para que **Persona** administre la información asociada a su perfil en el sistema, tal como se indica en RF04. La funcionalidad principal que extiende (‘«Extend»’) esta gestión es **Consultar perfil**.

Caso de Uso: Consultar perfil

Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de **CRUD Persona**. Permite a **Persona** visualizar sus propios datos de perfil registrados en la aplicación (operación de Leer). Esta consulta es, generalmente, el paso previo necesario para poder realizar modificaciones o eliminar la cuenta.

Caso de Uso: Editar perfil

Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de Consultar perfil. Una vez que Persona visualiza su perfil, este caso de uso le permite modificar sus datos personales registrados, como nombre, apellido, correo electrónico o preferencias de notificación (operación de Actualizar datos), de acuerdo con RF04.

Caso de Uso: Eliminar perfil

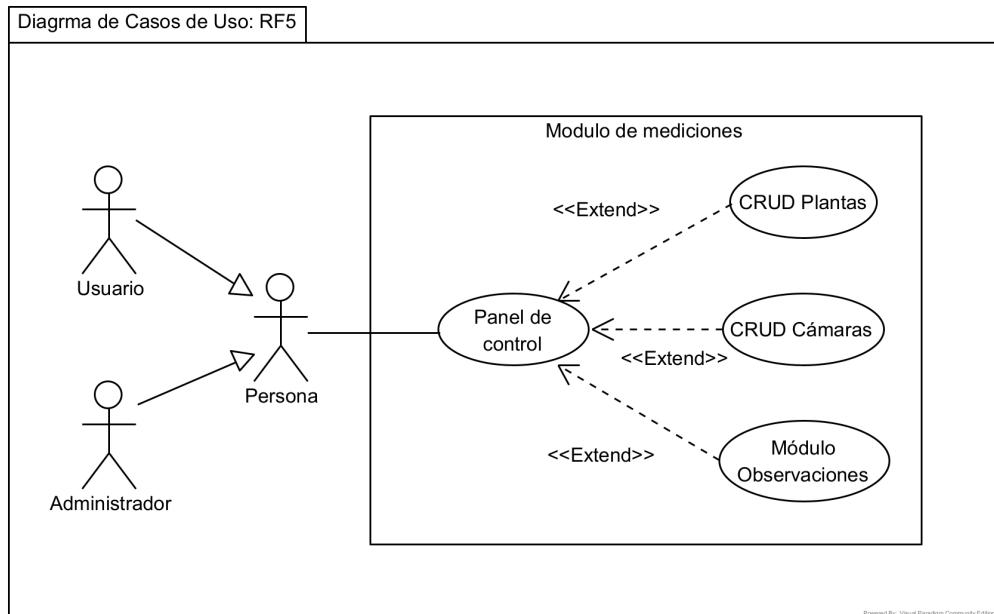
Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de Consultar perfil. Habilita a Persona para solicitar la eliminación permanente de su cuenta y datos asociados del sistema (operación de Borrar), como lo permite RF04. Esta acción se realiza típicamente desde la vista del perfil del usuario.

Caso de Uso: Cambiar contraseña

Extiende (‘«Extend»’) la funcionalidad de Consultar perfil. Permite a Persona iniciar el proceso para actualizar su contraseña de acceso al sistema (operación de Actualizar contraseña), como se menciona en RF04. Usualmente, esta opción está disponible dentro de la sección de gestión o consulta del perfil.

Figura 5

Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Mediciones (RF5).



La Figura 5 presenta los casos de uso asociados al **Modulo de mediciones** del sistema. Este módulo, accesible por los actores **Usuario** y **Administrador** (generalizados como **Persona**), funciona como el panel de control principal o *Dashboard* tras el inicio de sesión. A continuación, se describen los casos de uso involucrados:

Caso de Uso: Panel de control

Este caso de uso representa la pantalla principal que visualiza **Persona** al interactuar con el módulo de mediciones. Su función primordial, relacionada con RF05, es mostrar de forma consolidada los datos clave recopilados por los sensores y cámaras, típicamente mediante gráficas de las últimas 24 horas y los últimos valores registrados. Proporciona una visión general del estado del cultivo y sirve como punto central desde el cual se puede acceder ('«Extend»') a otras funcionalidades específicas de gestión.

Caso de Uso: CRUD Plantas

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Panel de control. Permite a Persona gestionar las plantas registradas en el sistema: añadir nuevas plantas, consultar su información, editar sus detalles o eliminarlas (Crear, Leer, Actualizar, Borrar). Esta es una funcionalidad esencial para administrar las entidades principales monitoreadas (PlantData).

Caso de Uso: CRUD Cámaras

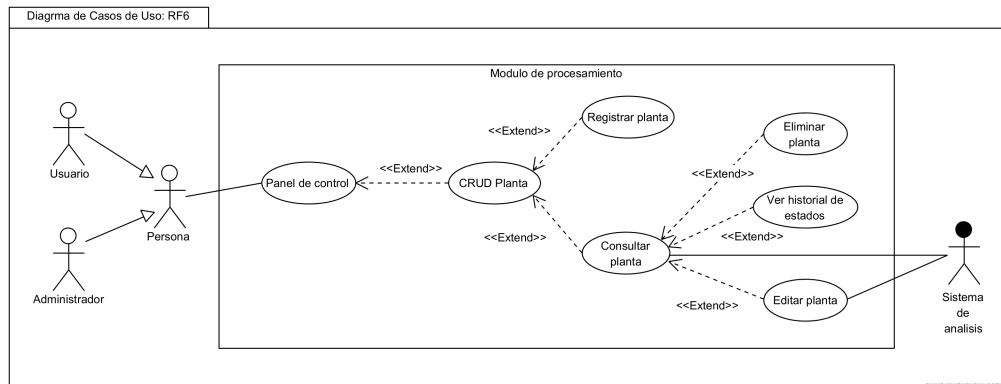
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Panel de control, proporcionando un acceso a la gestión de los dispositivos (módulos termográficos y sensores). Es importante resaltar que, aunque el Panel de control es accesible por Persona, la funcionalidad específica de CRUD Cámaras está restringida al rol Administrador, tal como se definió en RF03. Permite al Administrador realizar las operaciones de Crear, Leer, Actualizar y Borrar sobre los dispositivos desde este panel.

Caso de Uso: Módulo Observaciones

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Panel de control. Representa la funcionalidad añadida para gestionar las observaciones cualitativas realizadas sobre las plantas. Permite a Persona registrar y consultar notas descriptivas sobre aspectos visuales (decoloraciones, uniformidad, notas sobre hojas/tallos) o calificaciones subjetivas del estado de la planta. Esta funcionalidad es clave para cumplir con la metodología de investigación y permitir una mejor compresión de los datos recopilados.

Figura 6

Diagrama de Casos de Uso para la Gestión de Plantas (RF6).



La Figura 6 ilustra los casos de uso pertenecientes al **Modulo de procesamiento**, cuya funcionalidad principal (descrita en RF06) es la gestión de las plantas y la visualización de su estado y datos procesados. Los actores involucrados son el **Usuario** y el **Administrador** (generalizados como **Persona**), además de un actor externo, el **Sistema de análisis**.

Caso de Uso: Panel de control

Reutilizado del diagrama anterior (Figura 5), sirve como punto de entrada general para **Persona**, desde donde se puede acceder ('«Extend»') a la funcionalidad específica de gestión de plantas (**CRUD Planta**).

Caso de Uso: CRUD Planta

Actúa como el caso de uso central para la administración del ciclo de vida de las plantas dentro de este módulo. Es accedido desde el **Panel de control** y engloba las operaciones fundamentales sobre las plantas, siendo extendido ('«Extend»') por acciones más específicas como **Registrar planta** y **Consultar planta**.

Caso de Uso: Registrar planta

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Planta. Permite a Persona añadir una nueva planta al sistema (operación Create), registrando su información inicial para comenzar el monitoreo.

Caso de Uso: Consultar planta

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de CRUD Planta. Permite a Persona visualizar (Leer) la información detallada de una planta específica. Principalmente, según RF06, mostrar su estado actual (resultado del procesamiento de datos). Este caso de uso también es utilizado por el Sistema de análisis externo, para consultar el estado o datos procesados de las plantas. Sirve como base para otras operaciones extendidas.

Caso de Uso: Editar planta

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar planta. Permite a Persona modificar (Actualizar) la información asociada a una planta existente. Como se especifica en RF06, esto incluye la capacidad de los usuarios para actualizar manualmente el estado asignado a la planta si lo consideran necesario tras una revisión. Este caso de uso también es utilizado por el Sistema de análisis externo, para actualizar el estado de una planta después de procesar los datos obtenidos de los sensores y cámaras.

Caso de Uso: Eliminar planta

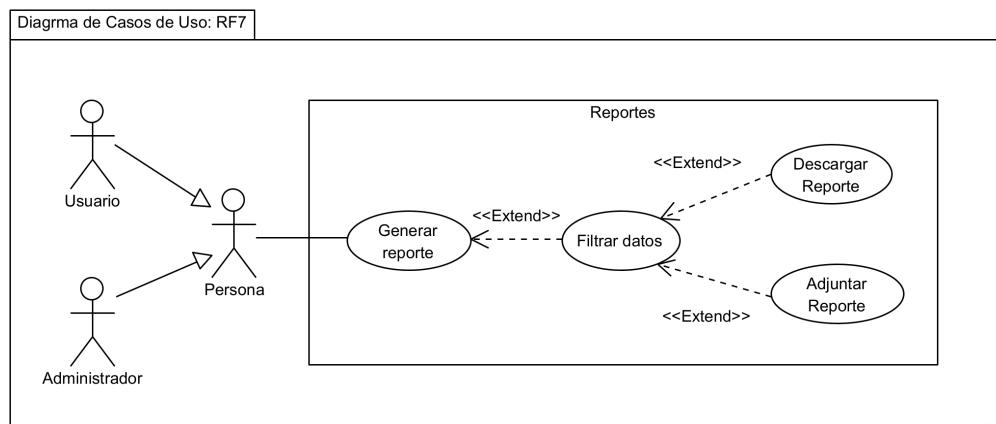
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar planta. Otorga a Persona la capacidad de eliminar (Borrar) el registro de una planta del sistema, por ejemplo, si la planta física es retirada del cultivo.

Caso de Uso: Ver historial de estados

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Consultar planta. Permite a Persona acceder y visualizar el registro histórico de los cambios de estado que ha tenido una planta a lo largo del tiempo, funcionalidad explícitamente mencionada en RF06 para el seguimiento de la condición de las plantas.

Figura 7

Diagrama de Casos de Uso para la Generación de Reportes (RF7).



La Figura 7 presenta los casos de uso correspondientes a la generación de Reportes del sistema, funcionalidad descrita en RF07. Tanto el Usuario como el Administrador (generalizados como Persona) pueden acceder a estas funcionalidades para obtener informes sobre el estado de las plantas y otros módulos del sistema.

Caso de Uso: Generar reporte

Este es el caso de uso principal que inicia Persona para solicitar la creación de un informe. Principalmente, el sistema compila la información relevante sobre el estado de las plantas basándose en los datos recopilados y procesados. El resultado es un reporte consolidado que se genera en formato PDF.

Caso de Uso: Filtrar datos

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Generar reporte. Proporciona a Persona la opción de aplicar criterios específicos para refinar el contenido del informe antes de su generación final. Por ejemplo, filtrar por planta(s) específica(s) o por lapsos de tiempo.

Caso de Uso: Descargar Reporte

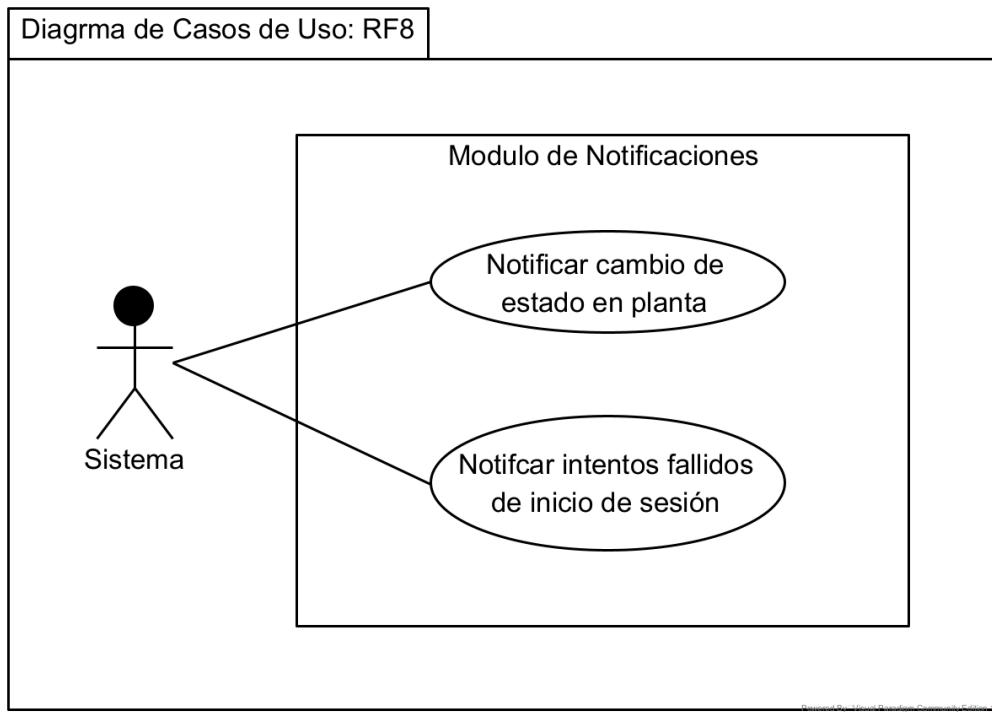
Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Filtrar datos (y, por lo tanto, la de Generar reporte). Una vez que el reporte ha sido generado (y posiblemente filtrado), este caso de uso permite a Persona descargar el archivo resultante (en formato PDF) a su dispositivo local para su consulta o almacenamiento.

Caso de Uso: Adjuntar Reporte

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad de Filtrar datos. Representa una opción disponible después de generar (y filtrar) el reporte. Permite de adjuntar el reporte generado por medio de un correo electrónico del usuario autenticado.

Figura 8

Diagrama de Casos de Uso para las Notificaciones (RF8).



La Figura 8 ilustra los casos de uso del **Modulo de Notificaciones**, que corresponden a la funcionalidad descrita en RF08. En este módulo, el actor principal que inicia las acciones es el propio **Sistema**, indicando que estas notificaciones son procesos automatizados. Estas alertas se envían por correo electrónico a los roles **Administrador** y **Usuario** del sistema.

Caso de Uso: Notificar cambio de estado en planta

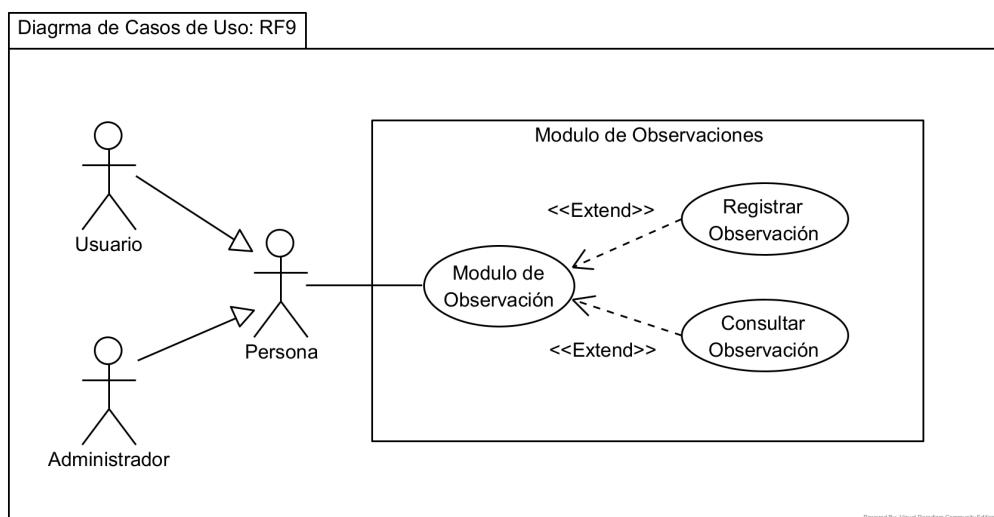
Este caso de uso es ejecutado automáticamente por el **Sistema**. Se activa cuando se produce un cambio significativo en el estado registrado de una planta (por ejemplo, al pasar de 'Saludable' a 'No Saludable' o viceversa, basado en el procesamiento de datos o una actualización manual). El objetivo es alertar proactivamente a los usuarios relevantes (**Administrador**, **Usuario**) por correo electrónico sobre la nueva condición de la planta, facilitando una respuesta rápida.

Caso de Uso: Notificar intentos fallidos de inicio de sesión

Iniciado también por el Sistema, este caso de uso forma parte de las "notificaciones de seguridad" mencionadas en RF08. Se activa cuando el sistema detecta una actividad potencialmente sospechosa, como múltiples intentos fallidos de inicio de sesión asociados a una cuenta de usuario. El propósito es informar al usuario afectado, mediante correo electrónico, sobre estos intentos para que pueda verificar la seguridad de su cuenta y tomar acciones si es necesario (ej. cambiar contraseña).

Figura 9

Diagrama de Casos de Uso para el Módulo de Observaciones (RF9).



La Figura 9 describe los casos de uso para el **Modulo de Observaciones**. Esta funcionalidad, descrita en RF09, es esencial para la metodología mixta del proyecto, permitiendo la recolección de datos cualitativos sobre las plantas. Los actores **Usuario** y **Administrador** (generalizados como **Persona**) interactúan con este módulo.

Caso de Uso: Modulo de Observación

Este caso de uso representa el punto de entrada principal para que Persona interactúe con las funcionalidades de registro y consulta de observaciones cualitativas de las plantas. Sirve como interfaz para acceder a las operaciones específicas que extienden ('«Extend»') su funcionalidad.

Caso de Uso: Registrar Observación

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Modulo de Observación. Permite a Persona registrar una nueva observación cualitativa sobre una planta específica, utilizando la plantilla definida en el diseño experimental. Esto incluye seleccionar el estado general visual, describir cambios, anotar aspectos específicos de color/textura y hojas/tallos, asignar una calificación subjetiva y opcionalmente notas adicionales. Estos datos son cruciales para complementar los datos cuantitativos y tener una mejor comprensión de los datos.

Caso de Uso: Consultar Observación

Extiende ('«Extend»') la funcionalidad del Modulo de Observación. Permite a Persona buscar y visualizar las observaciones cualitativas previamente registradas para una planta. Esto facilita el seguimiento de la evolución visual descrita en el diseño experimental y la comparación con los datos cuantitativos (termografía, sensores).

2.4.3. Diagramas de Secuencia

Un diagrama de secuencia muestra un conjunto de mensajes ordenados en una secuencia temporal (Rumbaugh y cols., 2007). Cada rol se muestra como una línea de vida es decir, una línea vertical que representa al rol a lo largo del tiempo a través de la interacción completa (Rumbaugh y cols., 2007). Los mensajes se muestran con flechas entre líneas de vida (Rumbaugh y cols., 2007).

Líneas de Vida Principales

Los diagramas de secuencia presentados en este documento ilustran las interacciones entre diferentes componentes del sistema para realizar casos de uso específicos. Debido al considerable número de escenarios detallados, se presenta a continuación una descripción general de las líneas de vida (*lifelines*) que aparecen de forma recurrente, representando los actores y las capas arquitectónicas principales del sistema:

- **:Persona:** Representa al usuario final que interactúa con el sistema a través de la interfaz gráfica. Dependiendo del contexto, puede ser un **Usuario** o un **Administrador**. Es el iniciador de las secuencias asociadas a funcionalidades interactivas.
- **:Vista:** Simboliza la interfaz de usuario cliente con la que interactúa :Persona. Esta línea de vida representa la aplicación ejecutándose en diferentes plataformas (web, móvil u otras). Sus responsabilidades incluyen presentar información, capturar datos del usuario, realizar validaciones iniciales y enviar solicitudes (vía HTTPS) a la API backend, así como mostrar las respuestas recibidas.
- **:Infraestructura:** Representa la capa más externa de la API backend, siguiendo los principios de la Arquitectura Cebolla (*Onion Architecture*). Esta capa actúa como la fachada de la API, recibiendo las solicitudes HTTP desde :Vista. Es responsable de manejar los controladores (endpoints), la configuración, la comunicación con elementos externos como la base de datos PostgreSQL (a través de ODBC o un ORM), la gestión de logs, la autenticación/autorización a nivel de API, y otros aspectos transversales (*cross-cutting concerns*). Traduce las solicitudes del exterior hacia las capas internas y las respuestas de las capas internas hacia el exterior.
- **:Aplicacion:** Representa la capa de lógica de aplicación en la Arquitectura Cebolla. Con-

tiene la orquestación de los casos de uso del sistema. Recibe las solicitudes ya procesadas por la capa de :Infraestructura, invoca la lógica de negocio necesaria en la capa de :Dominio, coordina las transacciones y prepara los datos de respuesta para la capa de :Infraestructura. Implementa la lógica específica de la aplicación que no pertenece estrictamente al dominio ni a la infraestructura.

- :Dominio: Simboliza el núcleo del sistema, la capa más interna y central de la Arquitectura Cebolla. Alberga las entidades de negocio (ej. Planta, Cultivo, Usuario), los objetos de valor, las reglas de negocio fundamentales, los eventos de dominio y, crucialmente, las interfaces de los repositorios (abstracciones para el acceso a datos). Procesa la lógica de negocio pura, respondiendo a las invocaciones de la capa de :Aplicacion y es completamente independiente de las tecnologías de UI, base de datos o infraestructura externa. La persistencia real de los datos (definida por las interfaces de repositorio) se implementa típicamente en la capa de :Infraestructura.

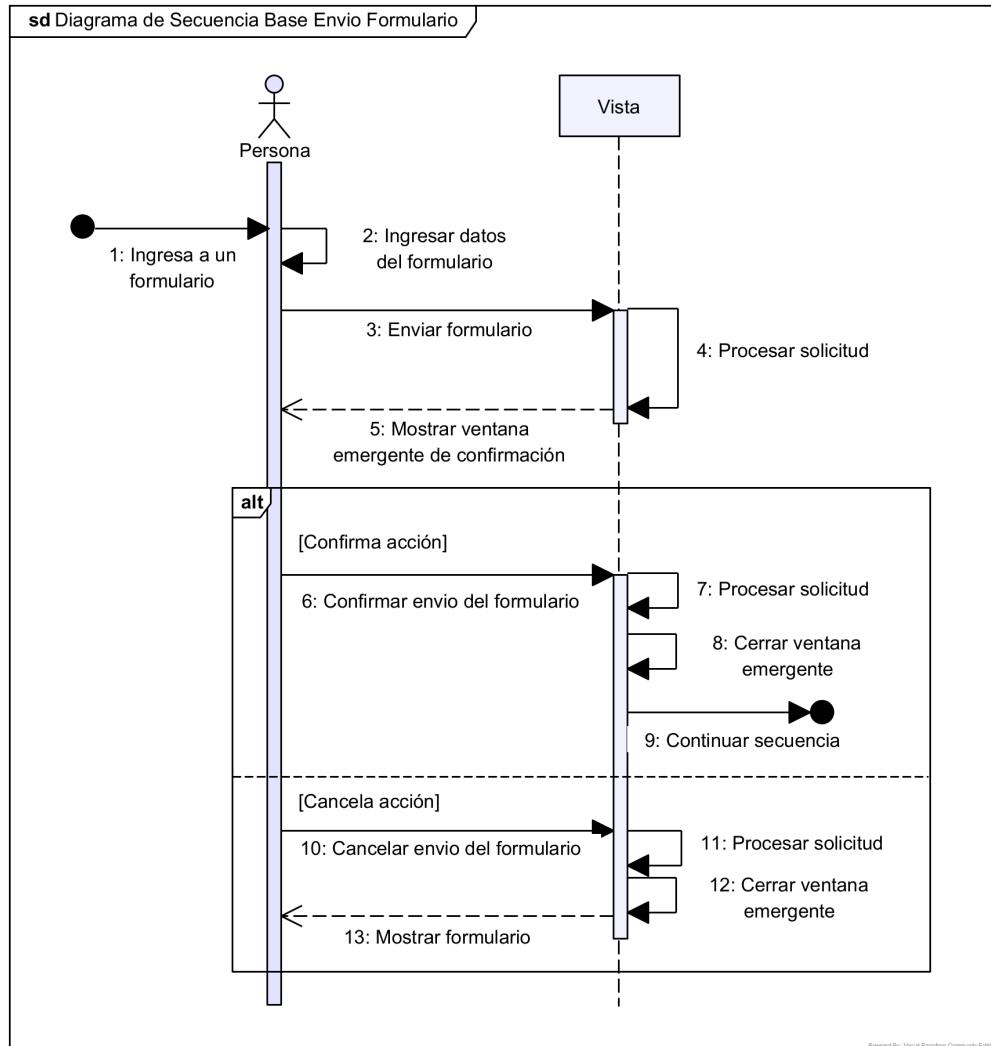
Generalmente, el flujo de una solicitud iniciada por el usuario sigue la secuencia :Persona → :Vista → :Infraestructura → :Aplicacion → :Dominio. La capa de :Dominio (o :Aplicacion a través de ella) utiliza las interfaces de repositorio, cuya implementación en :Infraestructura interactúa con la base de datos. La respuesta viaja de vuelta siguiendo el camino inverso: :Dominio → :Aplicacion → :Infraestructura → :Vista → :Persona. Esta estructura promueve la separación de responsabilidades y la mantenibilidad del sistema.

Es importante señalar que aquellos diagramas que introducen líneas de vida con roles particulares no cubiertos en la descripción general (como la línea de vida :Camara detallada en la Figura17) o aquellos que representan patrones de interacción fundamentales y reutilizables (como el flujo base para envío de formularios mostrado en la Figura10) incluyen una descripción textual específica adjunta. Para los diagramas de secuencia restantes, se entiende que siguen el patrón general de

interacción entre las capas :Vista, :Infraestructura, :Aplicacion y :Dominio, utilizando las responsabilidades asignadas a cada línea de vida según se describió previamente.

Figura 10

Diagrama de secuencia base: Envío de formulario.



Líneas de Vida Involucradas

Las líneas de vida principales en este diagrama base son:

- :Persona: Representa al usuario (Usuario o Administrador) que interactúa con la interfaz

gráfica del sistema. Es quien inicia la acción, ingresa los datos y toma la decisión final de confirmar o cancelar el envío.

- :Vista: Representa el componente de la interfaz de usuario (la pantalla o ventana específica) que contiene el formulario. Recibe los datos ingresados, gestiona el proceso de envío inicial y maneja el diálogo de confirmación con el usuario.

Descripción del Flujo Genérico

La secuencia describe el siguiente flujo general:

1. El proceso comienza cuando :Persona accede a un formulario (1: Ingresar a un formulario) e introduce los datos requeridos (2: Ingresar datos del formulario).
2. :Persona inicia la acción de envío (3: Enviar formulario) hacia la :Vista.
3. La :Vista realiza un procesamiento inicial (4: Procesar solicitud), que podría incluir validaciones del lado del cliente.
4. La :Vista solicita una confirmación explícita al usuario mostrando una ventana emergente (5: Mostrar ventana emergente de confirmación).
5. Se presenta un fragmento alternativo (alt) basado en la respuesta de :Persona:
 - Si [Confirma acción]: :Persona confirma el envío (6). La :Vista procede con el procesamiento definitivo de la solicitud (7), cierra la ventana emergente (8) y permite continuar la secuencia (9), lo que usualmente implica una redirección o un mensaje de éxito. (*Nota: El paso 7 es donde, en diagramas específicos, se detallaría la comunicación con controladores, servicios y base de datos*).

- Si [Cancela acción]: :Persona cancela el envío (10). La :Vista procesa la cancelación (11), cierra la ventana emergente (12) y vuelve a mostrar el formulario (13), permitiendo al usuario corregir datos o abandonar la tarea.

Este diagrama establece la interacción fundamental usuario-interfaz para operaciones de formulario, haciendo énfasis en el paso de confirmación antes del procesamiento final.

Figura 11

Diagrama de Secuencia para el Registro (RF1.0).

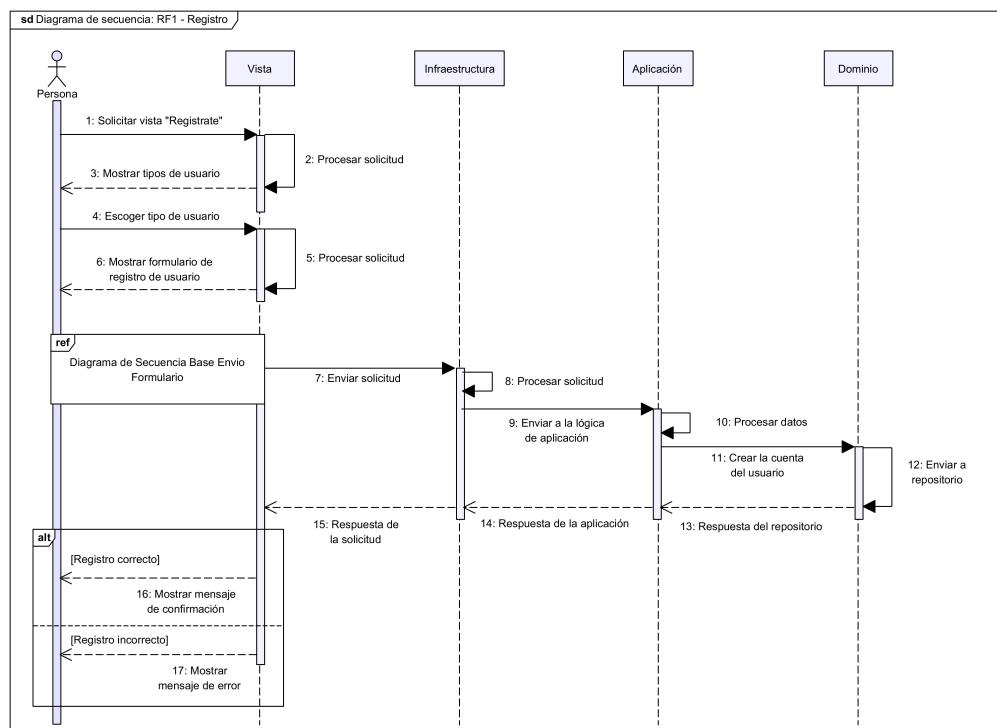


Figura 12

Diagrama de Secuencia para Solicitar Código (RF1.1).

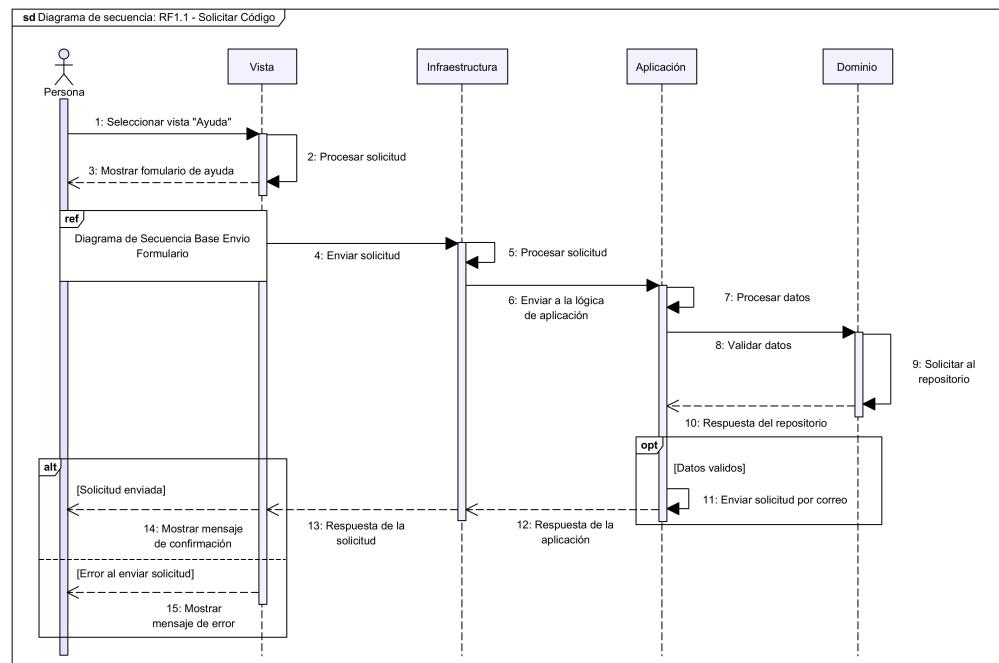


Figura 13

Diagrama de Secuencia para Iniciar Sesión (RF2.0).

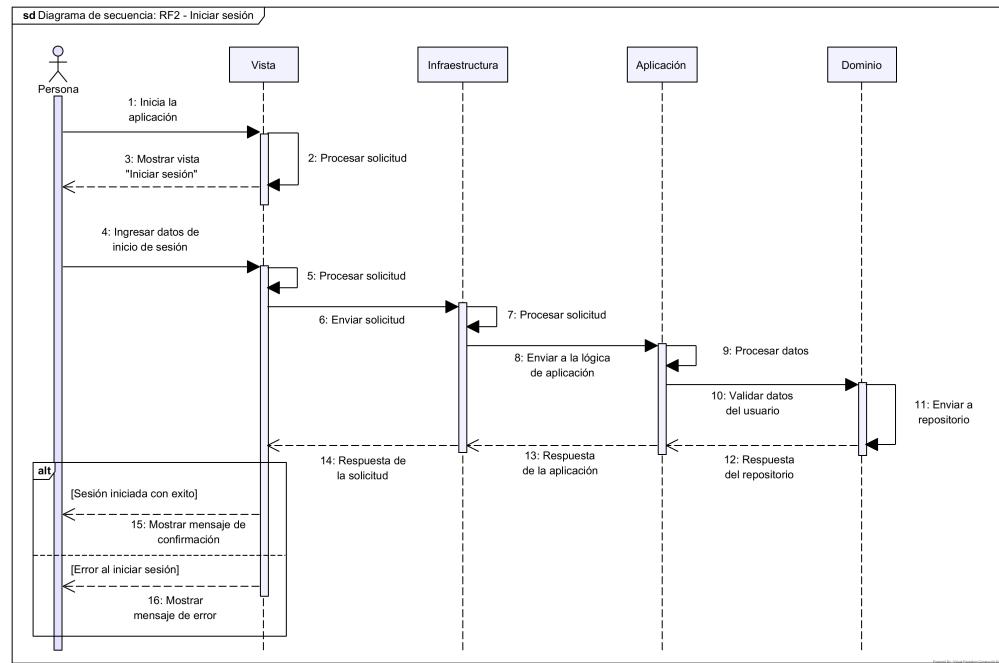


Figura 14

Diagrama de Secuencia para Cerrar Sesión (RF2.1).

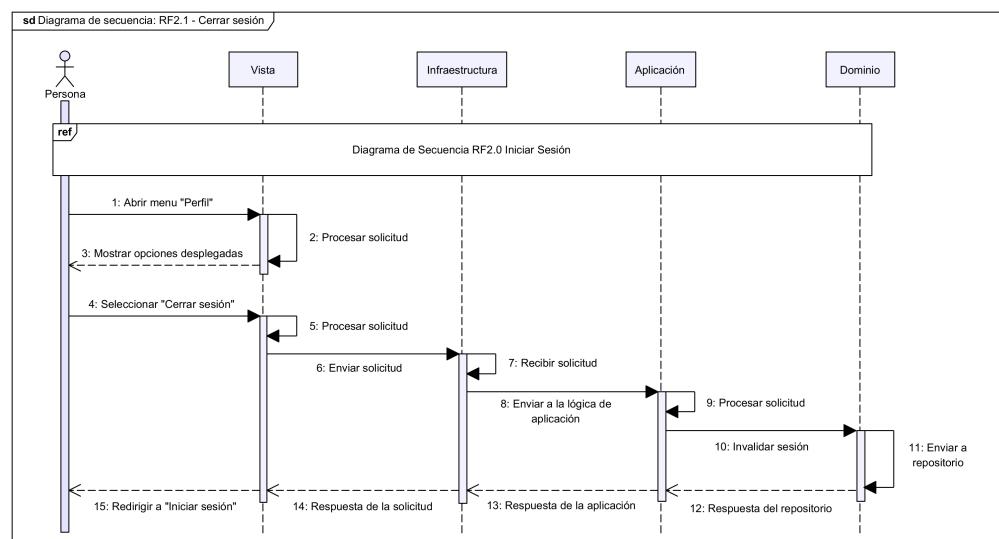


Figura 15

Diagrama de Secuencia para Recuperar Contraseña (RF2.2).

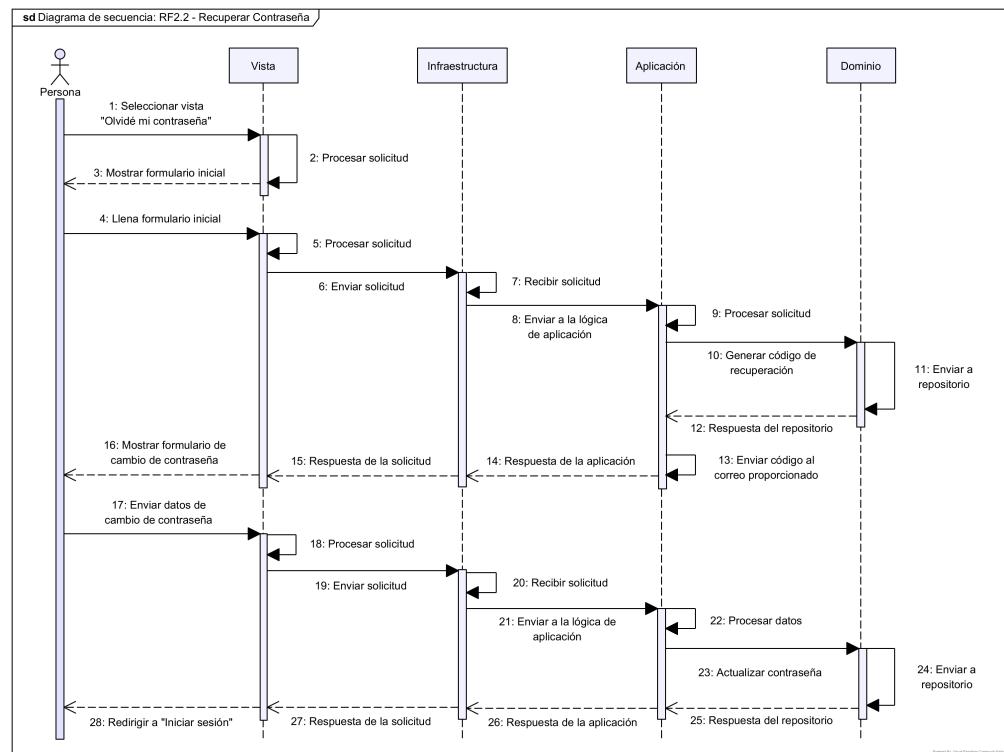


Figura 16

Diagrama de Secuencia para Crear Cámara (RF3.1).

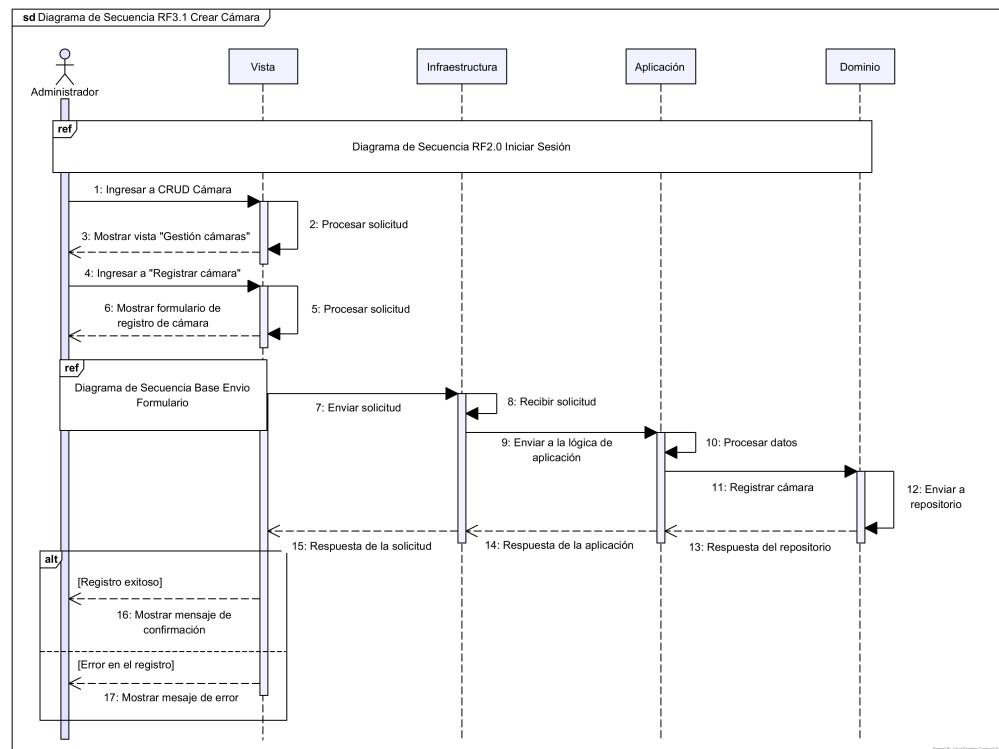
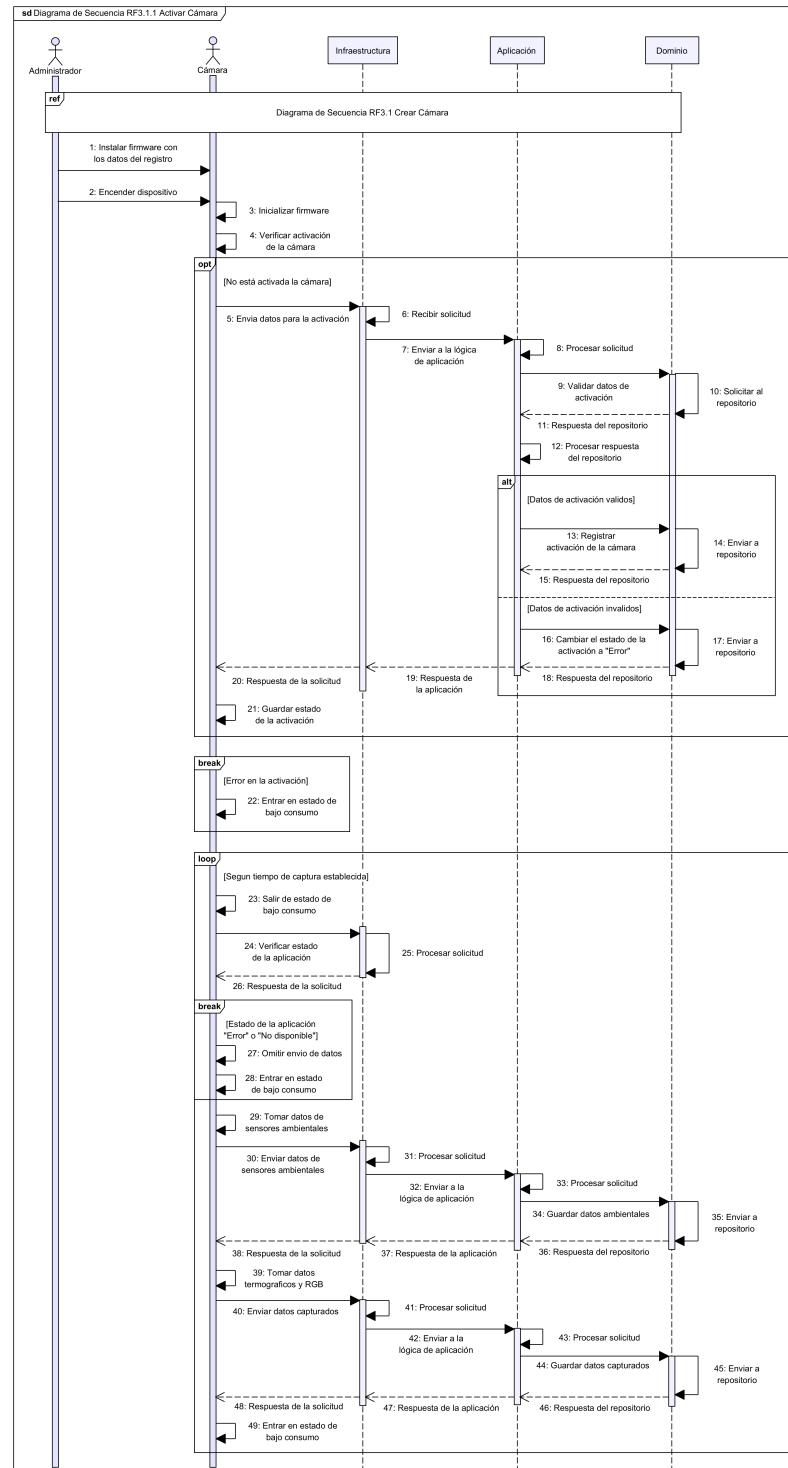


Figura 17

Diagrama de Secuencia para Activar Cámara (RF3.1.1).



Línea de Vida :Camara

La responsabilidad principal de la línea de vida :Camara es interactuar con la API del sistema. Encapsula la lógica autónoma del dispositivo físico, manejando su activación, configuración, el ciclo periódico de toma y envío de datos (ambientales y de imagen), y la gestión básica de errores de comunicación con la API. Su comportamiento se divide en dos fases principales:

1. Fase de Activación:

- Al iniciar y verificar la conexión de red, la :Camara envía un código de activación único a la API.
- Espera una respuesta de la API. Si la activación es exitosa, recibe la configuración operativa (ej. intervalo de muestreo) que fue definida por el Administrador durante el registro del dispositivo en el sistema.
- Almacena esta configuración recibida de forma persistente (memoria no volátil) para guiar su funcionamiento futuro.
- Si el proceso de activación falla (ej. código inválido, API no responde correctamente), la :Camara entra en un estado de error y detiene el proceso, sin pasar a la fase operativa.

2. Fase Operativa (Ciclo de Trabajo):

- Una vez activada, la :Camara opera en un ciclo continuo basado en el intervalo de tiempo definido en su configuración almacenada.
- Al inicio de cada ciclo, verifica la disponibilidad de la API.
- **Si la API está disponible:** Procede a recolectar los datos de los sensores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y los envía a la API. Seguidamente, captura las imágenes (termográfica

y RGB) y las envía también a la API. Después de enviar los datos, entra en un modo de bajo consumo o reposo hasta que el temporizador del ciclo indique el inicio del siguiente.

- **Si la API no está disponible:** La :Camara omite la recolección y envío de datos para ese ciclo. Entra en un periodo de espera antes de volver a intentar la verificación de la API en el siguiente ciclo programado.

Figura 18

Diagrama de Secuencia para Consultar Cámara (RF3.2).

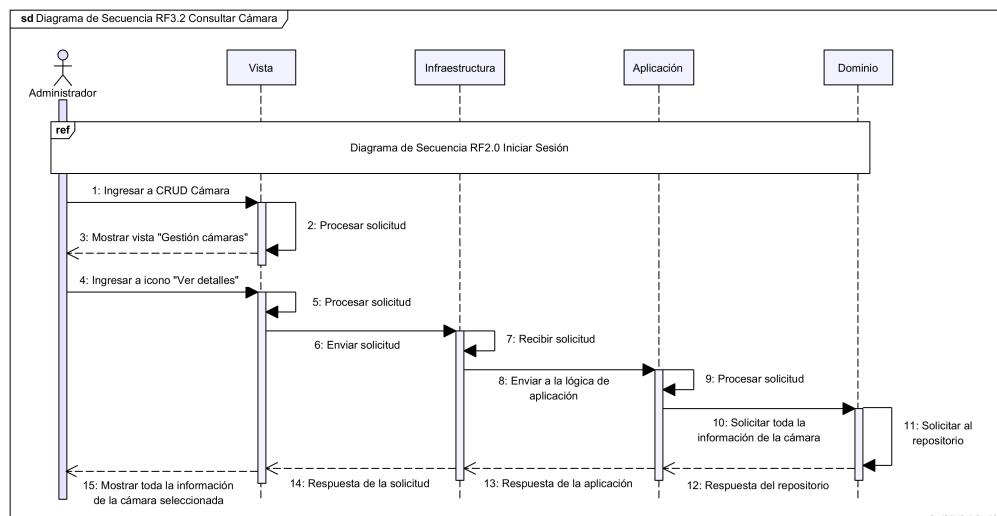


Figura 19

Diagrama de Secuencia para Editar Cámara (RF3.3).

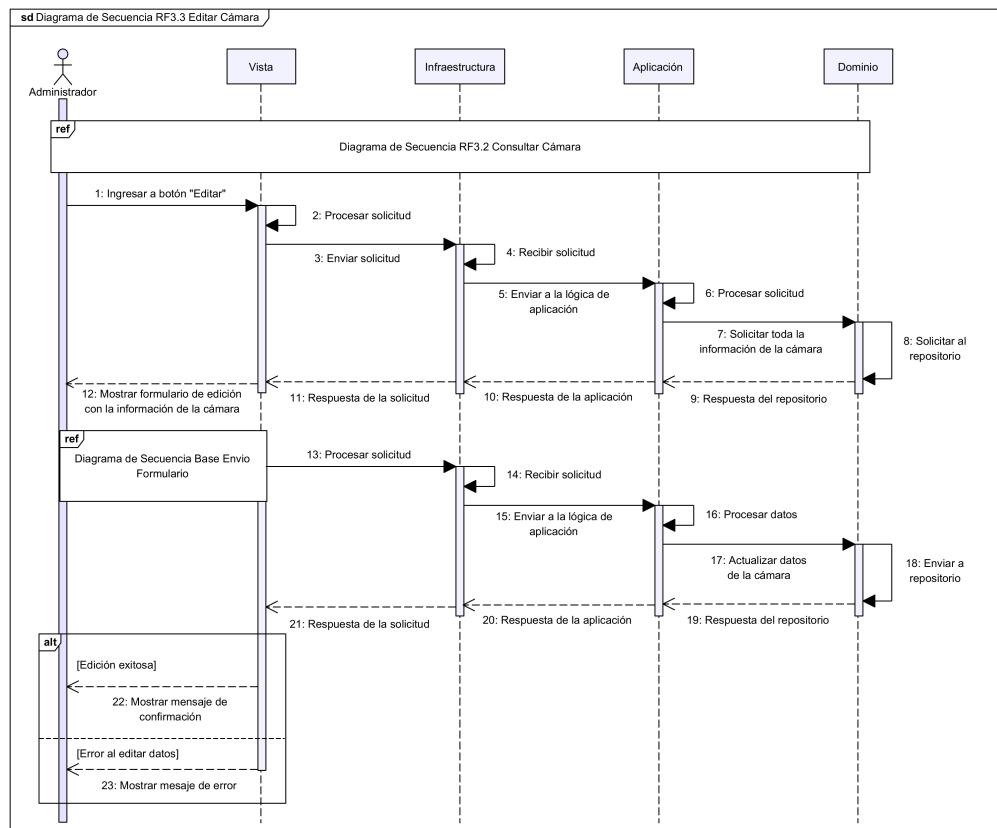


Figura 20

Diagrama de Secuencia para Eliminar Cámara (RF3.4).

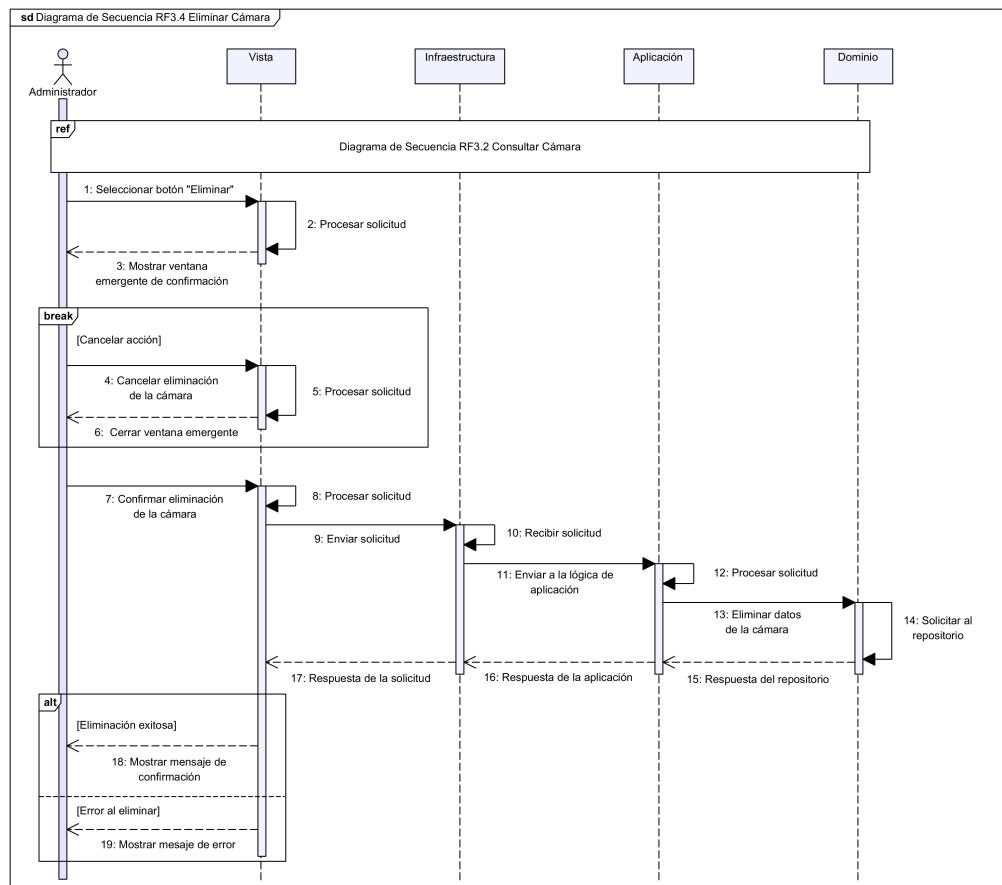


Figura 21

Diagrama de Secuencia para Consultar Perfil (RF4.1).

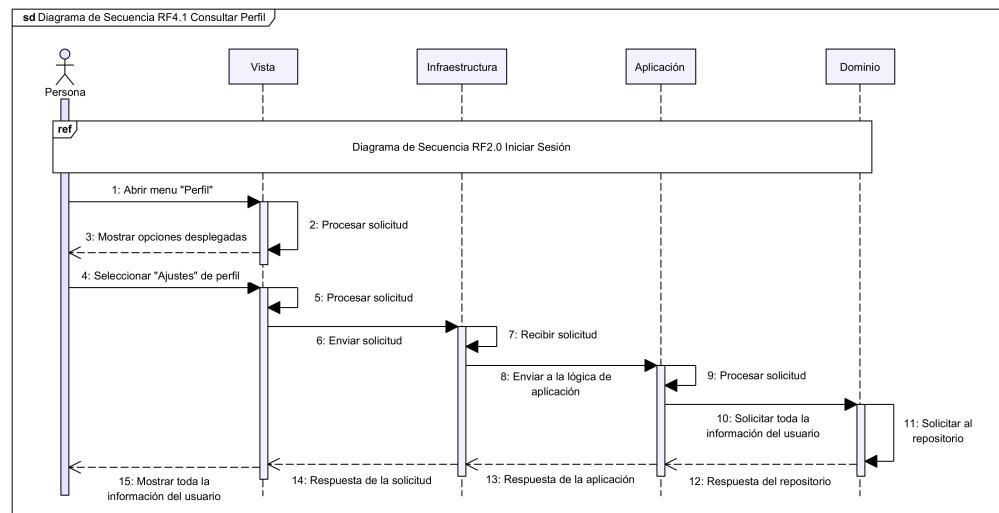


Figura 22

Diagrama de Secuencia para Editar Perfil (RF4.2).

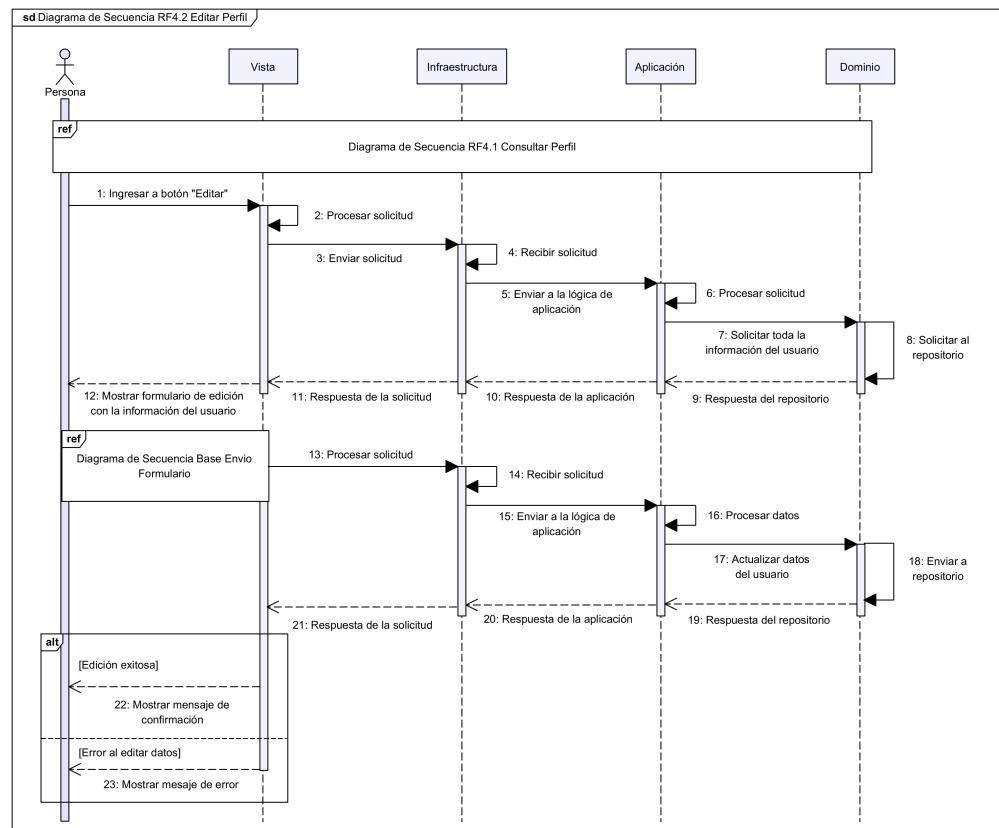


Figura 23

Diagrama de Secuencia para Eliminar Perfil (RF4.3).

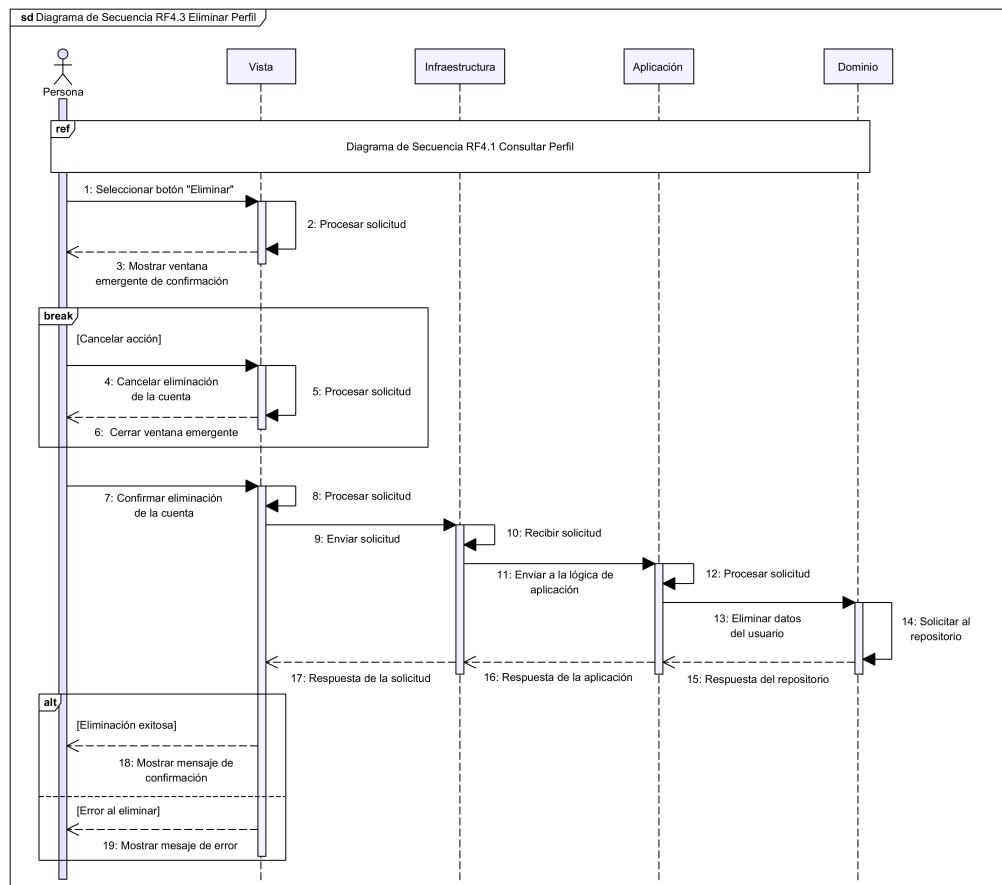


Figura 24

Diagrama de Secuencia para Cambiar Contraseña (RF4.4).

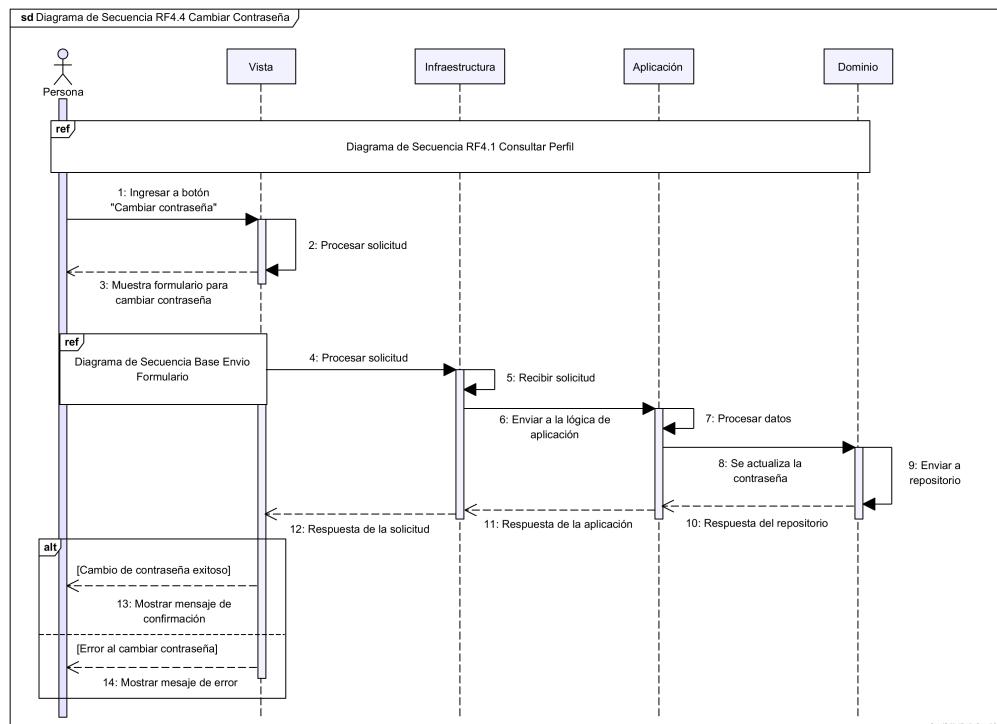


Figura 25

Diagrama de Secuencia para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5).

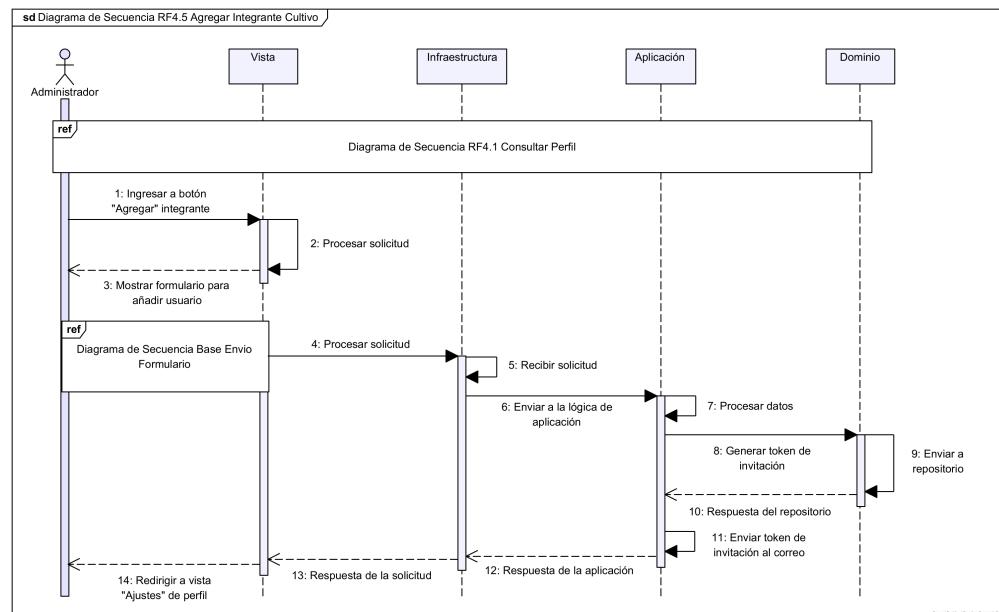


Figura 26

Diagrama de Secuencia para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6).

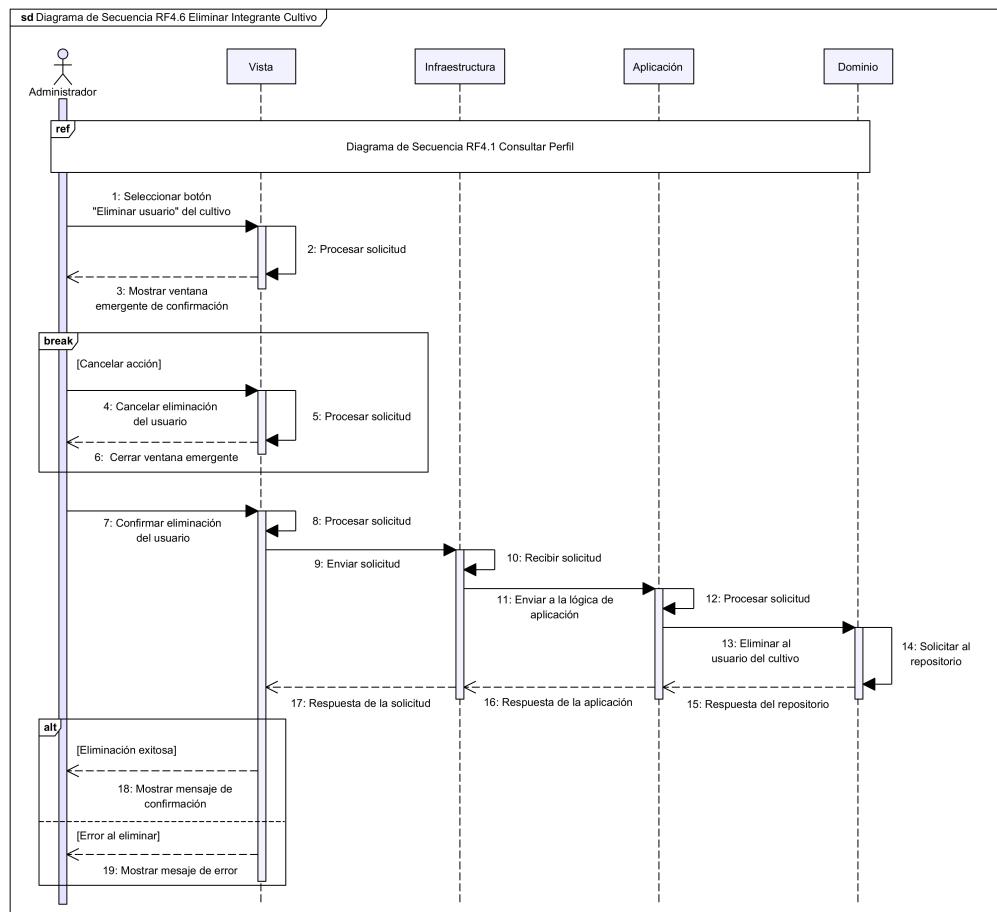


Figura 27

Diagrama de Secuencia para el Módulo de Mediciones (RF5.0).

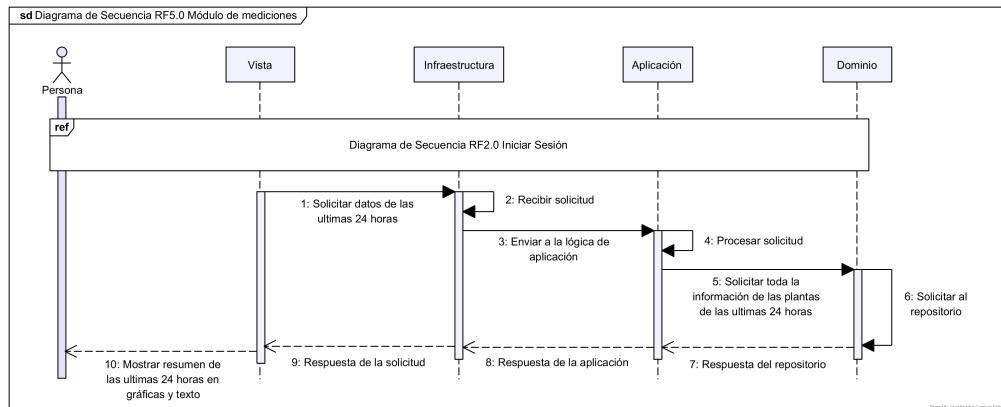


Figura 28

Diagrama de Secuencia para Crear Planta (RF6.1).

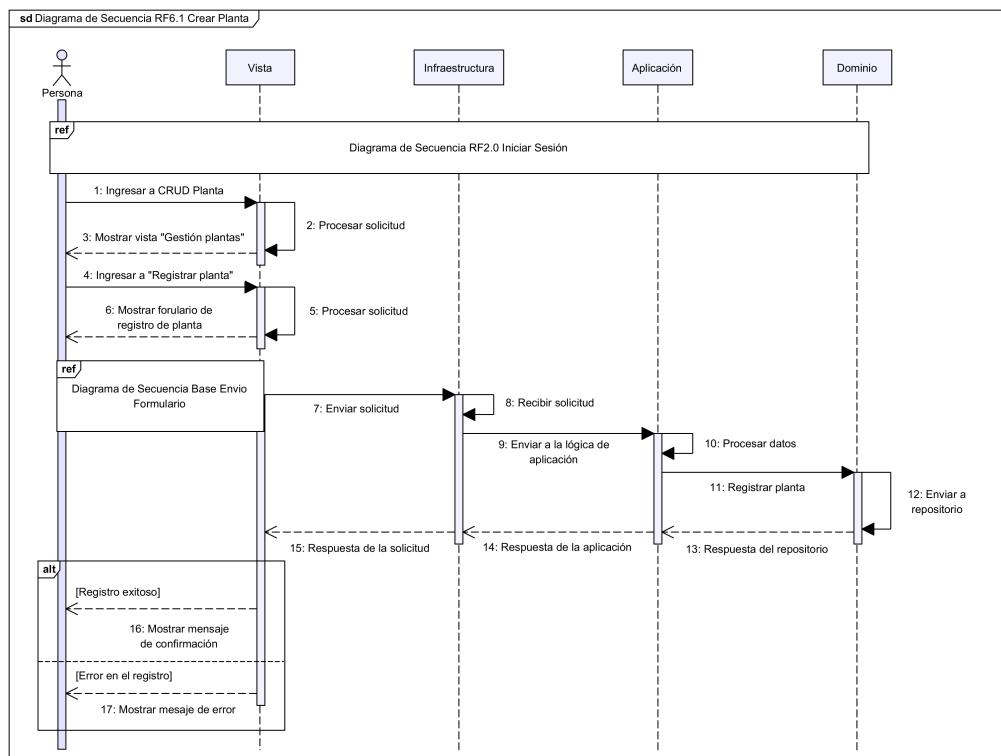


Figura 29

Diagrama de Secuencia para Consultar Planta (RF6.2).

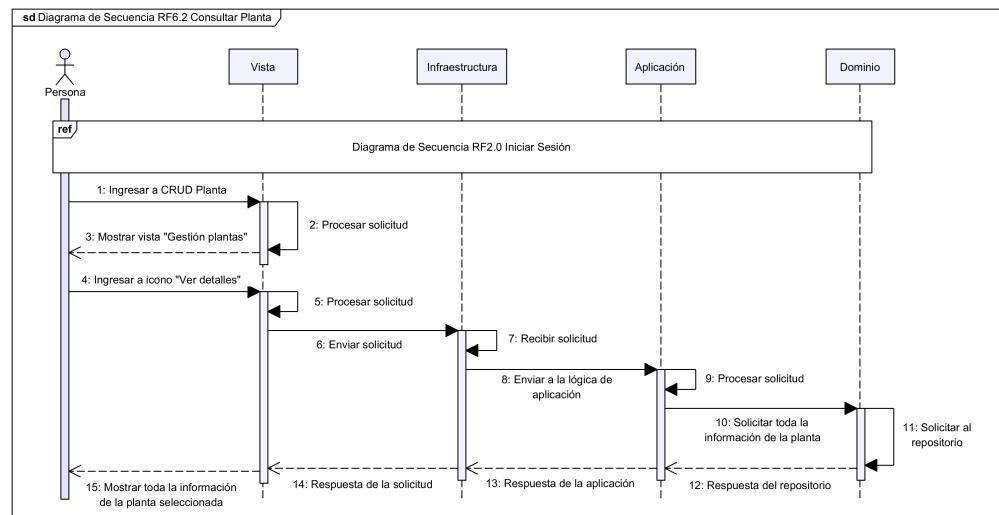


Figura 30

Diagrama de Secuencia para Editar Planta (RF6.3).

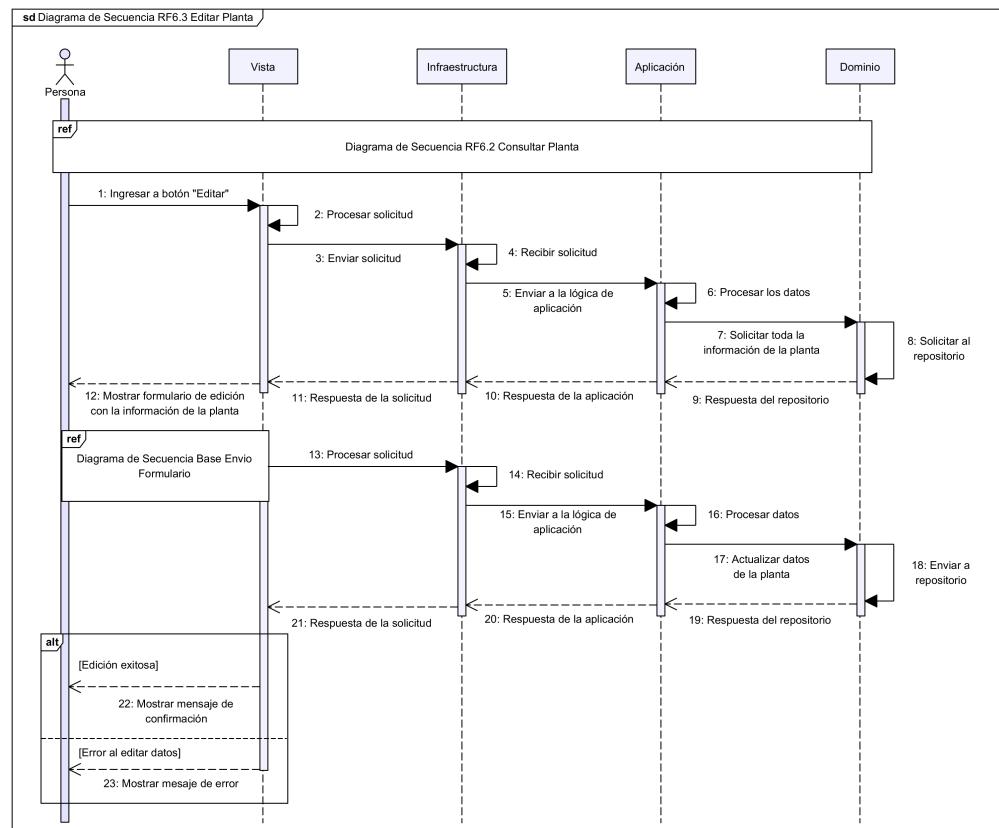


Figura 31

Diagrama de Secuencia para Eliminar Planta (RF6.4).

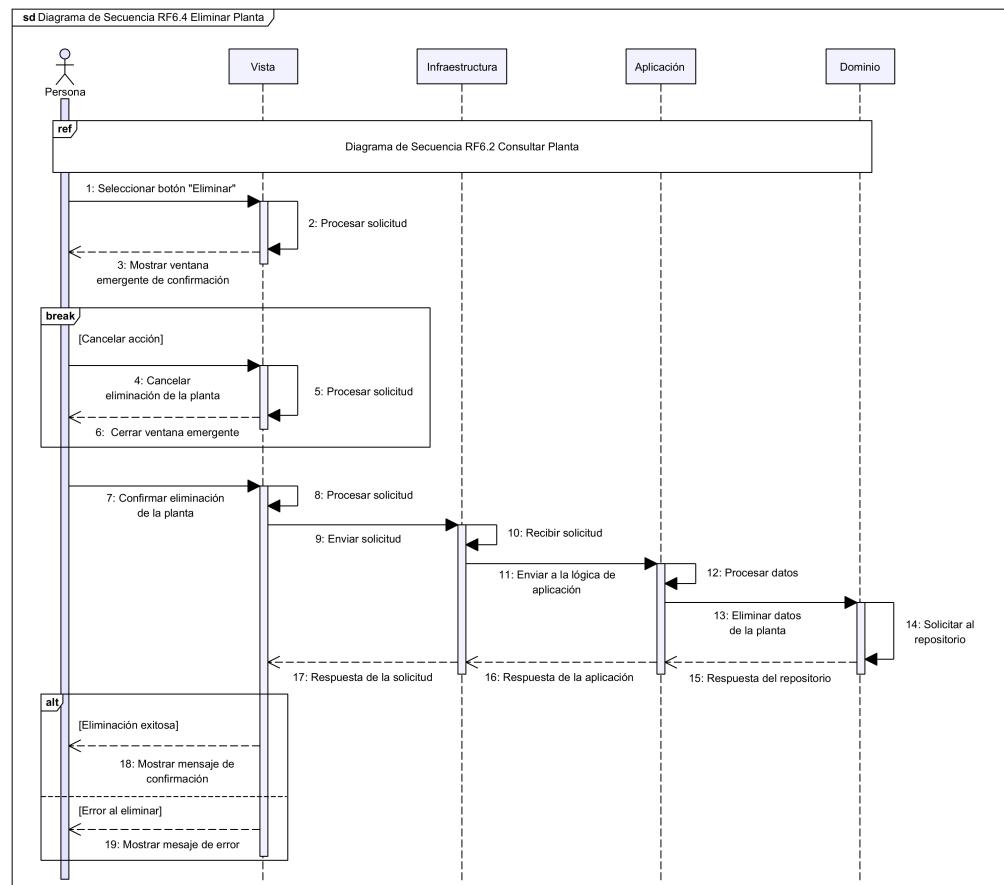


Figura 32

Diagrama de Secuencia para Generar Reporte (RF7.0).

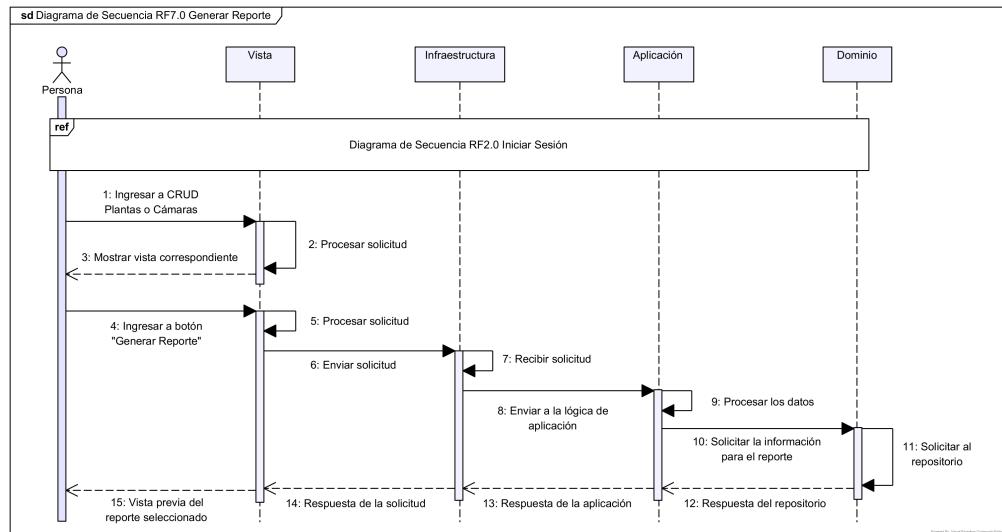


Figura 33

Diagrama de Secuencia para Descargar Reporte (RF7.1).

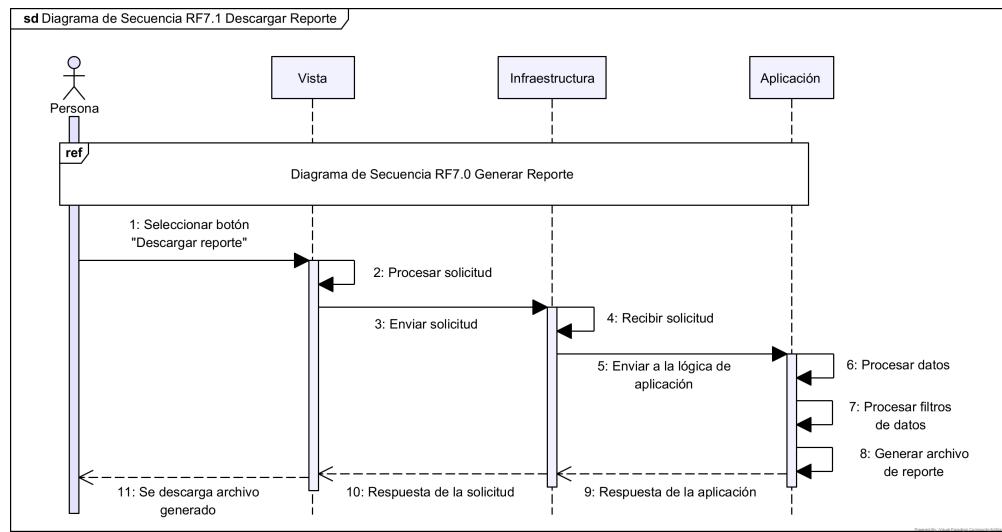


Figura 34

Diagrama de Secuencia para Adjuntar Reporte (RF7.2).

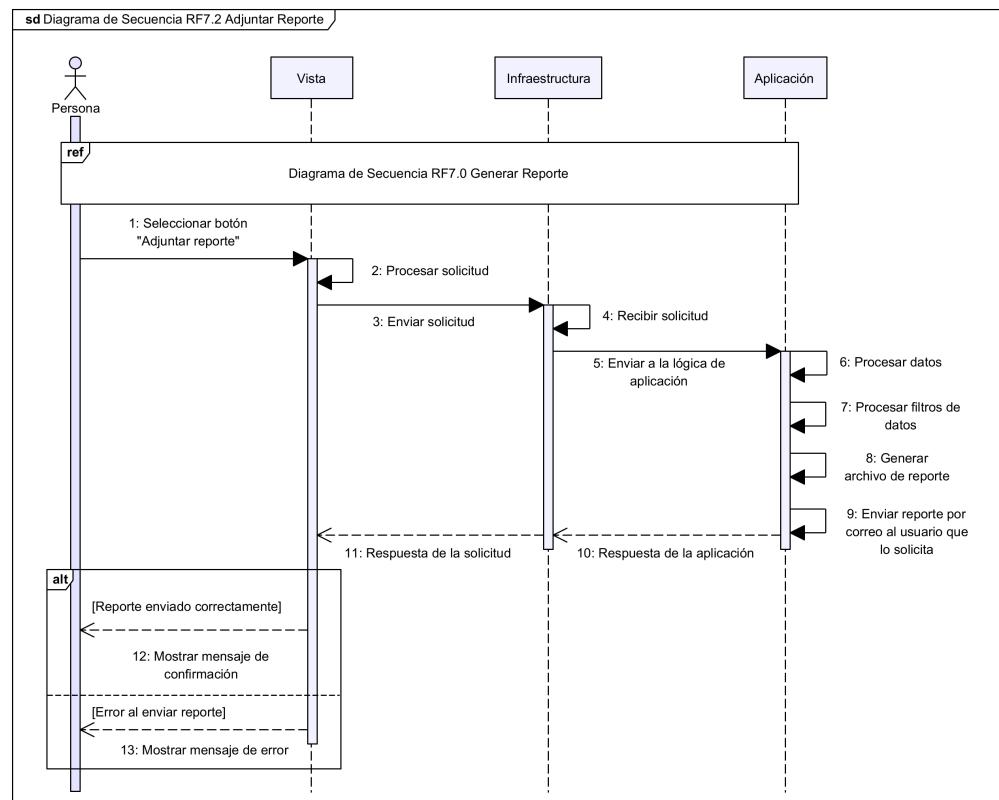


Figura 35

Diagrama de Secuencia para Notificar Planta (RF8.1).

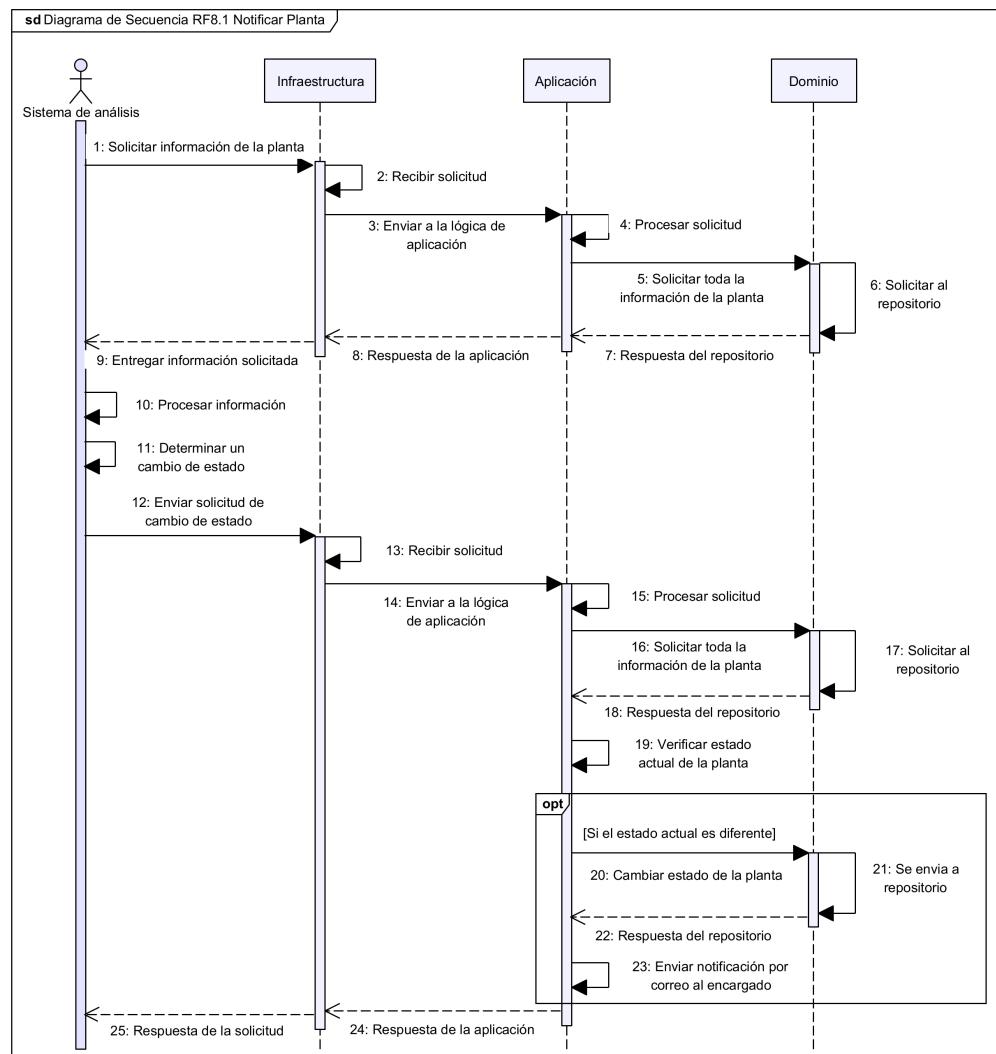


Figura 36

Diagrama de Secuencia para Notificar Seguridad (RF8.2).

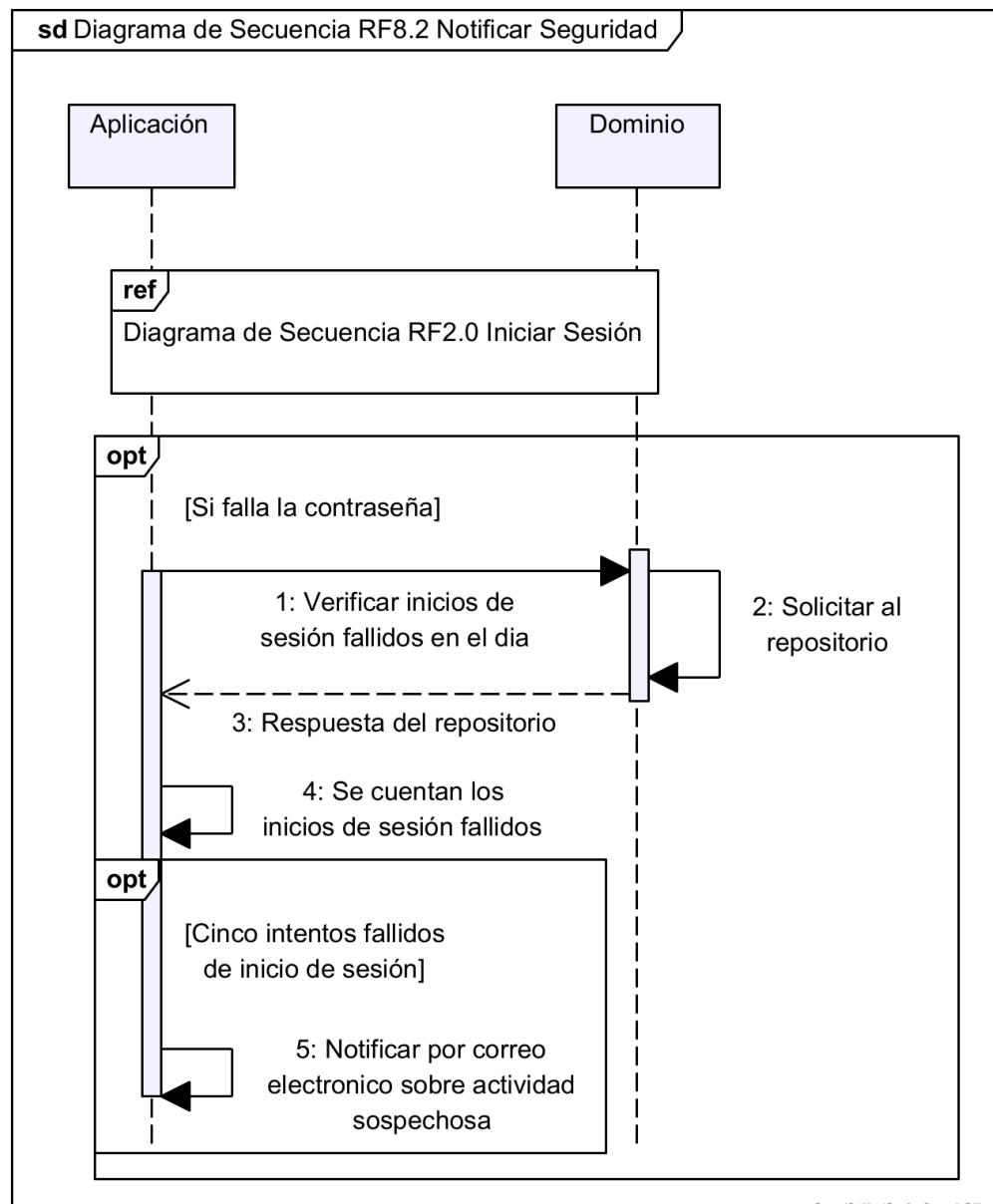


Figura 37

Diagrama de Secuencia para Crear Observación (RF9.1).

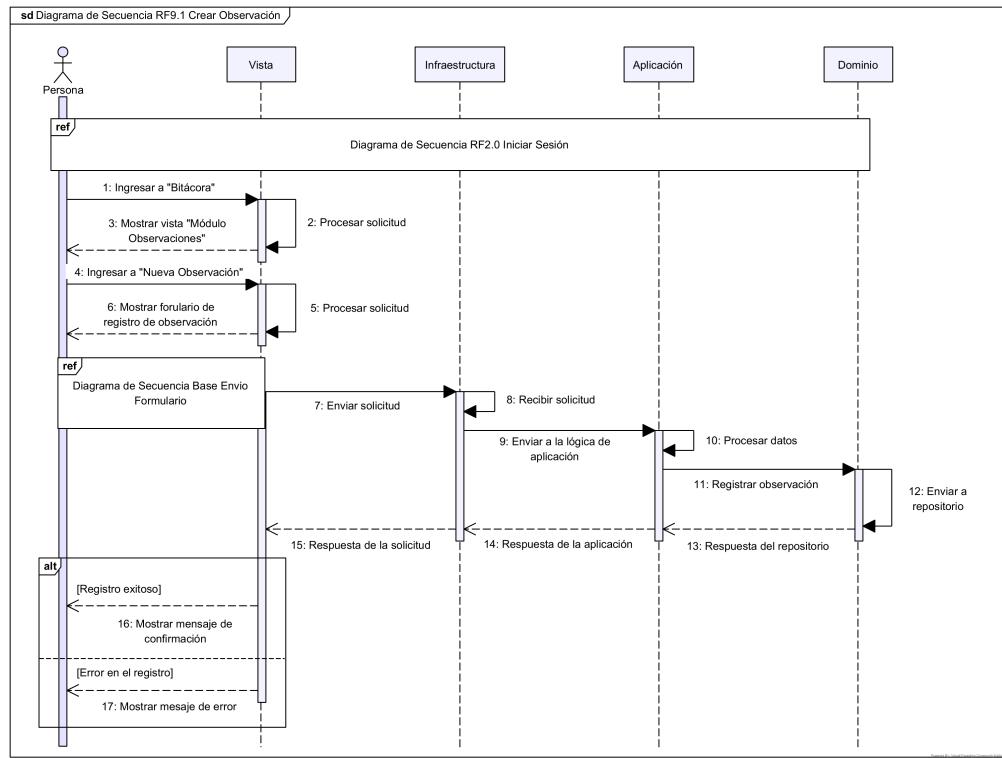
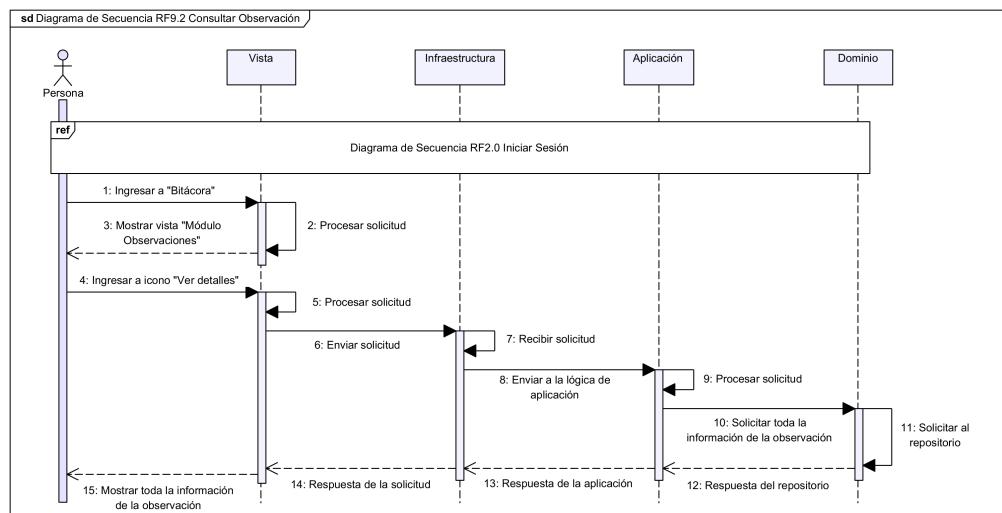


Figura 38

Diagrama de Secuencia para Consultar Observación (RF9.1).



2.4.4. Diagramas de Actividades

Una actividad muestra el flujo de control entre las actividades computacionales involucradas en la realización de un cálculo o un flujo de trabajo (Rumbaugh y cols., 2007). Una acción es un paso computacional primitivo y un nodo de actividad es un grupo de acciones o subactividades (Rumbaugh y cols., 2007). Una actividad describe tanto el cómputo secuencial como el concurrente (Rumbaugh y cols., 2007).

Los diagramas de actividad presentados a continuación modelan los flujos de trabajo (*workflows*) asociados a procesos o funcionalidades clave del sistema. Estos diagramas utilizan particiones verticales, comúnmente conocidas como calles o *swimlanes*, para asignar claramente la responsabilidad de cada acción a un participante específico del proceso. En la mayoría de los diagramas de este documento, se utilizan dos calles principales:

- **Usuario:** Esta calle agrupa todas aquellas actividades que son ejecutadas directamente por la persona que interactúa con la interfaz gráfica del sistema. Representa las acciones del usuario final, ya sea que actúe con el rol de **Usuario** o de **Administrador**. Ejemplos típicos de actividades en esta calle incluyen: ingresar datos en un formulario, seleccionar opciones, iniciar una acción (como presionar un botón) y visualizar mensajes o resultados mostrados por la aplicación.
- **Sistema:** Esta calle engloba todas las actividades y procesos que son realizados internamente por la aplicación software (backend y/o frontend). Representa las operaciones automáticas del sistema, tales como: procesar la información enviada por el usuario, validar datos según reglas de negocio, ejecutar algoritmos, consultar o actualizar información en la base de datos, determinar estados, generar respuestas y preparar la información que se devolverá a la interfaz para ser visualizada por el usuario.

La separación de actividades entre estas dos calles principales (*Usuario* y *Sistema*) permite visualizar de manera clara la interacción entre el usuario humano y la lógica interna de la aplicación a lo largo de un flujo de trabajo específico. Otros diagramas podrían incluir calles adicionales si participan otros actores o sistemas externos específicos en un proceso particular.

Figura 39

Diagrama de Actividad para el Registro (RF1.0).

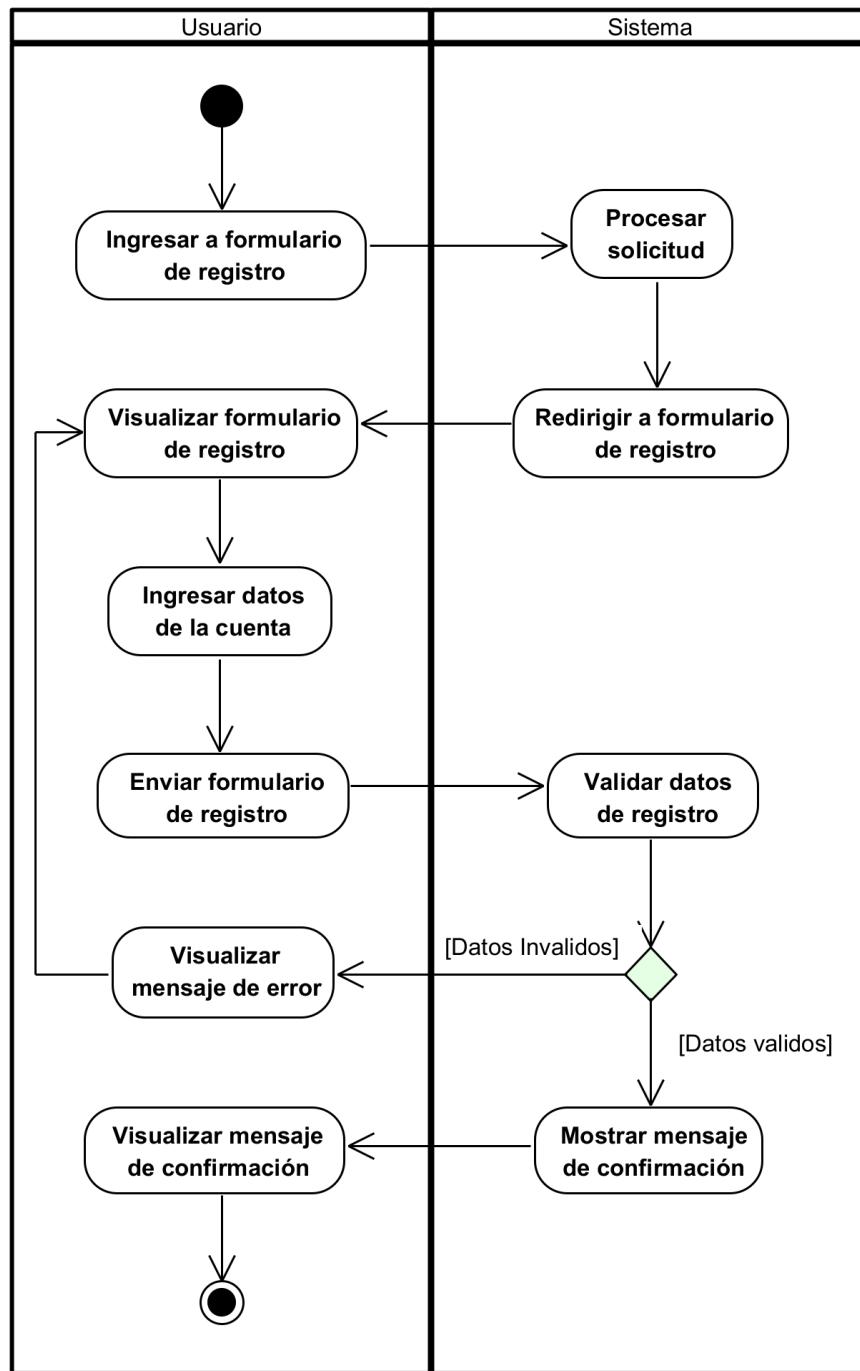


Figura 40

Diagrama de Actividad para Solicitar Código (RF1.1).

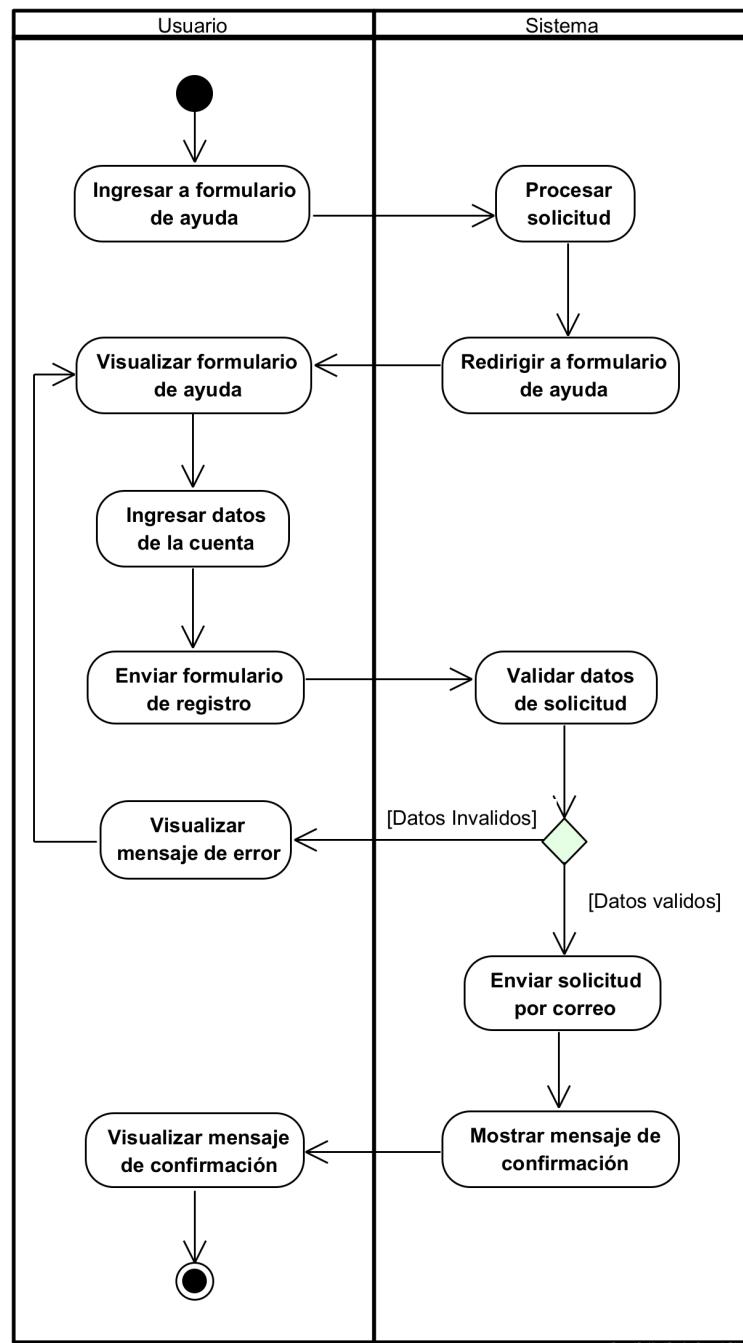


Figura 41

Diagrama de Actividad para Iniciar Sesión (RF2.0).

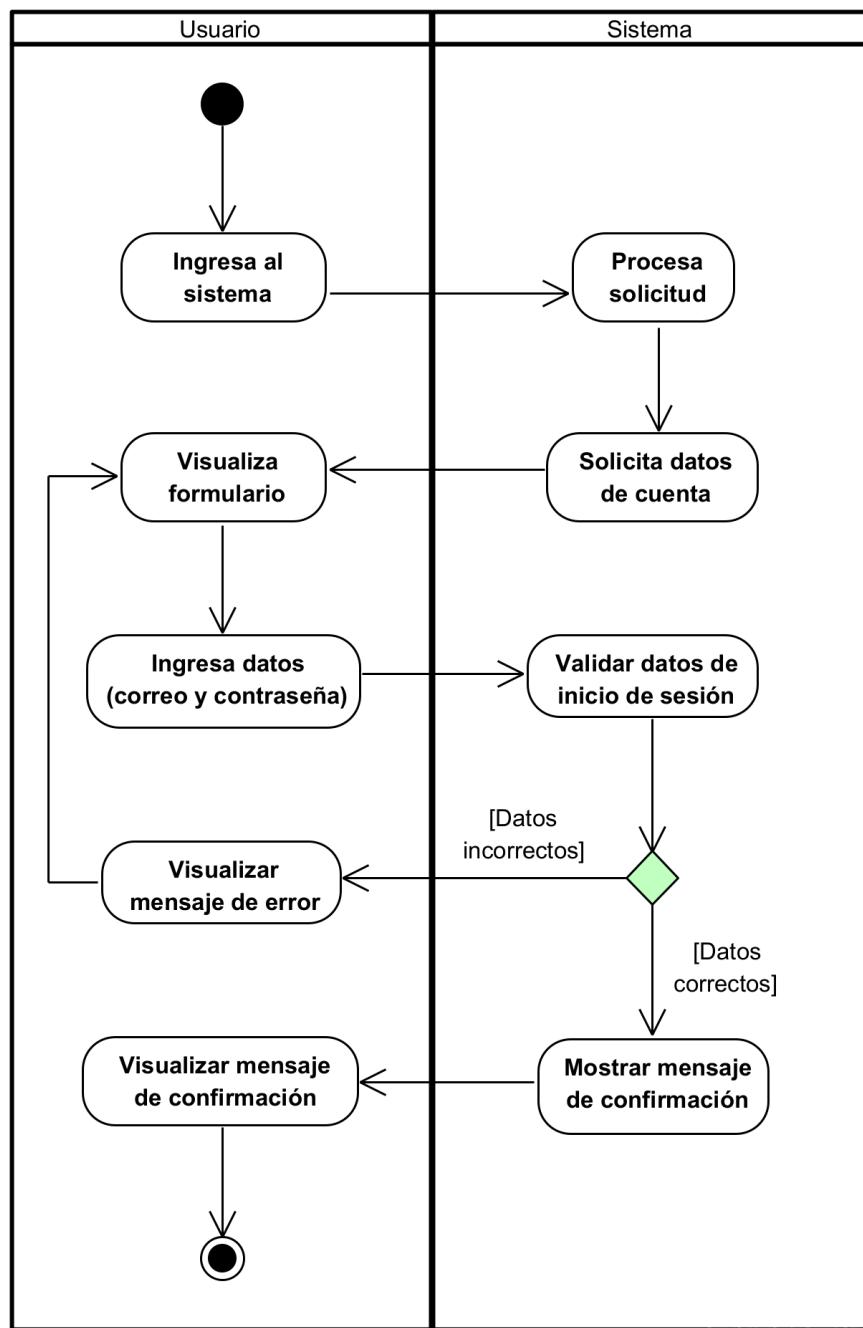


Figura 42

Diagrama de Actividad para Cerrar Sesión (RF2.1).

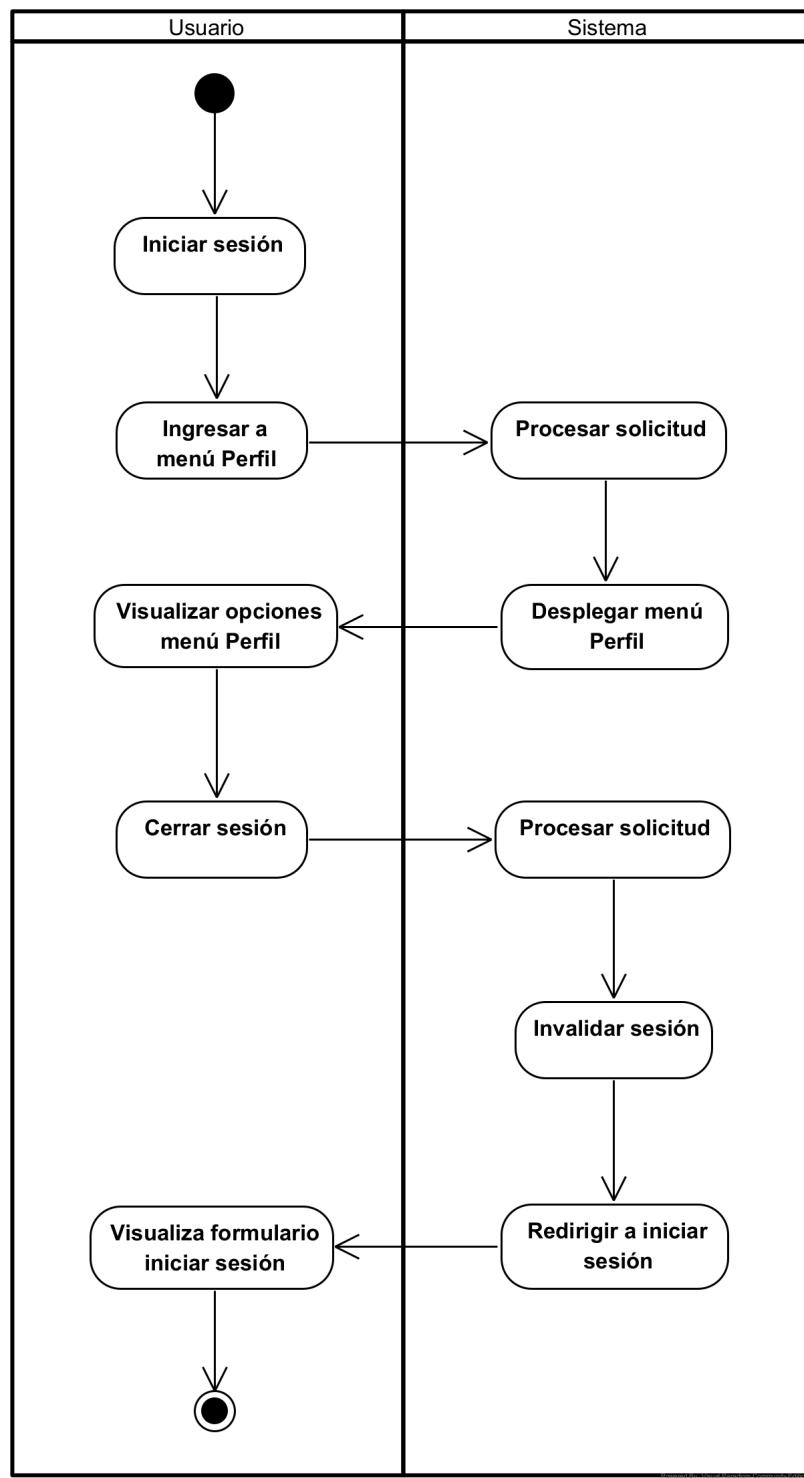


Figura 43

Diagrama de Actividad para Recuperar Contraseña (RF2.2).

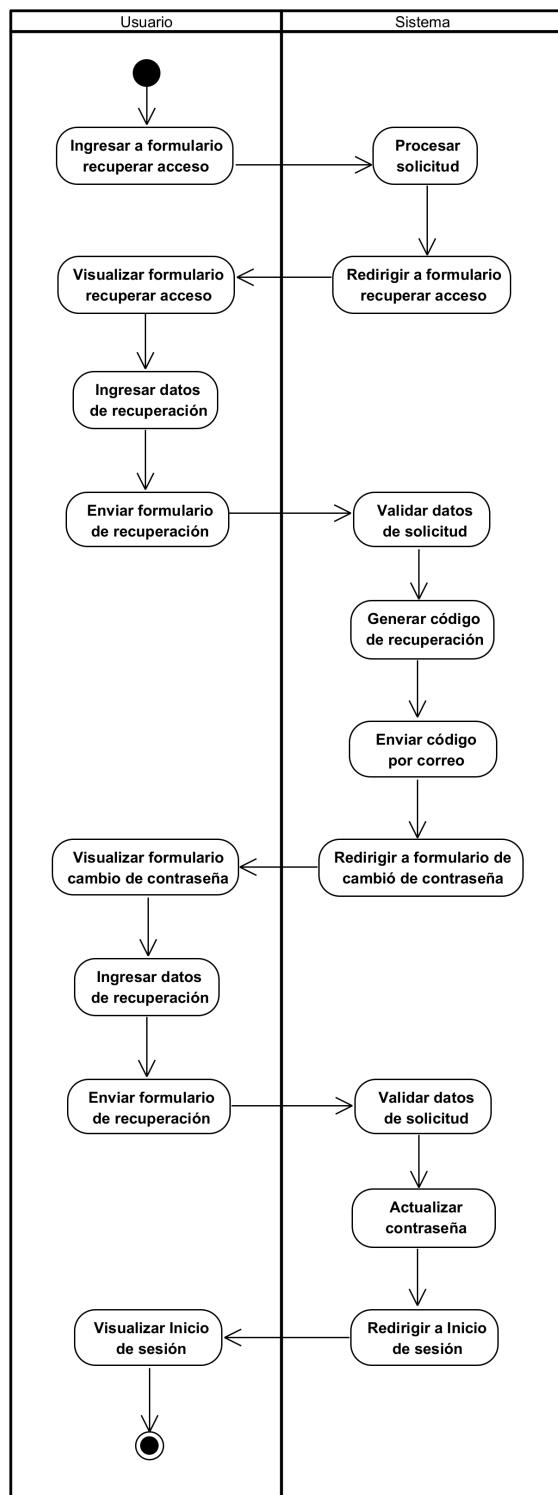


Figura 44

Diagrama de Actividad para Crear Cámara (RF3.1).

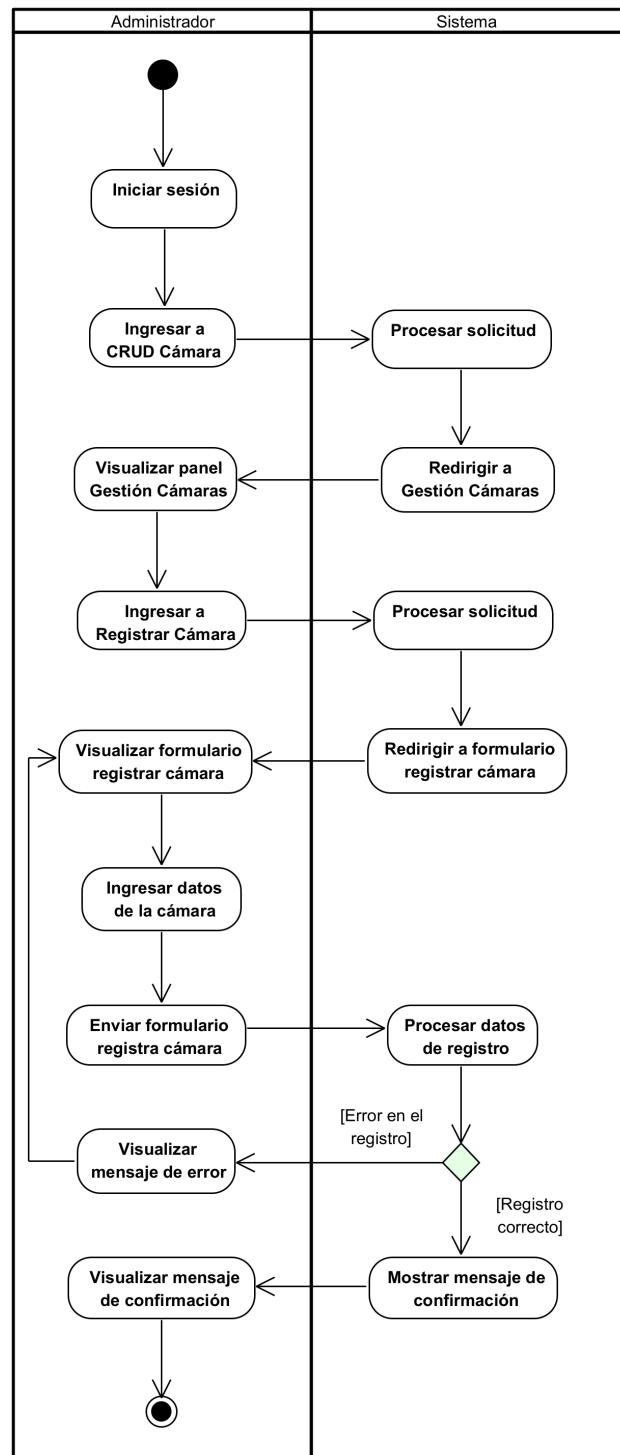
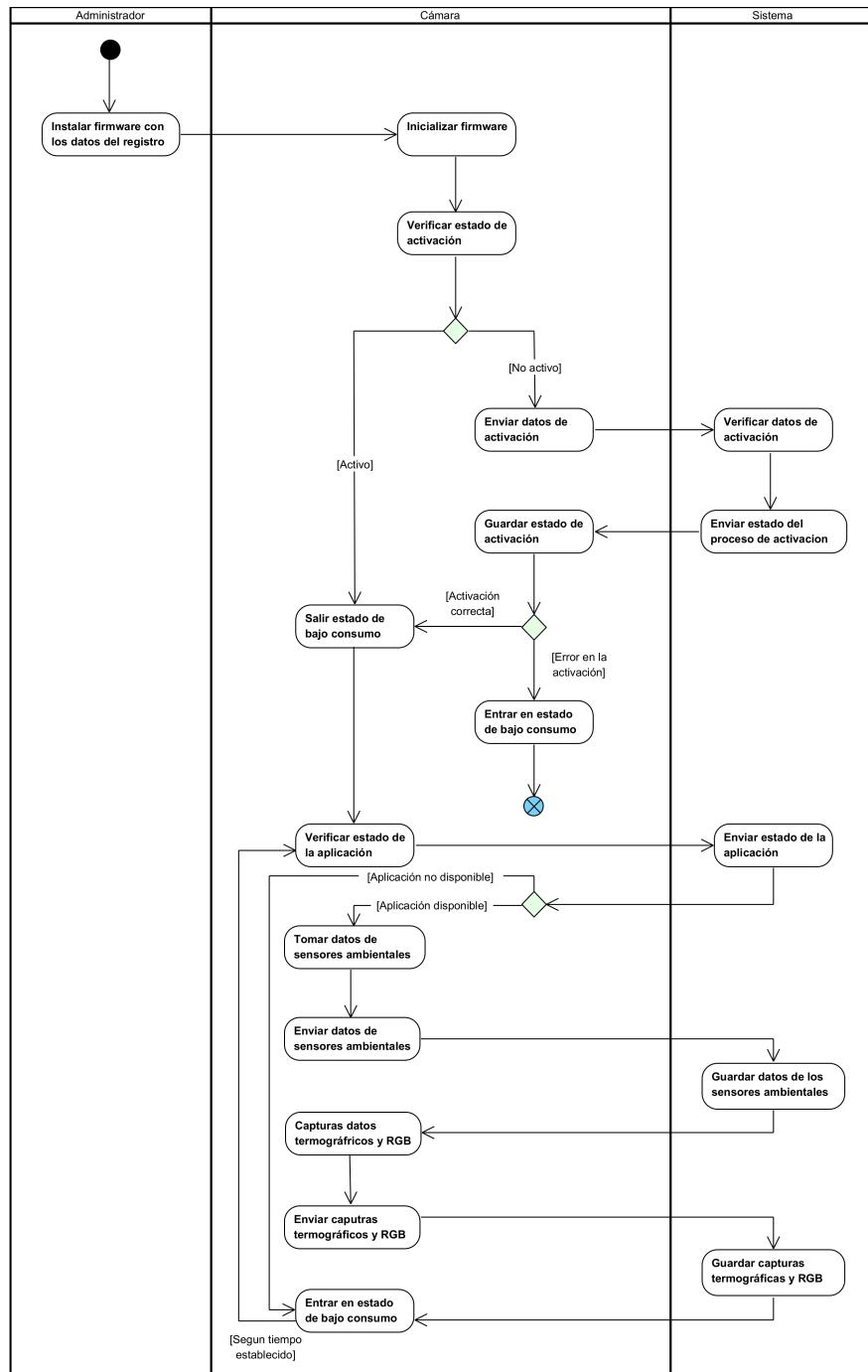


Figura 45

Diagrama de Actividad para Activar Cámara (RF3.1.1).



El diagrama de actividad de la Figura 45 muestra el flujo de trabajo para la activación e inicio de operación del dispositivo físico. Conforme a la descripción general proporcionada al inicio de esta sección, las calles **Administrador** y **Sistema** representan las acciones del usuario y del backend, respectivamente. La calle **Hardware**, corresponden a la lógica ejecutada por el firmware del propio dispositivo. Este flujo describe cómo el hardware gestiona su activación inicial y luego opera en un ciclo de verificación, recolección, envío y espera, interactuando con el **Sistema** cuando es necesario y gestionando su consumo de energía.

Figura 46

Diagrama de Actividad para Consultar Cámara (RF3.2).

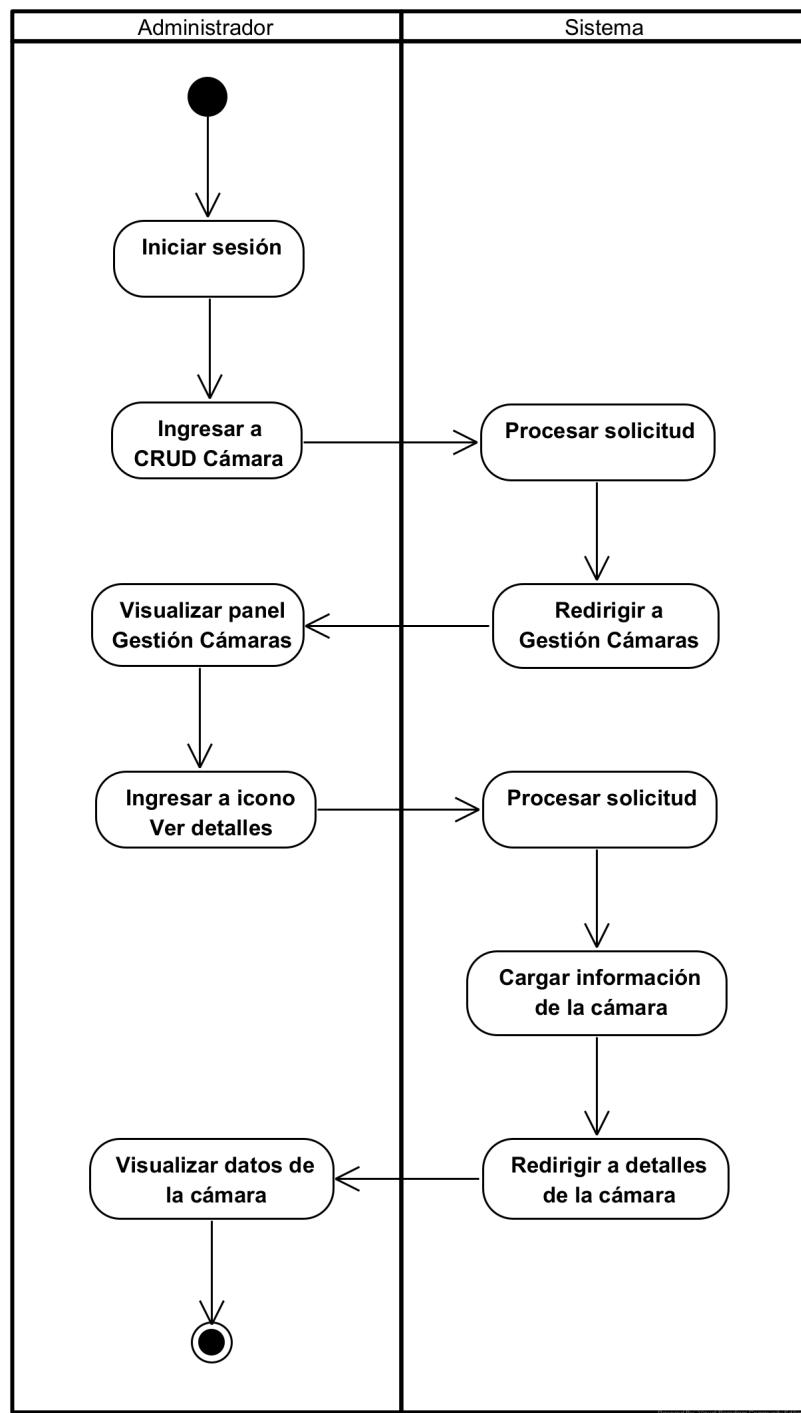


Figura 47

Diagrama de Actividad para Editar Cámara (RF3.3).

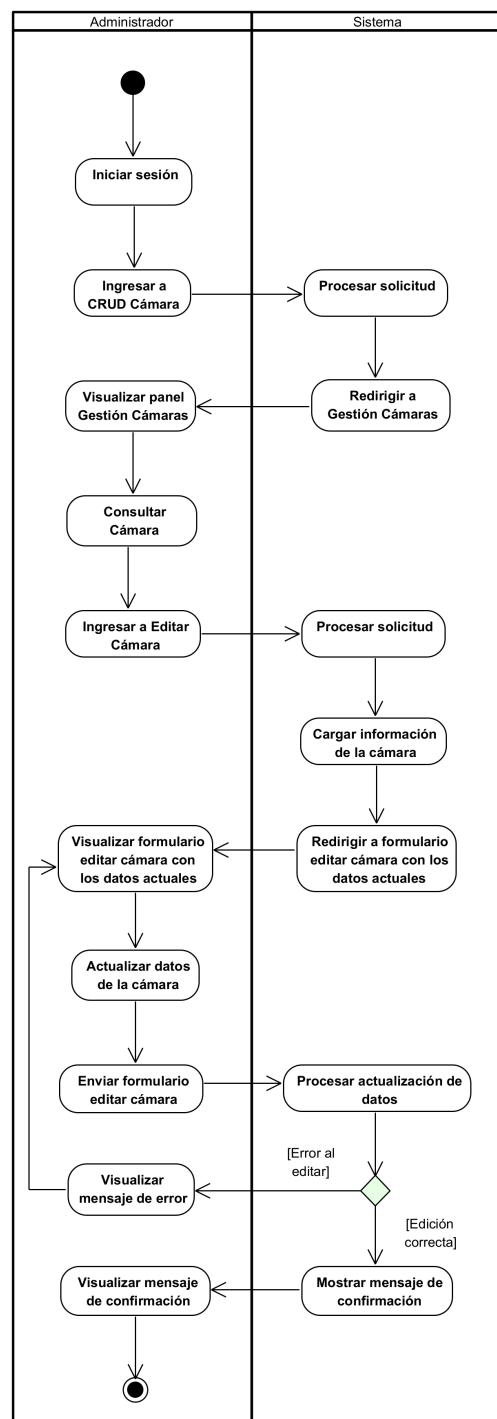


Figura 48

Diagrama de Actividad para Eliminar Cámara (RF3.4).

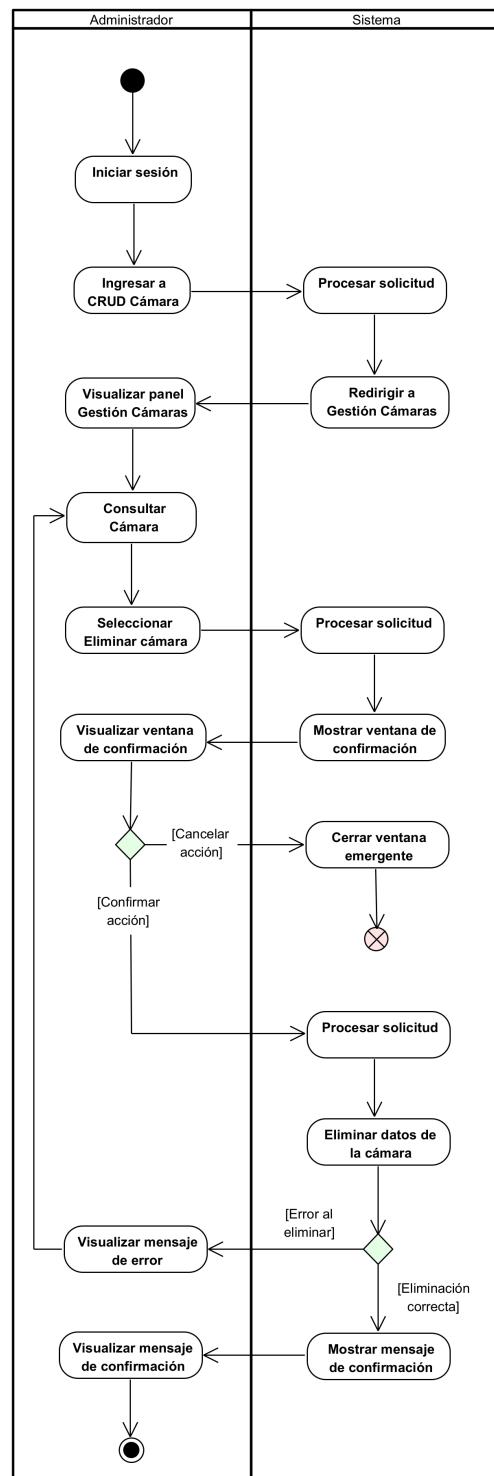


Figura 49

Diagrama de Actividad para Consultar Perfil (RF4.1).

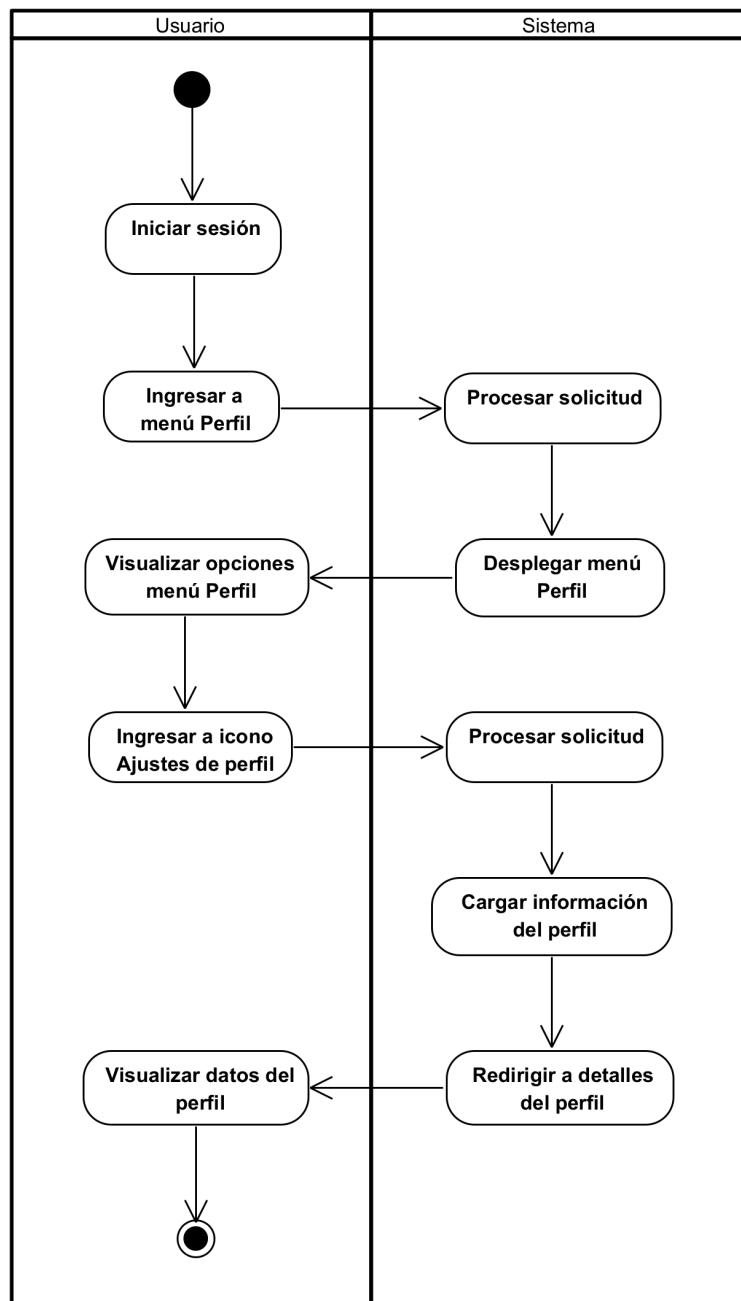


Figura 50

Diagrama de Actividad para Editar Perfil (RF4.2).

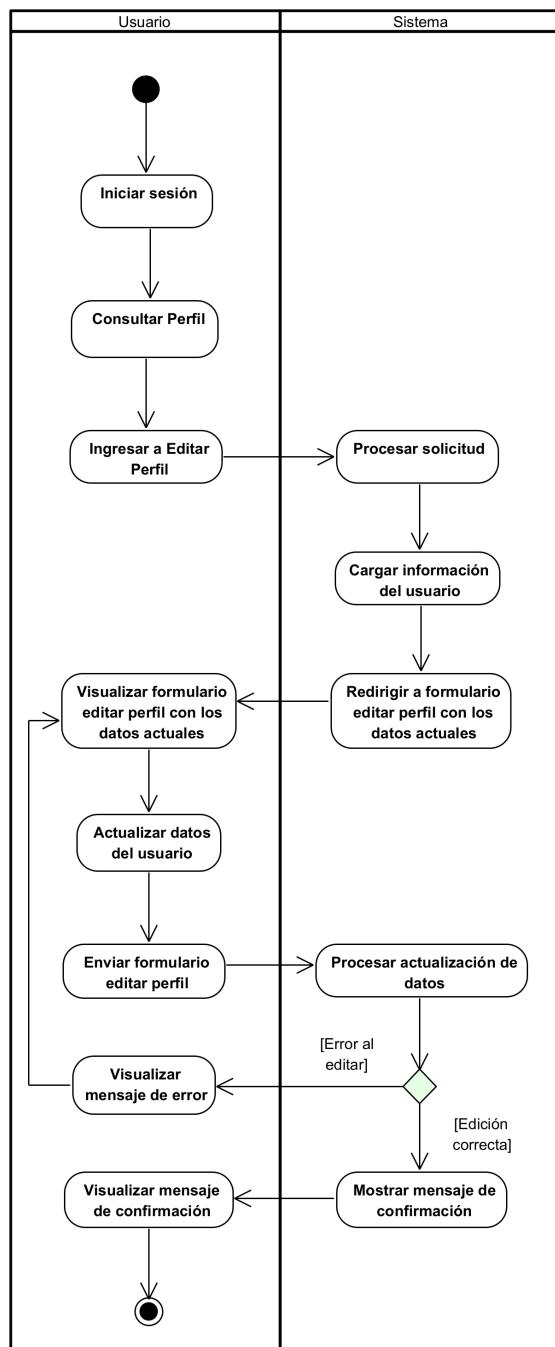


Figura 51

Diagrama de Actividad para Eliminar Perfil (RF4.3).

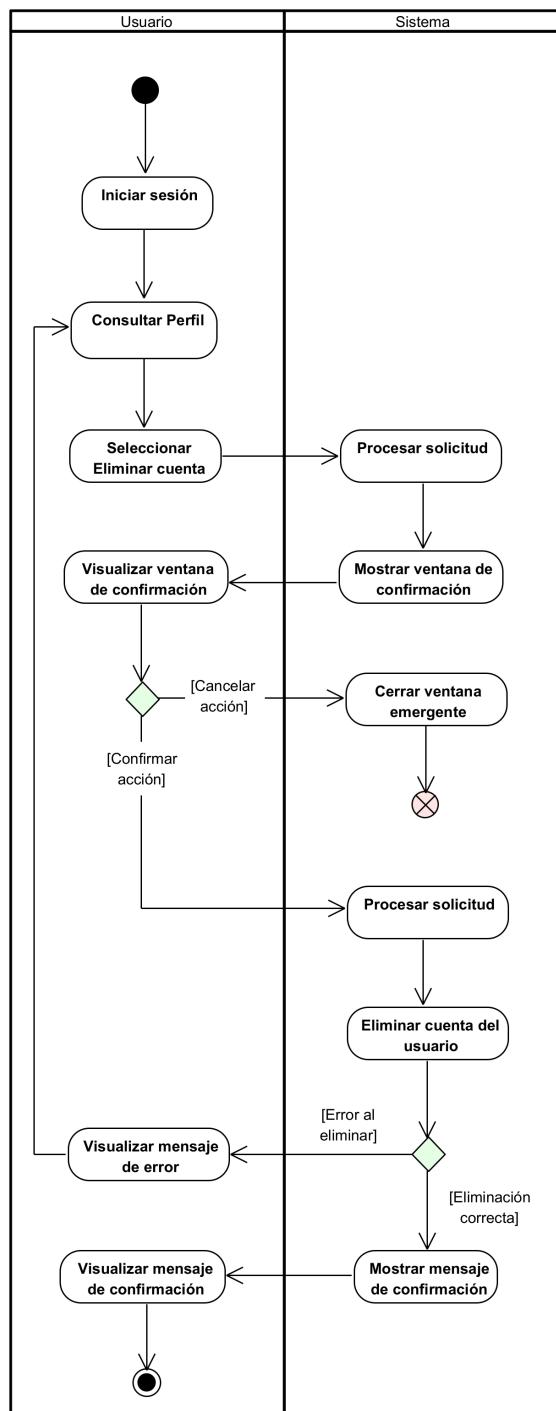


Figura 52

Diagrama de Actividad para Cambiar Contraseña (RF4.4).

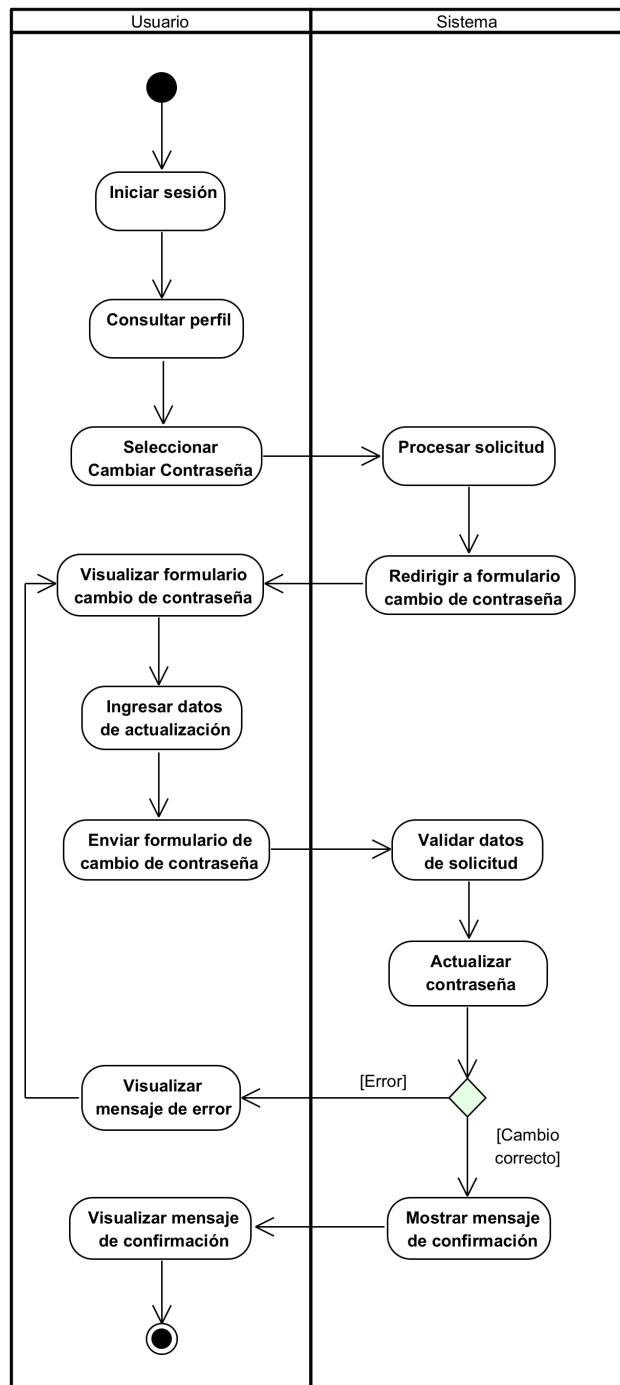


Figura 53

Diagrama de Actividad para Agregar Integrante de Cultivo (RF4.5).

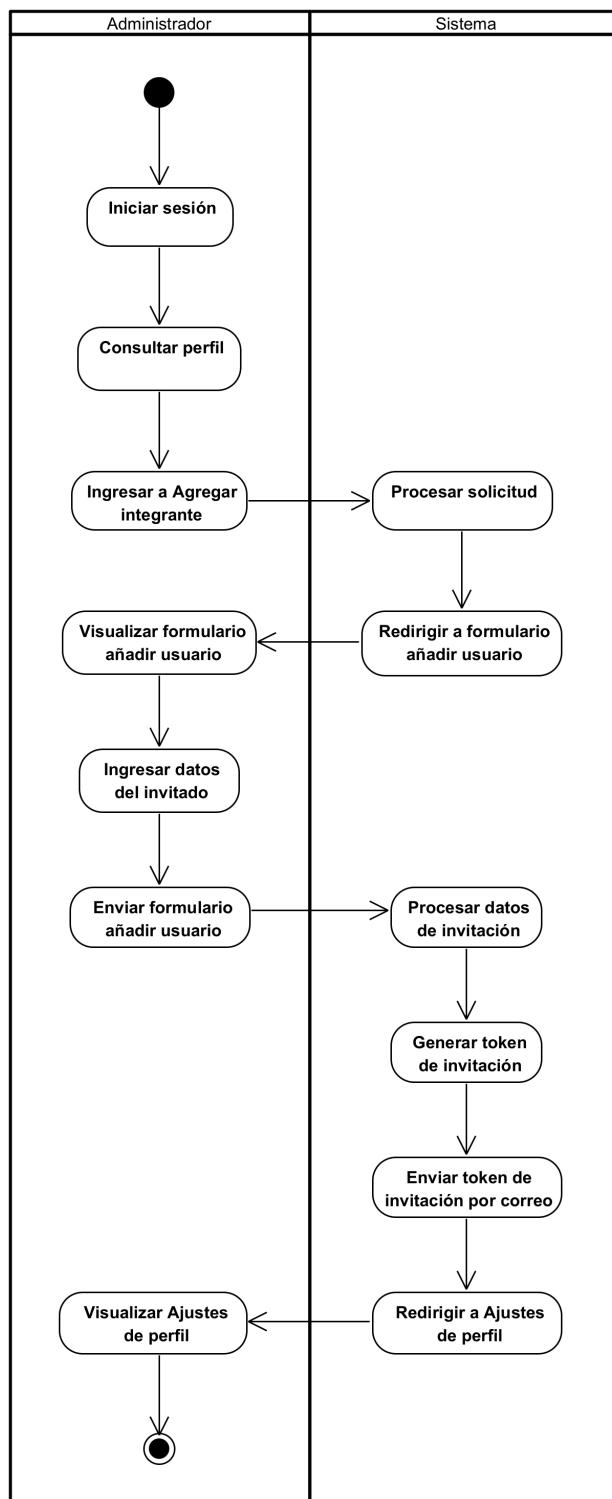


Figura 54

Diagrama de Actividad para Eliminar Integrante de Cultivo (RF4.6).

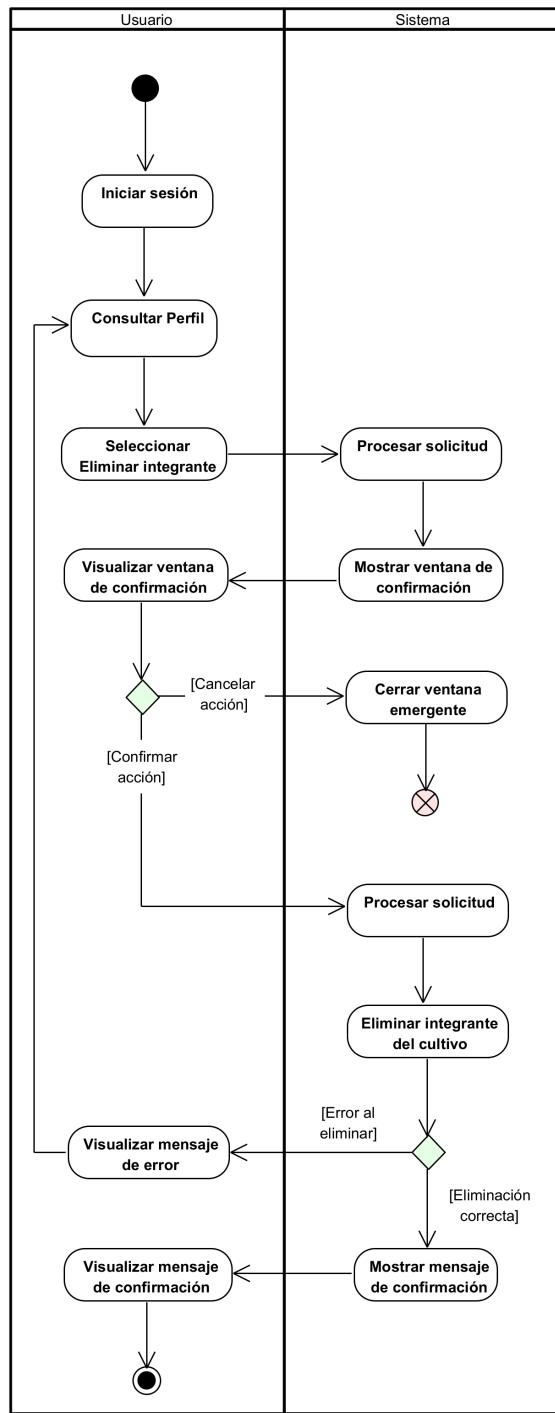


Figura 55

Diagrama de Actividad para el Módulo de Mediciones (RF5.0).

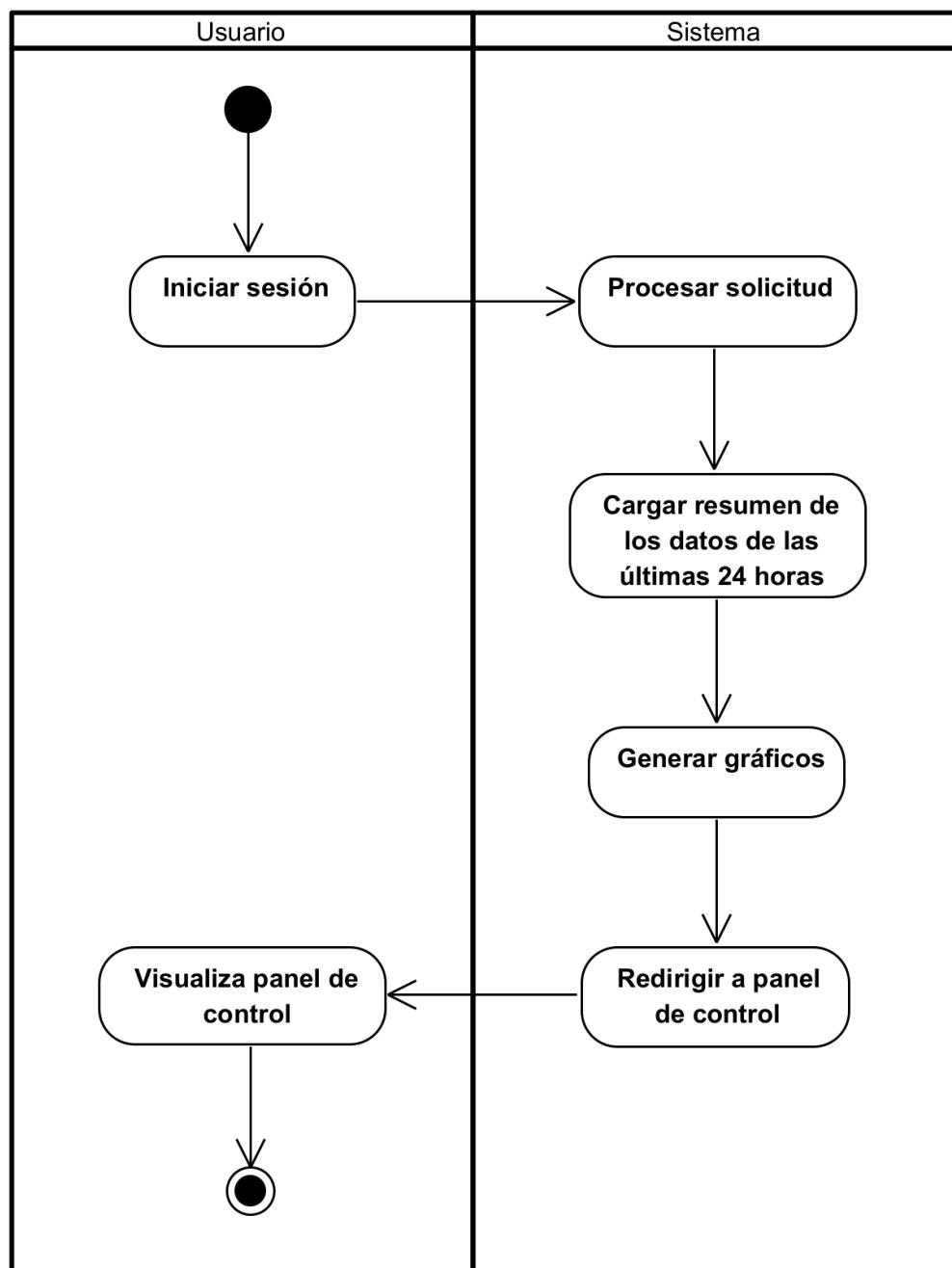


Figura 56

Diagrama de Actividad para Crear Planta (RF6.1).

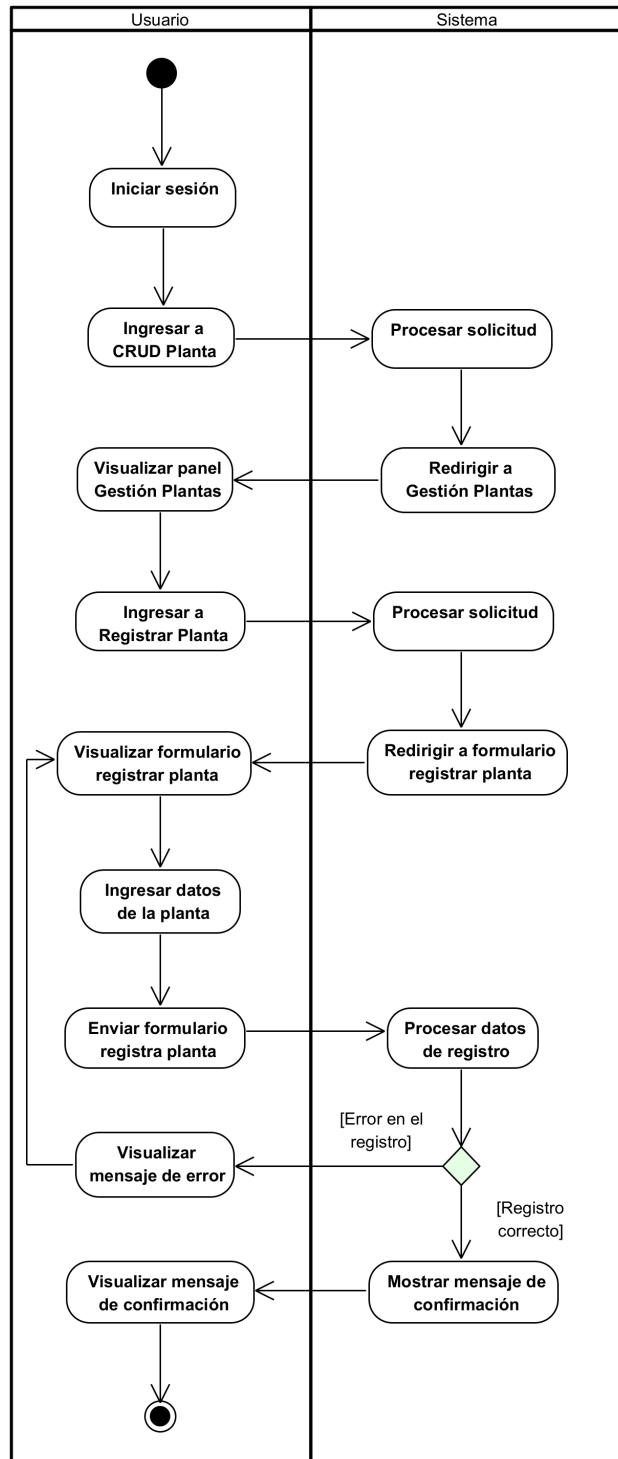


Figura 57

Diagrama de Actividad para Consultar Planta (RF6.2).

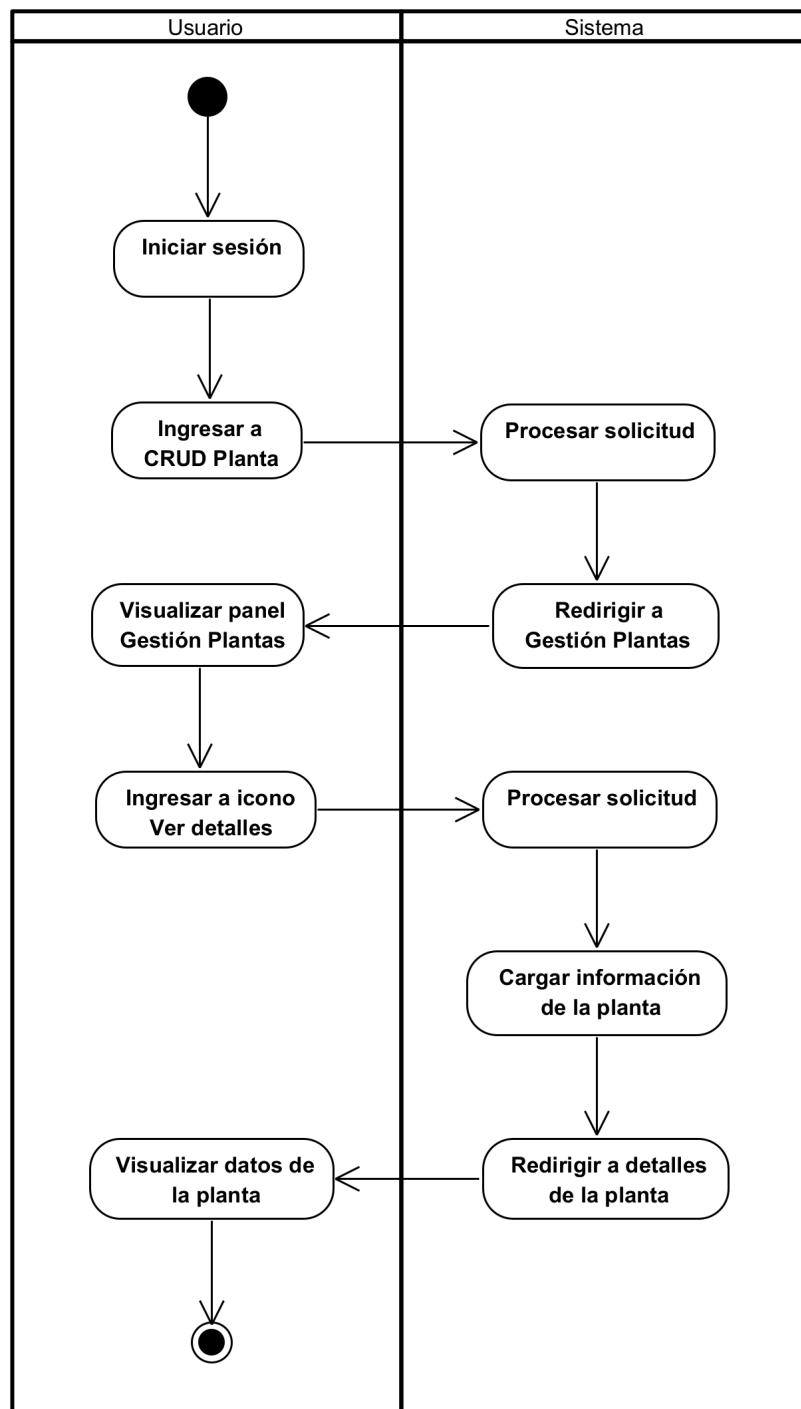


Figura 58

Diagrama de Actividad para Editar Planta (RF6.3).

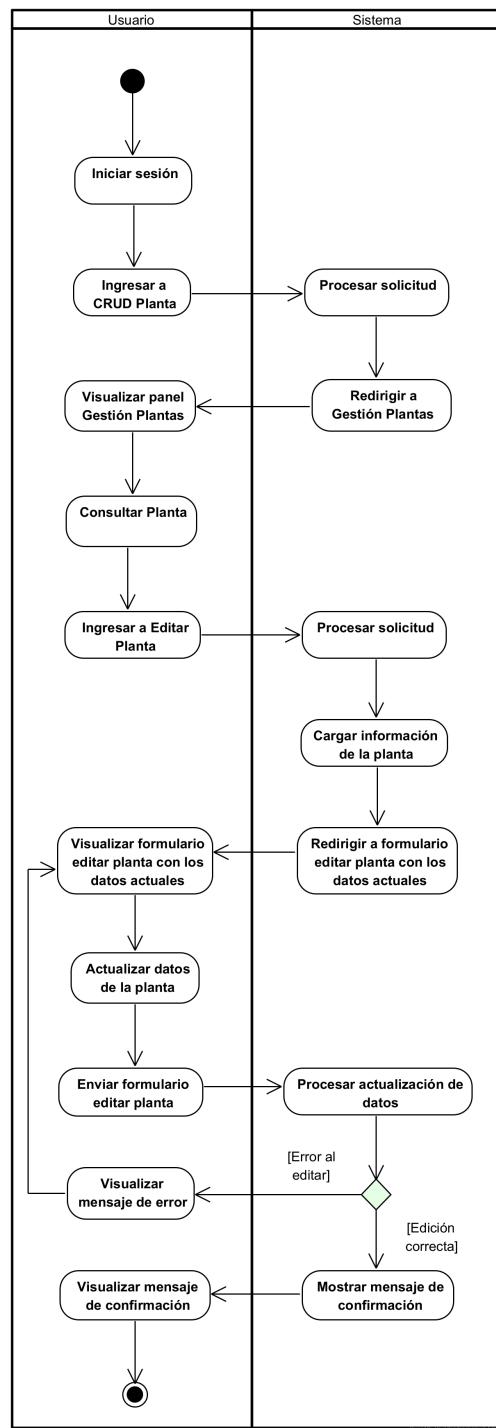


Figura 59

Diagrama de Actividad para Eliminar Planta (RF6.4).

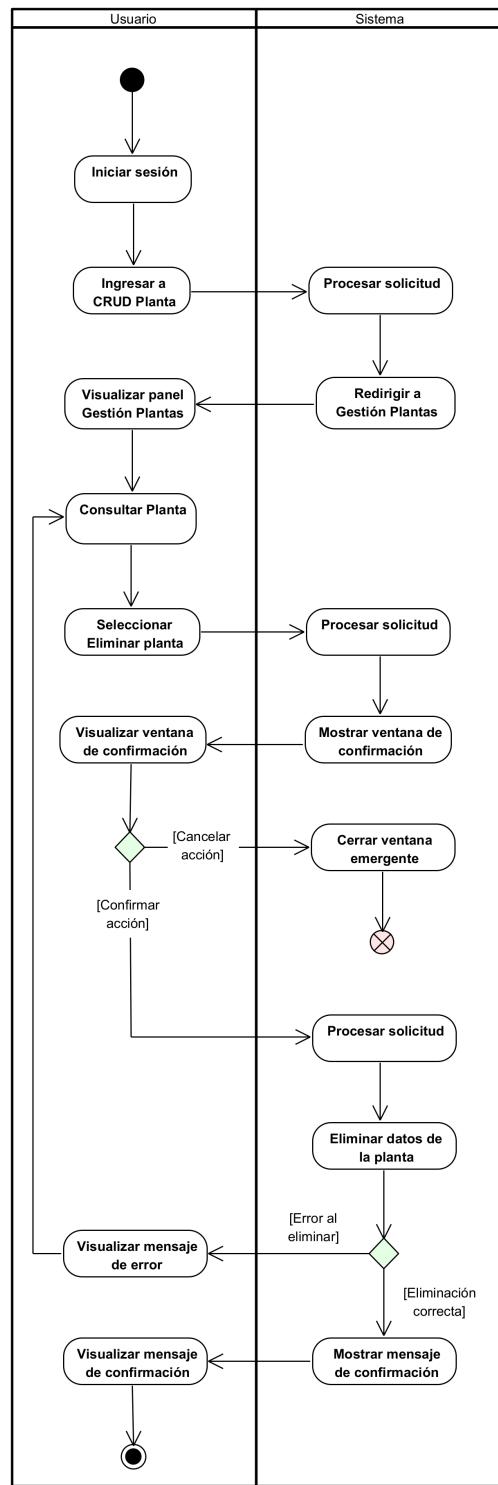


Figura 60

Diagrama de Actividad para Generar Reporte (RF7.0).

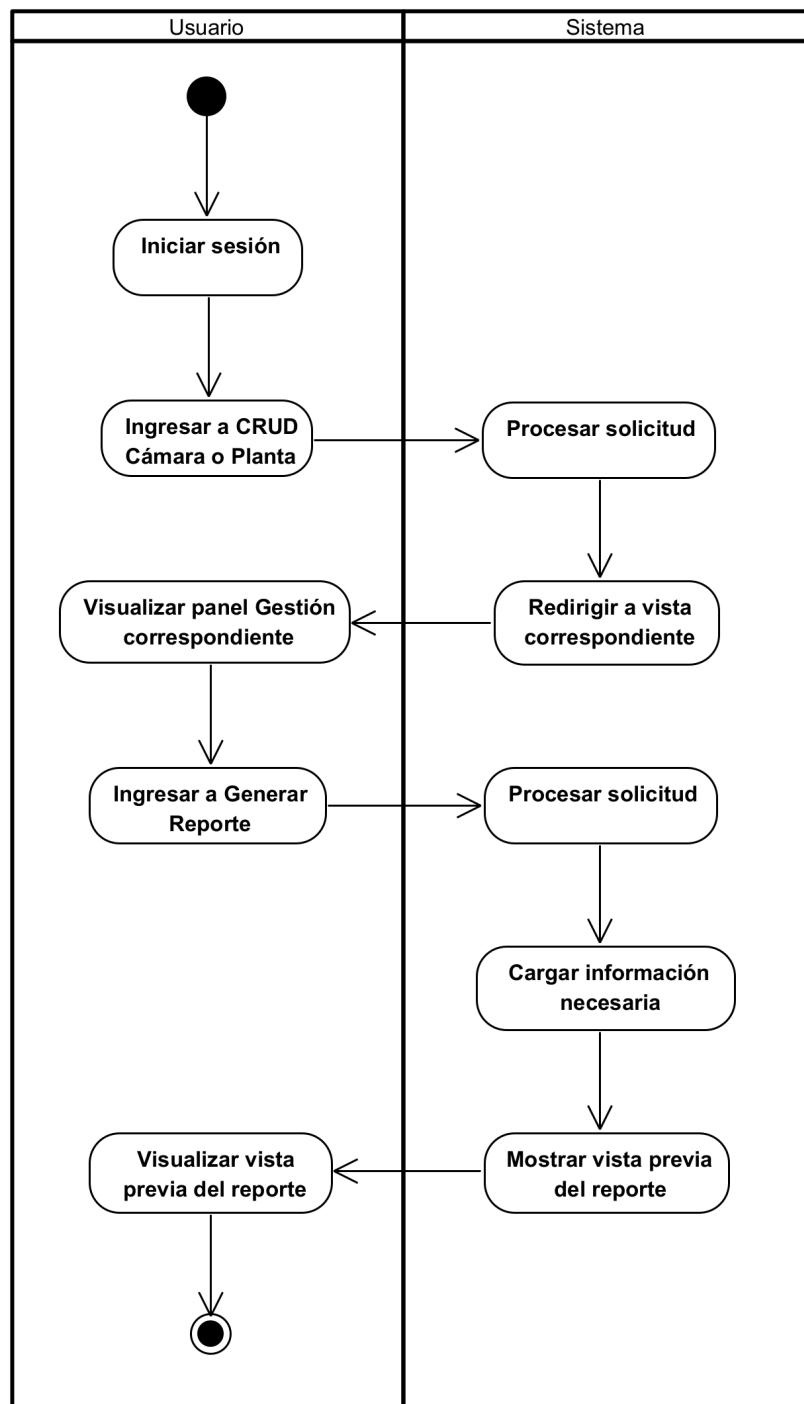


Figura 61

Diagrama de Actividad para Descargar Reporte (RF7.1).

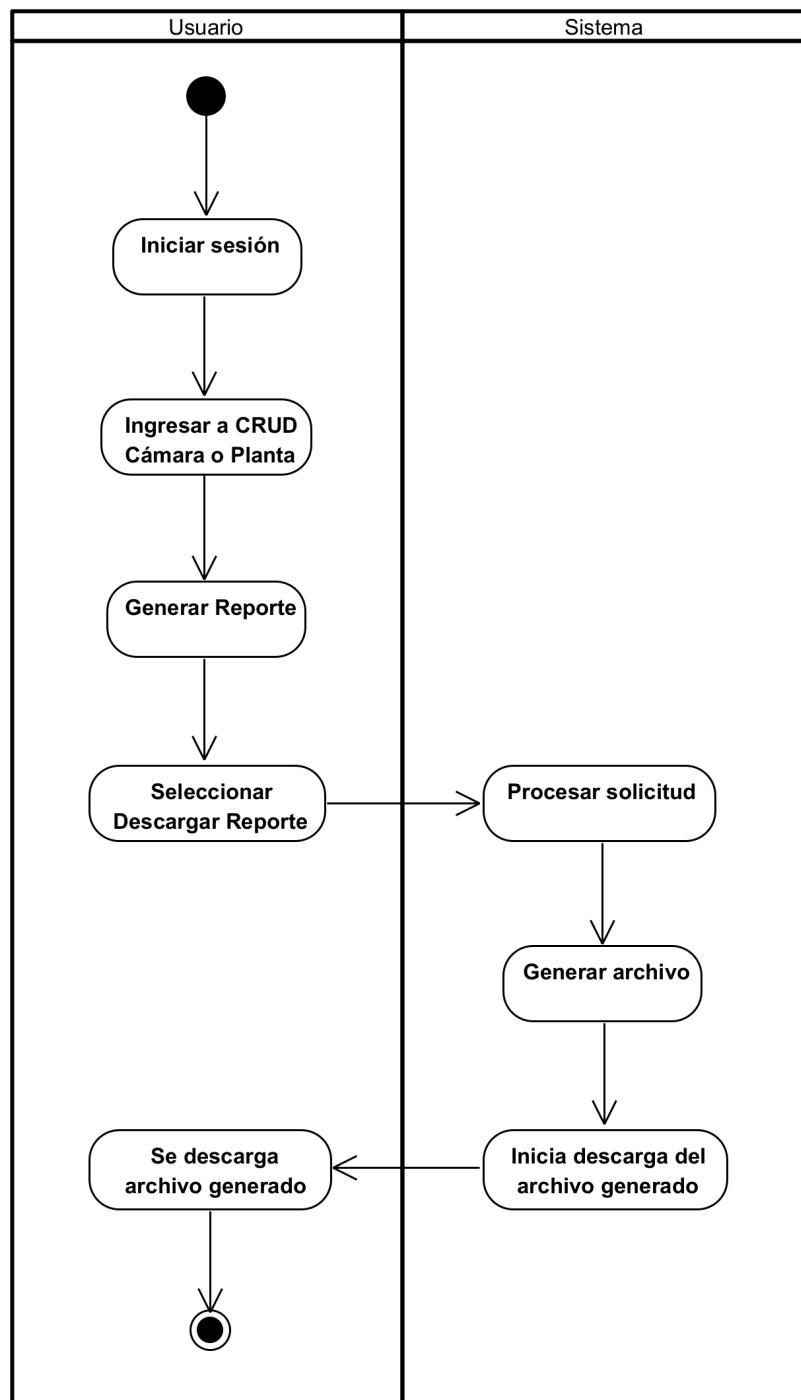


Figura 62

Diagrama de Actividad para Adjuntar Reporte (RF7.2).

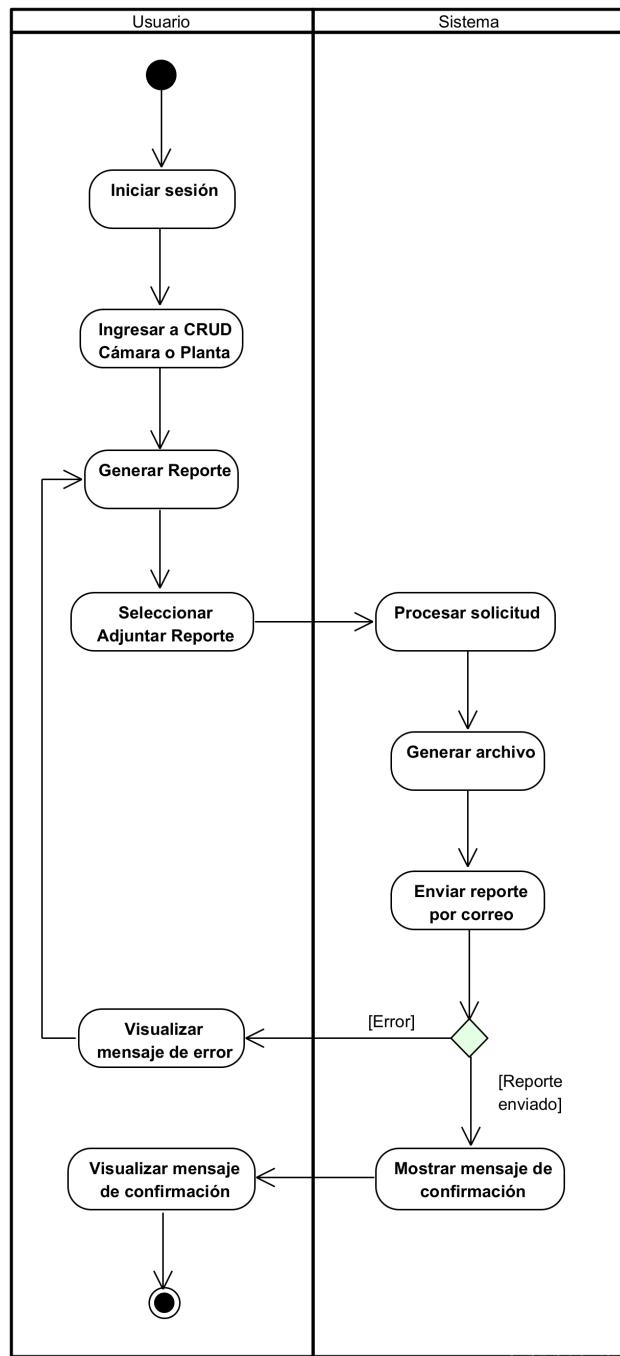


Figura 63

Diagrama de Actividad para Notificar Planta (RF8.1).

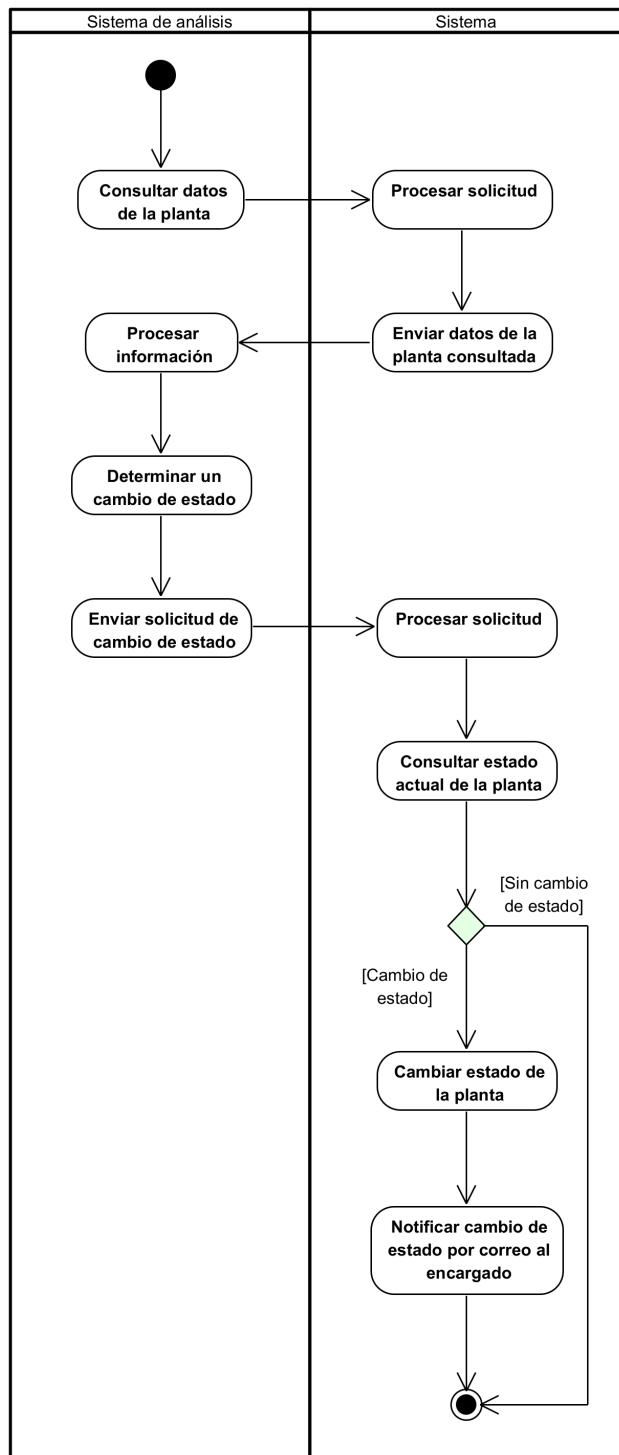


Figura 64

Diagrama de Actividad para Notificar Seguridad (RF8.2).

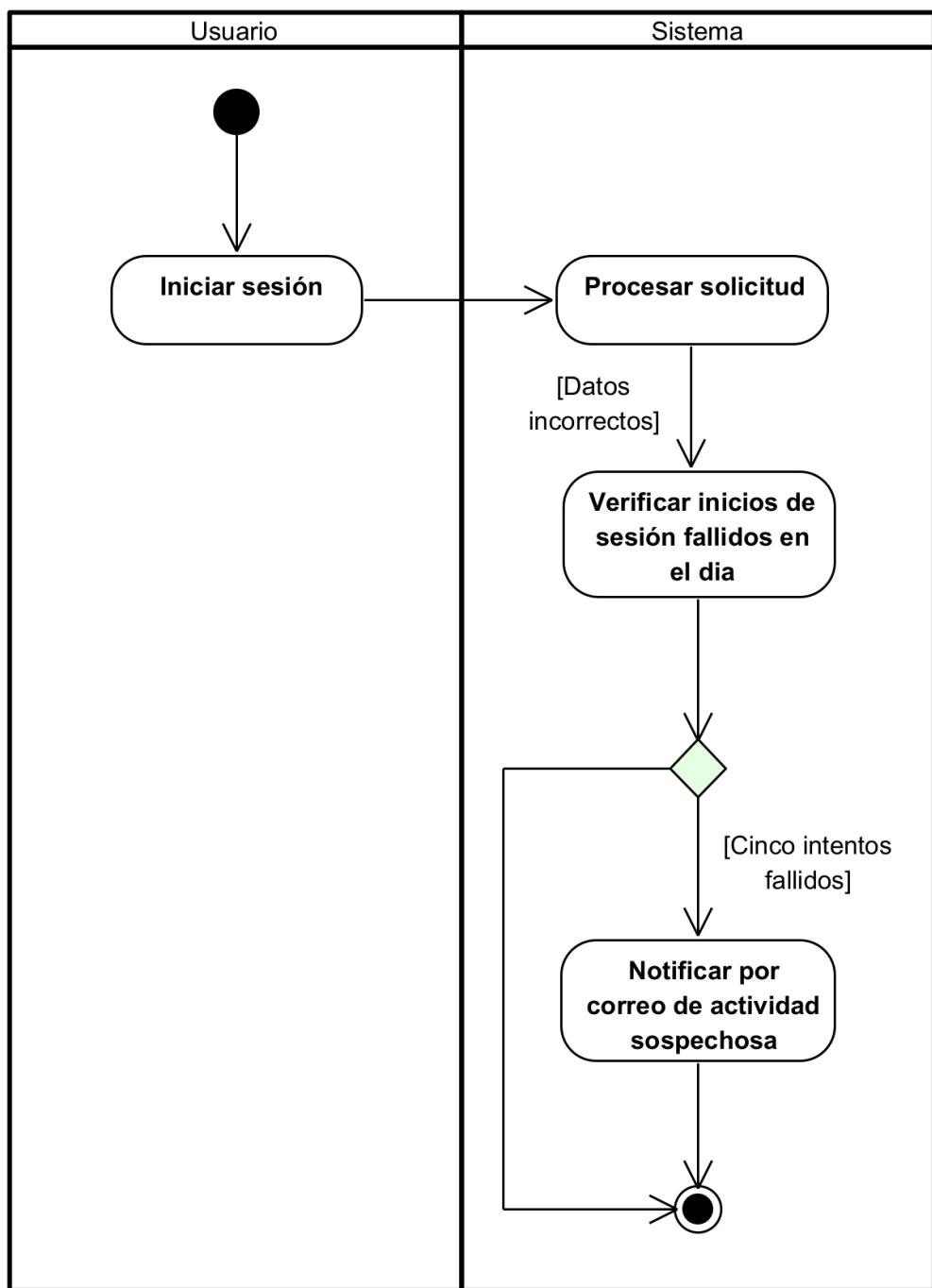


Figura 65

Diagrama de Actividad para Crear Observación (RF9.1).

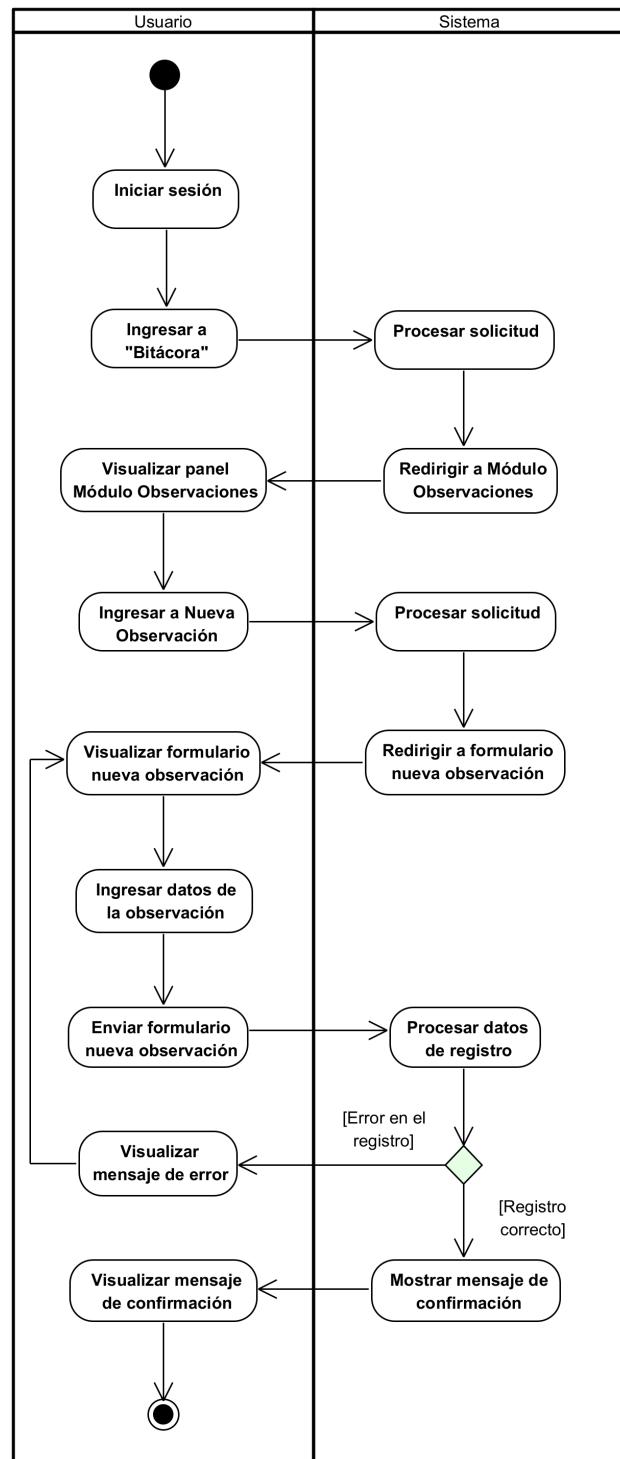
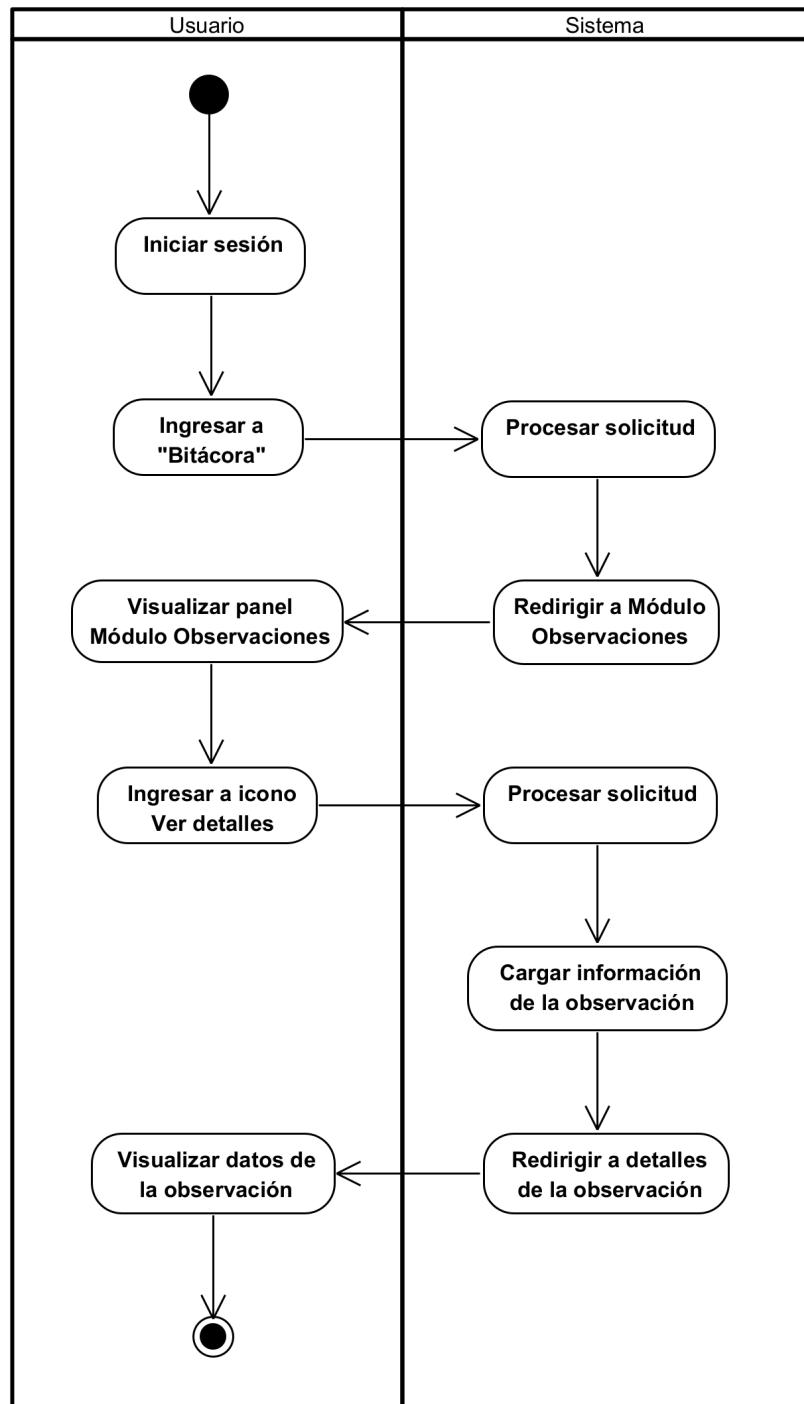


Figura 66

Diagrama de Actividad para Consultar Observación (RF9.2).



2.4.5. Diagrama de Clases

Una clase es la descripción de un concepto del dominio de la aplicación o del dominio de la solución (Rumbaugh y cols., 2007). Las clases son el centro alrededor del cual se organiza la vista de clases (Rumbaugh y cols., 2007). La vista estática se muestra en los diagramas de clases (Rumbaugh y cols., 2007).

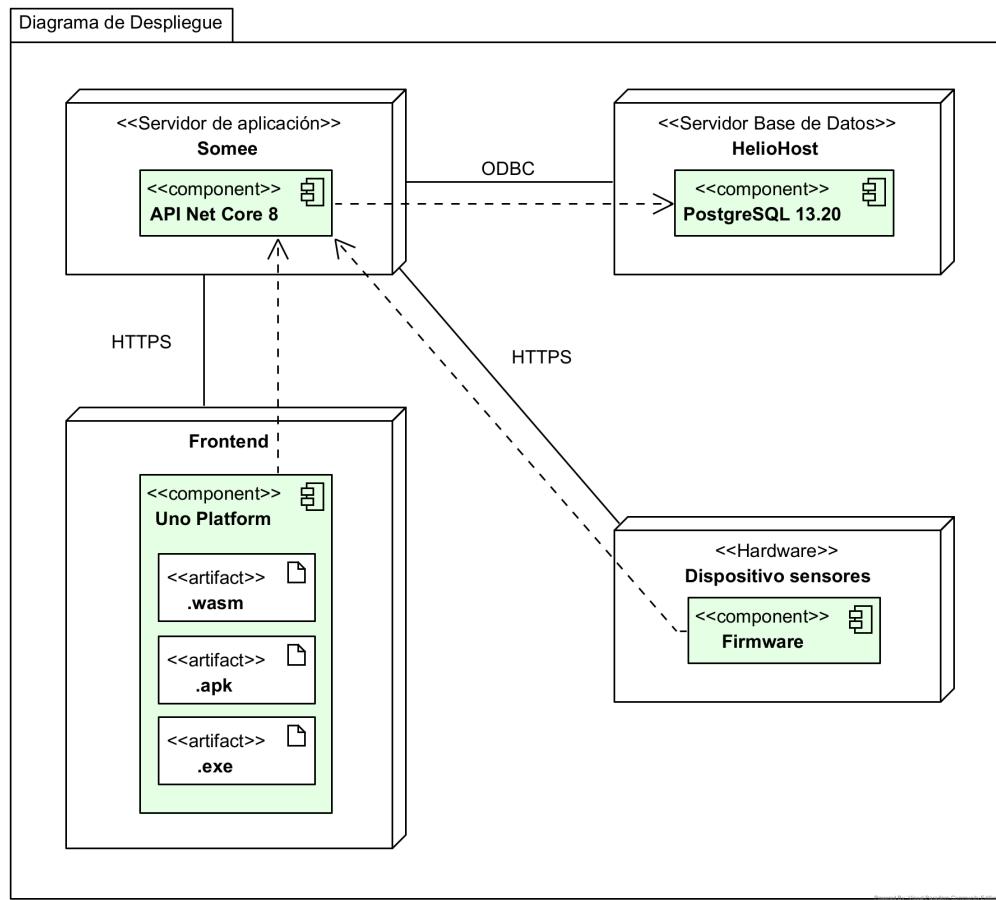
En esta sección se presenta el diagrama de clases principal del sistema. Se describirán las tablas (clases) más importantes, sus atributos, las relaciones (asociaciones, generalizaciones) entre ellas y cómo estas estructuras en conjunto definen el funcionamiento general y la organización de los datos del sistema.

2.4.6. Diagrama de Despliegue

La vista de despliegue muestra la disposición física de los nodos, que son recursos computacionales de tiempo de ejecución, como computadoras u otros dispositivos (Rumbaugh y cols., 2007). Durante la ejecución, los nodos pueden contener artefactos, que son entidades físicas como archivos (Rumbaugh y cols., 2007).

Figura 67

Diagrama de Despliegue del Sistema.



El Diagrama de Despliegue, mostrado en la Figura 67, representa la arquitectura física del sistema y cómo sus componentes de software se distribuyen en diferentes nodos de hardware y servidores. Se identifican cuatro nodos principales:

- **Frontend:** Representa el entorno cliente donde se ejecuta la interfaz de usuario. Despliega un componente Uno Platform y genera artefactos para diversas plataformas (.wasm, .apk, .exe).
- **«Servidor de aplicación»:** Alojado en la plataforma Somee, donde se despliega el com-

ponente principal de backend: la API Net Core 8.

- «Servidor Base de Datos»: Alojado en HelioHost, que ejecuta el sistema gestor de base de datos PostgreSQL 13.20.
- «Hardware» Dispositivo sensores: Representa el dispositivo físico encargado de la toma de datos y ejecuta su propio Firmware.

La comunicación entre el Frontend y la API, así como entre el Dispositivo sensores y la API, se establece a través del protocolo seguro HTTPS. La API interactúa con la base de datos mediante ODBC. El diagrama ilustra una arquitectura distribuida cliente-servidor, donde tanto los usuarios finales como los dispositivos de hardware se comunican con un servicio central (API) que gestiona la lógica y la persistencia de los datos.

2.5. Diseño de los Casos de Prueba

Texto sobre el diseño de casos de prueba utilizando SonarQube.

2.6. Estimación de Recursos

Texto sobre la estimación de recursos utilizando el método de puntos de función o puntos de casos de uso.

2.7. Resultados de la Implementación del Software

Texto sobre el resultado de implementar el software.

2.8. Conclusiones y Recomendaciones del software

Discusión, conclusiones y recomendaciones sobre el software y su integración.

III. DOCUMENTACIÓN HARDWARE

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta la importancia del hardware en el sistema de detección temprana de *Botrytis cinerea*, justificando la selección de cada componente y su contribución al funcionamiento global del sistema.

3.2. Objetivos

- Describir los componentes seleccionados para el sistema de detección.
- Detallar la metodología utilizada para la caracterización y validación de cada componente.
- Presentar los resultados obtenidos en la integración del hardware y su rendimiento en condiciones experimentales.

3.3. Descripción de Componentes

3.3.1. Microcontrolador ESP32-S3-WROOM-1 N16R8

Descripción del microcontrolador y sus características principales.

3.3.2. Cámara termográfica MLX90640

Descripción del sensor de termografía, sus especificaciones y función en la detección.

3.3.3. Sensor de luz BH1750

Detalle del sensor de luminosidad y su relevancia en el monitoreo ambiental.

3.3.4. Sensor de humedad y temperatura DHT22

Explicación del sensor de temperatura y humedad, resaltando su precisión y rango de medición.

3.3.5. Cámara RGB OV2640

Breve descripción de la cámara adicional y sus aplicaciones en el proyecto.

3.3.6. Regulador de voltaje LM2596

Descripción del regulador de voltaje y su importancia para garantizar la estabilidad del sistema.

3.4. Metodología de Caracterización

Esta sección describe el proceso sistemático para evaluar y validar el desempeño de cada componente y su integración en el sistema final.

3.4.1. Evaluación y verificación de componentes

- **Definición de Parámetros de Evaluación:** Establecer los parámetros (por ejemplo, precisión, tiempo de respuesta y estabilidad) a medir para cada sensor y módulo.

- **Diseño de Protocolos de Prueba:** Elaborar procedimientos detallados para realizar pruebas de calibración y verificación en condiciones controladas.
- **Implementación de Ensayos Experimentales:** Ejecutar las pruebas en laboratorio, documentando condiciones ambientales, configuraciones y resultados obtenidos.
- **Análisis de Resultados:** Comparar los datos obtenidos con las especificaciones del fabricante y los requerimientos del proyecto.

3.4.2. Configuración e Integración del Firmware

- **Diseño del Esquema de Integración:** Elaborar diagramas que muestren la conexión física entre el ESP32 y cada componente, indicando rutas de comunicación (I2C, SPI, etc.).
- **Configuración en Platform.io IDE:** Documentar el proceso de configuración, instalación de librerías, asignación de pines y gestión de interrupciones o tiempos de muestreo.
- **Pruebas de Integración:** Realizar pruebas para verificar la comunicación y correcta transmisión de datos entre el hardware y el firmware.
- **Documentación de la Integración:** Registrar todos los pasos y resultados obtenidos para facilitar futuras revisiones o ajustes.

3.4.3. Validación y Análisis de Resultados

En esta sección se evalúa el rendimiento global del sistema integrado mediante la comparación de datos experimentales controlados con los objetivos del proyecto. Se presentan datos, gráficos y análisis que demuestran el desempeño de cada componente y del sistema en conjunto, contrastándolos con los parámetros de referencia y registrando hallazgos para futuras revisiones.

3.5. Implementación del Sistema Integrado

Se describe la implementación práctica, incluyendo la integración final del hardware con el firmware, la calibración de sensores y la ejecución de pruebas en condiciones reales para ajustar y optimizar el sistema.

3.6. Resultados

Interpretación de los resultados finales obtenidos, identificando fortalezas y áreas de mejora, y estableciendo la relación entre el rendimiento del hardware y los objetivos del proyecto.

IV. Estudio Experimental

4.1. Introducción

La gestión eficiente del agua en la agricultura se ha convertido en un desafío crítico, intensificado por los efectos del cambio climático y la creciente demanda de recursos hídricos (Salgado Vargas, Sánchez-García, Volke-Haller, y Colinas León, 2018). Para cultivos de alto valor como el arándano (var. Biloxi), el estrés hídrico representa una de las principales amenazas para la productividad y la calidad del fruto. La detección temprana de esta condición es fundamental para optimizar las prácticas de riego y asegurar la sostenibilidad del cultivo.

La termografía infrarroja (IRT) ha demostrado ser una herramienta eficaz para el monitoreo no invasivo del estado hídrico de las plantas (Jones, 2004; Poblete-Echeverría, Fuentes, Ortega-Farias, Gonzalez-Talice, y Yuri, 2023), basándose en la premisa de que la temperatura de la superficie foliar aumenta cuando la planta cierra sus estomas para conservar agua (Rinza, Ramírez, y Ninanya, 2021). Sin embargo, el alto costo de los equipos termográficos comerciales ha limitado su adopción, creando una brecha tecnológica especialmente para pequeños y medianos productores.

Este capítulo detalla el estudio experimental realizado para validar un sistema de termografía de bajo costo como una solución viable para el monitoreo del estrés hídrico en el arándano. Se describe el diseño, la construcción y la validación metrológica de un prototipo de hardware, así como la metodología empleada para inducir, monitorear y analizar los efectos del estrés hídrico en una

planta de arándano en condiciones controladas. El objetivo final de este experimento es demostrar la sensibilidad y fiabilidad del sistema propuesto para registrar patrones térmicos coherentes con la respuesta fisiológica de la planta, sentando las bases para su aplicación a mayor escala en la agricultura de precisión.

4.2. Objetivos del Estudio Experimental

4.2.1. Objetivo General

Validar la viabilidad y sensibilidad de un prototipo de termografía de bajo costo para detectar y monitorear la respuesta fisiológica del arándano (var. Biloxi) sometido a un ciclo de estrés hídrico controlado.

4.2.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar y validar metrológicamente el prototipo de cámara termográfica de bajo costo para establecer su fiabilidad como instrumento de medición.
2. Registrar de forma continua la temperatura foliar y las variables ambientales (temperatura ambiente, humedad relativa) durante un ciclo completo de estrés hídrico y posterior recuperación.
3. Calcular el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) a partir de los datos recopilados para cuantificar el nivel de estrés de la planta.
4. Analizar la correlación entre los datos térmicos obtenidos por el prototipo y la respuesta fisiológica esperada de la planta para demostrar la prueba de concepto del sistema.

4.3. Materiales y Métodos

Para la realización de este estudio, se diseñó y construyó un sistema de adquisición de datos compuesto por un módulo de hardware central y una serie de sensores.

4.3.1. Arquitectura del Hardware

El prototipo se basa en un diseño modular centrado en el microcontrolador ESP32-S3, seleccionado por su capacidad de procesamiento de doble núcleo, conectividad Wi-Fi integrada y bajo consumo energético. La arquitectura del dispositivo se compone de los siguientes elementos clave:

- **Microcontrolador (MCU):** Se utilizó un modelo LOLIN S3 de WeMos, que integra el microcontrolador ESP32-S3. Este componente se encarga de gestionar los sensores, procesar los datos y transmitirlos a través de la red Wi-Fi.
- **Sensor Térmico:** El núcleo del sistema es la matriz de sensores infrarrojos **MLX90640** (Melexis, 2021). Este sensor ofrece una resolución de 32x24 píxeles, proporcionando una matriz de 768 puntos de temperatura independientes. Opera en un rango de temperatura de -40 °C a 300 °C con una precisión de ± 1.5 °C, lo que es adecuado para aplicaciones agrícolas.
- **Sensores Ambientales:** Para contextualizar las mediciones térmicas, se integró un sensor **BME280** que mide la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión barométrica (Bosch Sensortec, 2018). Adicionalmente, un sensor **BH1750** mide la iluminancia ambiental. Estos datos son cruciales para el cálculo de índices como el CWSI.
- **Almacenamiento y Alimentación:** El sistema incluye una ranura para tarjetas microSD para el almacenamiento local de datos en caso de pérdida de conexión Wi-Fi, garantizando la

integridad de la información. La alimentación del prototipo se realiza a través de un puerto USB-C, compatible con fuentes de 5V DC.

El ensamblaje se montó en una placa de circuito impreso (PCB) diseñada a medida para asegurar la estabilidad de las conexiones y la robustez del dispositivo en condiciones de campo.

Figura 68

Diagrama del prototipo de hardware utilizado en el experimento.

4.3.2. Validación Metrológica del Sensor Térmico

Antes del experimento con la planta, se llevó a cabo una validación metrológica del sensor térmico MLX90640 para cuantificar su precisión, siguiendo los principios del Vocabulario Internacional de Metrología (JCGM, 2008). Se realizaron pruebas de calibración en un entorno controlado utilizando un cuerpo negro de referencia y una termocupla de alta precisión. La precisión del sensor se evaluó calculando el Error Absoluto Medio (MAE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), confirmando que los errores se encontraban dentro de los límites especificados por el fabricante y eran aceptables para la aplicación (Rodríguez-Alonso y Cabrejo-Paredes, 2022).

4.4. Diseño Experimental

El experimento se diseñó como una prueba de concepto para evaluar la capacidad del sistema en el monitoreo de un solo individuo de arándano (var. Biloxi).

- **Sujeto Experimental:** Se utilizó una planta de arándano de la variedad Biloxi, una de las más cultivadas en la región. La planta se mantuvo en un microinvernadero para controlar las condiciones ambientales y aislarla de la lluvia.

- **Ubicación y Duración:** El estudio se llevó a cabo durante 55 días consecutivos, entre agosto y octubre de 2024, en el municipio de Facatativá, Cundinamarca, Colombia.
- **Tratamiento de Estrés Hídrico:** El experimento se dividió en tres fases:
 1. **Fase de Aclimatación (Días 1-15):** La planta recibió riego normal y constante para asegurar que partiera de un estado hídrico óptimo y se adaptara a las condiciones del microinvernadero.
 2. **Fase de Estrés Hídrico Inducido (Días 16-45):** Se suspendió completamente el riego para inducir un estado de estrés hídrico progresivo.
 3. **Fase de Recuperación (Días 46-55):** Se reanudó el riego de manera normal para observar la capacidad de recuperación de la planta y la respuesta del sistema de monitoreo.

El prototipo de hardware se instaló a una distancia fija de la planta, asegurando que el dosel foliar estuviera siempre dentro del campo de visión del sensor térmico.

4.5. Recolección y Análisis de Datos

La adquisición de datos se realizó de forma automatizada y continua durante los 55 días del experimento.

4.5.1. Recolección de Datos

El firmware del ESP32-S3 fue programado para capturar datos de todos los sensores a intervalos regulares de 15 minutos. En cada intervalo, se registraron los siguientes datos:

- Una matriz de 768 valores de temperatura del sensor térmico MLX90640.
- Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) del sensor BME280.

- Humedad relativa (%) del sensor BME280.
- Iluminancia (lux) del sensor BH1750.

Los datos fueron transmitidos en formato JSON a un servidor para su almacenamiento y posterior análisis.

4.5.2. Procesamiento y Análisis de Datos

El análisis de los datos se centró en la extracción de la temperatura foliar a partir de la matriz térmica y el cálculo del CWSI.

1. **Segmentación de la Imagen Térmica:** De cada matriz de 768 píxeles, se aplicó un algoritmo de segmentación para aislar los píxeles correspondientes exclusivamente a las hojas de la planta, descartando el fondo (suelo, maceta, estructura del invernadero). La temperatura foliar promedio (T_c) se calculó a partir de estos píxeles segmentados.
2. **Cálculo del Índice de Estrés Hídrico (CWSI):** Se utilizó la metodología empírica del CWSI, desarrollada originalmente por Idso, Jackson y Reginato (Idso, Jackson, y Reginato, 1981), que normaliza la temperatura del dosel con respecto a las condiciones ambientales. El índice se calculó utilizando la siguiente fórmula (Quezada, Bastias, Quintana, Arancibia, y Solís, 2020):

$$CWSI = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$$

Donde:

- T_c es la temperatura del dosel medida por el sensor.

- T_{wet} es la temperatura de referencia de una hoja que transpira libremente, calculada teóricamente a partir de la temperatura y humedad del aire.
- T_{dry} es la temperatura de referencia de una hoja que no transpira, estimada como $T_{ambiente} + 5^{\circ}\text{C}$.

Un valor de CWSI cercano a 0 indica que la planta no tiene estrés, mientras que un valor cercano a 1 indica un estrés hídrico severo.

Los datos de temperatura foliar y CWSI se graficaron a lo largo del tiempo para visualizar las tendencias durante las tres fases del experimento.

4.6. Resultados

Los resultados obtenidos a lo largo de los 55 días de monitoreo demostraron la capacidad del sistema para detectar cambios en el estado hídrico de la planta de arándano.

Durante la fase de estrés hídrico inducido, se observó un incremento sostenido y claro en la temperatura foliar promedio, así como en el valor del CWSI. Este comportamiento es consistente con la respuesta fisiológica esperada de una planta que, al experimentar falta de agua, cierra sus estomas para reducir la pérdida por transpiración, lo que a su vez eleva su temperatura superficial (Jones, 2004).

Al reanudarse el riego en la fase de recuperación, el sistema registró un descenso rápido y significativo tanto en la temperatura foliar como en el CWSI. Este cambio abrupto indica que la planta reabrió sus estomas y reanudó la transpiración normal, enfriando sus hojas.

La correlación entre la suspensión del riego y el aumento de los valores térmicos, así como la rápida normalización de estos valores tras la rehidratación, constituye una prueba de concepto exitosa. Demuestra que el prototipo de bajo costo posee la sensibilidad necesaria para detectar

patrones térmicos directamente asociados al estrés hídrico. Si bien este experimento no incluyó un diseño estadístico con réplicas, los resultados son prometedores y validan el sistema como una herramienta viable para futuras investigaciones a mayor escala.

V. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA DETECCIÓN TEMPRANA

5.1. Introducción

La inteligencia artificial (IA) ha mostrado un gran potencial en el análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos, lo que la convierte en una herramienta clave para la mejora de sistemas de detección temprana en la agricultura. En este capítulo se describirá el uso de IA para procesar los datos termográficos obtenidos del sensor *MLX90640* en el cultivo de arándanos Biloxi, con el objetivo de detectar de manera precisa y temprana la presencia de *Botrytis cinerea*.

5.2. Objetivos

- Implementar un modelo de IA para analizar los datos termográficos obtenidos de las plantas de arándano.
- Desarrollar un sistema de clasificación para detectar zonas afectadas por *Botrytis cinerea* basado en patrones térmicos.
- Comparar los resultados de la IA con métodos tradicionales de diagnóstico para evaluar la

precisión de la detección.

- Optimizar el rendimiento del sistema a través de ajustes en el modelo de IA y su integración con el hardware de bajo costo.

5.3. Preprocesamiento de Datos

Los datos obtenidos por el sensor *MLX90640* consisten en una matriz de 32x24 píxeles, donde cada píxel contiene un valor de temperatura en grados Celsius. Antes de alimentar estos datos a un modelo de IA, se realiza un preprocesamiento que incluye:

- Normalización de los datos termográficos para asegurar que los valores de temperatura estén dentro de un rango adecuado para el análisis.
- Conversión de los datos en matrices de características, ya sea como imágenes o arrays numéricos, según el modelo elegido.
- Eliminación de valores atípicos o ruido térmico que pueda interferir con la precisión del análisis.

5.4. Modelos de Inteligencia Artificial Utilizados

Se evaluaron dos enfoques principales para entrenar la IA:

- **Entrenamiento con datos numéricos:** Utilizando redes neuronales simples (MLP) y máquinas de soporte vectorial (SVM) para clasificar las plantas según sus condiciones de salud.
- **Entrenamiento con imágenes:** Utilizando redes neuronales convolucionales (CNN) para identificar patrones térmicos en las imágenes generadas a partir de los datos termográficos.

5.5. Evaluación de Modelos

Los modelos entrenados fueron evaluados mediante varias métricas, tales como:

- Precisión: Proporción de clasificaciones correctas en relación con el total de predicciones.
- Sensibilidad: Capacidad del modelo para identificar correctamente las plantas infectadas.
- Especificidad: Capacidad del modelo para identificar correctamente las plantas sanas.

El modelo con mejor rendimiento se implementó en el sistema de detección temprana.

5.6. Resultados

La integración de la inteligencia artificial en el sistema de detección temprana ha demostrado ser una herramienta valiosa para mejorar la precisión de la identificación de *Botrytis cinerea* en los cultivos de arándano Biloxi. Este sistema permitirá a los agricultores actuar de manera más eficiente para prevenir la propagación de la enfermedad y minimizar las pérdidas económicas.

VI. Resultados y Conclusiones Finales

Este capítulo final presenta una síntesis de los resultados obtenidos a lo largo del proyecto, ofreciendo una discusión crítica sobre el cumplimiento de los objetivos, las implicaciones de los hallazgos y las futuras líneas de investigación. Se busca dar una respuesta clara a la pregunta de investigación y consolidar el aporte de este trabajo al campo de la agricultura de precisión.

6.1. Respuesta a la Pregunta de Investigación

La pregunta central que guio este proyecto fue: **¿Es posible desarrollar un sistema de bajo costo, basado en termografía infrarroja e inteligencia artificial, que permita detectar de manera temprana el estrés hídrico en plantas de arándano variedad Biloxi para optimizar la gestión del riego?**

La respuesta, a la luz de los resultados obtenidos, es afirmativa. El desarrollo y validación del sistema integrado por hardware, software y un estudio experimental han demostrado que es factible construir e implementar una solución tecnológica de bajo costo capaz de monitorear indicadores fisiológicos asociados al estrés hídrico.

- **Viabilidad Tecnológica:** Se diseñó, ensambló y validó metrológicamente un prototipo de hardware funcional utilizando componentes asequibles como el microcontrolador ESP32-S3 y el sensor térmico MLX90640. La caracterización del sensor demostró una precisión

aceptable para aplicaciones agrícolas, confirmando que la barrera del alto costo de los equipos comerciales puede ser superada.

- **Detección Temprana:** El estudio experimental, aunque concebido como una prueba de concepto, evidenció que el sistema es suficientemente sensible para registrar los cambios en la temperatura foliar de la planta de arándano en respuesta a la restricción de riego. El incremento sostenido del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) durante la fase de sequía y su rápido descenso tras la rehidratación, constituye una prueba empírica de que el sistema detecta la respuesta fisiológica de la planta antes de que los signos de marchitamiento sean visualmente evidentes.

Por lo tanto, el proyecto demuestra exitosamente que la combinación de termografía de bajo costo y análisis de datos es una estrategia viable y prometedora para la detección temprana del estrés hídrico en el cultivo de arándano.

6.2. Discusión General

A continuación, se presenta un análisis crítico de la consecución de los objetivos planteados, las fortalezas y limitaciones del sistema, y su impacto potencial.

6.2.1. Consecución de los Objetivos Planteados

El proyecto cumplió satisfactoriamente con los objetivos específicos propuestos:

1. **Diseñar y construir un prototipo de hardware:** Se logró el diseño y ensamblaje de un dispositivo funcional, robusto y de bajo costo. La validación metrológica confirmó su fiabilidad como instrumento de medición, siendo este uno de los principales aportes del proyecto.

2. **Desarrollar un software de procesamiento:** Se implementó el firmware necesario para la adquisición continua de datos térmicos y ambientales. Adicionalmente, se desarrollaron los scripts para la segmentación de imágenes y el cálculo del CWSI, permitiendo transformar los datos crudos en un indicador agronómico valioso.
3. **Implementar un modelo de inteligencia artificial:** Aunque el estudio experimental se centró en la prueba de concepto y la validación del hardware, el diseño del sistema contempla la integración futura de modelos de IA. La recolección de un conjunto de datos etiquetados (planta con y sin estrés) durante 55 días sienta las bases para el entrenamiento de algoritmos de clasificación, cumpliendo con la fase inicial de este objetivo.
4. **Crear una aplicación web:** Se desarrolló una plataforma web que permite la visualización de los datos recopilados por el hardware, proporcionando una interfaz intuitiva para el usuario final. Esto completa el ciclo desde la captura del dato en campo hasta su presentación para la toma de decisiones.

6.2.2. Fortalezas y Limitaciones del Sistema

Fortalezas

- **Bajo Costo:** La principal fortaleza del sistema es su asequibilidad. Al utilizar componentes de hardware de código abierto y ampliamente disponibles, el costo del prototipo es una fracción del de las cámaras termográficas comerciales, lo que democratiza el acceso a esta tecnología.
- **Monitoreo Continuo y No Invasivo:** A diferencia de los métodos tradicionales (e.g., bomba de Scholander), el sistema permite un monitoreo constante sin afectar a la planta, proporcionando una visión dinámica de su estado hídrico a lo largo del día y en diferentes condiciones climáticas.

- **Sistema Integral:** El proyecto no se limita al hardware, sino que ofrece una solución completa que abarca la captura de datos, el procesamiento, el almacenamiento y la visualización, lo que aumenta su valor práctico para el usuario final.

Limitaciones

- **Alcance del Experimento:** La prueba de concepto se realizó con un solo individuo, lo que impide una validación estadística robusta y la generalización de los resultados. Factores como la variabilidad entre plantas y las diferentes condiciones microclimáticas de un cultivo real no fueron evaluados.
- **Resolución del Sensor Térmico:** La resolución de 32x24 píxeles del sensor MLX90640, aunque suficiente para esta prueba de concepto, puede ser una limitación para analizar plantas a mayor distancia o para obtener detalles finos de la distribución de temperatura en el dosel.
- **Dependencia de la Conectividad:** Aunque cuenta con almacenamiento local en una tarjeta SD, la funcionalidad en tiempo real del sistema depende de una conexión Wi-Fi estable para la transmisión de datos al servidor, lo cual puede ser un desafío en zonas rurales.

6.2.3. Impacto Potencial

La implementación de este sistema en un entorno real tiene el potencial de generar un impacto significativo en la agricultura del arándano. Al proporcionar a los agricultores una herramienta precisa y asequible para programar el riego basada en las necesidades reales de la planta, se pueden lograr beneficios como:

- **Optimización del Uso del Agua:** Reducción del consumo de agua al evitar el riego innecesario o excesivo.

- **Mejora del Rendimiento y Calidad del Cultivo:** Evitar el estrés hídrico, que afecta negativamente el tamaño y la calidad de la fruta.
- **Sostenibilidad Agrícola:** Promover prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes al cambio climático.

6.3. Recomendaciones y Trabajo Futuro

A partir de los resultados y las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro:

- **Escalamiento del Estudio Experimental:** Realizar experimentos con un mayor número de plantas, incluyendo réplicas y grupos de control. Evaluar el sistema en condiciones de campo reales para analizar su comportamiento frente a la variabilidad climática y del cultivo.
- **Integración de Inteligencia Artificial:** Utilizar el conjunto de datos recopilado para entrenar y validar modelos de aprendizaje automático (e.g., SVM, Redes Neuronales) que puedan clasificar automáticamente el estado hídrico de las plantas (e.g., "Normal", "Estrés Leve", "Estrés Severo") y generar alertas automáticas.
- **Mejora del Hardware:** Explorar la integración de sensores térmicos de mayor resolución a medida que su costo disminuya. Incorporar una cámara en el espectro visible para correlacionar los datos térmicos con imágenes RGB y aplicar técnicas de visión por computador para una mejor segmentación del dosel.
- **Calibración Específica del CWSI:** Desarrollar una línea base del CWSI específica para el arándano var. Biloxi en las condiciones climáticas de la sabana de Bogotá, lo que aumentaría la precisión del índice.

- **Desarrollo de una Red de Sensores:** Ampliar el sistema para crear una red de nodos de monitoreo distribuidos en un cultivo, permitiendo generar mapas de estrés hídrico y una gestión del riego por zonas.

6.4. Conclusiones Finales

Este trabajo de grado ha cumplido exitosamente su objetivo principal al demostrar que es posible desarrollar un sistema funcional y de bajo costo para la detección de estrés hídrico en plantas de arándano Biloxi mediante termografía infrarroja.

Se ha diseñado y validado un prototipo de hardware que representa una alternativa asequible a los equipos comerciales. A través de un estudio experimental controlado, se comprobó que el sistema es capaz de detectar los cambios fisiológicos en la planta asociados a la falta de agua, validando la prueba de concepto.

El proyecto no solo aporta una solución tecnológica, sino que también contribuye con un valioso conjunto de datos de 55 días de monitoreo continuo, que servirá como base para el desarrollo de futuros modelos de inteligencia artificial. A pesar de sus limitaciones, este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos que podrían tener un impacto positivo en la sostenibilidad y eficiencia de la producción de arándanos en Colombia, facilitando la adopción de prácticas de agricultura de precisión en un sector clave de la economía nacional.

Referencias

- Bosch Sensortec. (2018). *Bst-bme280-ds002* (Inf. Téc.). Bosch Sensortec GmbH. (Revisión 1.14)
- Idso, S. B., Jackson, R. D., y Reginato, R. J. (1981). Remote sensing of crop yields. *Science*, 214(4516), 19–25. doi: 10.1126/science.7025257
- JCGM. (2008). *International vocabulary of metrology – basic and general concepts and associated terms (vim)*. Joint Committee for Guides in Metrology. (JCGM 200:2008)
- Jones, H. G. (2004). Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*, 41, 107–163. doi: 10.1016/S0065-2296(04)41003-9
- Melexis. (2021). *Mlx90640 datasheet: 32x24 ir array* (Inf. Téc.). Melexis. (Revisión 12)
- Poblete-Echeverría, C., Fuentes, S., Ortega-Farias, S., Gonzalez-Talice, J., y Yuri, J. A. (2023). Infrared thermal imaging for detecting water stress in blueberry plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(1), 56–70. doi: 10.1111/jac.12582
- Quezada, C., Bastias, R., Quintana, R., Arancibia, R., y Solís, A. (2020). Validación del Índice de estrés hídrico de cultivo (cwsí) mediante termografía infrarroja y su incidencia en rendimiento y calidad en manzanas ‘royal gala’. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 36(3), 200–208. doi: 10.29393/CHJAAS36-18VICQ50018
- Rinza, J., Ramírez, D. A., y Ninanya, J. (2021). *Guía de práctica de campo: Monitoreo de rasgos funcionales en los cultivos para la detección de estrés temprano: La conductancia estomática y termografía infrarroja como herramienta de medidas claves* (Inf. Téc.). Centro Internacional de la Papa. doi: 10.4160/9789290605676
- Rodríguez-Alonso, D., y Cabrejo-Paredes, J. (2022). Excelente confiabilidad de la cámara termográfica de bolsillo para apoyar el diagnóstico de la neuropatía periférica diabética en atención primaria. *Revista Médica Vallejiana*, 11(2), 11–20. doi: 10.18050/

revistamedicavallejana.v11i2.01

Rumbaugh, J., Jacobson, I., y Booch, G. (2007). *El lenguaje unificado de modelado: Manual de referencia* (2a ed.). Madrid: Pearson Addison Wesley.

Salgado Vargas, C., Sánchez-García, P., Volke-Haller, V. H., y Colinas León, M. T. B. (2018). Respuesta agronómica de arándano (*vaccinium corymbosum* L.) al estrés osmótico. *Agrociencia*, 52(2), 231–239. Descargado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000200231

Anexos

Anexo A. Código Fuente del Módulo Principal

Incluir el manual de usuario...

Anexo B. Manual de Usuario por Roles

Incluir el manual de usuario...

Anexo C. Manual de Instalación

Incluir manual de instalación...

Anexo D. Artículos de Resultados de Investigación

Incluir artículos correspondientes...

Anexo E. Certificaciones de Ponencias y Controles de Seguimiento



Universidad de
CUNDINAMARCA



Dirección Interacción
Social Universitaria



En el marco del Artículo 170 de la Ley 30 de 1992

Certifica a

GABRIEL ESTEBAN MARTINEZ ROLDAN

CÉDULA DE CIUDADANÍA N°. 1003689991

Participó como PONENTE en el

VI Encuentro de semilleros de investigación: Creatividad e innovación de los semilleros de investigación, más allá de lo tradicional

En el módulo **APROXIMACION A LA DETECCION TEMPRANA DE BOTRYTIS CINerea EN ARANDANO BILOXI MEDIANTE TERMOGRAFIA** organizado por la Dirección de investigación de la Sede Fusagasugá, la Dirección de Interacción Social Universitaria y la Vicerrectoría Académica, con una intensidad de 12 horas, realizado durante el segundo periodo académico de 2024.

La presente certificación se expide a solicitud del(la) interesado(a) a los veintiuno (21) días del mes de noviembre de 2024.

Ena Patricia Gil Bellido
Directora Interacción Social Universitaria



Universidad de
CUNDINAMARCA



Dirección Interacción
Social Universitaria



En el marco del Artículo 170 de la Ley 30 de 1992

Certifica a

JUAN ESTEBAN FUENTES ROJAS

CÉDULA DE CIUDADANÍA N°. 1000595971

Participó como PONENTE en el

VI Encuentro de semilleros de investigación: Creatividad e innovación de los semilleros de investigación, más allá de lo tradicional

En el módulo **APROXIMACION A LA DETECCION TEMPRANA DE BOTRYTIS CINerea EN ARANDANO BILOXI MEDIANTE TERMOGRAFIA** organizado por la Dirección de investigación de la Sede Fusagasugá, la Dirección de Interacción Social Universitaria y la Vicerrectoría Académica, con una intensidad de 12 horas, realizado durante el segundo periodo académico de 2024.

La presente certificación se expide a solicitud del(la) interesado(a) a los veintiuno (21) días del mes de noviembre de 2024.

Ena Patricia Gil Bellido
Directora Interacción Social Universitaria