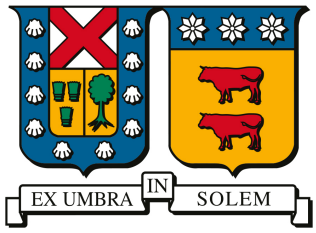
Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Electrónica
Santiago, Chile



Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Accesos Vehiculares y Gestión de Estacionamientos de Visita para Condominios

Diego Fernando Prokes Herbage

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
Ingeniero Civil Telemático

PROFESOR GUÍA
Nicolás Sebastián Gálvez Ramírez

PROFESOR CORREFERENTE
Patricia Franco Troya

Santiago, 13 de octubre de 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Accesos Vehiculares y Gestión de Estacionamientos de Visita para Condominios

Nombre del candidato(a): Diego Fernando Prokes Herbage

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Telemática

Campus: San Joaquín **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Nicolás Sebastián Gálvez Ramírez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

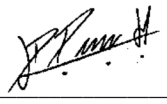
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 30-10-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 30-10-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Si he visto más lejos,
es porque estoy sentado
sobre hombros de gigantes

Dedicado a mis padres y abuelos

AGRADECIMIENTOS

En la vida he sido un afortunado: tengo una familia grande y hermosa y amigos que considero hermanos. Si me pusiera acá a agradecer a cada uno, podría escribir 100 planas sin esforzarme mucho. Pero entonces el resto de la memoria parecería un anexo, y no creo que a la comisión le hiciera mucha gracia. Así que nada, tendré que aguantarme las ganas de nombrarlos a todos y esperar que, aun así, encuentren un lugar en estas líneas.

A...

...mis papás, que no se limitaron a darme la vida y dos hermanos, sino que decidieron dedicar la suya a entregarnos amor y apoyo incondicional. A mi papá, Fernando Prokes, quien, a pesar de todas nuestras diferencias, me enseña día a día qué clase de persona quiero ser. Y a mi mamá, Irene Herbage, que me ha sabido entender incluso en mis momentos más rebeldes y que espero que, al ver este documento terminado, se tranquilice cuando le digo: *Tú tranquila, yo nervioso.*

...mis hermanos, Nico y Javi, a quienes quiero inconmensurablemente y por quienes daría cualquier cosa, incluso la última galleta del último paquete en la alacena. Qué suerte tengo de haber crecido junto a ustedes y qué solitaria habría sido mi niñez si no hubieran llegado.

...mis abuelos, que, sin dejar de malcriarme, nunca dejaron de recordarme quién soy. El gordo baboso que se reía por todo, el niño inquieto que hablaba hasta por los codos y el hombre que sigo aprendiendo a ser. Ustedes son los guardianes de mi infancia: con ustedes siempre me sentiré un niño, y en ustedes pensaré cada vez que no sepa qué hacer.

...A mis tíos y primos, por parentesco o por insistentes, con quienes he compartido innumerables cumpleaños, días del niño, 18 de septiembre, navidades, años nuevos y onces de una tarde cualquiera. Con ustedes he vivido algunos de los momentos más emotivos de mi vida. Hemos reído, nos hemos molestado y hemos llorado juntos. Quiero que sepan que son la principal razón por la que amo tanto a mi familia.

...mis amigos. Creo que todos lo saben, pero soy de los que piensa que la vida no vale la pena sin amigos. Como dijo un gran sabio alguna vez: *Hagas lo que hagas en esta vida, no es legendario a menos que tus amigos estén ahí para verlo.* Les agradezco cada pequeño momento: cada ataque de risa en el momento menos oportuno, cada tarde tranquila sin hacer nada, cada caminata borrachos a las tres de la mañana, cada vez que me aconsejaron cuando tuve un problema y cada vez que simplemente me escucharon.

Y quiero hacer una mención especial en este documento, por defecto académico, a todos los profesores que se excedieron en sus funciones y que, además de enseñarme a escribir, correr y saltar, me enseñaron a confiar en mis capacidades cuando yo no lo hacía y a valorarme por quien soy, sin aparentar.

Resumen

En los condominios donde el control de acceso es manual, el cumplimiento de las reglas de acceso vehicular y de uso de los estacionamientos de visita depende del encargado de acceso y de una bitácora que consigna el ingreso, pero no cómo se autorizó la visita, qué espacio se ocupó ni por cuánto tiempo. El objetivo general de esta memoria es diseñar e implementar ResiPark, una solución de control de accesos vehiculares y gestión de estacionamientos de visita para condominios, capaz de automatizar la validación de ingresos a partir del reconocimiento de patentes y de reportar en tiempo real la disponibilidad de dichos estacionamientos mediante una red de sensores IoT. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar la arquitectura de la solución, integrando visión por computador, sensores IoT, interfaces de usuario y servicios centrales.
- Registrar y consultar el historial de accesos, reservas y eventos mediante una base de datos.
- Crear una aplicación móvil para ocupantes y una plataforma web para el encargado de acceso.
- Desplegar un modelo de visión por computador para el reconocimiento automático de patentes.
- Implementar una red de sensores IoT que detecte y reporte en tiempo real la disponibilidad de los estacionamientos de visita.

ResiPark automatiza las operaciones que se repiten en cada ingreso y deja al encargado de acceso las decisiones que la regla no anticipa. El ocupante autoriza la visita mediante una reserva en una aplicación móvil; en el punto de ingreso, el reconocimiento de patentes identifica el vehículo y, si encuentra una reserva vigente, el portón se abre; y un sensor por espacio detecta la ocupación de cada estacionamiento de visita sin captar imágenes de personas ni vehículos. El prototipo se probó en un condominio de casas, donde el ingreso de un vehículo con reserva se verificó y se registró sin intervención del encargado de acceso en unos 9 s, y la ocupación se reflejó en la plataforma web entre 2 y 5 s después de producirse. De los 46 requisitos definidos, 35 se cumplieron por completo. Como resultado, cada visita queda asociada en un mismo registro a la autorización, la patente, el ingreso y el espacio asignado.

Palabras clave: control de acceso vehicular, estacionamientos de visita, reconocimiento automático de patentes, internet de las cosas, condominios

Summary

In gated communities where vehicle access is still handled manually, enforcing the rules on who may drive in and how visitor parking is used falls on the gate attendant and a paper logbook. The logbook shows that a car came in, but not who authorized the visit, which space the visitor took or how long they stayed. The general objective of this thesis is to design and implement ResiPark, a solution for vehicle access control and visitor parking management in gated communities that validates entries automatically through license plate recognition and reports visitor parking availability in real time using IoT sensors. This objective is broken down into five specific objectives:

- Design an architecture that brings together computer vision, IoT sensors, user interfaces and a central back end.
- Keep a searchable history of entries, reservations and events in a database.
- Develop a mobile app for residents and a web platform for the gate attendant.
- Deploy a computer vision model that reads license plates automatically.
- Build an IoT sensor network that detects visitor parking occupancy and reports it in real time.

ResiPark takes over the routine steps of every entry and leaves the attendant in charge of the cases the rules do not cover. Residents authorize their visitors in advance by creating a reservation in the app. When a car arrives, its plate is read and the gate opens if it matches an active reservation. In each visitor space, a sensor detects whether it is occupied without capturing images of people or vehicles. The prototype was deployed in a gated community of houses. In a field test, a visitor with a reservation was let in and logged in about 9 seconds with no input from the attendant, and changes in occupancy showed up on the web platform within 2 to 5 seconds. Of the 46 requirements defined, 35 were fully met. Every visit now leaves a single record linking who authorized it, the vehicle's plate, the entry and the assigned space.

Keywords: vehicle access control, visitor parking, automatic license plate recognition, Internet of Things, gated communities

Índice general

1. Introducción **1**

1.1. Propósito 2

1.2. Objetivos 3

1.2.1. Objetivo General 3

1.2.2. Objetivos Específicos 3

1.3. Contribuciones 3

1.4. Estructura del informe 4

2. Definición del Problema **6**

2.1. Recursos de uso común y sus tipos 6

2.2. Regímenes de propiedad común 9

2.2.1. Condiciones institucionales de un régimen exitoso 9

2.2.2. Desafíos en la administración de un régimen de propiedad común 13

2.3. El condominio como régimen de propiedad común 15

2.3.1. La Ley de Copropiedad Inmobiliaria 16

2.3.2. Desafíos en la administración de un condominio 20

2.4. Problemática y alcance: el cumplimiento de las reglas de acceso al bien común 22

3. Estado del Arte **27**

3.1. Gestión tradicional del control de acceso vehicular y de los estacionamientos de visita . . . 27
3.1.1. Control de acceso vehicular: identificación y registro . . . 28
3.1.2. Estacionamientos de visita: asignación y monitoreo . . . 29
3.2. Digitalización y automatización . . . 30
3.2.1. Tecnologías de identificación en el punto de ingreso . . . 31
3.2.2. Tecnologías de monitoreo de la ocupación . . . 34
3.2.3. Arquitecturas de integración . . . 35
3.3. Sistemas comerciales . . . 37
3.4. Síntesis y oportunidad . . . 38

4. Propuesta y Diseño de Solución 40
4.1. Usuarios del Sistema . . . 40
4.2. Distribución de Operaciones . . . 41
4.3. Requisitos del Sistema . . . 43
4.3.1. Requisitos Funcionales . . . 43
4.3.2. Requisitos No Funcionales . . . 45
4.3.3. Requisitos de la Interfaz . . . 46
4.3.4. Requisitos de Ambiente . . . 47
4.4. Diseño de la Arquitectura del Sistema . . . 49
4.4.1. Diagrama de Contexto del Sistema . . . 49
4.4.2. Diagrama de Arquitectura . . . 50
4.4.3. Distribución entre Borde y Nube . . . 52
4.5. Módulos del Sistema . . . 53
4.5.1. Matriz de Trazabilidad . . . 55
4.6. Alternativas Tecnológicas . . . 56
4.6.1. Gestión de Accesos Vehiculares . . . 57
4.6.2. Gestión de Estacionamientos de Visita . . . 60
4.6.3. Interfaces de Usuario . . . 62
4.6.4. Servicios Centrales . . . 62
4.7. Diseño de las Interfaces de Usuario . . . 64

4.7.1. Aplicación Móvil 64
4.7.2. Plataforma Web 66

5. Implementación de la Solución **69**

5.1. Caso de Estudio 69
5.1.1. Contexto del Caso de Estudio 69
5.1.2. Stack Tecnológico 70
5.1.3. Implementación del Prototipo 77
5.2. Gestión de Accesos Vehiculares 79
5.2.1. Orquestador de Borde 79
5.2.2. Servicio de Reconocimiento 81
5.2.3. Resultados 82
5.3. Gestión de Estacionamientos de Visita 86
5.3.1. Nodos Sensores y Receptor 86
5.3.2. Resultados 87
5.4. Interfaces de Usuario 88
5.4.1. Aplicación Móvil 88
5.4.2. Plataforma Web 90
5.4.3. Resultados 91
5.5. Servicios Centrales 92
5.5.1. Modelo de Datos 92
5.5.2. Verificación y Registro 93
5.5.3. Resultados 93
5.6. Verificación de Requisitos 94
5.7. Análisis Crítico y Limitaciones 98
5.7.1. Infraestructura del Reconocimiento 98
5.7.2. Reconocimiento de Patentes 99
5.7.3. Gestión de Estacionamientos de Visita 99
5.7.4. Avisos al Encargado de Acceso 99
5.7.5. Preparación para un Uso Real 100

6. Conclusión **101**

6.1. Cumplimiento de los Objetivos 101

6.2. Alcances y Limitaciones del Trabajo 102

6.3. Trabajo Futuro 103

6.4. Reflexiones Finales 104

Índice de figuras

2.1. Ejemplos de *recurso de uso común* según su origen y su grado de formalidad 8

2.2. *Derechos operacionales* asociados a cada posición en un *régimen de propiedad común*. Cada posición posee el derecho de su capa y todos los de las capas inferiores [1] 12

2.3. Componentes de un recurso compartido y ámbitos de gestión asociados a cada vínculo entre ellos [2] 15

2.4. Estructura de un condominio de tipo A y de tipo B 17

2.5. Relación entre el reglamento de copropiedad, la asamblea de copropietarios, el comité de administración y el administrador en la gobernanza de un condominio 18

2.6. Los dos problemas abordados: la verificación del ingreso vehicular y la ocupación de los estacionamientos de visita. 23

3.1. Operaciones del control de acceso vehicular en la modalidad manual, según quién se presenta en el punto de ingreso 29

3.2. Recaudación esperada según el número de fiscalizadores y el factor de detección 30

3.3. Ejemplos de control de acceso basado en credenciales 33

3.4. Etapas de un sistema de reconocimiento automático de patentes 33

3.5. Uso de los distintos tipos de sensores en sistemas de estacionamiento inteligente 35

3.6. Arquitectura de un sistema de estacionamiento inteligente basado en cómputo en la niebla 36

4.1. Diagrama de contexto de ResiPark 50
4.2. Arquitectura de ResiPark en cuatro capas 51
4.3. Módulos de ResiPark y relaciones entre ellos 54
4.4. Vistas y navegación de las interfaces de usuario de ResiPark 64
4.5. Wireframe de la aplicación móvil 66
4.6. Wireframe de la plataforma web 68

5.1. Módulos del prototipo de ResiPark, tecnologías que los implementan y relaciones entre ellos 77
5.2. Diagrama de red del prototipo de ResiPark 78
5.3. Punto de ingreso del condominio del caso de estudio, con la ubicación de la cámara y del relé 79
5.4. Caja estanca con la Raspberry Pi 4 instalada en el punto de ingreso (arriba) y conexión entre la Raspberry Pi, el relé y el control remoto del portón (abajo) 81
5.5. Evolución de las pérdidas de entrenamiento y validación y de las métricas de validación durante las 50 épocas de entrenamiento de cada detector 83
5.6. Matrices de confusión de los detectores sobre sus conjuntos de validación 84
5.7. Salida del servicio de reconocimiento sobre un video de prueba, con la zona de interés, el vehículo detectado, la patente localizada y su transcripción 84
5.8. Nodo sensor instalado en el estacionamiento de visita del caso de estudio (arriba) y conexión entre el ESP32, el sensor ultrasónico, el LED y el módulo LoRa (abajo) 87
5.9. Vistas implementadas de la aplicación móvil 89
5.10. Vista de inicio de la plataforma web, con la cámara del punto de ingreso y el estado de los estacionamientos de visita 90
5.11. Acciones del encargado de acceso en la vista de inicio de la plataforma web 91
5.12. Vistas de historial y de patentes de la plataforma web 91
5.13. Estados del estacionamiento E1 en la plataforma web según el contraste entre su ocupación y su asignación 94

Índice de cuadros

2.1. Ejemplos de *recurso de uso común* según quién lo controla y su grado de formalidad 8

2.2. Ejemplos de condominios según su tipo estructural y uso 17

2.3. Derecho sobre el bien común de quienes concurren al punto de ingreso de un condominio 24

3.1. Tecnologías de identificación en el punto de ingreso 34

3.2. Arquitecturas de integración según el lugar de procesamiento 37

3.3. Capacidades declaradas por plataformas comerciales de administración de condominios en Chile 38

3.4. Operaciones que cubre cada tecnología revisada sin intervención de una persona 38

4.1. Roles de ResiPark, interfaz que utilizan y acciones principales 41

4.2. Distribución de operaciones entre ResiPark y las personas que intervienen en cada proceso 42

4.3. Módulos de ResiPark, capas que atraviesan y operaciones que cubren . 55

4.4. Matriz de trazabilidad entre requisitos y módulos 55

5.1. Precisión y tamaño de los modelos YOLO empleados 71

5.2. Alternativas y tecnologías elegidas para la gestión de accesos vehiculares 72

5.3. Alternativas y tecnologías elegidas para la gestión de estacionamientos de visita 73

5.4. Alternativas y tecnologías elegidas para las interfaces de usuario 74

5.5. Comparación de los frameworks para la API 75

5.6. Alternativas y tecnologías elegidas para los servicios centrales 76

5.7. Desempeño de los detectores sobre sus conjuntos de validación 82

5.8. Respuestas del servicio de reconocimiento durante la prueba in situ con el vehículo de patente BYPF45. El guion indica que el texto transcrito no superó la validación, y las patentes en negrita son las cinco lecturas consecutivas que llevaron a la verificación 85

5.9. Verificación de los requisitos en el prototipo 94

Capítulo 1

Introducción

Los condominios son inmuebles donde cada propietario tiene un espacio propio, como un departamento dentro de una torre, y comparte con el resto los espacios que la comunidad administra en conjunto. El diseño y la administración de dichos espacios comunes se reconocen, desde la disciplina de la arquitectura, como una condición para la convivencia y el sentido de comunidad entre sus ocupantes, esto es, los copropietarios, arrendatarios u otras personas que usan una unidad a cualquier título [3]. En Chile, esta misma idea está recogida en la Ley de Copropiedad Inmobiliaria (Ley 21.442) [4], que regula su uso con el objetivo explícito de fortalecer el rol de las comunidades y mejorar la convivencia dentro de ellas.

Sostener estos objetivos en la práctica es un problema que enfrenta día a día quien administra el condominio, en su rol de principal responsable de la gestión de los espacios comunes [4]. Dicha labor puede recaer en una persona natural o en una empresa administradora, que a su vez opera como una unidad de la propia inmobiliaria o como un tercero contratado [5]. Su gestión abarca aspectos tan diversos como la seguridad, el mantenimiento de las instalaciones y la resolución de conflictos entre ocupantes, todos ellos determinantes para la convivencia cotidiana de la comunidad.

Si bien este problema puede abordarse desde múltiples aristas, ya sea mediante ajustes normativos, la profesionalización del personal a cargo, o la incorporación de nuevas tecnologías, es esta última la que se ha observado como una tendencia transversal a distintas escalas de organización territorial, materializada a nivel de comunidades residenciales en las llamadas *smart communities* [6, 7]. Estas corresponden a comunidades que integran tecnologías digitales en la gestión de sus procesos, con el objetivo de mejorar la eficiencia de sus servicios y el bienestar de quienes las habitan.

Cuando dicha tendencia baja al nivel de un inmueble en particular, toma la forma del concepto de *smart building* [8]: estas tecnologías se aplican a distintos ámbitos de la convivencia comunitaria, permitiendo delegar a sistemas automatizados procesos

que antes dependían por completo de la gestión manual del personal a cargo. Esto se traduce, por ejemplo, en una mayor seguridad en el control de los accesos [8], y en una administración más eficiente de los recursos compartidos [7], lo que puede contribuir a reducir los conflictos derivados de su gestión discrecional y a mejorar la calidad de vida de sus ocupantes [6].

Uno de dichos ámbitos es el control de los accesos vehiculares y la gestión de los estacionamientos de visita, particularmente sensible en un condominio: es en el punto de ingreso donde ocupantes, visitantes y el encargado de acceso (la persona que, como conserje, guardia o recepcionista, controla el ingreso) interactúan de forma más directa y frecuente [9], y donde la gestión de un recurso compartido se vuelve más visible para toda la comunidad.

En la práctica, esta interacción depende en gran medida de procesos manuales: la validación del ingreso de un vehículo y la asignación de un estacionamiento de visita recaen en el encargado de acceso, según su propio criterio y sin un registro centralizado que respalde dichas decisiones [10]. La combinación de criterio individual y falta de respaldo documental puede derivar en conflictos entre ocupantes y en una percepción de administración poco transparente sobre el uso de los estacionamientos de visita.

Frente a esta brecha, se documenta el diseño e implementación de un sistema que incorpora tecnologías propias de los *smart buildings* al control de accesos vehiculares y a la gestión de los estacionamientos de visita en condominios, orientado a mejorar la convivencia, la seguridad y la calidad de vida de sus ocupantes. Con ello, se busca ofrecer a quien administra el condominio una herramienta para este ámbito de su gestión diaria, sin reemplazar el criterio humano en aquello que efectivamente lo requiere.

1.1. Propósito

La tecnología tiene la capacidad de mejorar la vida de las personas cuando se pone a su servicio y no en su lugar. En este sentido, automatizar un proceso no debiera significar reemplazar a quien lo ejecuta, sino liberarlo de lo repetitivo para devolverle tiempo y atención a lo que solo una persona puede hacer. Bajo esta premisa, la eficiencia deja de ser un fin en sí mismo y pasa a ser un medio para que el personal pueda concentrar sus esfuerzos donde su aporte resulta más valioso.

Este proyecto se enmarca en el ámbito inmobiliario, donde dicha premisa cobra especial relevancia, pues la parte humana sigue siendo vital: la convivencia en una comunidad se sostiene en el trato directo entre quienes la ocupan, quienes la cuidan y quienes la administran, y es dicho vínculo el que la distingue de un simple conjunto de unidades que comparten una dirección. Por ello, se propone una herramienta que haga la vida más fácil y más segura a estos tres actores por igual, sin interponerse entre ellos, y que contribuya así a comunidades más transparentes, más cercanas y mejor cuidadas.

1.2. Objetivos

A partir del propósito descrito, se definen el objetivo general y los objetivos específicos que guían el desarrollo de esta memoria. El objetivo general resume el alcance completo del sistema propuesto, mientras que los objetivos específicos delimitan las tareas concretas necesarias para avanzar hacia la meta global. Cada uno de ellos corresponde a un componente del sistema o a la arquitectura que los articula, de modo que su cumplimiento puede evaluarse por separado al cierre de esta memoria.

1.2.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control de accesos vehiculares y gestión de estacionamientos de visita para condominios, capaz de automatizar la validación de ingresos a partir del reconocimiento de patentes y de reportar en tiempo real la disponibilidad de dichos estacionamientos mediante una red de sensores IoT.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar la arquitectura del sistema que integre los módulos de visión computacional, sensores IoT, interfaces de usuario y servicios centrales.
2. Registrar y consultar el historial de accesos, reservas y eventos del sistema mediante una base de datos.
3. Crear una aplicación móvil para ocupantes y una plataforma web para el encargado de acceso, que permitan gestionar reservas, visualizar el estado de los estacionamientos de visita y registrar los accesos.
4. Desplegar un modelo de visión por computador para el reconocimiento automático de la patente de los vehículos de ocupantes y de visitantes con una reserva vigente.
5. Implementar una red de sensores IoT que permita detectar y reportar en tiempo real la disponibilidad de los estacionamientos de visita.

1.3. Contribuciones

Como producto resultante, se presenta el diseño e implementación de ResiPark, un sistema de control de accesos vehiculares y gestión de estacionamientos de visita para condominios.

Esta herramienta integra cuatro componentes:

- **Reconocimiento automático de patentes (ALPR) y visión por computador**. Módulos encargados de detectar el vehículo en el punto de ingreso y de reconocer su patente.
- **Red de sensores IoT**. Basada en el internet de las cosas [11], reporta en tiempo real la disponibilidad de los estacionamientos de visita.
- **Interfaces de usuario**. Una aplicación móvil para ocupantes y una plataforma web para el encargado de acceso, que permiten gestionar reservas y visualizar el estado de dichos estacionamientos.
- **Base de datos**. Centraliza el registro de accesos, reservas y eventos del sistema.

Una arquitectura central conecta estos módulos de percepción con las interfaces de usuario y los servicios que sostienen su funcionamiento.

Asimismo, se posiciona respecto a la literatura revisada, donde el reconocimiento de patentes [12, 13], las redes de sensores inalámbricas para estacionamientos [14, 15, 16] y las interfaces de gestión para edificios y comunidades inteligentes [8, 7, 6] suelen abordarse de forma aislada; esta memoria documenta un caso de integración de estos componentes aplicado al contexto de los condominios.

Finalmente, se entrega una alternativa a la validación manual de accesos vehiculares, actualmente dependiente del criterio del encargado de acceso, aportando una herramienta con potencial de adopción por parte de administradoras e inmobiliarias para la gestión de la seguridad de las comunidades que administran.

1.4. Estructura del informe

Con el fin de guiar la lectura de este documento y facilitar la ubicación de los distintos temas que aborda, este informe se organiza en seis capítulos, cada uno correspondiente a una etapa del proceso seguido para el diseño e implementación de ResiPark. A continuación se resume el contenido de cada uno:

- El Capítulo 2 define el problema abordado, partiendo de qué es un recurso de uso común y del arreglo institucional que una comunidad construye para gestionarlo, examinando luego la Ley de Copropiedad Inmobiliaria como una implementación concreta de dicho arreglo y los desafíos que enfrenta la administración de un condominio, para cerrar con la delimitación del problema en el punto donde se vuelve más difícil de sostener: cuando quien usa el bien común no pertenece a la comunidad que lo posee.
- El Capítulo 3 presenta el estado del arte, partiendo de cómo se administra un condominio sin mediación tecnológica y de los instrumentos con que opera su

punto de ingreso, para revisar luego qué ha aportado la digitalización al monitoreo de un recurso de uso común y, por último, las tecnologías disponibles para identificar un vehículo y detectar la ocupación de un estacionamiento, junto con las arquitecturas que permiten integrarlas y las interfaces por las que se operan.

- El Capítulo 4 describe la propuesta y diseño de la solución, detallando los requisitos del sistema, el diseño de su arquitectura, los módulos que lo componen y el prototipo de sus interfaces de usuario.
- El Capítulo 5 aborda la implementación de la solución, incluyendo el desarrollo de cada módulo, así como su verificación, validación y las limitaciones identificadas durante el proceso.
- El Capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo, evaluando el cumplimiento de los objetivos planteados, sus alcances y limitaciones, y las proyecciones de trabajo futuro.

Capítulo 2

Definición del Problema

En este capítulo se define el problema abordado, presentando, en términos generales, qué es un recurso de uso común y cómo varía según su origen y su grado de formalidad. Sobre esta base se describe el arreglo institucional que un grupo construye para gestionarlo, las condiciones que distinguen a los casos exitosos y los tipos de desafíos que tal arreglo puede enfrentar. Se examina luego la Ley de Copropiedad Inmobiliaria como una implementación concreta del mismo, junto con los desafíos que enfrenta la administración de los condominios regidos por ella. El capítulo cierra delimitando el problema abordado: hacer cumplir las reglas que definen quién puede usar un bien común y bajo qué condiciones, en el punto en que dicha exigencia puede volverse más difícil de sostener, cuando quien lo usa no pertenece a la comunidad que lo posee.

2.1. Recursos de uso común y sus tipos

Toda persona necesita recursos para vivir: agua, peces, madera, tierras de cultivo o zonas de pastoreo, entre otros. Muchos de ellos no pertenecen a alguien en particular, sino que son compartidos por un grupo: lo que uno consume deja de estar disponible para los demás, y resulta difícil impedir el acceso de quienes no lo integran. Aquello que reúne ambas propiedades se conoce como *recurso de uso común* [17].

Aunque suelen asociarse a sistemas naturales, los *recursos de uso común* no se limitan a ellos. En [18], se señala que el concepto también puede aplicarse a recursos cuya existencia o configuración es resultado de la acción humana, pudiendo considerarse, en este sentido, recursos de origen artificial.

- **Origen natural**. Existe con independencia de la acción humana, y su disponibilidad depende de procesos ecológicos o físicos que la comunidad de usuarios no

controla por completo. Una pesquería es un ejemplo: la cantidad de peces disponible aumenta o disminuye de acuerdo con dinámicas biológicas que escapan al control directo de quienes pescan. Un bosque presenta una situación similar, pues su disponibilidad depende de procesos de crecimiento y regeneración que los usuarios pueden afectar, pero no producir directamente.

- **Origen artificial**. Surge de una acción deliberada destinada a generar una infraestructura para el uso conjunto. Una red de cómputo compartida, una infraestructura de telecomunicaciones o ciertos espacios habitacionales comunes son ejemplos de este tipo: sus componentes y capacidades no existen hasta que son diseñados y construidos. En este caso, la comunidad de usuarios, o quien construye la instalación en su nombre, determina en buena medida su origen y capacidad. Sin embargo, una vez puesta en funcionamiento, la infraestructura presenta un problema de gestión análogo al de los recursos naturales: el uso de una parte de su capacidad puede reducir la disponibilidad para otros usuarios, mientras que restringir el acceso a quienes no están autorizados puede resultar costoso.

En ambos casos persiste el mismo problema colectivo que plantea el uso compartido: los usuarios deben establecer mecanismos que permitan coordinar el acceso y evitar que el consumo individual termine deteriorando la disponibilidad del recurso para el resto de la comunidad. De esta necesidad surgen mecanismos de gestión del recurso con distintos grados de formalidad. En [18] se distingue entre mecanismos formalmente reconocidos (*de jure*) y mecanismos que se sostienen sólo de manera informal (*de facto*):

- ***De jure***. Cuenta con reconocimiento legal explícito: las reglas que rigen el acceso y el uso del recurso están respaldadas por alguna forma de autoridad formal, y su cumplimiento puede exigirse por la misma vía.
- ***De facto***. No cuenta con reconocimiento legal explícito: las reglas que rigen el recurso surgen y se sostienen por acuerdo entre quienes lo usan, sin que exista un reconocimiento legal que las formalice.

Un *recurso de uso común* también varía según quién ejerce este control, ya sea que se trate de gobiernos nacionales, regionales o locales, de grupos comunales, o de individuos o empresas privadas. La Tabla 2.1 combina ambas dimensiones con un ejemplo para cada caso.

Tabla 2.1: Ejemplos de *recurso de uso común* según quién lo controla y su grado de formalidad

	Formal (*de jure*)	Informal (*de facto*)
Gobierno	Un parque nacional, cuyo acceso y uso están regulados por ley	Un bosque fiscal usado por la comunidad vecina sin reglas reconocidas legalmente
Comunidad	La copropiedad de un edificio residencial en Chile (Ley 21.442)	Un sistema de riego tradicional gestionado por reglas consuetudinarias no reconocidas legalmente
Privados	Un consorcio de empresas que comparte contractualmente una misma infraestructura	Un grupo de vecinos que comparte, sin contrato, el uso de un pozo de agua

Existen, en este sentido, recursos que combinan ambas variaciones a la vez. Vale decir, son artificiales y formalizadas por ley desde su origen, antes incluso de que exista una comunidad de usuarios que las habite. La Figura 2.1 ilustra un ejemplo para cada una de las cuatro combinaciones posibles entre origen y grado de formalidad.

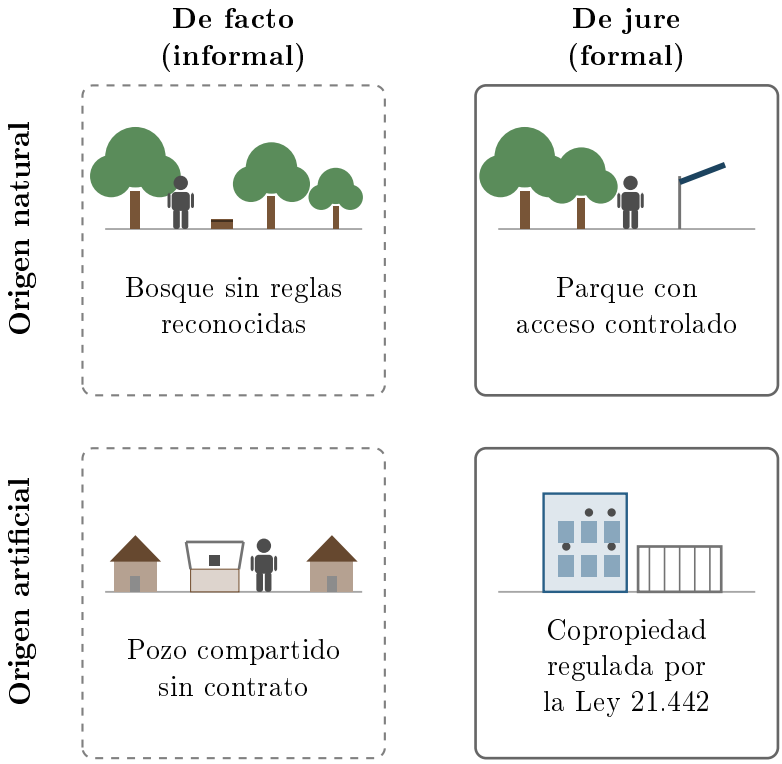


Figura 2.1: Ejemplos de *recurso de uso común* según su origen y su grado de formalidad

Estas variaciones; origen y formalidad; no cambian el problema de fondo: todo recurso de uso común exige coordinar su uso para evitar el agotamiento o el conflicto. Esto es lo que examina la siguiente sección.

2.2. Regímenes de propiedad común

La gobernanza de un *recurso de uso común* plantea una pregunta que antecede a cualquier forma particular de organización: ***¿cómo logra un grupo que comparte un espacio común evitar que su uso derive en abuso o en conflicto, sin que ello dependa únicamente de la buena voluntad de los interesados?*** La respuesta no se encuentra en el recurso, sino en el arreglo institucional que el grupo construye en torno a él, al que se denomina *régimen de propiedad común* [19].

2.2.1. Condiciones institucionales de un régimen exitoso

En [20] se ofrece una respuesta pesimista a esta pregunta: como cada usuario se queda con el beneficio íntegro de lo que extrae, pero el costo se reparte entre todos, lo racional para cada uno es sobreexplotar el recurso hasta agotarlo, aún cuando aquello perjudique a todo el grupo, incluido a sí mismo. Esta idea, conocida como la *tragedia de los comunes*, instala la creencia de que sólo la propiedad privada o el control estatal son capaces de evitar tal desenlace. En [17] se muestra que este pronóstico no es una ley inevitable, sino el resultado de un caso particular: aquel en que los usuarios no pueden comunicarse, no pueden diseñar sus propias reglas, o no tienen forma de saber quién las respeta y quién no. En él, se estudian casos de gestión comunitaria, y se documenta que el régimen exitoso de un *recurso de uso común*; el que no degenera en conflicto ni en sobreexpoltación; depende de que exista una institución capaz de sostener la cooperación en el tiempo.

En [19] se precisa la distinción entre el recurso y el arreglo institucional construido para gestionarlo. Bajo esta distinción, la propiedad privada y el control estatal; invocados hasta ahora como las únicas alternativas frente a la tragedia de los comunes; dejan de ser categorías naturales del recurso para ser una construcción social de derechos y deberes; y un *régimen de propiedad común*, lejos de ser una solución de segundo orden frente a la propiedad privada, puede ser la forma más eficiente de gestionar un recurso que resulta costoso o inconveniente de subdividir físicamente, evitando además los costos de fragmentación y permitiendo compartir el riesgo entre sus miembros. La gestión exitosa de un *recurso de uso común* no depende, entonces, de la etiqueta de propiedad que se le asigne, sino de si el régimen institucional construido en torno a él, y no el recurso en sí, reúne los elementos identificados en [17].

Para comprender esta idea, es necesario identificar las condiciones institucionales que distinguen a los casos documentados como exitosos. Estas condiciones se sintetizaron en un conjunto de ocho principios de diseño, identificados a partir del contraste entre

casos de gestión sostenida en el tiempo y casos que terminaron en sobreexplotación o conflicto. Estos principios distinguen dos tipos de actores en torno al recurso: los usuarios, que lo usan directamente, y los funcionarios, quienes ejercen alguna forma de autoridad delegada sobre las reglas que rigen su uso, ya sea que rindan cuentas ante los propios usuarios o ante una autoridad externa desconectada de ellos. Los ocho principios son:

1. **Límites claramente definidos.** Tanto los límites físicos del recurso como la identidad de quienes tienen derecho a usarlo deben estar bien delimitados. Sin esta condición, es imposible distinguir a un usuario legítimo de uno que no lo es, lo que impide controlar el aprovechamiento gratuito (en inglés, *free-riding*) y estimar con certeza el estado del recurso.

2. **Congruencia entre las reglas y las condiciones locales.** Las reglas que determinan cuánto, cuándo, dónde y con qué medios puede usarse el recurso deben ajustarse a sus características particulares y a las de quienes lo usan, en vez de imponerse de forma genérica.

3. **Arreglos de elección colectiva.** La mayoría de quienes se ven afectados por una regla operativa deben poder participar en su modificación. Esto no implica que cada usuario individual administre el recurso, sino que las reglas no queden fijadas de forma unilateral por quien las aplica.

4. **Monitoreo.** El cumplimiento de las reglas y el estado del recurso deben ser supervisados por monitores que rindan cuentas ante los propios usuarios, y no únicamente ante una autoridad externa desconectada de las consecuencias de la supervisión.

5. **Sanciones graduadas.** Quien infringe una regla debe recibir una sanción proporcional a la gravedad y reincidencia de la infracción, aplicada por otros usuarios, por funcionarios responsables ante ellos, o por ambos, en vez de una sanción fija o arbitraria.

6. **Mecanismos de resolución de conflictos.** Los usuarios y los funcionarios deben contar con espacios rápidos y de bajo costo para resolver los conflictos que surjan entre los propios usuarios, o entre estos y los funcionarios.

7. **Reconocimiento mínimo de derechos de organización.** El derecho de los usuarios a definir sus propias instituciones no debe ser cuestionado por autoridades gubernamentales externas de mayor jerarquía.

8. **Organización anidada.** Cuando el recurso forma parte de un sistema más amplio, las actividades de gobernanza (apropiación, provisión, monitoreo, sanción, resolución de conflictos) se organizan en múltiples niveles de gobierno anidados entre sí, en vez de concentrarse en uno solo.

Ningún principio garantiza por sí solo la sostenibilidad del recurso; es su presencia conjunta la que distingue a los regímenes que logran evitar la sobreexplotación de aquellos que no. El primero, sin embargo, antecede lógicamente al resto: mientras no esté definido quiénes tienen derecho a usar el recurso, no hay a quién aplicar las reglas que los demás principios suponen.

Para caracterizar con mayor precisión dicho *régimen de propiedad común*, en [1] se propone entender la propiedad no como una facultad única e indivisible, sino como un conjunto de derechos separables entre sí (por ejemplo, uno para usar el recurso y otro distinto para decidir quién más puede hacerlo), que pueden repartirse de manera distinta entre los usuarios de un mismo recurso. Se identifican cinco *derechos operacionales*:

1. **Acceso.** El derecho a ingresar a un área definida del recurso y disfrutar de sus beneficios no extractivos, sin que ello implique poder retirar unidades del recurso ni influir en cómo se gestiona.
2. **Extracción.** El derecho a obtener las unidades o los beneficios que el recurso genera (por ejemplo, pescar en una pesquería o estacionar un vehículo en un espacio compartido), dentro de los límites que fijen las reglas vigentes.
3. **Gestión.** El derecho a regular los patrones internos de uso del recurso y a introducir mejoras sobre él, es decir, a modificar las reglas operativas que rigen a quienes solo tienen acceso o extracción.
4. **Exclusión.** El derecho a determinar quién más puede obtener alguno de los derechos anteriores, y bajo qué condiciones. Es el derecho que permite decidir la composición del grupo de usuarios.
5. **Enajenación.** El derecho a vender o transferir, en todo o en parte, cualquiera de los cuatro derechos anteriores a un tercero.

Estos derechos no se dividen simplemente entre quienes tienen propiedad y quienes no la tienen. Cada usuario puede poseer una combinación distinta de ellos, y esta combinación define su posición dentro del régimen. En [1] se identifican cinco posiciones, que se acumulan de manera jerárquica: quien ocupa una posición superior conserva, en general, los derechos de las posiciones anteriores. La Figura 2.2 resume qué derechos corresponden a cada una de estas posiciones.

1. **Propietario pleno.** Posee los cinco derechos, incluida la alienación, lo que le permite ceder o vender cualquiera de los derechos anteriores.
2. **Propietario de uso.** Suma además el derecho de exclusión, lo que le permite determinar quién puede acceder al recurso y bajo qué condiciones, sin poder transferir tal derecho a un tercero.

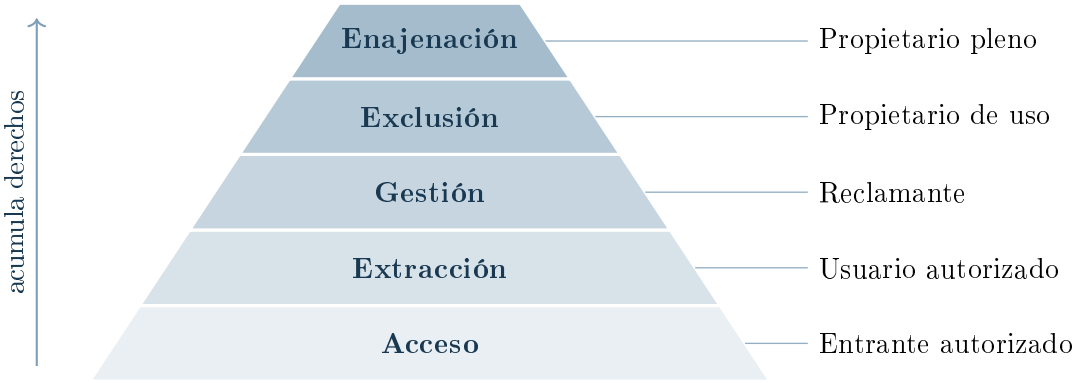


Figura 2.2: *Derechos operacionales* asociados a cada posición en un *régimen de propiedad común*. Cada posición posee el derecho de su capa y todos los de las capas inferiores [1]

3. **Reclamante.** Suma además el derecho de gestión: puede participar en la definición de las reglas operativas de uso, aunque no decide quién integra el grupo de usuarios.

4. **Usuario autorizado.** Suma al acceso el derecho de extracción, pero no participa en las decisiones sobre cómo se gestiona el recurso ni sobre quién más puede usarlo.

5. **Entrante autorizado.** Posee únicamente el derecho de acceso. Puede ingresar al recurso, pero no extraer nada de él ni influir en su gestión.

Esta distinción tiene una implicancia directa para el diagnóstico de un *régimen de propiedad común*: un conflicto en torno a un recurso compartido no siempre revela un problema con el recurso mismo, sino con la forma en que los derechos de gestión y exclusión están, o no están, formalmente atribuidos a una posición dentro del grupo de usuarios. Cuando tales derechos existen solo de manera informal, o quedan concentrados, en los hechos, en quien se encuentra físicamente presente al momento de la decisión, el régimen carece del respaldo institucional que se identifica como condición de una gestión exitosa. La falla, en tal caso, no está en la buena fe de quien ejerce el criterio, sino en que el régimen le entrega una decisión sin un medio para rendir cuenta de ella.

Hasta aquí se ha hablado de las condiciones que hacen exitosa la gobernanza de un recurso de uso común, y del vocabulario que permite precisar los derechos de cada usuario dentro de la institución. Falta, sin embargo, precisar qué tipo de problema puede enfrentar una gobernanza así construida.

2.2.2. Desafíos en la administración de un régimen de propiedad común

Reunir las condiciones descritas en la Sección 2.2.1 no exime a un *régimen de propiedad común* de enfrentar dificultades en su operación cotidiana. En [2] se descompone un recurso compartido en cuatro componentes, a saber, el recurso, sus usuarios, la infraestructura construida para aprovecharlo y quienes proveen y mantienen tal infraestructura, y se documentan los problemas que puede presentar cada vínculo entre ellos: el aprovechamiento gratuito de la mantención, la elusión del trabajo comprometido, el desgaste de las obras con el tiempo, la pérdida de información entre usuarios y proveedores, y la indecisión sobre qué política adoptar, entre otros. Estos problemas se concentran en los siguientes ocho ámbitos de gestión.

1. **Asignación del recurso entre usuarios**. La capacidad del recurso es limitada y la demanda que recibe no se distribuye de forma pareja en el tiempo ni en el espacio. Definir cuánto, cuándo y dónde puede usar cada uno, y sostener la definición en el tiempo, es el primer problema que un régimen debe resolver: un sistema de riego reparte turnos de agua entre regantes cuyas parcelas no rinden lo mismo, y una pesquería reparte cuotas de captura entre embarcaciones de capacidad desigual [17]. Cuando no existe una regla explícita, la asignación se resuelve por orden de llegada o por la posición de quien controla el punto de acceso.

2. **Conservación del recurso en el tiempo**. Un recurso usado de forma sostenida se degrada si nadie invierte en mantenerlo, y las obras construidas sobre él se desgastan por el solo paso del tiempo [2]. La dificultad reside en que el beneficio de tal inversión es diferido y compartido, mientras que su costo es inmediato y recae sobre quien la realiza, lo que desincentiva asumirla de manera individual y favorece eludir el trabajo comprometido. El problema se agrava porque el deterioro rara vez es visible antes de comprometer la capacidad del recurso, de modo que la decisión de conservarlo debe tomarse sin una señal clara que la justifique.

3. **Financiamiento de la provisión**. Sostener el recurso exige aportes de quienes se benefician de él, ya sean monetarios, en trabajo o en tiempo. Quien no contribuye, sin embargo, rara vez puede ser privado del beneficio que el resto financia, lo que instala un incentivo permanente al aprovechamiento gratuito [17]. Un régimen que no logra hacer exigible la contribución termina sosteniéndose sobre una fracción de sus usuarios, situación que se vuelve insostenible a medida que el resto la advierte.

4. **Cumplimiento de las reglas y resolución de conflictos**. Tener reglas no equivale a que se cumplan. Verificar el cumplimiento exige observar de forma continua qué hace cada usuario, tarea costosa cuando el recurso es extenso o los usuarios son numerosos, y aplicar una consecuencia proporcional ante la infracción. Los desacuerdos que igualmente surgen requieren, a su vez, una instancia capaz de resolverlos a un costo que no desincentive recurrir a ella [17].

5. **Toma de decisiones colectivas**. Las reglas deben poder revisarse cuando las condiciones del recurso o del grupo cambian, y tal revisión exige reunir a quienes se ven afectados por ella. La participación desigual, el desinterés de quienes no perciben el problema como propio y la indecisión sobre qué política adoptar [2] postergan decisiones cuya demora agrava el problema que buscaban resolver.

6. **Delegación y rendición de cuentas**. A medida que el grupo crece, la gestión cotidiana se delega en funcionarios que actúan en su nombre. La delegación separa a quien decide de quien ejecuta, e instala entre ambos una asimetría de información: el funcionario conoce el estado del recurso y el detalle de su propia gestión mejor que quienes lo designaron. El vínculo entre los usuarios y quienes proveen y mantienen la infraestructura se identifica, de hecho, como la variable más determinante de la robustez de un recurso compartido, y a la vez como la más desatendida por la literatura previa [2]. Que los funcionarios rindan cuentas ante los usuarios, y no únicamente ante una autoridad externa, es lo que distingue a los regímenes que sostienen la cooperación de aquellos que la erosionan [17].

7. **Control de acceso y exclusión de terceros**. Un recurso de uso común es, por definición, difícil de cerrar a quienes no pertenecen al grupo. Distinguir a un usuario legítimo de uno que no lo es exige tanto delimitar el recurso como identificar a quienes tienen derecho sobre él, y el costo de la verificación crece con la apertura del recurso: una pesquería debe vigilar un área extensa frente a embarcaciones ajenas, y una instalación compartida debe controlar sus puntos de entrada. Sin tal control, el resto de las reglas pierde efecto, pues se aplican solo sobre quienes se reconocen obligados por ellas. Es, en la operación cotidiana, el ámbito donde se juega el primer principio de diseño enunciado en la Sección 2.2.1.

8. **Resguardo ante perturbaciones externas**. Un régimen puede reunir todas las condiciones anteriores y verse igualmente sobrepasado por un evento que no controla. En [2] se distinguen dos fuentes de estas perturbaciones: las biofísicas, como una inundación, un terremoto o un deslizamiento, que dañan de forma directa el recurso y la infraestructura construida sobre él; y las socioeconómicas, como un cambio regulatorio, una migración o una variación brusca en el precio de lo que el recurso produce, que alteran la demanda sobre el recurso y la composición del grupo que lo usa. Un régimen ajustado a un entorno estable puede resultar frágil justamente por tal ajuste, al carecer de la holgura necesaria para absorber un evento fuera de lo previsto.

Ellos están presentes con distinta intensidad en cualquier recurso compartido, sea una pesquería, un sistema de riego, un bosque comunal o una instalación construida para el uso conjunto. La Figura 2.3 ubica cada ámbito sobre el vínculo del que se origina.

Estos problemas no operan de forma aislada. La ausencia de control sobre quién usa el recurso puede volver inexigible la contribución al financiamiento; la falta de recursos posterga la conservación; y el deterioro resultante alimenta el desacuerdo sobre cómo asignar lo que queda. La Sección 2.3 examina un caso concreto de régimen de propiedad

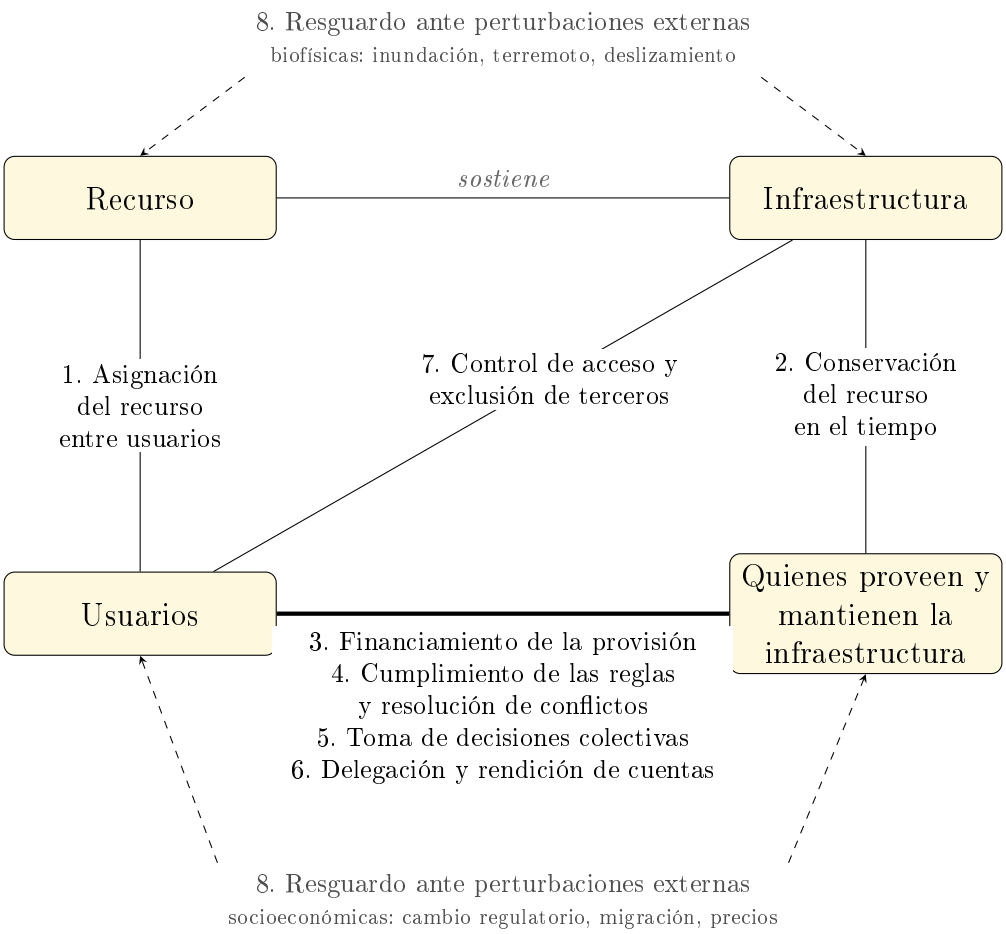


Figura 2.3: Componentes de un recurso compartido y ámbitos de gestión asociados a cada vínculo entre ellos [2]

común, a la luz tanto del vocabulario institucional como de los ámbitos presentados hasta ahora.

2.3. El condominio como régimen de propiedad común

Entre los recursos de uso común descritos en la Sección 2.1, el condominio, esto es, un inmueble dividido en unidades de dominio exclusivo y bienes de dominio común, ocupa una posición reconocible. Su origen es artificial, pues los bienes que la comunidad comparte no existen hasta que alguien los diseña y construye. El control recae sobre la propia comunidad de quienes lo usan, y no sobre un gobierno ni sobre un tercero privado. Y su formalización es *de jure*, pues las reglas que lo rigen están respaldadas por ley desde antes de que exista la comunidad que habrá de habitarlo, tal como se anticipó en la Tabla 2.1.

Conviene fijar, antes de avanzar, la equivalencia entre ambos vocabularios: lo que la ley denomina *bien de dominio común* es, en los términos de la Sección 2.1, el recurso de uso común de este régimen. Su capacidad es limitada y su uso es sustractivo, pues un ascensor ocupado, una sala de eventos reservada o un estacionamiento de visita ocupado dejan de estar disponibles para el resto mientras dura su uso; y excluir a quien no tiene derecho sobre él resulta costoso, pues exige vigilar de forma continua los puntos por donde se accede. La Ley 21.442 es, bajo esta lectura, el *régimen de propiedad común* que una sociedad construye por anticipado para gestionar dicho recurso, y los cuatro instrumentos que se describen a continuación son la forma concreta que adoptan en Chile los principios de diseño de la Sección 2.2.1.

2.3.1. La Ley de Copropiedad Inmobiliaria

La Ley de Copropiedad Inmobiliaria, Ley 21.442 [4], regula en Chile los condominios, esto es, los inmuebles en que coexisten bienes de dominio exclusivo, que pertenecen individualmente a cada propietario, y bienes de dominio común, que pertenecen en conjunto a toda la comunidad. Esta coexistencia, que la ley denomina *régimen de copropiedad*, opera con independencia de que el inmueble se destine a vivienda, oficinas, comercio, equipamiento o bodegaje, y admite dos estructuras posibles:

- **Tipo A.** El dominio exclusivo recae sobre unidades emplazadas en un terreno de dominio común. Un condominio de departamentos es el ejemplo típico: cada propietario es dueño exclusivo de su departamento, mientras que el terreno, la estructura, las escaleras, la techumbre y los muros exteriores pertenecen en conjunto a toda la comunidad.
- **Tipo B.** El dominio exclusivo recae sobre sitios urbanizados. Un condominio de casas pareadas es el ejemplo típico: cada propietario es dueño exclusivo de su casa y de su sitio, mientras que las circulaciones interiores, la plaza y las áreas verdes del conjunto son bienes comunes.

La diferencia entre ambas estructuras no es solo de forma: determina cuánto del inmueble queda bajo administración conjunta. En un condominio de tipo A, prácticamente todo lo que no es el interior de una unidad es un bien común; en uno de tipo B, los bienes comunes se limitan a las circulaciones y los espacios abiertos que separan a los sitios. La Figura 2.4 ilustra ambas estructuras.

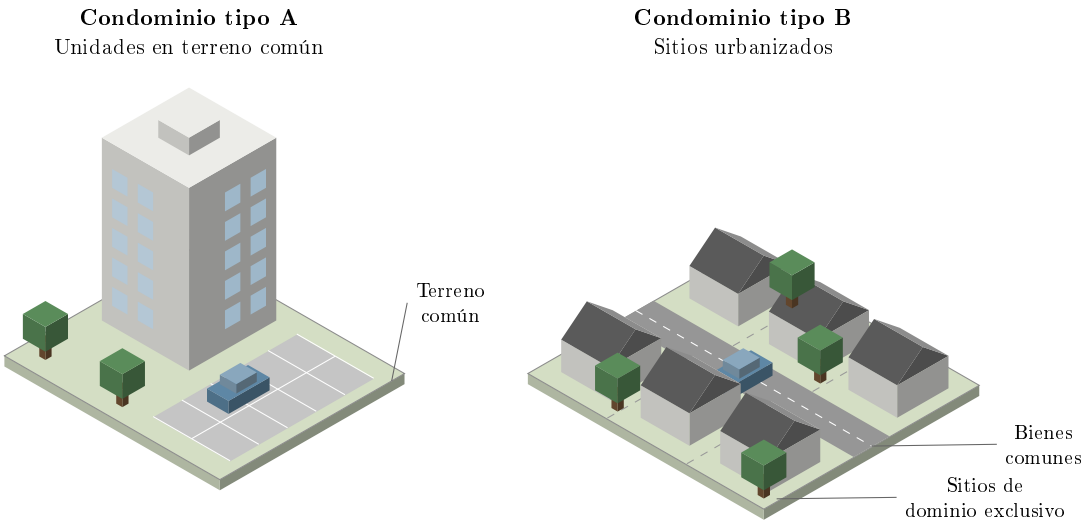


Figura 2.4: Estructura de un condominio de tipo A y de tipo B

Esta clasificación estructural es independiente del uso al que se destine el inmueble. Un edificio de oficinas y un edificio de departamentos son ambos condominios de tipo A, del mismo modo que un parque industrial de naves independientes y un conjunto de casas son ambos de tipo B, y la ley somete a todos ellos a las mismas reglas de administración. Los desafíos de gestionar lo que se comparte no son, por tanto, exclusivos de la vivienda, sino propios de cualquier inmueble en que coexisten dominio exclusivo y dominio común. La Tabla 2.2 recoge ejemplos de ambas clasificaciones combinadas entre sí.

Tabla 2.2: Ejemplos de condominios según su tipo estructural y uso

Tipo	Uso	Ejemplos
Tipo A	Residencial	Edificio de departamentos Torre de departamentos con locales comerciales en el primer piso
	No residencial	Edificio de oficinas Centro comercial de varios pisos Hospital
Tipo B	Residencial	Conjunto de casas pareadas Loteo de parcelas de agrado
	No residencial	Conjunto de bodegas con sitios individuales Parque industrial de naves independientes

Definido qué parte del inmueble es de dominio exclusivo y qué parte es común, queda por resolver cómo se gobierna lo común: quién fija las reglas de uso, quién decide sobre las materias que afectan a toda la comunidad, quién ejecuta lo decidido y quién vigila la ejecución. La ley asigna estas funciones a cuatro instrumentos, cuya relación mutua se ilustra en la Figura 2.5.

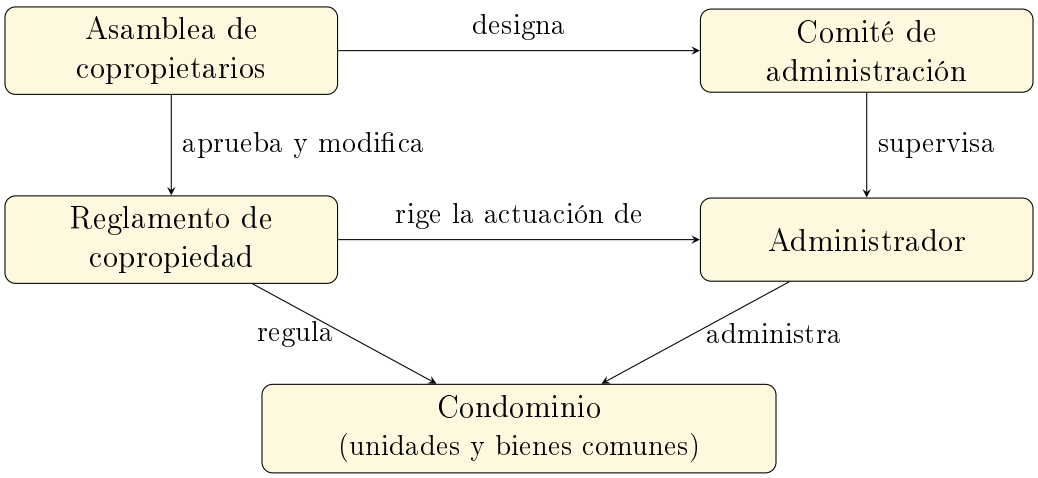


Figura 2.5: Relación entre el reglamento de copropiedad, la asamblea de copropietarios, el comité de administración y el administrador en la gobernanza de un condominio

- **Reglamento de copropiedad (Art. 8).** Fija los derechos y obligaciones recíprocas entre copropietarios, identifica las unidades y los bienes comunes, define las contribuciones económicas de cada uno y regula tanto la administración como las multas aplicables por su incumplimiento.
- **Asamblea de copropietarios (Art. 13).** El órgano decisorio está facultado para adoptar acuerdos vinculantes sobre el uso, la administración y la mantención de los bienes comunes.
- **Comité de administración (Art. 17).** Un grupo de copropietarios, designado por la asamblea, que representa a la asamblea y supervisa la gestión del administrador entre una sesión y la siguiente, e impone las multas previstas en el reglamento de copropiedad a quienes lo infrinjan.
- **Administrador (Art. 2).** La persona natural o jurídica designada para cumplir labores de administración conforme a la ley, al reglamento de copropiedad y a las instrucciones de la asamblea y del comité de administración.

Cómo se traduce este régimen institucional a la práctica varía según el tipo de condominio: uno de tipo A y uno de tipo B comparten el mismo marco legal, pero distribuyen sus bienes comunes de forma distinta. A continuación, se profundiza en cuatro aspectos de este marco legal: qué se considera un bien común, cómo se financia su mantención, qué regula el reglamento de copropiedad, y quién toma las decisiones sobre su uso y administración.

- **Bienes comunes**. Un bien de dominio común es aquel necesario para la existencia, la seguridad, la conservación o el funcionamiento del condominio, en contraste con un bien de dominio exclusivo, que pertenece en particular a un propietario (una vivienda, una oficina, un local, una bodega o un estacionamiento). Dentro

de los bienes de dominio común, la ley distingue además dos regímenes de uso: unos de uso general, disponibles para todos los copropietarios por igual (escaleras, ascensores, fachadas), y otros de uso y goce exclusivo, que siguen perteneciendo formalmente a la comunidad, pero cuyo uso queda asignado a un propietario en particular (por ejemplo, cierta bodega o terraza). Para algunos bienes, la ley fija esta clasificación de forma imperativa, sin dejarla al criterio de la comunidad. Los estacionamientos de visita son uno de ellos: la ley los reserva como bienes comunes de uso general y prohíbe asignarlos en uso y goce exclusivo a propietario alguno [4].

- **Gastos comunes**. La mantención de los bienes comunes se financia mediante gastos comunes, que la ley clasifica en ordinarios y extraordinarios. Los gastos comunes ordinarios son los habituales y permanentes, necesarios para el funcionamiento cotidiano del condominio: las remuneraciones del personal, los servicios básicos de las áreas comunes, la mantención de ascensores, los seguros y los honorarios de administración. Los gastos comunes extraordinarios, en cambio, no son habituales ni permanentes, y suelen requerir un acuerdo específico de la asamblea: reparaciones mayores, mejoras a los bienes comunes u obras de emergencia. Esta distinción importa porque determina qué decisiones puede tomar la administración por sí sola, dentro de un presupuesto ya aprobado, y cuáles requieren someterse a votación.

- **Reglamento de copropiedad**. Ya mencionado como uno de los instrumentos de la ley, regula cuatro tipos de materias:

  1. Identifica las unidades de dominio exclusivo y los bienes de dominio común del condominio, incluida la clasificación de estos últimos en generales o de uso y goce exclusivo.
  2. Fija los derechos y obligaciones recíprocas entre copropietarios y regula las formas de aprovechamiento de los bienes comunes, sus alcances y limitaciones, como las normas de convivencia y de uso de los espacios comunes.
  3. Define las contribuciones económicas de cada unidad, esto es, el criterio de prorrateo de los gastos comunes entre los copropietarios.
  4. Regula la administración del condominio y establece las conductas que constituyen infracciones y sus multas o sanciones, que puede calificar según su gravedad.

  En conjunto, el reglamento de copropiedad es el instrumento donde una comunidad concreta traduce el marco general de la ley a sus propias circunstancias. La facultad de calificar las infracciones según su gravedad recoge, en la ley chilena, las sanciones graduadas del quinto principio de diseño (Sección 2.2.1).

- **Órganos de decisión y gobernanza**. Las decisiones sobre el condominio no se toman todas en la misma instancia. La asamblea de copropietarios sesiona, como mínimo, una vez al año en su modalidad ordinaria, oportunidad en la que la

administración rinde cuenta documentada de su gestión y se aprueba el balance de ingresos y gastos; para sesionar se exige un quórum del 33 % de los derechos del condominio, y para adoptar acuerdos, la mayoría absoluta de los asistentes. Las materias que no pueden esperar a la sesión anual, o que revisten mayor entidad, se resuelven en una asamblea extraordinaria, convocada solo para tratar los puntos de la citación: unas requieren la mayoría absoluta de los derechos del condominio, y otras, como modificar el reglamento de copropiedad o enajenar bienes comunes, una mayoría reforzada de al menos el 75 % de los presentes. Entre una asamblea y la siguiente, el comité de administración representa a la asamblea, supervisa la gestión del administrador y ejecuta los acuerdos ya adoptados, cerrando así la cadena de decisión: la asamblea decide las materias de mayor entidad, el comité las administra en el día a día, y el administrador ejecuta ambas.

2.3.2. Desafíos en la administración de un condominio

El marco legal descrito explica cómo debería administrarse un condominio; falta ver qué ocurre cuando el marco se pone a prueba. En [21] se construye, a partir de la revisión de la legislación de tres estados australianos y de la consulta sucesiva a expertos de la industria, una tipología de los problemas de gobernanza que afectan a los inmuebles de propiedad múltiple, y se constata que tales problemas persisten pese a existir legislación dictada precisamente para ordenarlos. Parte de la dificultad antecede a la comunidad misma: en [22] se muestra que decisiones tomadas por quien desarrolla el inmueble, como la calidad de la construcción, el diseño de los espacios, la asignación de los derechos de cada unidad y el monto inicial de las contribuciones, condicionan después la viabilidad financiera del condominio, el equilibrio de poder entre propietarios y la frecuencia de los conflictos.

Los ámbitos descritos en la Sección 2.2.2 adoptan, en un condominio, la siguiente forma concreta, en la que el control de los accesos y el resguardo ante perturbaciones se abordan de manera conjunta:

1. **Uso y disponibilidad de los bienes comunes**. La capacidad de un bien común es limitada y la demanda que recibe no se distribuye de forma pareja a lo largo del día: los estacionamientos, los ascensores y los espacios sujetos a reserva concentran su uso en franjas acotadas. Cuando el reglamento no fija una regla explícita de asignación, el acceso se resuelve por orden de llegada o por el criterio de quien controla el ingreso, sin que quede constancia del espacio ocupado ni de por cuánto tiempo. En [23] se identifica el diseño de las áreas comunes y la delimitación de los espacios de dominio exclusivo entre los factores más asociados a la intensidad de las disputas dentro de un inmueble de propiedad múltiple.

2. **Mantención y deterioro de la infraestructura**. Conservar la fachada, la techumbre, las áreas verdes y la estructura del inmueble exige planificación, información sobre su estado y recursos comprometidos con anticipación. En [24] se

identifican los obstáculos que enfrenta la conservación, entre ellos el tratamiento reactivo de la mantención, que no distingue entre la mantención rutinaria, la reparación y la mejora, cada una con una organización y un horizonte de tiempo distintos. El costo de postergarla crece con el tiempo: un deterioro no atendido compromete la funcionalidad del inmueble y encarece la intervención posterior.

3. **Morosidad y financiamiento colectivo**. La provisión de los bienes comunes depende de que cada propietario entere su contribución. Quien no lo hace sigue beneficiándose de los servicios que financia el resto, lo que reproduce el aprovechamiento gratuito descrito en la Sección 2.2.1. El problema no se agota en la recaudación corriente: en [25] se comparan las alternativas mediante las cuales una comunidad financia el gasto mayor en bienes comunes, y se concluye que constituir un fondo de reserva de manera anticipada es preferible a recaudar cuotas extraordinarias cuando el gasto ya se hizo inevitable, ya que esto expone a los propietarios a una exigencia de pago que no siempre pueden enfrentar.

4. **Conflictos por el uso de espacios comunes**. El incumplimiento de las reglas de uso, la ocupación de un bien común por parte de un propietario en desmedro del resto y las molestias entre ocupantes derivan en conflictos que la comunidad debe resolver. En [23] se analiza un centenar de causas llevadas ante el tribunal competente en Victoria, Australia, y se muestra que la intensidad del conflicto se asocia a la estructura de propiedad y al diseño del inmueble, y no únicamente a la conducta de las partes. Los mecanismos formales de resolución operan, además, sobre conflictos ya escalados, con un costo en tiempo que desincentiva recurrir a ellos ante las infracciones cotidianas.

5. **Toma de decisiones colectivas**. Las materias de mayor entidad exigen quórums que obligan a convocar y reunir a los propietarios. En [26] se explica el resultado de la administración de un inmueble de propiedad múltiple desde la perspectiva de la acción colectiva: depende de la capacidad efectiva de los propietarios para coordinarse, y no solo de las atribuciones que la ley les reconoce. La participación despareja, la rotación de quienes integran los órganos de representación y la dificultad para acordar gastos elevados postergan decisiones cuya demora agrava el problema que buscaban resolver.

6. **Administración y transparencia**. La comunidad delega en un administrador la ejecución de sus acuerdos, lo que separa a quien decide de quien ejecuta e instala entre ambos una asimetría de información. Mantener registros de la gestión y rendir cuenta documentada de ella es el mecanismo previsto para corregir la asimetría, y figura entre las materias que toda asociación de propietarios debe cumplir por mandato legal [21]. Cuando la rendición no se realiza, o se reduce a un trámite formal, la desconfianza sobre el manejo de los fondos recaudados se instala sobre quienes administran.

7. **Seguridad y emergencias**. Un inmueble compartido concentra a un número elevado de personas en un espacio con accesos comunes, lo que plantea dos exigencias

distintas. La primera, controlar quién ingresa y bajo qué autorización, cuestión que remite a la delimitación de los usuarios legítimos descrita en la Sección 2.2.1. La segunda, la preparación ante una emergencia: la ley obliga a todo condominio a mantener vigente un plan de emergencia que incluya el plan de evacuación del inmueble [4]. En [27] se documenta que ambas funciones descansan menos en el equipamiento instalado que en los procedimientos que lo acompañan y en la constancia con que se aplican.

Los ámbitos descritos no operan de forma aislada: la morosidad reduce los recursos disponibles para la mantención, la dificultad para reunir quórum posterga las decisiones que dicha mantención requiere, y la desconfianza hacia la administración puede, a su vez, desincentivar el pago de las contribuciones. Todos ellos presuponen que las reglas sobre quién puede usar el bien común, y bajo qué condiciones, se cumplen en el día a día. Dicha cuestión se examina a continuación.

2.4. Problemática y alcance: el cumplimiento de las reglas de acceso al bien común

De los ocho ámbitos descritos en la Sección 2.2.2, el control de acceso y la exclusión de terceros es el que se ejerce en cada ingreso. La ley y el reglamento de copropiedad pueden definir quién tiene derecho a usar el bien común y bajo qué condiciones, pero dicha definición solo tiene efecto si alguien la hace cumplir en el punto de ingreso. En los condominios regidos por la Ley 21.442, hacerla cumplir puede volverse más difícil en un caso preciso: cuando quien usa el bien común no pertenece a la comunidad que lo posee, como ocurre con un visitante.

Un condominio, cualquiera sea su tipo y su destino, separa el espacio que administra del espacio público mediante uno o más puntos de ingreso, y es en ellos donde se resuelve quién puede acceder y quién no. Cuando el ingreso es vehicular, la decisión se desdobla en dos: si el vehículo entra, y dónde permanece mientras está dentro. La segunda recae sobre los estacionamientos de visita, bienes comunes de uso general que la ley reserva para quienes no habitan el condominio y prohíbe asignar en uso y goce exclusivo a propietario alguno [4]. Ambas decisiones las toma el encargado de acceso. De ellas se desprenden los dos problemas concretos que se definen a continuación, ilustrados en la Figura 2.6.

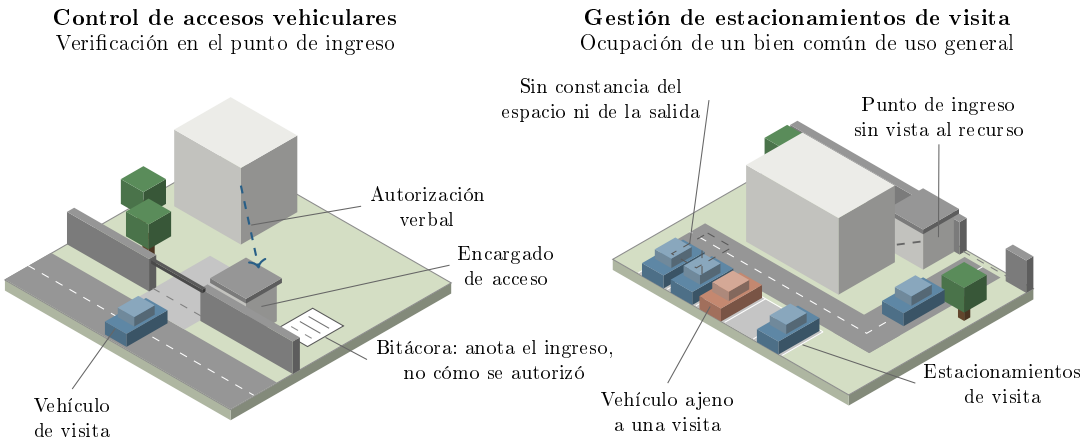


Figura 2.6: Los dos problemas abordados: la verificación del ingreso vehicular y la ocupación de los estacionamientos de visita.

Antes de examinar cada problema por separado, la Tabla 2.3 resume qué derecho tiene sobre el bien común cada persona que concurre al punto de ingreso. El copropietario puede usar el bien común, autorizar visitas a nombre de su unidad y, reunido en asamblea, decidir las reglas de su uso y quién más puede usarlo. El ocupante no propietario, como un arrendatario, puede usarlo y autorizar visitas mientras dure su vínculo con una unidad, pero no participa en las decisiones de la asamblea. El personal y los proveedores, entre ellos el encargado de acceso, pueden ingresar para prestar un servicio, mientras dure el contrato que los vincula con el condominio. El visitante puede ingresar y ocupar un estacionamiento de visita, pero su derecho nace y se extingue con una sola autorización, concedida por un ocupante de la unidad que visita. Cuando dicho ocupante llega junto al visitante, la autorización se entrega en el mismo punto de ingreso; cuando no, el encargado de acceso debe obtenerla a distancia y decidir sin poder constatarla por sí mismo. En ambos casos, el visitante no está sujeto al reglamento de copropiedad, pues no forma parte de la comunidad que lo dictó.

Tabla 2.3: Derecho sobre el bien común de quienes concurren al punto de ingreso de un condominio

Quién	Qué puede hacer sobre el bien común
Copropietario	Usarlo, autorizar visitas a nombre de su unidad y, reunido en asamblea, decidir sus reglas y quién más puede usarlo
Arrendatario u otro ocupante no propietario	Usarlo y autorizar visitas a nombre de su unidad, mientras dure su vínculo con ella
Personal de acceso	Ingresar para prestar su servicio y, en nombre de la comunidad, dar paso al personal general, a los proveedores y a los visitantes autorizados por un ocupante
Personal general y proveedores	Ingresar para prestar su servicio
Visitante	Ingresar y ocupar un estacionamiento de visita, con la autorización de un ocupante válida solo para dicha visita

Dentro del personal, el encargado de acceso merece atención aparte. Su derecho sobre el bien común se limita a ingresar para prestar su servicio: no es copropietario ni ocupante y no participa en la gestión del bien común. Sin embargo, en los hechos decide quién ingresa, lo que corresponde al derecho de exclusión que la ley reconoce a la comunidad en su conjunto, y ocupa el lugar del monitor que describe el cuarto principio de diseño de la Sección 2.2.1: supervisa el uso del bien común y el cumplimiento de las reglas que lo rigen. El reglamento de copropiedad puede fijar reglas para el ingreso de visitantes y el uso de los estacionamientos de visita, pero su aplicación en cada caso queda en manos del encargado de acceso: es esta persona quien decide si la regla se cumple, cómo se interpreta ante una situación no prevista y cuándo corresponde una excepción. Dicho margen de decisión se ejerce en dos momentos, el ingreso del vehículo y la asignación de un estacionamiento de visita, que dan lugar a los dos problemas descritos a continuación.

- **Control de accesos vehiculares**. Por un mismo punto de ingreso pasan, en un mismo turno, todas las personas de la Tabla 2.3, cuyas condiciones de acceso y vigencia pueden ser distintas. Cuando el ingreso es vehicular, la verificación se realiza a partir de la patente, la que debe vincularse con la autorización correspondiente y, tratándose de un visitante, con la unidad que lo autorizó. Si el ocupante llega junto al visitante, dicho vínculo se constata en el mismo punto de ingreso; si no, la autorización se obtiene a distancia y se resuelve en el momento [10]. La ley exige a la administración mantener actualizado un registro de los copropietarios, arrendatarios y demás ocupantes [4], pero no uno de los visitantes: el ingreso

de estos queda anotado en una bitácora [28], cuyo contenido puede variar según lo que cada turno considere pertinente anotar, y la salida del vehículo puede no consignarse.

Dicha situación puede tener consecuencias en dos de los ámbitos descritos en la Sección 2.2.2. En el control de acceso y la exclusión de terceros, buena parte de los incidentes de seguridad en conjuntos residenciales cerrados no se origina en fallas del sistema físico, sino en el momento en que un tercero persuade, presiona o induce a error al encargado de acceso [9]. El punto de falla no es la diligencia de una persona, sino una decisión que debe tomarse de inmediato, frente a quien la solicita. Ante un incidente posterior, la falta de evidencia sobre los protocolos aplicados ha sido determinante para atribuir responsabilidad, tanto a la comunidad como a quien estuvo de turno [29]. Una bitácora que registra el ingreso, pero no cómo se verificó la autorización, no alcanza a aportar dicha evidencia.

En la delegación y rendición de cuentas, la cadena descrita en la Sección 2.3.1 (asamblea, comité de administración, administrador) suma un eslabón que la ley no nombra: el encargado de acceso. La administración puede revisar la bitácora, pero no dispone de otra fuente con la cual contrastarla para verificar cómo se aplicó el criterio de ingreso. La rendición de cuenta documentada que la ley exige al administrador, además, cubre los ingresos y gastos, pero no el ejercicio cotidiano del derecho de exclusión.

- **Gestión de estacionamientos de visita**. El estacionamiento de visita es el único bien común cuyo uso la ley destina a quien no pertenece a la comunidad [4]. No tiene un usuario con derecho permanente sobre él: el derecho a ocuparlo nace con cada visita, se extingue cuando el visitante se retira y lo ejerce alguien ajeno a la comunidad, en nombre de una unidad que sí forma parte de ella. Al momento del ingreso, el encargado de acceso puede indicar dónde estacionar o dejar que el visitante elija un espacio libre. Cuando lo indica y el punto de ingreso no tiene vista a los estacionamientos, la indicación depende de su última ronda o de lo que recuerda haber autorizado [30]. La bitácora, por su parte, consigna la hora de entrada y la unidad visitada, pero no el espacio ocupado ni la hora de salida.

  Dicha falta de información deja expuestos otros dos ámbitos. En la asignación del recurso entre usuarios, nada permite distinguir un espacio ocupado legítimamente de uno ocupado por un vehículo ajeno a un visitante, o por un visitante que excedió el tiempo previsto. Si ocurre, la asignación puede quedar resuelta por orden de llegada o por el criterio de quien controla el ingreso.

  En el cumplimiento de las reglas y la resolución de conflictos, el reglamento de copropiedad puede fijar condiciones de uso para los estacionamientos de visita, como un tiempo máximo de permanencia o un número de visitas simultáneas por unidad, y multas por su incumplimiento (Sección 2.3.1). A diferencia del ruido, la ocupación de un estacionamiento es un hecho físico y verificable. El reglamento, sin embargo, obliga a los copropietarios y a quienes residen en las unidades, pero no al visitante [4], de modo que una eventual multa solo puede dirigirse a la unidad que lo autorizó, y acreditar un exceso exige saber qué vehículo ocupó cada espacio

y durante cuánto tiempo. Sin dichos datos, una infracción puede pasar inadvertida a menos que otro ocupante la reclame, por ejemplo en el libro de novedades que la ley exige mantener a disposición de la comunidad [4], y un eventual conflicto debe resolverse sobre la palabra de una parte contra la de la otra.

Ambos problemas responden a una misma dificultad, observada en dos momentos. La Ley 21.442 y el reglamento de copropiedad pueden definir quién puede ingresar, qué bienes son de uso general, bajo qué condiciones se usan y qué sanción corresponde a su mal uso. La dificultad no está en definir dichas reglas, sino en hacerlas cumplir: verificar en el día a día que el uso del bien común se ajusta a ellas, lo que corresponde al monitoreo del cuarto principio de diseño, y disponer de la información necesaria para aplicar una sanción cuando no es así, lo que corresponde al quinto (Sección 2.2.1). En el esquema descrito, ambas tareas recaen sobre el encargado de acceso, un miembro del personal que no forma parte de la comunidad, y se apoyan en una bitácora que registra el ingreso, pero no cómo se autorizó, qué espacio se ocupó ni cuándo terminó la visita. Cuando dicha información falta, el cumplimiento de las reglas puede quedar sujeto al criterio de quien se encuentra en el punto de ingreso.

Cuando el esquema falla, el costo puede recaer sobre el ocupante que no encuentra disponible un estacionamiento al que su unidad tiene derecho y no sabe por qué; sobre el vecino que reclama una infracción sin poder acreditarla; sobre la administración, que debe responder por un ejercicio del derecho de exclusión que no puede verificar; y sobre el encargado de acceso, que sostiene con su sola palabra una decisión que la comunidad le delegó sin un medio para dejar constancia de ella. De ahí la pregunta que orienta lo que sigue: ***¿Cómo apoyar el cumplimiento de las reglas de acceso vehicular y de uso de los estacionamientos de visita en un condominio, sin eliminar el criterio humano en los casos que efectivamente lo requieren?***

Responder esta pregunta no exige intervenir en todo lo que la ley regula ni en todos los ámbitos descritos. De los instrumentos presentados en la Sección 2.3.1, no se interviene en la administración de los gastos comunes, ni en la redacción o modificación del reglamento de copropiedad, ni en el funcionamiento de la asamblea o del comité de administración. De los ocho ámbitos de la Sección 2.2.2, quedan fuera la conservación del recurso en el tiempo, el financiamiento de la provisión, la toma de decisiones colectivas y el resguardo ante perturbaciones externas, esto es, en un condominio, la mantención de la infraestructura, la morosidad, el funcionamiento de la asamblea y la preparación ante emergencias. Dentro de los dos problemas enunciados, se abordan dos procesos: la verificación del derecho de acceso de los visitantes que ingresan en vehículo, y la asignación y ocupación de los estacionamientos de visita.

Queda fuera, además, la seguridad física del perímetro. Lo que se aborda es la verificación y el registro administrativo de quién ingresa y dónde se estaciona, no la prevención de amenazas activas en el momento del ingreso, como una encerrona a un ocupante o el paso de un segundo vehículo aprovechando la apertura del portón antes de que este cierre. Tales amenazas exigen medidas de seguridad física (rejas, tiempos de cierre, vigilancia) que corresponden a un ámbito distinto.

Capítulo 3

Estado del Arte

En este capítulo se revisa cómo se han abordado, en la práctica y en la literatura, los dos procesos delimitados en la definición del problema: el control de acceso vehicular y la gestión de estacionamientos de visita. La revisión avanza de lo general a lo particular. Se parte por la modalidad manual con que ambos procesos se ejecutan en un condominio y por lo que la literatura ha observado sobre la fiscalización manual del uso de un bien común. Luego se examina cómo la digitalización ha abordado el monitoreo de un recurso compartido, primero en términos generales y después en tres frentes: las tecnologías de identificación en el punto de ingreso, las de monitoreo de la ocupación y las arquitecturas que integran ambas. Se revisan a continuación los sistemas comerciales disponibles en Chile, y el capítulo cierra con una síntesis que cruza lo revisado e identifica los aspectos que no aparecen resueltos.

3.1. Gestión tradicional del control de acceso vehicular y de los estacionamientos de visita

Para comparar la modalidad manual con las tecnologías revisadas más adelante, cada proceso se descompone en cinco operaciones, que se repiten en cada ingreso y en cada uso de un estacionamiento de visita:

- **Identificación**. Establecer quién o qué se presenta: una persona, un vehículo o un dispositivo que la representa.
- **Verificación de la autorización**. Constatar que lo identificado cuenta con un derecho vigente para ingresar o para ocupar un espacio.

- **Decisión**. Resolver si se permite o se niega el ingreso o la ocupación, incluidas las excepciones que la regla no prevé.
- **Acción**. Ejecutar lo decidido, como abrir el portón o indicar un espacio disponible.
- **Registro**. Dejar constancia de lo ocurrido para consultarlo después.

Cada operación puede quedar a cargo de una persona, de un dispositivo o de una combinación de ambos, lo que define la modalidad del proceso. En la modalidad manual, las cinco operaciones recaen sobre el encargado de acceso.

3.1.1. Control de acceso vehicular: identificación y registro

En la modalidad manual, el encargado de acceso identifica al vehículo o a su conductor a simple vista, verifica la autorización consultando al ocupante de la unidad visitada, decide, abre el portón y anota el ingreso en una bitácora. La única operación que se apoya en un soporte distinto de la memoria de dicha persona es el registro, y la bitácora consigna el ingreso, pero no cómo se verificó la autorización. Tal como se describió en la definición del problema, la consulta al ocupante puede resolverse de palabra y a distancia, sin que quede constancia de ella.

Para los ocupantes, el control remoto del portón traslada la identificación desde la persona hacia un dispositivo: el portón se abre ante quien porta el control, con independencia de quién conduce el vehículo. La identificación, la decisión y la acción se resuelven en un solo gesto, pero ninguna de ellas queda registrada de forma individual. El visitante, en cambio, no porta un control remoto, por lo que su ingreso vuelve a depender de las cinco operaciones manuales.

La Figura 3.1 resume ambas vías de ingreso. En la del visitante, las cinco operaciones recaen sobre el encargado de acceso y solo el registro deja constancia escrita. En la del ocupante, el control remoto reúne la identificación, la decisión y la acción en un solo gesto, sin registro individual.

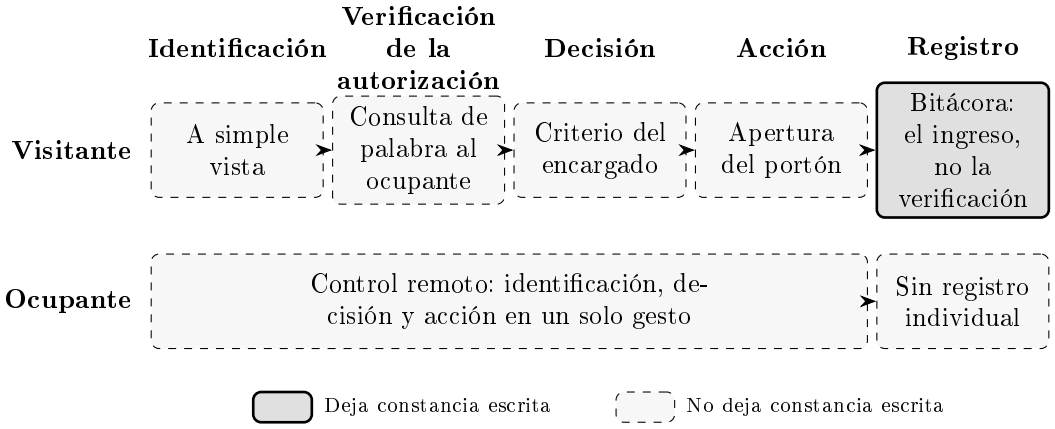


Figura 3.1: Operaciones del control de acceso vehicular en la modalidad manual, según quién se presenta en el punto de ingreso

Lo anterior ubica al encargado de acceso en el lugar del monitor que describe el cuarto principio de diseño de [17]: supervisa el uso del bien común y el cumplimiento de las reglas que lo rigen. En los casos que dicho trabajo documenta, el monitor es un usuario del recurso o rinde cuentas ante quienes lo usan [17]. En un condominio, la tarea recae sobre un miembro del personal, y la evidencia de su gestión se reduce a lo que la bitácora alcanza a consignar.

3.1.2. Estacionamientos de visita: asignación y monitoreo

La asignación de un bien común de uso general sin una regla explícita ha sido estudiada en el estacionamiento en la vía pública. En [31] se caracteriza el estacionamiento gratuito en la calle como una forma de propiedad comunal, en la que los conductores ocupan los espacios por orden de llegada. Cuando todos están ocupados, quien llega debe circular hasta que alguno se libere, y los estudios revisados en dicho trabajo registran búsquedas de entre 3,5 y 14 minutos por espacio en centros urbanos congestionados [31]. El estacionamiento de visita de un condominio comparte la misma estructura: no tiene tarifa que regule la demanda y, salvo que el encargado de acceso indique un espacio, se asigna por orden de llegada.

El monitoreo del tiempo de permanencia presenta una dificultad distinta. En [32] se analizan 181.735 infracciones de estacionamiento registradas en Friburgo, Alemania, junto con entrevistas a los organismos reguladores y al personal de fiscalización. Con la densidad de control existente, no pagar la tarifa resultaba económicamente racional durante el 86,1 % de las horas en el centro de la ciudad y durante el 99,9 % en las zonas circundantes [32]. Entre las tres medidas que dicho estudio propone para revertirlo, figura aumentar la densidad de control. En [33] se modela la misma relación y se muestra que la probabilidad de ser sancionado aumenta con el tiempo de permanencia del infractor, por lo que las permanencias breves son las que tienen menos probabilidad de ser detectadas.

Ambos trabajos se refieren a la vía pública, donde la fiscalización está a cargo de un organismo dedicado a ella. En [34] se revisan, además, las políticas de gestión del estacionamiento residencial en la calle y sus repercusiones. En un condominio, la situación es análoga, pero con menos recursos: el encargado de acceso solo puede constatar la ocupación de los estacionamientos de visita mediante rondas, y la bitácora no consigna el espacio ocupado ni la hora de salida. Sin dicha información, un límite de permanencia fijado en el reglamento de copropiedad no puede verificarse, y una infracción puede pasar inadvertida con mayor facilidad cuanto más breve sea.

La fiscalización manual queda así limitada por el personal disponible para ejecutarla. En [35] se modela la asignación de personal de fiscalización entre distintas zonas y se muestra que una tecnología que aumenta la eficiencia de la detección permite sostener el efecto disuasivo con menos personal. En dicho modelo, la dotación mínima de fiscalizadores con que se alcanza el efecto disuasivo disminuye a medida que aumenta la eficiencia de la detección: con un factor de detección un 20 % inferior al de referencia se requieren unos 12 fiscalizadores, y con uno un 20 % superior, unos 8 (Véase en la Figura 3.2). Dicha observación abre la revisión de la sección siguiente.

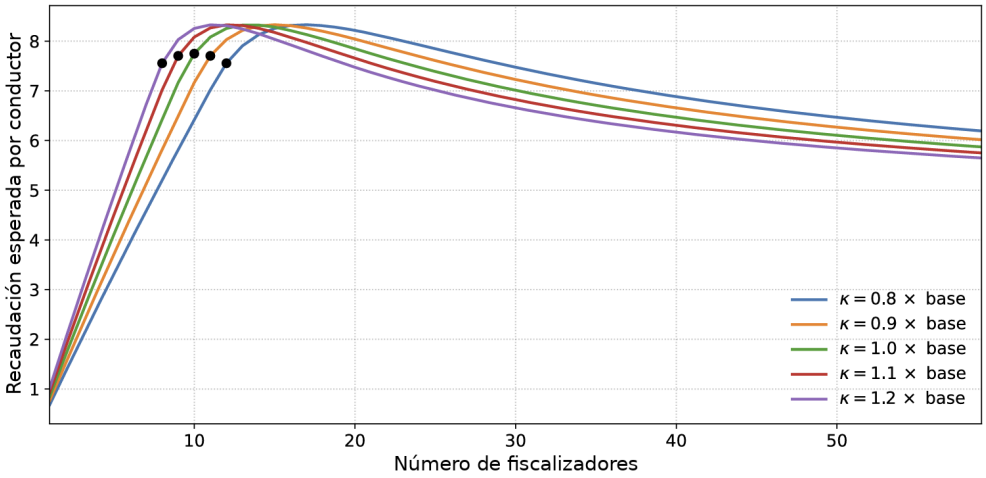


Figura 3.2: Recaudación esperada por conductor según el número de fiscalizadores, para distintos valores del factor de detección κ respecto de su valor de referencia. Los puntos indican la dotación mínima con que se alcanza el efecto disuasivo. Fuente: [35]

3.2. Digitalización y automatización

El monitoreo es una de las condiciones que distinguen a los regímenes de propiedad común que perduran [17]. Su efecto ha sido estudiado de forma empírica. En [36] se analizan 100 bosques en 14 países para identificar de qué depende que una comunidad monitoree y sancione el uso de su recurso, y se encuentra que el derecho a extraer una parte de dicho recurso es un factor relevante para que el monitoreo local ocurra. En [37],

a partir de ensayos aleatorizados en seis países, con 400 comunidades intervenidas y 347 de control, se encontró que la introducción del monitoreo comunitario redujo el uso del recurso y aumentó la satisfacción de los usuarios, aunque en magnitudes moderadas, y que dicho efecto se observó incluso cuando el monitoreo fue introducido desde fuera de la comunidad.

La tecnología interviene en este punto reduciendo el costo de monitorear. En el riego, la teledetección permite medir el uso del agua a gran escala, a bajo costo y casi en tiempo real, aunque su adopción se ve limitada por brechas institucionales, regulatorias y metodológicas [38]. En la pesca, las plataformas digitales y los datos en tiempo real han abierto la gestión a más actores y reducido el costo de coordinarlos [39]. El mismo trabajo advierte un límite: un registro digital no corrige los errores introducidos al momento de capturar el dato, y sin una verificación confiable en el origen puede preservar información falsa en lugar de corregirla [39].

En el ámbito residencial, la digitalización ha tomado la forma de las comunidades inteligentes. En [6] se describe la infraestructura del internet de las cosas que las sostiene, compuesta por sensores, adquisición de datos y procesamiento en el borde y en la nube, y se señalan como desafíos la seguridad, la interoperabilidad y la capacidad de la red. En [7] se presenta un sistema de gestión de información comunitaria que combina una aplicación móvil para ocupantes con un panel de administración. Ambos trabajos abordan la comunidad en su conjunto, sin detenerse en el control de acceso vehicular ni en los estacionamientos de visita.

Para comparar las tecnologías revisadas en las subsecciones siguientes, se usan cinco criterios, que se repiten en todas las tablas del capítulo:

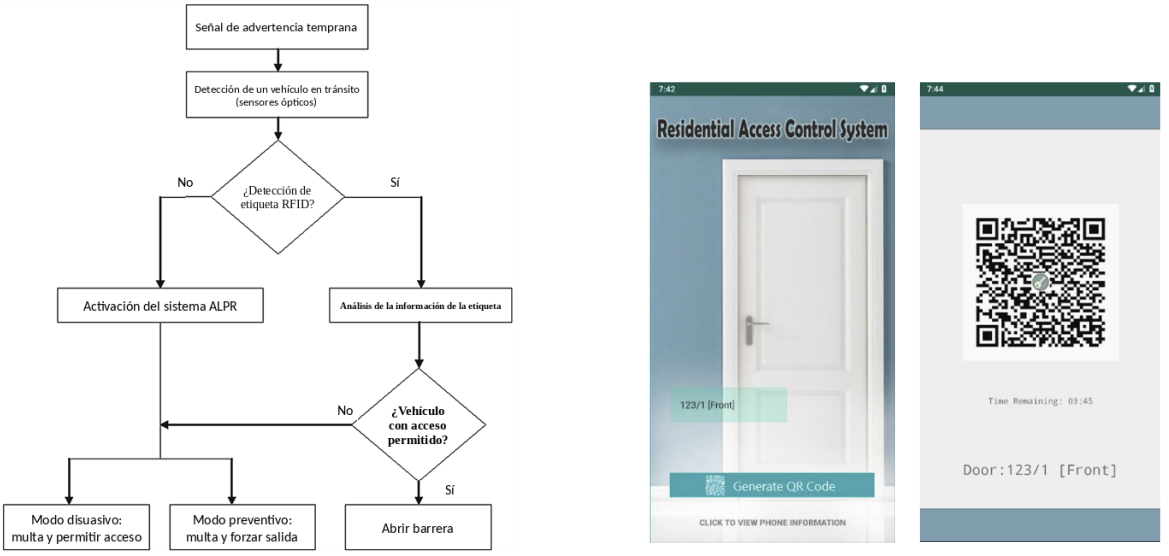
- **Operaciones que cubre**. Cuáles de las cinco operaciones descritas en la Sección 3.1 ejecuta la tecnología sin intervención de una persona.
- **Objeto identificado**. Si lo que se identifica es una persona, un vehículo o un dispositivo que los representa.
- **Requisito para el visitante**. Qué debe tener o recibir un visitante para ser identificado.
- **Registro**. Qué información queda consignada y si puede consultarse después.
- **Datos personales**. Si la tecnología captura información que permite identificar a una persona natural.

3.2.1. Tecnologías de identificación en el punto de ingreso

La identificación es la operación de la que dependen todas las demás: la verificación, la decisión y el registro solo son tan precisos como lo sea el dato capturado en el punto de ingreso. Para el acceso vehicular se revisan cuatro tecnologías:

- **Control remoto**. Identifica al dispositivo, no al vehículo ni a la persona. El portón se abre ante cualquier control autorizado y, en su forma básica, no deja registro individual de cada apertura. El visitante no dispone de uno.
- **Identificación por radiofrecuencia (RFID)**. Una antena lee una etiqueta o *tag* instalada en el vehículo. En [40] se presenta un sistema de control de acceso vehicular que combina RFID con reconocimiento de patentes: la lectura por RFID identificó a todos los vehículos que pasaron a velocidades de hasta 100 km/h, mientras que el reconocimiento de patentes, aplicado a los vehículos sin etiqueta, alcanzó un 94 % de acierto. La combinación responde a una limitación estructural de RFID: solo identifica a quien tiene una etiqueta instalada, lo que excluye al visitante ocasional.
- **Código QR o credencial móvil**. El ocupante o el sistema emite una credencial que se presenta desde un teléfono. En [41] se propone un sistema de control de acceso residencial basado en códigos QR, que valida la credencial comparando códigos secretos a través de un servidor de claves y notifica cada acceso en tiempo real, con un tiempo de acceso cercano a 5,63 segundos. En [8] se propone un control de acceso para edificios inteligentes operado desde teléfonos móviles, con un protocolo de autenticación de mensajes para proteger las comunicaciones. Ambas propuestas permiten entregar una credencial a un visitante antes de su llegada, pero identifican a quien porta el teléfono, no al vehículo.
- **Reconocimiento automático de patentes (ALPR)**. Una cámara captura la patente y un algoritmo la convierte en texto. En [42] se revisan las técnicas clásicas, organizadas en la localización de la patente, la segmentación de sus caracteres y el reconocimiento de cada uno. En [12] se aplican redes neuronales convolucionales a la detección y al reconocimiento, y en [13] se propone un reconocimiento basado en visión por computador tradicional capaz de ejecutarse con recursos de cómputo mínimos. En [43] se revisan los métodos recientes y se advierte que muchos de ellos son sensibles a los cambios de iluminación y funcionan principalmente con luz diurna, por lo que el reconocimiento en condiciones adversas permanece como un desafío abierto.

Las propuestas basadas en credenciales se ilustran en la Figura 3.3. En el sistema de [40], el reconocimiento de patentes se activa solo cuando no se detecta una etiqueta RFID en el vehículo, y en la aplicación de [41], el código QR se genera con un tiempo de validez limitado. El reconocimiento de patentes, por su parte, se organiza en las cuatro etapas que describe [42]: la adquisición de la imagen, la localización de la patente, la segmentación de sus caracteres y el reconocimiento de cada uno (Véase en la Figura 3.4).



(a) Flujo del control de acceso con RFID y reconocimiento de patentes [40]

(b) Aplicación móvil que genera la credencial QR [41]

Figura 3.3: Ejemplos de control de acceso basado en credenciales. Fuente: [40] y [41]

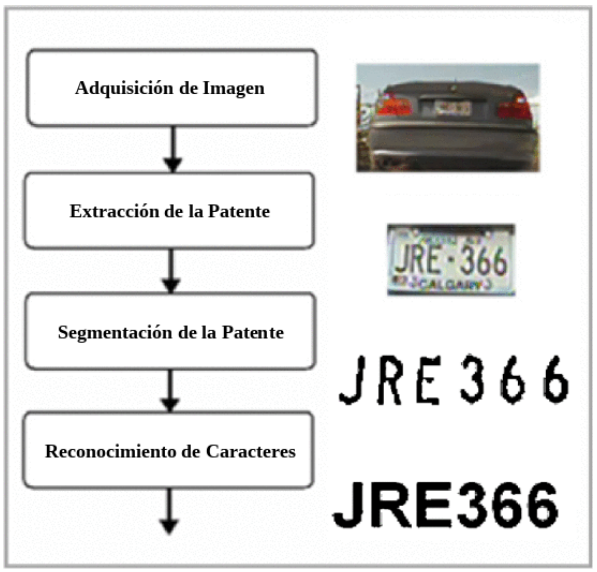


Figura 3.4: Etapas de un sistema de reconocimiento automático de patentes. Fuente: [42]

Las cuatro tecnologías difieren en el objeto que identifican, en lo que exigen al visitante y en el dato que queda registrado. El reconocimiento de patentes, en particular, no exige al visitante portar ni recibir nada, pero captura un dato que permite vincular un vehículo con una unidad y con un horario de entrada y salida. La Ley 21.719, publicada en 2024, regula el tratamiento de los datos personales en Chile y reemplaza el marco vigente desde 1999 [44]. En la medida en que una patente, asociada a otros registros,

permite identificar a una persona natural, su captura y almacenamiento quedan sujetos a dicho régimen. La Tabla 3.1 resume la comparación.

Tabla 3.1: Tecnologías de identificación en el punto de ingreso

Tecnología	Objeto identificado	Requisito para el visitante	Registro	Datos personales
Control remoto	Dispositivo	Ninguno; no se le entrega	Sin registro individual en su forma básica	No
RFID	Etiqueta en el vehículo	Una etiqueta instalada	Por etiqueta leída	Indirectos, vía la etiqueta
QR o credencial móvil	Portador del teléfono	Recibir la credencial antes de llegar	Por credencial validada	Sí
ALPR	Vehículo	Ninguno	Por patente reconocida	Sí

3.2.2. Tecnologías de monitoreo de la ocupación

Una vez que el vehículo ingresa, el problema cambia de objeto: ya no se trata de quién entra, sino de qué espacio ocupa y por cuánto tiempo. La literatura sobre estacionamiento inteligente ha abordado principalmente la primera de ambas preguntas. En [45] se revisan las propuestas de estacionamiento inteligente a partir de tres ejes: la recolección de información, el despliegue del sistema y la entrega del servicio a los usuarios. En [46] se describe un sistema de estacionamiento inteligente como la combinación de tres componentes (sensores, protocolos de comunicación y software) y se identifican los tipos más usados de cada uno.

Para detectar la ocupación de un espacio, la literatura distingue dos familias de tecnologías:

- **Sensores por espacio**. Un sensor instalado en cada espacio detecta la presencia de un vehículo. En [47] se comparan doce tipos de sensores y se señala, por ejemplo, que los ultrasónicos tienen bajo costo y baja mantención, pero requieren montarse en el techo y se limitan a espacios interiores, que los infrarrojos son sensibles a la lluvia y la nieve, y que los lazos inductivos tienen un alto costo de instalación. En [14] se presenta un prototipo basado en una red de sensores inalámbricos que permite monitorear los espacios a distancia, guiar a los conductores y reservar un espacio, sin necesidad de excavaciones ni cableado.
- **Visión por computador**. Una cámara cubre varios espacios a la vez y un algoritmo determina cuáles están ocupados. En [47] se observa que las redes de

cámaras son la tecnología más frecuente entre los sistemas revisados, porque cubren un área mayor con menos dispositivos y permiten detectar la ocupación y vigilar el espacio al mismo tiempo, aunque su despliegue y mantención tienden a ser costosos.

La Figura 3.5 muestra cuántos de los sistemas revisados en [47] emplean cada tipo de sensor. Las cámaras son las más frecuentes, con 17 sistemas, seguidas por RFID y por los sensores ultrasónicos, con 14 cada uno, y por los infrarrojos, con 11. Los demás tipos aparecen en tres sistemas o menos.

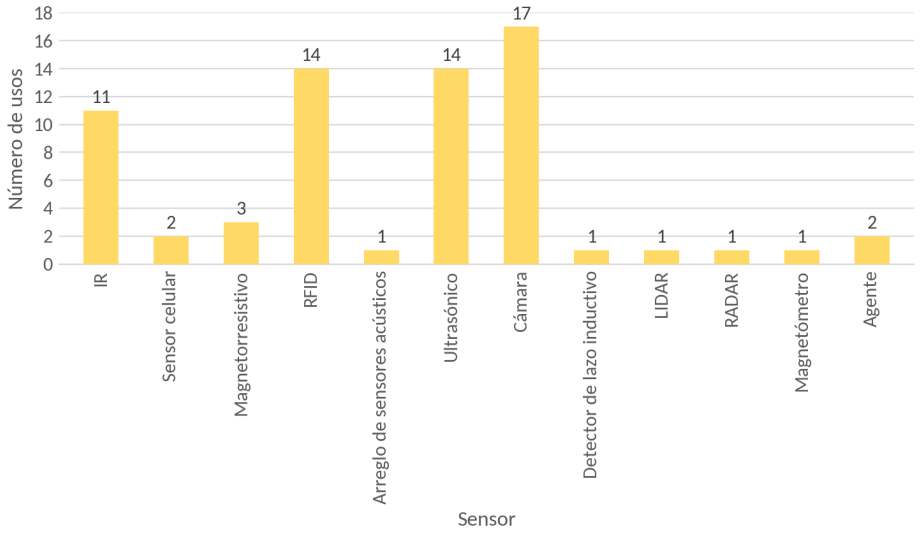


Figura 3.5: Uso de los distintos tipos de sensores en sistemas de estacionamiento inteligente. Fuente: [47]

Ninguna de las dos familias, por sí sola, responde quién ocupa el espacio. Un sensor informa que el espacio está ocupado; una cámara orientada a la ocupación informa lo mismo para varios espacios. Para contrastar la ocupación con una autorización, el dato de ocupación debe vincularse con la identidad del vehículo, lo que exige combinar el monitoreo con una tecnología de identificación. Dicha combinación es la que hace posible la fiscalización del tiempo de permanencia, que en la vía pública se ha abordado como un problema de probabilidad de detección [33] y de asignación de personal [35].

En todos los casos, el objeto identificado es el espacio, no el vehículo, y el visitante no necesita portar nada. El registro que se genera es el de la ocupación de cada espacio en el tiempo, que por sí solo no constituye un dato personal.

3.2.3. Arquitecturas de integración

Vincular la identificación en el punto de ingreso con el monitoreo de la ocupación exige una arquitectura que reúna los datos de ambas y los ponga a disposición de quienes

deben usarlos. La literatura sobre el internet de las cosas [11] y sobre estacionamiento inteligente organiza dichas arquitecturas en capas, que se distinguen por el papel que cumplen dentro del flujo de datos:

- **Capa de percepción**. Reúne los sensores y cámaras que capturan los datos en el lugar [16].
- **Capa de red**. Transmite los datos capturados hacia donde se procesan [15].
- **Capa de aplicación**. Procesa los datos, los almacena y los presenta a los usuarios mediante interfaces.

La diferencia principal entre las arquitecturas revisadas está en dónde se procesan los datos. En [8] se propone una arquitectura centralizada en un servidor en la nube, al que se conectan los dispositivos del edificio y los clientes móviles y de escritorio. En [48] se advierte que los sistemas de estacionamiento que concentran el procesamiento en un solo punto de la nube quedan expuestos a una falla única, a pérdida de datos y a demoras, y se propone una arquitectura de varias capas en la que nodos de cómputo cercanos a los sensores procesan los datos antes de enviarlos a la nube. En el mismo sentido, en [13] el reconocimiento de patentes se ejecuta en un dispositivo local de bajo costo, sin depender de un servidor remoto.

La arquitectura de [48] se muestra en la Figura 3.6. Los datos de sensores RFID, ultrasónicos y magnéticos, de cámaras y de lectores de códigos QR llegan a un nodo de cómputo cercano al estacionamiento, que registra las llegadas, estima la disponibilidad, asigna los espacios y gestiona las reservas. Dicho nodo se comunica con la nube, y los resultados se presentan al usuario en una aplicación móvil.

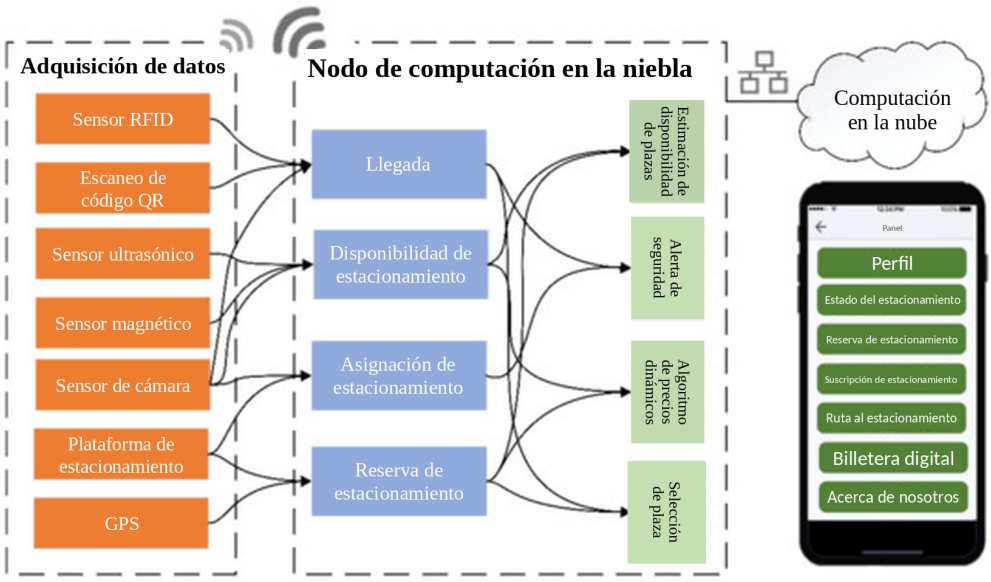


Figura 3.6: Arquitectura de un sistema de estacionamiento inteligente basado en cómputo en la niebla. Fuente: [48]

La capa de aplicación es la que llega a las personas. En [7], la información de la comunidad se presenta mediante una aplicación móvil para ocupantes y un panel para la administración, una separación de interfaces por tipo de usuario que también aparece en [8]. La Tabla 3.2 resume la comparación.

Tabla 3.2: Arquitecturas de integración según el lugar de procesamiento

Arquitectura	Procesamiento	Dependencia de la conexión	Ejemplo revisado
Centralizada en la nube	En un servidor remoto	Total: sin conexión no hay decisión ni registro	[8]
En el borde	En un dispositivo local	Baja para decidir; la sincronización puede diferirse	[13]
Por capas (borde y nube)	Local para lo inmediato, remoto para lo consolidado	Parcial	[48]

3.3. Sistemas comerciales

En Chile existen plataformas comerciales orientadas a la administración de condominios. Su revisión se basa en la información que cada empresa publica sobre sus productos, que no incluye documentación técnica detallada, por lo que la comparación se limita a las capacidades declaradas.

- **ComunidadFeliz**. Declara un módulo de control de acceso con reconocimiento facial, códigos QR dinámicos generados desde su aplicación y lectura de la cédula de identidad para el acceso peatonal, y apertura remota desde la aplicación o lectura de un *tag* en el parabrisas para el acceso vehicular [49]. Incluye un registro automatizado de las visitas, con el historial de entradas y salidas [49]. La descripción publicada no menciona los estacionamientos de visita ni el monitoreo de su ocupación.
- **EdiPro**. Ofrece software de administración de edificios y condominios y un servicio de conserjería remota [50].
- **Kastor**. Ofrece una plataforma de administración de comunidades y gastos comunes, con un módulo de conserjería [51].

La Tabla 3.3 aplica los criterios de comparación a lo declarado por cada plataforma.

Tabla 3.3: Capacidades declaradas por plataformas comerciales de administración de condominios en Chile

Plataforma	Identificación en el ingreso	Registro de visitas	Estacionamientos de visita
ComunidadFeliz	Facial, QR, cédula, *tag* vehicular y apertura remota	Sí, con historial de entradas y salidas	No se menciona
EdiPro	Conserjería remota; sin detalle publicado	Sin detalle publicado	No se menciona
Kastor	Módulo de conserjería; sin detalle publicado	Sin detalle publicado	No se menciona

3.4. Síntesis y oportunidad

La revisión muestra que el monitoreo del uso de un bien común tiene efectos documentados [37] y que la tecnología puede reducir su costo [38], siempre que el dato se verifique en el origen [39]. En el caso de los estacionamientos de visita, el estudio de la vía pública muestra que un bien común asignado por orden de llegada [31] y fiscalizado con poca densidad de control [32] puede dejar de cumplir sus reglas sin que la infracción se detecte. La Tabla 3.4 cruza las tecnologías revisadas con las cinco operaciones y con el monitoreo de la permanencia.

Tabla 3.4: Operaciones que cubre cada tecnología revisada sin intervención de una persona

Tecnología	Identif.	Verif.	Decisión	Acción	Registro	Permanencia
Modalidad manual	–	–	–	–	Parcial	–
Control remoto	Sí	Sí	Sí	Sí	–	–
RFID	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	–
QR o credencial móvil	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	–
ALPR	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	–
Sensores de ocupación	–	–	–	–	Sí	Parcial
Visión de ocupación	–	–	–	–	Sí	Parcial

De la tabla se desprenden tres observaciones. En primer lugar, la identificación en el punto de ingreso y el monitoreo de la ocupación se abordan por separado: las tecnologías de acceso cubren las operaciones del ingreso, pero no siguen al vehículo una vez dentro, y las de ocupación registran cuándo un espacio está ocupado, pero no por quién. Por ello,

la permanencia solo se cubre de forma parcial: se conoce la duración de la ocupación, pero no puede contrastarse con una autorización. En segundo lugar, las tecnologías que identifican a usuarios conocidos, como el control remoto y RFID, no alcanzan al visitante ocasional, que es precisamente quien usa los estacionamientos de visita; las que sí lo alcanzan exigen entregarle una credencial previa o capturar un dato personal. En tercer lugar, los sistemas comerciales revisados declaran capacidades de control de acceso y registro de visitas, pero ninguno menciona los estacionamientos de visita.

En la literatura y los sistemas revisados no se identificó una propuesta que vincule, en un mismo registro, la autorización concedida por el ocupante, la patente del vehículo del visitante, el estacionamiento de visita que ocupa y la duración de dicha ocupación. Tampoco se identificó una que distinga qué operaciones conviene automatizar y cuáles conviene dejar a cargo del encargado de acceso, cuyo criterio la definición del problema reconoce como necesario en los casos que la regla no prevé. Ambos aspectos orientan el diseño de la solución que se presenta a continuación.

Capítulo 4

Propuesta y Diseño de Solución

La revisión de la literatura dejó dos aspectos sin resolver: ningún trabajo revisado vincula en un mismo registro la autorización concedida por el ocupante, la patente del vehículo del visitante, el estacionamiento de visita que ocupa y la duración de dicha ocupación, y ninguno distingue qué operaciones conviene automatizar y cuáles conviene delegar al encargado de acceso. En este capítulo se presenta ResiPark, la solución propuesta para abordar ambos aspectos. Se identifican primero los usuarios de la solución y se define qué operaciones ejecuta ResiPark y cuáles quedan a cargo de una persona. A partir de dicha distribución se establecen los requisitos, se describe la arquitectura y los módulos que la componen, y se definen las interfaces de usuario.

4.1. Usuarios del Sistema

La definición del problema identificó a las personas que concurren al punto de ingreso de un condominio y el derecho que cada una tiene sobre el bien común (Tabla 2.3). ResiPark traduce dichas posiciones con cuatro roles.

- **Ocupante**. Corresponde al copropietario, al arrendatario o a otra persona que usa una unidad a cualquier título, y que puede autorizar visitas a nombre de dicha unidad. Usa una aplicación móvil para crear reservas de estacionamiento de visita, consultar la disponibilidad de dichos estacionamientos y revisar sus reservas activas.
- **Visitante**. Es un usuario no registrado dentro del sistema. Su derecho a ingresar y a ocupar un estacionamiento de visita queda representado por la reserva que crea el ocupante, que consigna la patente de su vehículo y su documento de identidad.

Su única interacción con ResiPark ocurre en el punto de ingreso, cuando la cámara captura la patente de su vehículo.

- **Encargado de acceso**. Usa una plataforma web para seguir en tiempo real los ingresos y la ocupación de los estacionamientos de visita, asignar un espacio a cada reserva y resolver los casos que la regla no prevé, como el ingreso de un vehículo sin reserva o una falla del reconocimiento.
- **Administrador**. Representa a la administración del condominio. Usa la misma plataforma web para registrar los vehículos de los ocupantes, gestionar las cuentas de los usuarios y configurar los parámetros de funcionamiento, como, por ejemplo, el número de estacionamientos de visita.

La Tabla 4.1 resume, para cada rol, la interfaz que utiliza y sus acciones principales.

Tabla 4.1: Roles de ResiPark, interfaz que utilizan y acciones principales

Rol	Interfaz	Acciones principales
Ocupante	Aplicación móvil	▪ Crear reservas ▪ Consultar la disponibilidad ▪ Consultar sus reservas activas
Visitante	Ninguna	▪ Presentarse en el punto de ingreso con el vehículo registrado en la reserva
Encargado de acceso	Plataforma web	▪ Seguir los ingresos y la ocupación ▪ Asignar espacios a las reservas ▪ Resolver excepciones
Administrador	Plataforma web	▪ Registrar los vehículos de los ocupantes ▪ Gestionar usuarios ▪ Configurar parámetros

El visitante es el usuario en torno al cual se define el problema y, a la vez, el único que no interactúa con ResiPark por medio de una interfaz. La decisión es deliberada: exigirle una cuenta o una credencial trasladaría al visitante una carga que las tecnologías de identificación basadas en credenciales ya imponen, según se revisó en el estado del arte (Tabla 3.1).

4.2. Distribución de Operaciones

Cada uno de los dos procesos abordados se compone de las cinco operaciones definidas en el estado del arte: identificación, verificación de la autorización, decisión, acción y registro. En la modalidad manual, todas recaen sobre el encargado de acceso. ResiPark adopta una modalidad combinada, en la que cada operación se asigna a quien puede

ejecutarla con mayor consistencia, según el siguiente criterio: se automatizan las operaciones que se repiten en cada ingreso y que pueden resolverse contrastando un dato con una regla, y se dejan a cargo de una persona las que requieren evaluar una situación que la regla no anticipa. La Tabla 4.2 presenta la distribución resultante.

Tabla 4.2: Distribución de operaciones entre ResiPark y las personas que intervienen en cada proceso

Operación	Control de acceso vehicular	Gestión de estacionamientos de visita
Identificación	ResiPark reconoce la patente del vehículo en el punto de ingreso	ResiPark detecta si cada estacionamiento está ocupado
Verificación de la autorización	ResiPark contrasta la patente con los vehículos de los ocupantes y con las reservas vigentes, que el ocupante crea de antemano	ResiPark contrasta cada ocupación con las asignaciones vigentes y con la duración de la reserva
Decisión	ResiPark autoriza el ingreso si la verificación es positiva; el encargado de acceso resuelve los demás casos	El encargado de acceso asigna un espacio a cada reserva, entre su creación y la llegada del visitante
Acción	ResiPark abre el portón; en los casos que resuelve el encargado de acceso, este lo abre con el control remoto	El encargado de acceso indica al visitante el espacio asignado
Registro	ResiPark consigna cada ingreso con su hora, su resultado y la reserva asociada; el encargado de acceso registra de forma manual los ingresos que resuelve	ResiPark consigna el inicio, el término y la duración de cada ocupación, asociados a la reserva

En el control de acceso vehicular, la autorización se desplaza al momento en que el ocupante crea la reserva. Así, la verificación en el punto de ingreso deja de depender de una consulta verbal y a distancia, y pasa a ser un contraste entre la patente reconocida y una autorización que ya consta por escrito. Dicha verificación se repite en cada ingreso y admite una respuesta sin ambigüedad, por lo que ResiPark la ejecuta y abre el portón cuando el resultado es positivo. Cuando no lo es, porque el vehículo no tiene reserva, la patente no se reconoce o el ingreso corresponde a un caso no previsto, la decisión vuelve al encargado de acceso, que puede registrar el ingreso de forma manual.

En la gestión de estacionamientos de visita, la reserva descuenta un espacio de la disponibilidad del periodo, pero no determina cuál. La asignación de un espacio concreto queda delegado al encargado de acceso, que puede realizarla en cualquier momento entre la creación de la reserva y la llegada del visitante. Dicha decisión depende de

condiciones que cambian durante el día, como el número de visitas simultáneas o un espacio que no conviene usar, y corresponde al margen de criterio que la definición del problema reconoce al encargado de acceso. ResiPark, por su parte, detecta la ocupación de cada espacio, la contrasta con las asignaciones vigentes y consigna su duración.

La distribución responde a la segunda brecha identificada en el estado del arte y al propósito de esta memoria: el encargado de acceso queda liberado de las operaciones repetitivas de identificación, verificación y registro, y conserva las decisiones que requieren su criterio.

4.3. Requisitos del Sistema

Los requisitos traducen la distribución de operaciones anterior en condiciones verificables que ResiPark debe cumplir. Se organizan en cuatro categorías: los funcionales describen qué debe hacer la solución; los no funcionales, bajo qué condiciones de calidad debe hacerlo; los de interfaz, cómo se comunica con sus usuarios y entre sus componentes; y los de ambiente, qué hardware y software requiere.

4.3.1. Requisitos Funcionales

Los requisitos funcionales especifican qué debe hacer el sistema, es decir, qué servicios debe ofrecer, qué operaciones debe permitir y cómo debe responder ante determinadas acciones o situaciones. En esta sección, se presentan agrupados según el proceso al que corresponden.

Control de accesos:

- **RF01 — Reconocimiento de patentes**: ResiPark debe reconocer la patente de cada vehículo que se presenta en el punto de ingreso a partir de las imágenes de una cámara.
- **RF02 — Verificación contra ocupantes y reservas**: ResiPark debe verificar la patente reconocida contra los vehículos registrados de los ocupantes y contra las reservas vigentes al momento del ingreso.
- **RF03 — Apertura del portón**: ResiPark debe accionar la apertura del portón cuando la verificación resulta positiva.
- **RF04 — Registro de cada ingreso**: ResiPark debe registrar cada ingreso con su fecha, hora, patente y resultado, asociándolo al vehículo del ocupante o a la reserva que lo autorizó.
- **RF05 — Ingresos en tiempo real para el encargado**: ResiPark debe mostrar al encargado de acceso, en tiempo real, cada ingreso detectado y el resultado de su verificación.

- **RF06 — Notificación de vehículos sin autorización**: ResiPark debe notificar al encargado de acceso cuando se presente un vehículo sin autorización vigente o cuya patente no pueda reconocerse.
- **RF07 — Registro manual de ingresos**: ResiPark debe permitir al encargado de acceso registrar de forma manual el ingreso de un vehículo, dejando constancia de que se trató de un ingreso manual.

Gestión de estacionamientos de visitas:

- **RF08 — Creación de reservas**: ResiPark debe permitir al ocupante crear una reserva ingresando la patente del vehículo y el documento de identidad del visitante, con una duración fija y común a todos los ocupantes, definida en la configuración del sistema.
- **RF09 — Descuento de la disponibilidad**: ResiPark debe descontar cada reserva de la disponibilidad de estacionamientos de visita del periodo reservado, sin asignarle un espacio.
- **RF10 — Asignación de espacios**: ResiPark debe permitir al encargado de acceso asignar un estacionamiento de visita a cada reserva, en cualquier momento entre su creación y la llegada del visitante.
- **RF11 — Detección de la ocupación**: ResiPark debe detectar si cada estacionamiento de visita está libre u ocupado.
- **RF12 — Contraste entre ocupación y asignación**: ResiPark debe contrastar la ocupación detectada con las asignaciones vigentes, indicando al encargado de acceso los espacios asignados que no han sido ocupados y alertando cuando hay espacios ocupados sin asignación.
- **RF13 — Historial de uso de los estacionamientos**: ResiPark debe registrar el historial de uso de cada estacionamiento de visita, incluyendo la reserva asociada, el inicio y el término de la ocupación y su duración.
- **RF14 — Alerta por exceso de duración**: ResiPark debe alertar al encargado de acceso cuando una ocupación exceda la duración de la reserva que la autorizó.
- **RF15 — Disponibilidad para el ocupante**: ResiPark debe mostrar al ocupante la disponibilidad de estacionamientos de visita.

Generales:

- **RF16 — Autenticación y roles**: ResiPark debe autenticar a cada usuario y restringir las funcionalidades disponibles según su rol: ocupante, encargado de acceso o administrador.

- **RF17 — Recuperación de contraseña**: ResiPark debe permitir la recuperación de la contraseña de un usuario registrado.
- **RF18 — Gestión de usuarios y patentes**: ResiPark debe permitir al administrador gestionar las cuentas de los usuarios y registrar las patentes de los vehículos asociados a cada unidad.
- **RF19 — Configuración de estacionamientos**: ResiPark debe permitir al administrador configurar el número de estacionamientos de visita disponibles.

4.3.2. Requisitos No Funcionales

Estos son declaraciones que especifican qué condiciones o atributos debe cumplir el sistema al realizar sus funciones. Definen restricciones y expectativas sobre aspectos como rendimiento, confiabilidad, privacidad, seguridad, compatibilidad, escalabilidad y otros.

- **RNF01 — Tiempo de decisión en el ingreso**: La orden de apertura para un vehículo autorizado debe emitirse mientras este permanece detenido frente al portón, sin que el conductor deba repetir la aproximación ni el encargado de acceso intervenir.
- **RNF02 — Vigencia del estado de ocupación**: La plataforma web debe reflejar cada cambio en la ocupación de un estacionamiento de visita sin que el encargado de acceso deba recargarla, con un retraso menor que el tiempo que toma a un vehículo completar la maniobra de estacionamiento. Así, el estado que el encargado consulta al asignar un espacio corresponde al estado físico del estacionamiento.
- **RNF03 — Condiciones de operación**: El reconocimiento de patentes debe operar con luz diurna y con la iluminación nocturna del punto de ingreso.
- **RNF04 — Protección de datos personales**: La patente del vehículo y el documento de identidad del visitante deben tratarse conforme a la Ley 21.719 [44]: solo pueden usarse para verificar y registrar la visita que los originó, y solo pueden consultarlos los roles que los requieren para dicha finalidad. Además, ResiPark solo debe capturar los datos personales que requiere cada una de sus finalidades.
- **RNF05 — Seguridad de la información**: Las contraseñas deben almacenarse cifradas, y toda comunicación entre los componentes de ResiPark que atraviese una red pública debe cifrarse.
- **RNF06 — Continuidad ante fallas**: Una falla del reconocimiento o de la conexión no debe impedir el ingreso: el portón debe poder abrirse con su control remoto habitual y el ingreso debe poder registrarse de forma manual.

- **RNF07 — Compatibilidad**: La aplicación móvil debe funcionar en Android e iOS, y la plataforma web, en las versiones vigentes de los navegadores de uso común.
- **RNF08 — Escalabilidad**: Debe ser posible agregar estacionamientos de visita y puntos de ingreso sin modificar la arquitectura base, mediante la incorporación de nuevos sensores o cámaras y su configuración.

Los requisitos de tiempo, RNF01 y RNF02, se expresan en relación con el proceso que apoyan y no como un valor fijo: lo que se exige es que la decisión llegue antes de que el vehículo deba detenerse de nuevo y que el estado mostrado llegue antes de que el encargado de acceso lo necesite. El valor efectivamente alcanzado se informa en la validación. El requisito RNF06, por su parte, expresa en términos técnicos la decisión de no eliminar el criterio humano: la automatización se agrega a la modalidad manual existente, sin reemplazarla.

4.3.3. Requisitos de la Interfaz

Los requisitos de interfaz especifican cómo debe interactuar el sistema con entidades externas, ya sean usuarios, otros sistemas o dispositivos. Describen las características y condiciones de estas interacciones, sin detallar necesariamente la funcionalidad interna que las hace posibles. Se dividen en dos grupos: interfaces de usuario e interfaces técnicas. Las primeras definen cómo los usuarios interactúan con el sistema, incluyendo los elementos y medios disponibles para ingresar información y recibir resultados. Las segundas especifican cómo el sistema se comunica e intercambia información con otros sistemas o dispositivos, incluyendo los protocolos, formatos y condiciones de comunicación.

Interfaces de usuario:

- **RI01 — Aplicación móvil para ocupantes**: Debe proporcionar una interfaz para el inicio de sesión y la recuperación de contraseña, presentar la disponibilidad de los estacionamientos de visita, permitir la creación de reservas y la gestión de las reservas activas, y permitir la consulta y actualización de los datos del perfil.
- **RI02 — Aplicación web para el encargado de acceso y el administrador**: Debe presentar el estado de cada estacionamiento de visita (libre, reservado, asignado u ocupado), permitir la asignación de espacios a las reservas, mostrar la imagen de la cámara del punto de ingreso junto con el registro de entradas y salidas, y proporcionar una interfaz para el registro manual de ingresos. Para el administrador, debe proporcionar además interfaces para la gestión de usuarios, el registro de patentes asociadas a las unidades y la configuración de la solución.

Interfaces técnicas:

- **RI03 — Cámara y dispositivo de borde**: El dispositivo de borde debe recibir los fotogramas de la cámara del punto de ingreso con la continuidad necesaria para reconocer la patente mientras el vehículo permanece detenido frente al portón (RNF01).
- **RI04 — Dispositivo de borde y servicio de reconocimiento**: El dispositivo de borde debe enviar los fotogramas al servicio de reconocimiento y recibir como respuesta la patente transcrita.
- **RI05 — Transmisión del estado de ocupación**: Los dispositivos de los estacionamientos de visita deben transmitir el estado de cada espacio (libre u ocupado) cada vez que cambia, mediante un medio de comunicación con un alcance que cubra la distancia entre dichos dispositivos y el punto de conexión más cercano.
- **RI06 — Estado de ocupación y servicios centrales**: Cada cambio de estado de un estacionamiento de visita debe llegar a los servicios centrales dentro del retraso que admite RNF02, ya sea de forma directa o a través de un componente intermedio.
- **RI07 — Aplicaciones de usuario y servicios centrales**: La aplicación móvil y la plataforma web deben comunicarse con los servicios centrales mediante una API REST de forma segura.
- **RI08 — Dispositivo de borde y portón**: El dispositivo de borde debe permitir accionar el portón mediante una interfaz eléctrica compatible.

4.3.4. Requisitos de Ambiente

Los requisitos de ambiente definen el hardware y el software necesarios para desplegar y operar ResiPark. Cada requisito establece las capacidades que debe reunir un componente, sin fijar una tecnología. Las alternativas que pueden satisfacer cada uno se describen más adelante, y la elección entre ellas se justifica en la implementación de la solución.

Hardware:

- **RA01 — Cámara del punto de ingreso**: Debe disponerse de una cámara capaz de transmitir sus imágenes al componente que las procesa, con una resolución que permita distinguir los caracteres de la patente a la distancia a la que se detiene el vehículo y con capacidad de captura bajo la iluminación nocturna del punto de ingreso.
- **RA02 — Dispositivo de borde**: Debe disponerse, en el punto de ingreso, de un computador de bajo consumo capaz de recibir las imágenes de la cámara, comunicarse con los demás componentes de ResiPark y accionar el portón.

- **RA03 — Detección en los estacionamientos de visita**: Debe disponerse de dispositivos capaces de determinar si cada estacionamiento de visita está ocupado y de comunicar su estado a ResiPark, con un consumo y una instalación compatibles con la ubicación de los espacios.
- **RA04 — Conectividad**: El punto de ingreso y la zona de los estacionamientos de visita deben contar con un medio de comunicación que permita a sus dispositivos intercambiar datos con los demás componentes de ResiPark.
- **RA05 — Cómputo para el reconocimiento**: Debe disponerse de capacidad de cómputo suficiente para detectar y transcribir la patente dentro del tiempo que exige RNF01, ya sea en un equipo propio o en un servicio en la nube.
- **RA06 — Servidor central**: Debe disponerse de un servidor que ejecute los servicios centrales y la base de datos de ResiPark, accesible para los dispositivos del punto de ingreso y de los estacionamientos de visita, la aplicación móvil y la plataforma web.

Software:

- **RA07 — Sistemas operativos y firmware**: El dispositivo de borde y el servidor central deben ejecutar un sistema operativo compatible con los lenguajes y las bibliotecas de los servicios, y los dispositivos de los estacionamientos de visita, el software que corresponda a su plataforma.
- **RA08 — Visión por computador**: Deben utilizarse bibliotecas que permitan entrenar y ejecutar un modelo de detección de objetos y un modelo de reconocimiento óptico de caracteres, junto con una biblioteca de procesamiento de imágenes.
- **RA09 — Servicios centrales y base de datos**: Los servicios centrales deben construirse sobre un framework para APIs REST, de modo que el enrutamiento, la validación de los datos y la autenticación no deban implementarse desde cero. Los datos deben almacenarse en una base de datos relacional, pues ResiPark vincula en un mismo registro la reserva, la patente, la unidad y el espacio asignado, y un motor relacional mantiene la integridad de dichas relaciones.
- **RA10 — Aplicación móvil**: Debe utilizarse una tecnología que facilite el desarrollo y el mantenimiento de la aplicación para Android e iOS (RNF07), preferentemente a partir de una misma base de código.
- **RA11 — Plataforma web**: Debe utilizarse una tecnología para interfaces web que permita actualizar la información presentada sin recargar la página (RNF02).

4.4. Diseño de la Arquitectura del Sistema

La arquitectura describe cómo se organizan los componentes de ResiPark y cómo se relacionan entre sí y con su entorno. En esta sección se presenta en tres partes: primero, con quién se comunica ResiPark y qué información intercambia; luego, cómo se organiza internamente, y por último, dónde se ejecuta cada una de sus partes y por qué.

4.4.1. Diagrama de Contexto del Sistema

El diagrama de contexto delimita ResiPark frente a su entorno. Presenta la solución como una unidad, sin detallar sus componentes internos, e identifica las entidades externas con las que intercambia información y el contenido de cada intercambio (Véase en la Figura 4.1). Dichas entidades son de dos tipos: las personas que cumplen alguno de los roles definidos en la Sección 4.1 y los dispositivos instalados en el condominio. Los intercambios se agrupan en tres tipos:

- **Flujos con los usuarios**. Corresponden a las acciones de cada rol. El ocupante entrega reservas y recibe la disponibilidad de los estacionamientos de visita y el estado de sus reservas activas. El encargado de acceso entrega asignaciones e ingresos manuales, y recibe los ingresos, la ocupación y las alertas. El administrador entrega la configuración, las cuentas de usuario y las patentes de los ocupantes.
- **Flujos con los dispositivos**. La cámara entrega las imágenes del punto de ingreso, los sensores de estacionamiento entregan el estado de cada estacionamiento de visita y el portón recibe las órdenes de apertura.
- **Flujo con el visitante**. Es indirecto: el visitante no intercambia información con ResiPark, sino que su vehículo es captado por la cámara del punto de ingreso. Su autorización llega por otra vía, la reserva que crea el ocupante.

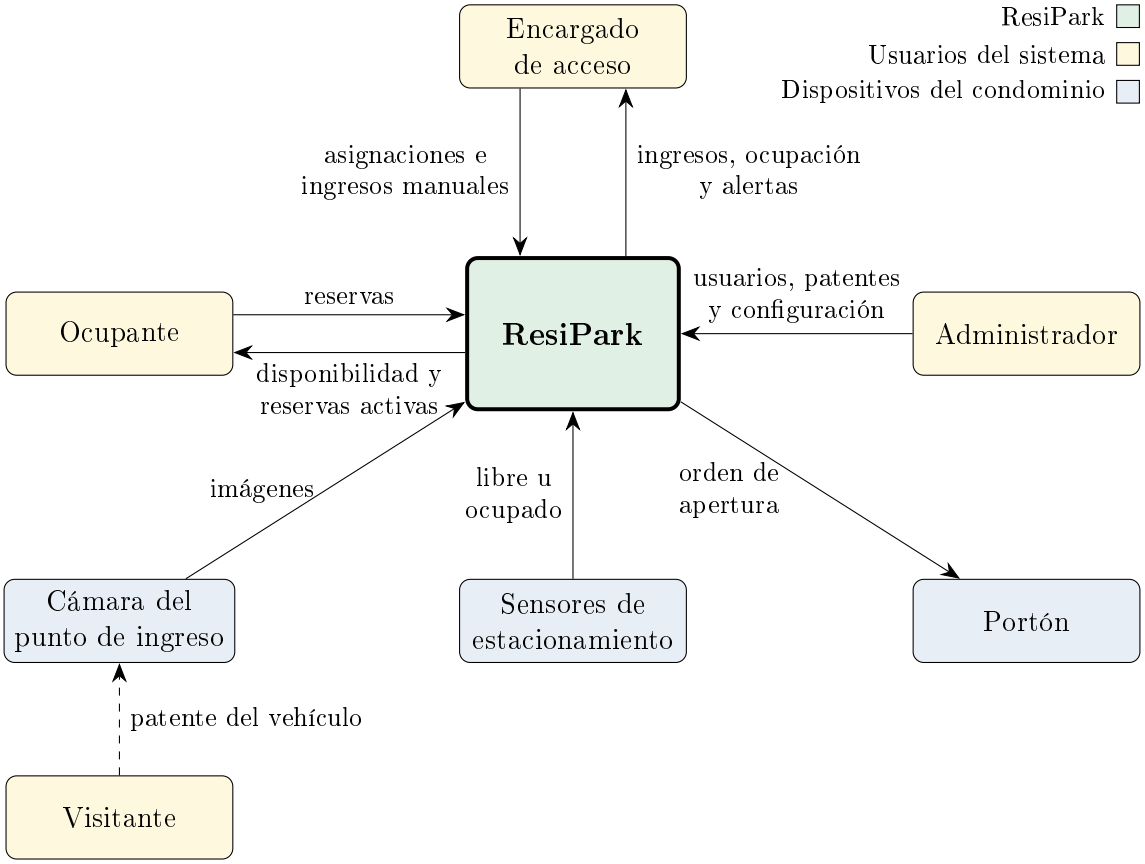


Figura 4.1: Diagrama de contexto de ResiPark

Del diagrama se desprende que ResiPark recibe datos de dos orígenes de naturaleza distinta: las personas, que interactúan con la solución mediante sus interfaces, y los dispositivos, que miden lo que ocurre en el condominio. Su única salida sobre el mundo físico es la orden de apertura del portón. Para conectar ambos orígenes y producir dicha salida, ResiPark se organiza internamente en capas.

4.4.2. Diagrama de Arquitectura

ResiPark se organiza en cuatro capas, siguiendo la estructura revisada en el estado del arte para los sistemas basados en el internet de las cosas. Cada capa recibe los datos de la inferior y entrega su resultado a la superior (Véase en la Figura 4.2). Desde la inferior hasta la superior, las capas son las siguientes:

1. **Capa de obtención de datos**. Digitaliza lo que ocurre en el condominio. En el punto de ingreso, una cámara captura los vehículos y un relé conectado al control remoto permite accionar el portón. En los estacionamientos de visita, un sensor por espacio detecta si está ocupado.

2. **Capa de comunicación**. Transporta los datos según su origen. Las imágenes y las solicitudes a los servicios viajan por la red del condominio y, cuando atraviesan una red pública, de forma cifrada (RNF05). El estado de cada espacio viaja desde los sensores hasta los servicios centrales, de forma directa o a través de un receptor, según el medio de comunicación que se adopte.

3. **Capa de soporte**. Contiene la lógica de ResiPark, distribuida en tres componentes. El orquestador coordina el flujo de cada ingreso: toma los fotogramas, solicita el reconocimiento, solicita la verificación y, si esta resulta positiva, acciona el relé. El servicio de reconocimiento detecta el vehículo y la patente, y transcribe sus caracteres. Los servicios de verificación y registro contrastan la patente con la base de datos, contrastan la ocupación con las asignaciones y consignan cada evento.

4. **Capa de aplicación**. Presenta la información a cada rol: la aplicación móvil al ocupante, y la plataforma web al encargado de acceso y al administrador.

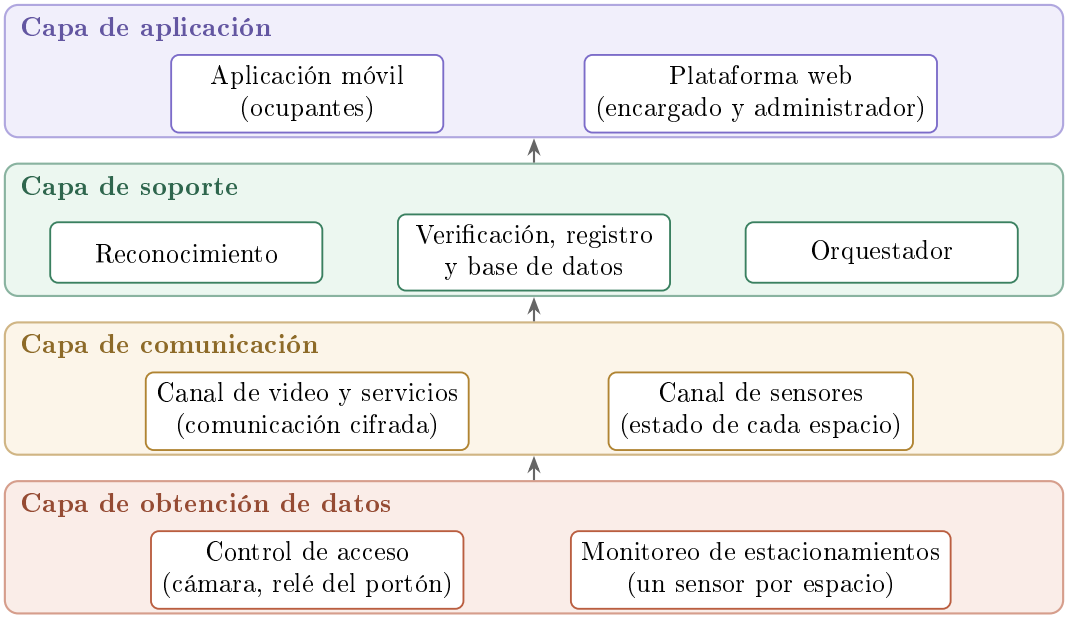


Figura 4.2: Arquitectura de ResiPark en cuatro capas

Definidas las capas, es posible seguir el recorrido de cada proceso a través de ellas. Por las cuatro capas circulan dos flujos paralelos, que parten de lo que ocurre físicamente en el condominio y terminan en lo que ve cada usuario en su interfaz. En el control de acceso vehicular, la cámara del punto de ingreso capta una imagen que la capa de comunicación transporta hasta la capa de soporte, donde se transforma en una patente y en una decisión; el resultado llega a la plataforma web del encargado de acceso como un ingreso registrado. En la gestión de estacionamientos de visita, el sensor de cada espacio mide su ocupación, la capa de comunicación la transporta hasta los servicios centrales, la capa de soporte la contrasta con las asignaciones vigentes y la capa de aplicación la muestra al encargado de acceso y al ocupante.

Ambos flujos convergen en la capa de soporte. Es en ella donde la reserva, la patente, el espacio asignado y la duración de la ocupación quedan vinculados en un mismo registro, que es precisamente el vínculo que la literatura revisada no reúne.

4.4.3. Distribución entre Borde y Nube

Las capas describen qué hace cada componente, pero no dónde se ejecuta. El estado del arte distinguió tres alternativas según el lugar de procesamiento (Tabla 3.2): centralizada en la nube, en el borde y por capas. ResiPark adopta la tercera: fija en el borde los componentes que dependen del lugar físico y deja abierta la ubicación de los demás, que se define en la implementación de la solución a partir de las alternativas disponibles. Cada componente se ubica según lo que requiere para funcionar:

- **En el borde**. Se ejecutan los componentes que dependen del lugar físico. La captura de imágenes, el orquestador y el accionamiento del portón funcionan en un dispositivo instalado en el punto de ingreso, y los sensores, junto con el receptor que requiera el medio de comunicación, en los estacionamientos de visita.
- **Servicios centrales**. Los servicios de verificación y registro, junto con la base de datos, deben estar disponibles para todos los usuarios y dispositivos (RA06), ya sea desde un servidor instalado en el condominio o desde la nube.
- **Reconocimiento**. Puede ejecutarse en el borde o en la nube, según el cómputo disponible (RA05). En la nube depende de la conexión a internet del punto de ingreso, mientras que en el borde requiere hardware local capaz de ejecutar los modelos dentro del tiempo que exige RNF01.

Cualquiera sea la ubicación de los servicios centrales, la verificación de cada ingreso depende de la comunicación entre el punto de ingreso y dichos servicios. El requisito RNF06 acota dicha dependencia: si la comunicación falla, el portón conserva su control remoto y el encargado de acceso puede registrar el ingreso de forma manual. La distribución en capas responde, además, al requisito de escalabilidad (RNF08), pues cada capa se comunica solo con sus vecinas y la tecnología de una de ellas, como el tipo de sensor o el medio de comunicación, puede reemplazarse sin modificar las demás.

Ninguna de las decisiones anteriores supone un tipo particular de condominio, por lo que la arquitectura es aplicable a cualquier recinto con un acceso vehicular controlado y estacionamientos destinados a personas externas. Con los componentes y su ubicación definidos, la sección siguiente los agrupa en módulos según la parte de cada proceso que resuelven.

4.5. Módulos del Sistema

La arquitectura describe cómo se organizan los componentes y dónde se ejecutan; los módulos, qué parte de los procesos resuelve cada uno. ResiPark se organiza en cuatro módulos, que se corresponden con los objetivos específicos de esta memoria y atraviesan una o más capas. Para cada uno se describe qué hace, qué decisiones de diseño lo definen y qué operaciones cubre.

- **M1. Gestión de accesos vehiculares**. Resuelve la identificación y la acción en el punto de ingreso: recibe los fotogramas de la cámara y entrega la patente transcrita y, cuando corresponde, la orden de apertura del portón. Usa el reconocimiento automático de patentes, establecido en los objetivos de esta memoria, porque, a diferencia del control remoto, RFID o una credencial móvil (Sección 3.2.1), identifica al vehículo sin exigir nada al visitante. La patente es un dato personal (RNF04), cuya captura se justifica porque en el punto de ingreso se decide quién entra al condominio. El reconocimiento localiza primero el vehículo dentro de una zona de interés, para descartar los que circulan al fondo de la escena, y luego la patente dentro de él. El portón se acciona mediante un relé conectado a su control remoto, lo que conserva su apertura manual (RNF06).
- **M2. Gestión de estacionamientos de visita**. Resuelve la identificación de la ocupación. Recibe como entrada la medición de un sensor instalado en cada espacio y entrega como salida el estado del espacio (libre u ocupado) cada vez que cambia. Usa un sensor por espacio, establecido en los objetivos de esta memoria, en lugar de visión por computador (Sección 3.2.2), por la protección de datos personales (RNF04): en los estacionamientos de visita, el vehículo ya fue identificado en el ingreso y solo se requiere saber si el espacio está ocupado, dato que un sensor obtiene sin captar imágenes de personas ni vehículos.
- **M3. Interfaces de usuario**. Resuelve la autorización previa y la asignación de espacios, que son las operaciones a cargo de personas. Comprende la aplicación móvil, con la que el ocupante crea las reservas, y la plataforma web, con la que el encargado de acceso asigna los espacios, sigue los ingresos y registra los ingresos manuales, y con la que el administrador configura la solución.
- **M4. Servicios centrales**. Resuelve la verificación y el registro. Contrasta cada patente reconocida con los vehículos registrados de los ocupantes y con las reservas vigentes, distinguiendo ambos casos para aplicar a cada uno su regla de autorización; consigna cada ingreso y cada cambio de ocupación; contrasta la ocupación con las asignaciones; y mantiene la base de datos de usuarios, vehículos, reservas, asignaciones y eventos. Es el módulo que vincula, en un mismo registro, la reserva, la patente, el espacio asignado y la duración de la ocupación.

Los cuatro módulos no se comunican directamente entre sí: cada uno intercambia información solo con M4, que concentra la verificación y el registro (Véase en la Figura

4.3). M1 entrega a M4 la patente reconocida y recibe el resultado de la verificación, del que depende la orden de apertura del portón. M2 entrega el estado de cada espacio cada vez que cambia. M3 entrega lo que registran las personas (las reservas, las asignaciones, los ingresos manuales, las patentes de los ocupantes y la configuración) y recibe la disponibilidad, la ocupación y los ingresos que presenta a cada rol.

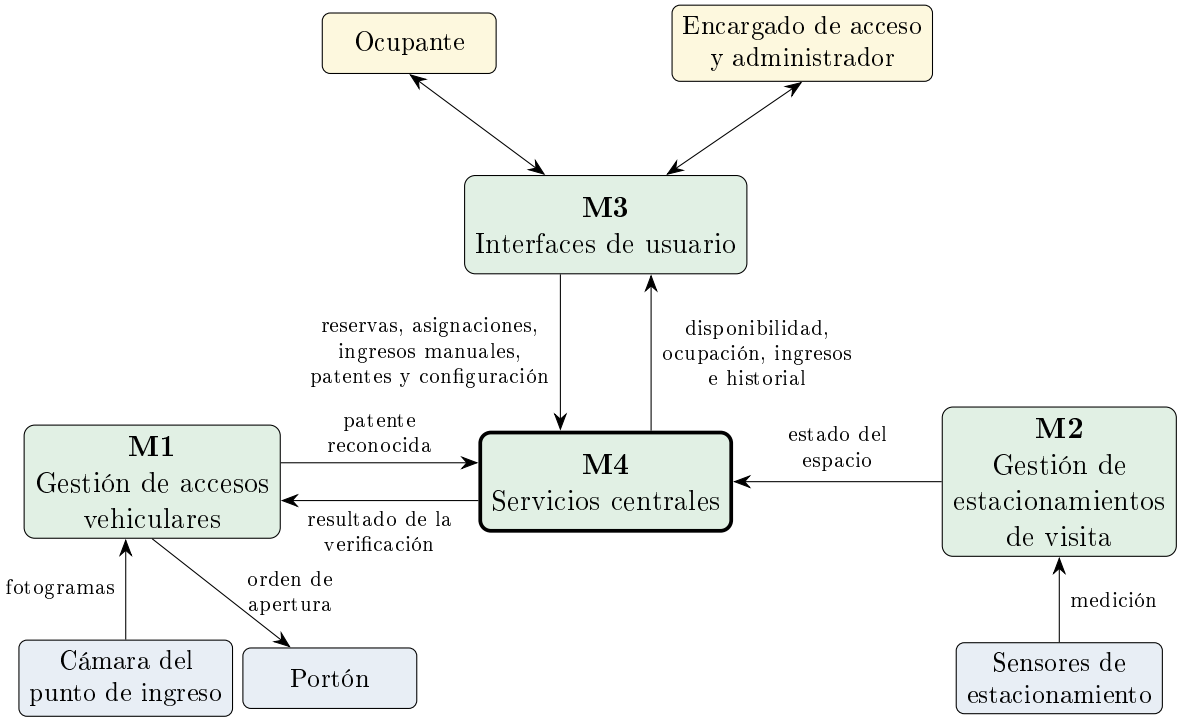


Figura 4.3: Módulos de ResiPark y relaciones entre ellos

Los módulos se distribuyen en la arquitectura según la parte del proceso que resuelven. Los dos módulos que miden lo que ocurre en el condominio ocupan las capas inferiores: M1 se extiende desde la obtención de datos hasta la capa de soporte, porque el reconocimiento de la patente y la coordinación del ingreso forman parte de su trabajo, mientras que M2 llega solo hasta la capa de comunicación, pues entrega el estado de cada espacio sin procesarlo. M4 se ubica únicamente en la capa de soporte, donde recibe lo que producen M1 y M2, y M3 se ubica únicamente en la capa de aplicación, donde están las personas. La misma división se observa en las operaciones: M1, M2 y M4 ejecutan las operaciones automatizadas de identificación, verificación, acción y registro, mientras que M3 reúne las que quedan a cargo de una persona, como la autorización previa, la asignación de espacios y la decisión en las excepciones. Dichas relaciones se resumen en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Módulos de ResiPark, capas que atraviesan y operaciones que cubren

Módulo	Capas	Operaciones
M1. Gestión de accesos vehiculares	Obtención de datos, comunicación, soporte	Identificación de la patente, acción sobre el portón
M2. Gestión de estacionamientos de visita	Obtención de datos, comunicación	Identificación de la ocupación
M3. Interfaces de usuario	Aplicación	Autorización previa, asignación, decisión en las excepciones
M4. Servicios centrales	Soporte	Verificación, registro, contraste entre ocupación y asignación

4.5.1. Matriz de Trazabilidad

La matriz de trazabilidad relaciona cada requisito con los módulos que participan en su cumplimiento (Tabla 4.4). Su propósito es comprobar que ningún requisito queda sin un módulo que lo resuelva y que ningún módulo carece de un requisito que lo justifique.

Tabla 4.4: Matriz de trazabilidad entre requisitos y módulos

Requisito	M1	M2	M3	M4
RF01 — Reconocimiento de patentes	•			
RF02 — Verificación contra ocupantes y reservas				•
RF03 — Apertura del portón	•			•
RF04 — Registro de cada ingreso				•
RF05 — Ingresos en tiempo real para el encargado			•	•
RF06 — Notificación de vehículos sin autorización			•	•
RF07 — Registro manual de ingresos			•	•
RF08 — Creación de reservas			•	•
RF09 — Descuento de la disponibilidad				•
RF10 — Asignación de espacios			•	•
RF11 — Detección de la ocupación		•		
RF12 — Contraste entre ocupación y asignación		•	•	•
RF13 — Historial de uso de los estacionamientos				•
RF14 — Alerta por exceso de duración		•	•	•
RF15 — Disponibilidad para el ocupante			•	•
RF16 — Autenticación y roles			•	•
RF17 — Recuperación de contraseña			•	•
RF18 — Gestión de usuarios y patentes			•	•

Requisito	M1	M2	M3	M4
RF19 — Configuración de estacionamientos			•	•
RNF01 — Tiempo de decisión en el ingreso	•			•
RNF02 — Vigencia del estado de ocupación		•	•	•
RNF03 — Condiciones de operación	•			
RNF04 — Protección de datos personales	•		•	•
RNF05 — Seguridad de la información	•	•	•	•
RNF06 — Continuidad ante fallas	•		•	
RNF07 — Compatibilidad			•	
RNF08 — Escalabilidad	•	•		•
RI01 — Aplicación móvil para ocupantes			•	
RI02 — Aplicación web para encargado de acceso y admin.			•	
RI03 — Cámara y dispositivo de borde	•			
RI04 — Dispositivo de borde y servicio de reconocimiento	•			
RI05 — Transmisión del estado de ocupación		•		
RI06 — Estado de ocupación y servicios centrales		•		•
RI07 — Aplicaciones de usuario y servicios centrales			•	•
RI08 — Dispositivo de borde y portón	•			
RA01 — Cámara del punto de ingreso	•			
RA02 — Dispositivo de borde	•			
RA03 — Detección en los estacionamientos de visita		•		
RA04 — Conectividad	•	•		
RA05 — Cómputo para el reconocimiento	•			
RA06 — Servidor central				•
RA07 — Sistemas operativos y firmware	•	•		•
RA08 — Visión por computador	•			
RA09 — Servicios centrales y base de datos				•
RA10 — Aplicación móvil			•	
RA11 — Plataforma web			•	

4.6. Alternativas Tecnológicas

Los requisitos de ambiente establecen qué capacidades debe reunir cada componente de ResiPark, pero no con qué tecnología se construye. En esta sección se describen, para cada tipo de tecnología que la solución necesita, las alternativas disponibles y los aspectos de cada una que inciden en el cumplimiento de los requisitos. Las decisiones de diseño tomadas en los módulos, como el uso del reconocimiento de patentes y de un sensor por espacio, acotan las alternativas a las tecnologías dentro de cada familia. La elección entre ellas no se realiza aquí, sino en la implementación de la solución, donde se justifica a partir de esta descripción.

Los tipos de tecnología se agrupan por módulo, de M1 a M4, y dentro de cada módulo siguen el recorrido de los datos, desde su captura hasta su presentación. Dentro de cada tipo, las alternativas se presentan de la más general a la más especializada para la tarea que deben cumplir.

4.6.1. Gestión de Accesos Vehiculares

La gestión de accesos vehiculares abarca los componentes que captan el vehículo en el punto de ingreso, reconocen su patente y accionan el portón. Sus tecnologías deben permitir reconocer la patente mientras el vehículo permanece detenido frente al portón (RNF01), tanto de día como de noche (RNF03), a partir de un dispositivo de borde de bajo consumo (RA02). En el orden en que circulan los datos, se requieren siete tipos de tecnología.

Cámara del punto de ingreso. Debe entregar fotogramas en que los caracteres de la patente sean legibles, también de noche (RA01), y hacerlos llegar al dispositivo de borde (RI03). Las alternativas se distinguen principalmente por su forma de conexión, que determina la distancia admisible entre la cámara y el dispositivo:

- **Cámara USB**. Se conecta directamente al dispositivo de borde y transmite el video según la clase de dispositivos de video de USB, que permite reconocerla sin controladores específicos en los sistemas que implementan dicha clase [52]. Su instalación es simple, pero el largo del cable obliga a ubicar el dispositivo de borde junto a la cámara.
- **Cámara IP**. Se conecta a una red cableada o inalámbrica y transmite el video mediante protocolos como RTSP [53]. El estándar ONVIF define perfiles con los que equipos de distintos fabricantes pueden interoperar [54]. Con alimentación por Ethernet, un mismo cable transporta los datos y la energía [55], lo que permite instalar la cámara lejos del dispositivo de borde. Los modelos orientados a la videovigilancia pueden incorporar iluminación infrarroja para la captura nocturna.

Dispositivo de borde. Debe recibir los fotogramas, comunicarse con los demás componentes y accionar el portón, con bajo consumo (RA02). El accionamiento requiere salidas capaces de controlar un relé:

- **Minicomputador**. Computador de formato reducido con arquitectura x86, capaz de ejecutar los mismos sistemas operativos y bibliotecas que un computador de escritorio. No dispone de pines de entrada y salida de propósito general, por lo que el accionamiento del relé requiere un adaptador externo.
- **Computador de placa única**. Integra procesador, memoria y conectividad en una sola placa. El Raspberry Pi 4, por ejemplo, incorpora conexión Ethernet y Wi-Fi y un conector de 40 pines de entrada y salida de propósito general, con el que puede controlarse un relé sin hardware adicional [56].

- **Módulo con acelerador para inteligencia artificial**. La familia Jetson de NVIDIA integra una GPU en un módulo de bajo consumo destinado a ejecutar modelos de aprendizaje profundo en el borde [57]. Permitiría ejecutar el reconocimiento en el propio punto de ingreso, sin depender de la conexión a internet.

Sistema operativo. El dispositivo de borde y el servidor central deben ejecutar un sistema operativo compatible con los lenguajes y las bibliotecas de los servicios (RA07). Aunque el servidor pertenece a M4, ambos se describen aquí porque las alternativas son comunes:

- **Windows**. Sistema operativo de Microsoft, con ediciones de escritorio y de servidor [58]. Su uso en ResiPark se limitaría al minicomputador o al servidor central, y requiere una licencia comercial.
- **Ubuntu**. Distribución de Linux mantenida por Canonical, con versiones para servidores en arquitecturas x86 y ARM, incluidos algunos computadores de placa única [59]. Permite usar el mismo sistema en el dispositivo de borde y en el servidor central.
- **Raspberry Pi OS**. Distribución de Linux basada en Debian, mantenida por Raspberry Pi Ltd para sus propios computadores [60]. Incluye soporte para los pines de entrada y salida de la placa, pero se limita a dicho hardware.

Procesamiento de imágenes. Antes y después de cada detección, los fotogramas deben leerse, recortarse, redimensionarse y convertirse al formato que espera cada modelo (RA08):

- **Pillow**. Biblioteca de Python para abrir, convertir y transformar imágenes [61]. Cubre las operaciones básicas, pero no incluye algoritmos de visión por computador ni la lectura de flujos de video.
- **scikit-image**. Biblioteca que reúne algoritmos de procesamiento de imágenes para Python, construida sobre las bibliotecas científicas NumPy y SciPy [62]. Opera sobre imágenes ya cargadas, sin funciones para capturar video.
- **OpenCV**. Biblioteca de código abierto de visión por computador [63], que reúne en un mismo paquete la captura de video desde cámaras y flujos de red y las operaciones de procesamiento de imágenes.

Detección de objetos. El reconocimiento requiere localizar el vehículo y, dentro de él, la patente, con la rapidez que exige RNF01. Los detectores basados en aprendizaje profundo se dividen en los de dos etapas, que primero proponen regiones candidatas y luego las clasifican, y los de una etapa, que predicen las cajas delimitadoras en una sola pasada:

- **Faster R-CNN**. Detector de dos etapas, en el que una red de propuesta de regiones sugiere las zonas candidatas y una segunda etapa las clasifica y ajusta [64]. Su costo de cómputo es mayor que el de los detectores de una etapa [65].
- **SSD**. Detector de una etapa que predice las cajas a partir de mapas de características de distintas escalas, lo que le permite detectar objetos de tamaños diversos en una sola pasada [65].
- **YOLO**. Detector de una etapa que plantea la detección como un único problema de regresión sobre la imagen completa, lo que permite procesarla en tiempo real [66]. Sus versiones recientes se distribuyen con herramientas para entrenar modelos sobre conjuntos de datos propios y exportarlos a distintos entornos de ejecución [67, 68].

Transcripción de la patente. Una vez localizada la patente, sus caracteres deben transcribirse (RA08), a partir de una imagen captada en exteriores, con perspectiva, desenfoque y cambios de iluminación:

- **Tesseract**. Motor de reconocimiento óptico de caracteres de código abierto, concebido para documentos digitalizados [69]. Aplicado a una patente, requiere preparar la imagen para que se asemeje a un documento.
- **EasyOCR**. Biblioteca de Python que combina una red de detección de texto y una red de reconocimiento, orientadas al texto presente en escenas, con modelos para más de 80 idiomas [70].
- **PaddleOCR**. Sistema de reconocimiento de texto basado en modelos livianos, diseñados para ejecutarse con pocos recursos de cómputo [71].
- **Modelos de visión y lenguaje**. Modelos como Florence-2 resuelven distintas tareas visuales a partir de una instrucción de texto, entre ellas la transcripción del texto de una imagen [72]. No requieren un modelo entrenado para patentes, pero su tamaño exige más recursos de cómputo que un sistema liviano como PaddleOCR.

Cómputo para el reconocimiento. Los modelos de detección y de transcripción deben ejecutarse dentro del tiempo que exige RNF01, en un equipo propio o en un servicio en la nube (RA05):

- **Equipo propio**. Un computador instalado en el condominio, o un módulo con acelerador en el propio punto de ingreso, ejecuta los modelos sin depender de la conexión a internet. El tiempo de inferencia depende del hardware disponible, y su adquisición y mantención quedan a cargo del condominio.

- **Google Colab**. Entorno de cuadernos de Python alojado por Google, que da acceso a GPU sin adquirir hardware. Su uso gratuito está sujeto a límites de recursos y de duración de las sesiones, por lo que no garantiza una disponibilidad continua [73].
- **Instancias con GPU en la nube**. Proveedores como Amazon Web Services arriendan máquinas virtuales con GPU, como las instancias G4, que se cobran por tiempo de uso [74]. Permiten mantener el servicio en ejecución de forma continua, a cambio de un costo que crece con dicho tiempo.

4.6.2. Gestión de Estacionamientos de Visita

La gestión de estacionamientos de visita abarca los dispositivos que detectan la ocupación de cada estacionamiento y transmiten su estado. Sus tecnologías deben tener un consumo y una instalación compatibles con la ubicación de los espacios (RA03), alcanzar el punto de conexión más cercano (RI05) y entregar cada cambio dentro del retraso que admite RNF02. Se requieren cuatro tipos de tecnología: el sensor, el microcontrolador, su firmware y el medio de comunicación.

Sensor de presencia. La literatura revisada distingue los sensores por espacio de la visión por computador (Sección 3.2.2). Dado que M2 usa un sensor por espacio, por la protección de datos personales (Sección 4.5), las alternativas corresponden a los tipos de sensor:

- **Lazo inductivo**. Bobina instalada bajo el pavimento que detecta la masa metálica del vehículo. Tiene un alto costo de instalación, pues exige intervenir el pavimento [47].
- **Sensor infrarrojo**. Detecta el vehículo por la interrupción o el reflejo de un haz de luz infrarroja. Es sensible a la lluvia y a la nieve [47].
- **Sensor ultrasónico**. Mide la distancia al objeto más cercano por el tiempo que tarda en volver un pulso de sonido. Tiene bajo costo y baja mantención, pero debe montarse sobre el espacio y se limita a recintos interiores [47].

Microcontrolador. Cada sensor requiere un microcontrolador que lo lea y opere con un consumo compatible con la ubicación del espacio (RA03). Las alternativas se distinguen por la conectividad que integran:

- **Arduino UNO**. Placa basada en el microcontrolador ATmega328P, de 8 bits, con un entorno de desarrollo simple [75]. No integra comunicación inalámbrica, por lo que requiere un módulo de radio externo.
- **ESP32**. Microcontrolador de Espressif que integra Wi-Fi y Bluetooth y dispone de modos de bajo consumo, como el sueño profundo [76]. Para un enlace de largo alcance requiere un módulo de radio externo.

- **STM32 de bajo consumo**. Familias de microcontroladores de STMicroelectronics, con núcleo ARM Cortex-M, orientadas a minimizar el consumo de energía [77].

Firmware. El microcontrolador debe ejecutar un programa que lea el sensor y transmita el estado del espacio (RA07):

- **MicroPython**. Implementación de Python para microcontroladores, que permite programarlos en dicho lenguaje [78]. Facilita el desarrollo, pero, al ser interpretado, ocupa más memoria y se ejecuta más lento que un programa compilado.
- **Arduino**. Entorno que ofrece una interfaz de programación común para distintas placas, entre ellas el ESP32, mediante el núcleo que mantiene Espressif [79]. Dispone de bibliotecas para numerosos sensores y módulos de radio.
- **ESP-IDF**. Marco de desarrollo oficial de Espressif para sus microcontroladores, basado en el sistema operativo de tiempo real FreeRTOS [80]. Da acceso completo al hardware, incluidos los modos de bajo consumo, a cambio de una programación más compleja.

Medio de comunicación. Cada sensor debe transmitir el estado de su espacio con un alcance que cubra la distancia hasta el punto de conexión (RI05, RA04) y con un consumo compatible con su ubicación (RA03). En este caso, las alternativas se presentan de menor a mayor alcance:

- **Wi-Fi**. Red inalámbrica de área local, de alta tasa de datos y un alcance del orden de los cien metros, con un consumo mayor que el de los protocolos diseñados para sensores [81]. Permite aprovechar la red existente del condominio, sin un receptor dedicado.
- **Zigbee**. Protocolo de bajo consumo para redes de sensores, con un alcance de entre 10 y 100 metros [81]. Requiere un coordinador que conecte la red de sensores con los servicios centrales.
- **LoRa**. Modulación de radio de bajo consumo que alcanza varios kilómetros a cambio de una tasa de datos baja [82]. Requiere un receptor que reciba los mensajes de los nodos y los reenvíe a los servicios centrales.
- **NB-IoT**. Tecnología celular para el internet de las cosas que opera sobre la red de un operador móvil, sin requerir un receptor propio, a cambio de una suscripción con dicho operador [83].

4.6.3. Interfaces de Usuario

Las interfaces de usuario comprenden la aplicación móvil del ocupante y la plataforma web del encargado de acceso y el administrador. La primera debe funcionar en Android e iOS (RNF07, RA10), y la segunda debe reflejar los cambios sin que la página deba recargarse (RNF02, RA11). Ambas se comunican con los servicios centrales mediante su API (RI07).

Aplicación móvil. Las alternativas se distinguen por la cantidad de bases de código que exigen para cubrir ambos sistemas operativos:

- **Desarrollo nativo**. Cada plataforma se programa en su lenguaje oficial, Kotlin para Android [84] y Swift para iOS [85]. Da acceso directo a las funciones de cada sistema operativo, pero exige mantener dos bases de código.
- **React Native**. Framework que permite escribir la aplicación en JavaScript, con el modelo de componentes de React, y la presenta con los componentes nativos de cada plataforma [86]. Una misma base de código genera la aplicación para Android y para iOS.
- **Flutter**. Framework de Google que usa el lenguaje Dart y dibuja la interfaz con su propio motor de renderizado, a partir de una misma base de código para varias plataformas [87].

Plataforma web. Las tres alternativas construyen la interfaz a partir de componentes que se actualizan cuando cambian sus datos, sin recargar la página. Para que un cambio se refleje en cuanto ocurre, los servicios centrales deben además enviarlo por un canal persistente, como WebSocket [88]:

- **Angular**. Plataforma de Google, basada en TypeScript, que incluye de forma integrada el enrutamiento, los formularios y la comunicación con servidores [89].
- **Vue**. Framework progresivo, que puede incorporarse de forma gradual, desde una parte de una página hasta una aplicación completa [90].
- **React**. Biblioteca para construir interfaces a partir de componentes [91]. Se ocupa solo de la interfaz, por lo que el enrutamiento y otras funciones se agregan con bibliotecas externas, y comparte su modelo de componentes con React Native.

4.6.4. Servicios Centrales

Los servicios centrales reúnen las API's que consumen los demás módulos, la base de datos y el servidor en que se ejecutan. Las API's debe construirse sobre un framework y los datos deben almacenarse en una base de datos relacional (RA09), en un servidor

accesible para todos los componentes de ResiPark (RA06). Se requieren tres tipos de tecnología.

Framework para la API. Debe resolver el enrutamiento, la validación de los datos y la autenticación (RA09):

- **Express**. Framework minimalista para Node.js, que provee el enrutamiento y un mecanismo de funciones intermedias sobre el cual se agregan la validación y la autenticación [92].
- **Django**. Framework de Python que incluye un mapeo objeto-relacional, un sistema de autenticación y un panel de administración [93].
- **FastAPI**. Framework de Python para construir APIs a partir de anotaciones de tipo, con las que valida los datos de entrada y genera la documentación de la API de forma automática [94]. Al usar Python, comparte lenguaje con las bibliotecas de visión por computador.

Base de datos. Debe mantener la integridad de las relaciones entre reservas, patentes, unidades y espacios (RA09):

- **SQLite**. Motor relacional que almacena la base de datos en un archivo y se ejecuta dentro de la propia aplicación, sin un servidor. Su documentación lo desaconseja cuando varios clientes escriben de forma concurrente a través de la red [95].
- **MySQL**. Motor relacional cliente-servidor de código abierto, mantenido por Oracle, cuyo motor de almacenamiento InnoDB ofrece transacciones y claves foráneas [96].
- **PostgreSQL**. Motor relacional cliente-servidor de código abierto, con transacciones, claves foráneas y tipos de datos extensibles [97]. Es además la base de servicios gestionados como Supabase [98].

Despliegue del servidor central. Debe quedar accesible para los dispositivos del condominio, la aplicación móvil y la plataforma web (RA06):

- **Servidor en el condominio**. Un computador instalado en el condominio ejecuta la API y la base de datos, sin depender de terceros. Para que la aplicación móvil funcione fuera del condominio, el servidor debe exponerse a internet, y su respaldo y mantención quedan a cargo del condominio.
- **Máquina virtual en la nube**. Proveedores como Amazon Web Services arriendan máquinas virtuales en las que se instalan la API y la base de datos [99]. El proveedor mantiene el hardware, mientras que la configuración del sistema queda a cargo de quien lo despliega.

- **Backend como servicio**. Plataformas que entregan la base de datos, la autenticación y otras funciones ya configuradas. Supabase ofrece una base de datos PostgreSQL con autenticación y suscripción a cambios en tiempo real [98], mientras que Firebase ofrece Cloud Firestore, una base de datos de documentos no relacional [100] que no satisface RA09.

Las alternativas descritas acotan las opciones de cada módulo sin cerrarlas. La elección de cada tecnología, y su justificación a partir de los aspectos aquí descritos, se presenta en la implementación de la solución.

4.7. Diseño de las Interfaces de Usuario

Las interfaces de usuario materializan la distribución de operaciones: a través de ellas el ocupante ejecuta la autorización previa y el encargado de acceso ejecuta la asignación de espacios y las decisiones sobre las excepciones. En esta sección se define, para cada interfaz, qué vistas la componen, qué muestra o captura cada una y cómo se navega entre ellas (Véase en la Figura 4.4). Las pantallas implementadas se presentan en la implementación de la solución.

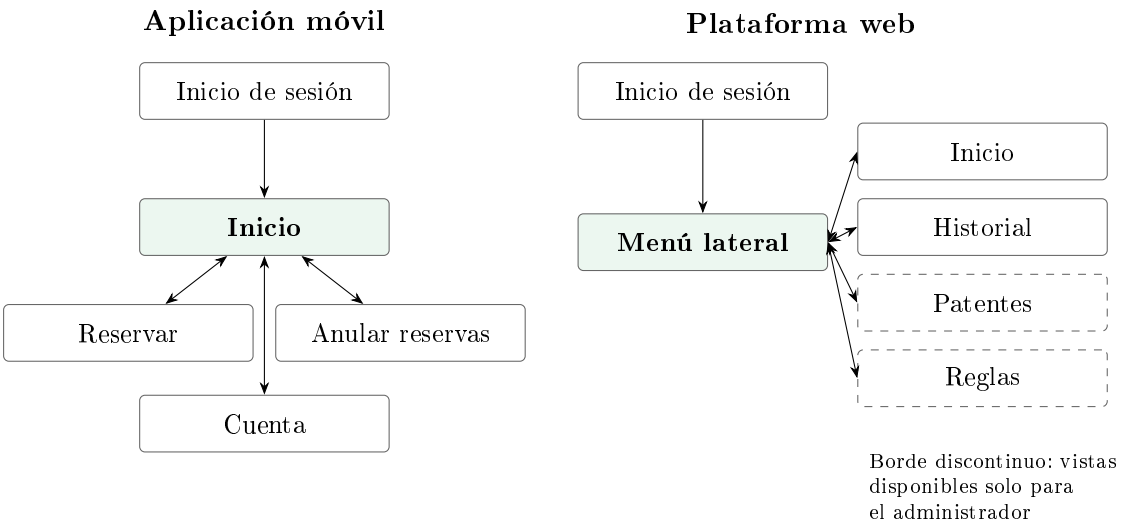


Figura 4.4: Vistas y navegación de las interfaces de usuario de ResiPark

4.7.1. Aplicación Móvil

La aplicación móvil está destinada al ocupante. Su navegación distingue un flujo sin sesión iniciada, en el que solo es posible iniciar sesión o recuperar la contraseña, y un flujo con sesión iniciada, organizado en torno a la vista de inicio. Sus vistas son las siguientes:

- **Inicio de sesión**. Solicita el correo electrónico y la contraseña del ocupante (RF16) y ofrece un enlace para recuperar la contraseña (RF17).
- **Inicio**. Resume la cantidad de estacionamientos de visita disponibles, reservados y ocupados (RF15), y lista las reservas activas del ocupante con la patente, el documento de identidad del visitante y el periodo de cada una. Desde ella se accede a las vistas de reserva y de anulación.
- **Reservar**. Captura la patente del vehículo y el documento de identidad del visitante para crear una reserva (RF08), y muestra la disponibilidad de estacionamientos de visita del periodo (RF15). No permite elegir un espacio, pues la asignación corresponde al encargado de acceso.
- **Anular reservas**. Lista las reservas activas creadas por el ocupante y permite anular cada una de ellas.
- **Cuenta**. Muestra la unidad del ocupante y permite cambiar la contraseña y cerrar la sesión.

El wireframe de la aplicación móvil representa la disposición de los elementos en cada una de estas vistas (Véase en la Figura 4.5). Las vistas de inicio, reserva y anulación comparten una barra superior con un botón para volver a la vista anterior y un acceso a la vista de cuenta. En cada vista, la acción principal, como reservar o anular una reserva, se presenta como un botón que ocupa todo el ancho de la pantalla.

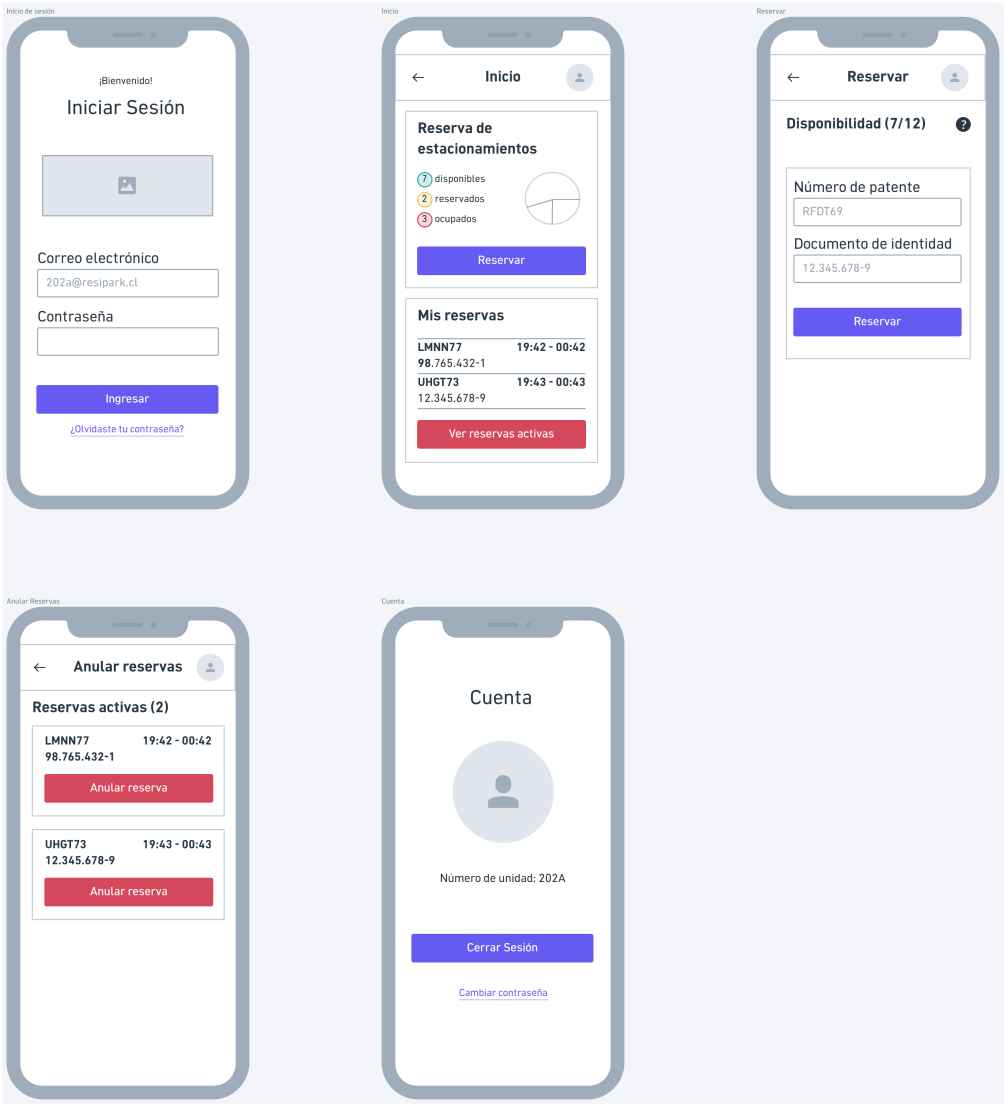


Figura 4.5: Wireframe de la aplicación móvil

4.7.2. Plataforma Web

La plataforma web está destinada al encargado de acceso y al administrador. Tras el inicio de sesión, un menú lateral permite navegar entre las demás vistas, cuya disponibilidad depende del rol (RF16):

- **Inicio de sesión**. Solicita el correo electrónico y la contraseña del usuario (RF16) y ofrece un enlace para recuperar la contraseña (RF17).
- **Inicio**. Reúne las operaciones del punto de ingreso y de los estacionamientos de visita. Presenta la imagen en vivo de la cámara, cada ingreso detectado con el resultado de su verificación (RF05), las notificaciones de vehículos sin autorización vigente (RF06) y un formulario para registrar un ingreso de forma manual

(RF07). Junto a ellos, presenta el estado de cada estacionamiento de visita (libre, reservado, asignado u ocupado) y la hora desde la que se encuentra en dicho estado. Desde esta vista, el encargado de acceso asigna un espacio a cada reserva (RF10), libera la reserva de un espacio y recibe las indicaciones de espacios asignados sin ocupar, de espacios ocupados sin asignación y de ocupaciones que exceden la duración de la reserva (RF12, RF14).

- **Historial**. Lista las entradas y salidas registradas, con la patente, el tipo de usuario (ocupante o visitante) y la hora de cada una, y permite buscar un registro (RF04).
- **Patentes**. Disponible para el administrador, permite asociar una o más patentes a cada unidad (RF18).
- **Reglas**. Disponible para el administrador, permite configurar los parámetros que ResiPark aplica a las reservas: el número de estacionamientos de visita (RF19) y la duración de cada reserva (RF08).

El wireframe de la plataforma web representa las vistas de inicio de sesión, inicio, historial, patentes y reglas (Véase en la Figura 4.6). Todas las vistas con sesión iniciada comparten el menú lateral. En la vista de inicio, cada estacionamiento de visita se representa como una tarjeta cuyo color indica su estado, y al seleccionar una tarjeta se habilita, junto a la imagen de la cámara, un panel para liberar la reserva del espacio. Las vistas de historial y de patentes presentan sus registros en una tabla con un buscador, mientras que la vista de reglas presenta el número de estacionamientos de visita y la duración de la reserva en un formulario editable.

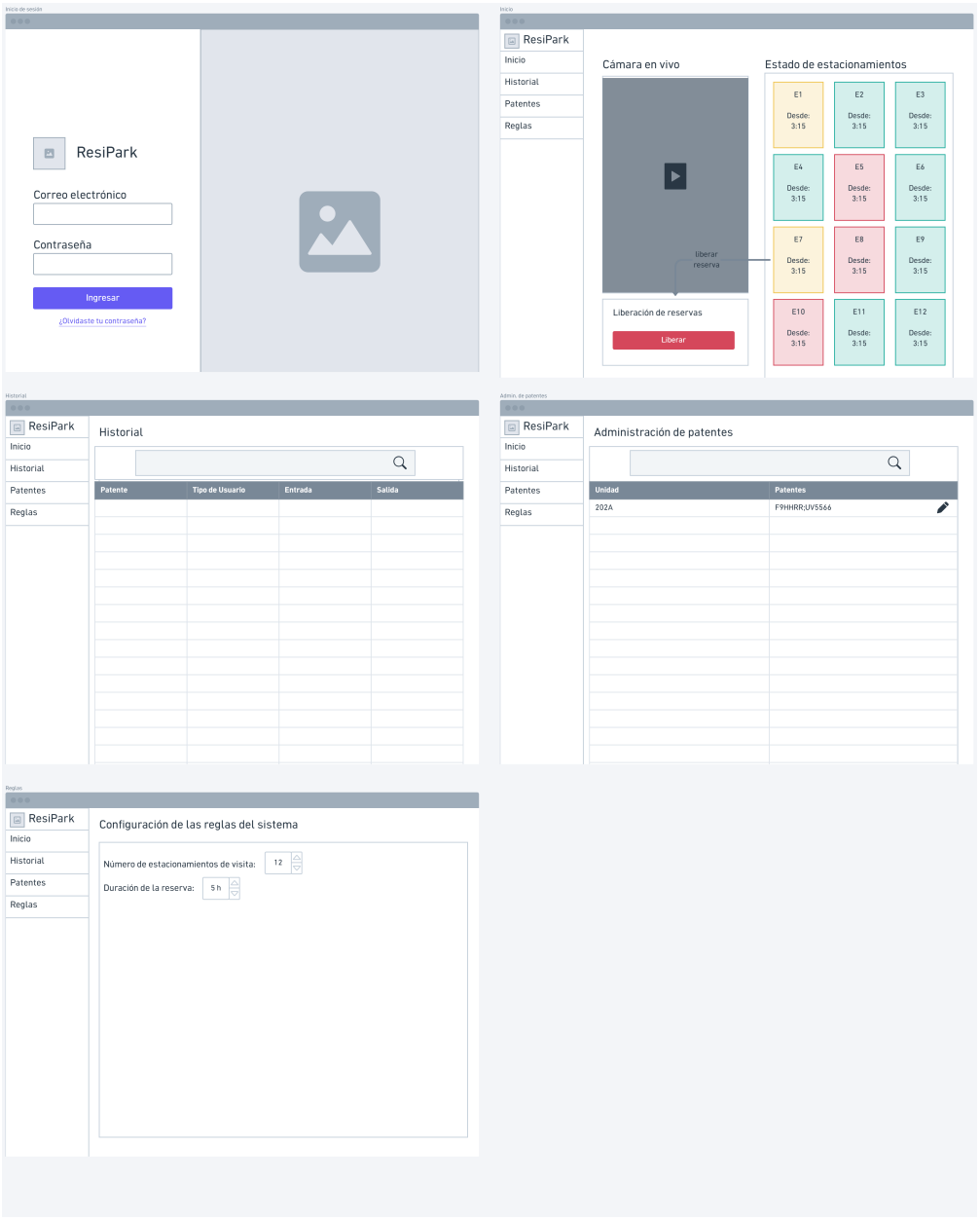


Figura 4.6: Wireframe de la plataforma web

Con los usuarios, la distribución de operaciones, los requisitos, la arquitectura, los módulos y las interfaces definidos, el diseño de ResiPark queda especificado. A continuación se describe cómo se implementó cada módulo, qué herramientas se eligieron en cada caso y cómo se verificó y validó la solución resultante.

Capítulo 5

Implementación de la Solución

En el diseño de ResiPark se definió qué operaciones se automatizan, qué requisitos debe cumplir la solución y cómo se organizan sus componentes, sin fijar los dispositivos ni las herramientas concretas. En este capítulo se describe el prototipo con que se implementó dicho diseño y los resultados obtenidos al probarlo en un condominio. Se presenta primero el caso de estudio: el condominio donde se instaló el prototipo, la elección de las tecnologías que lo componen y su implementación en dicho espacio. Luego se describe, para cada uno de los cuatro módulos, qué se construyó y qué resultados se alcanzaron. A continuación se contrasta el prototipo con los requisitos definidos en el diseño y, por último, se analizan sus limitaciones.

5.1. Caso de Estudio

El prototipo de ResiPark se implementó y se probó en un condominio, que constituye el caso de estudio de esta memoria. En esta sección se describe primero dicho condominio y las condiciones en que se realizaron las pruebas. Luego se presenta el stack tecnológico del prototipo, con la elección de cada tecnología entre las alternativas descritas en el diseño, y por último, la forma en que el prototipo se implementó en el espacio físico del caso de estudio.

5.1.1. Contexto del Caso de Estudio

El prototipo se instaló en un condominio de casas de la comuna de Cerrillos, en la Región Metropolitana, cuyas viviendas se ubican a ambos lados de un pasaje cerrado. Se trata de un condominio de tipo B según la Ley de Copropiedad Inmobiliaria (Ley 21.442) [4]: el dominio exclusivo recae sobre el sitio de cada vivienda, y el pasaje,

como circulación interior, es un bien común. El pasaje tiene un único punto de ingreso vehicular, controlado por un portón automático que los ocupantes abren con un control remoto, y no cuenta con personal destinado a controlar el acceso ni con un registro de los ingresos. Por dicha razón, durante las pruebas el rol de encargado de acceso lo ejercieron quienes las realizaron. Las pruebas en el condominio se efectuaron en noviembre de 2025.

En la plataforma web se configuraron cuatro estacionamientos de visita, identificados de E1 a E4, y se instaló un nodo sensor en uno de ellos, el estacionamiento E1. Los demás estacionamientos se usaron para probar la asignación de espacios y el registro de reservas, sin medición de su ocupación.

5.1.2. Stack Tecnológico

El diseño describió, para cada tipo de tecnología, las alternativas capaces de satisfacer los requisitos (Sección 4.6). En esta sección se justifica la elección entre ellas, en el mismo orden: por módulo y, dentro de cada módulo, según el recorrido de los datos. Los criterios provienen de los requisitos asociados a cada tipo de tecnología y de condiciones propias de un prototipo, como el costo, la disponibilidad de los componentes y la compatibilidad entre ellos. Cuando una elección respondió a una razón práctica más que a una ventaja técnica, se indica de forma explícita. Al final de cada módulo, una tabla resume las alternativas consideradas y la tecnología elegida.

5.1.2.1. Gestión de Accesos Vehiculares

Las tecnologías de este módulo debían permitir reconocer la patente mientras el vehículo permanece detenido frente al portón (RNF01) y accionar el portón sin reemplazar su mecanismo (RNF06). Sus elecciones son las siguientes:

Cámara del punto de ingreso. Se eligió una cámara IP. El dispositivo de borde se instaló en una caja estanca junto al portón y la cámara, en la parte superior de la reja contigua, de modo que la conexión por red permite ubicar ambos equipos de forma independiente, sin depender del largo de un cable USB. La cámara entrega su video por Ethernet mediante RTSP [53], a 10 fotogramas por segundo. Una segunda cámara IP, conectada por Wi-Fi, entrega la imagen en vivo que muestra la plataforma web.

Dispositivo de borde. Se eligió una Raspberry Pi 4, que integra Ethernet y Wi-Fi y un conector de 40 pines de entrada y salida de propósito general, con el que se controla el relé del portón sin hardware adicional [56]. Un minicomputador, en cambio, habría requerido un adaptador externo para el relé. La familia Jetson se descartó porque su principal ventaja, la GPU integrada, solo se aprovecha si el reconocimiento se ejecuta en el borde, y en el prototipo se ejecuta en la nube, como se justifica más adelante.

Sistema operativo. La Raspberry Pi ejecuta Raspberry Pi OS, la distribución que mantiene el fabricante para sus computadores, con soporte para los pines de entrada y salida de la placa [60]. Ubuntu era compatible con la placa, pero no aportaba una

ventaja para un dispositivo cuyo único propósito es ejecutar el orquestador, y Windows quedó descartado al no emplearse un minicomputador.

Procesamiento de imágenes. El orquestador usa OpenCV [63], la única de las alternativas que permite leer el flujo de video de la cámara, además de procesar los fotogramas. Pillow y scikit-image operan sobre imágenes ya cargadas, por lo que habrían requerido una herramienta adicional para la captura.

Detección de objetos. Se eligieron modelos de la familia YOLO. Al tratarse de detectores de una etapa, procesan cada fotograma en una sola pasada [66], lo que favorece el tiempo de decisión que exige RNF01, y sus versiones recientes incluyen herramientas para entrenar modelos sobre conjuntos de datos propios [67]. Faster R-CNN, de dos etapas, tiene un costo de cómputo mayor [65], y SSD, también de una etapa, no se evaluó. Dentro de la familia YOLO se emplearon dos versiones, cuya precisión y tamaño se comparan en la Tabla 5.1. Para la patente se usó YOLOv11s, que en su versión preentrenada alcanza una precisión mayor que YOLOv8s con menos parámetros y operaciones. Para el vehículo se usó YOLOv8s por una razón práctica: se contaba con un modelo de dicha versión ya entrenado sobre un conjunto propio de más de 10.000 imágenes, que se ajustó con un conjunto nuevo en lugar de entrenar un modelo desde cero.

Tabla 5.1: Precisión y tamaño de los modelos YOLO empleados, en su versión preentrenada sobre el conjunto COCO. Fuente: [67] y [68]

Modelo	mAP50-95	Parámetros (M)	GFLOPs	Uso en ResiPark
YOLOv8s	44,9	11,2	28,6	Detección del vehículo
YOLOv11s	47,0	9,4	21,5	Detección de la patente

Transcripción de la patente. La transcripción se planificó inicialmente con PaddleOCR, por sus modelos livianos [71]. Su integración, sin embargo, presentó conflictos de dependencias y de versiones con las demás bibliotecas del servicio de reconocimiento, que impidieron avanzar, por lo que se reemplazó por Florence-2, un modelo de visión y lenguaje que transcribe el texto de una imagen a partir de una instrucción [72]. Tesseract se descartó por estar concebido para documentos digitalizados [69], y EasyOCR no se probó. El mayor costo de cómputo de Florence-2, cuyas versiones tienen entre 0,23 y 0,77 mil millones de parámetros [72], se absorbe en la GPU del entorno donde se ejecuta el servicio.

Cómputo para el reconocimiento. El servicio de reconocimiento se ejecuta en Google Colab, que da acceso a una GPU sin adquirir hardware [73]. La elección respondió a la etapa de prototipo, pues permitió ejecutar los tres modelos sin un costo de equipamiento. Su contrapartida es que el uso gratuito de Colab no garantiza una disponibilidad continua [73] y que el servicio no cuenta con una dirección pública fija, por lo que se expone mediante un túnel de Cloudflare. Para una operación permanente, las alternativas serían un equipo propio con GPU o una instancia con GPU en la nube [74], como se discute en las limitaciones.

La Tabla 5.2 resume las elecciones del módulo.

Tabla 5.2: Alternativas y tecnologías elegidas para la gestión de accesos vehiculares

Tipo de tecnología	Alternativas consideradas	Elección
Cámara	USB, IP	Cámara IP
Dispositivo de borde	Minicomputador, computador de placa única, Jetson	Raspberry Pi 4
Sistema operativo	Windows, Ubuntu, Raspberry Pi OS	Raspberry Pi OS
Procesamiento de imágenes	Pillow, scikit-image, OpenCV	OpenCV
Detección de objetos	Faster R-CNN, SSD, YOLO	YOLOv8s (vehículo) y YOLOv11s (patente)
Transcripción	Tesseract, EasyOCR, PaddleOCR, modelos de visión y lenguaje	Florence-2
Cómputo para el reconocimiento	Equipo propio, Google Colab, instancias con GPU	Google Colab

5.1.2.2. Gestión de Estacionamientos de Visita

Las tecnologías de este módulo debían operar con un consumo compatible con la ubicación de los espacios (RA03), alcanzar el punto de conexión más cercano (RI05) y entregar cada cambio dentro del retraso que admite RNF02. Sus elecciones son las siguientes:

Sensor de presencia. Se eligió un sensor ultrasónico HC-SR04. Según la comparación de [47], el lazo inductivo tiene un alto costo de instalación, pues exige intervenir el pavimento; el infrarrojo es sensible a la lluvia, una condición relevante en un estacionamiento exterior como el del caso de estudio; y el ultrasónico tiene bajo costo y baja mantención. A ello se sumó la disponibilidad de componentes. La misma fuente asocia el sensor ultrasónico a un montaje en el techo de espacios interiores, por lo que su uso en un espacio exterior obligó a montarlo de forma lateral, como se describe en la implementación del módulo.

Microcontrolador. Se eligió el ESP32, tanto para los nodos sensores como para el receptor. Como se instala un nodo por estacionamiento de visita, el costo del microcontrolador se multiplica por el número de espacios, por lo que su precio fue un criterio central para que la solución pueda crecer a más estacionamientos. El ESP32 reúne en una sola placa de bajo costo el procesador, la conectividad Wi-Fi y Bluetooth y modos de bajo consumo [76]. El Arduino UNO, en cambio, no integra comunicación inalámbrica [75], por lo que el receptor habría requerido un módulo Wi-Fi adicional para reenviar

los estados a los servicios centrales. Usar la misma placa en los nodos y en el receptor permitió, además, compartir el entorno de desarrollo y las bibliotecas. Las familias STM32 no se evaluaron.

Firmware. El firmware se desarrolló con el núcleo Arduino para ESP32 [79], que dispone de bibliotecas para el sensor ultrasónico y para los módulos de radio LoRa. MicroPython habría simplificado la programación a costa de un mayor uso de memoria, y ESP-IDF, que da acceso completo al hardware, exige una programación más compleja [80], que no se justificaba para un nodo que solo mide una distancia y transmite un cambio de estado.

Medio de comunicación. Se eligió LoRa en la banda de 915 MHz, con un enlace directo entre cada nodo y el receptor, sin la red de pasarelas ni el servidor de red que define LoRaWAN, innecesarios con un único receptor. La alternativa más directa era Wi-Fi, que permite aprovechar la red del condominio y, mediante repetidores, extender su cobertura hacia los estacionamientos más alejados o hacia un subterráneo. Dicha opción, sin embargo, exige instalar y alimentar cada repetidor, hace depender a cada nodo de la cobertura y de la configuración de la red del condominio, y tiene un consumo mayor que el de los protocolos diseñados para sensores, con un alcance del orden de los cien metros [81]. LoRa, en cambio, alcanza varios kilómetros con bajo consumo [82], de modo que un solo receptor, ubicado donde exista conexión a la red, puede cubrir todos los estacionamientos de visita, y agregar un espacio requiere solo instalar un nodo. Su contrapartida es una tasa de datos baja [82], suficiente para mensajes que solo indican si un espacio está libre u ocupado, y la necesidad de un receptor dedicado. Zigbee también requiere un coordinador y ofrece un alcance menor [81], y NB-IoT exige una suscripción con un operador móvil para cada nodo [83].

La Tabla 5.3 resume las elecciones del módulo.

Tabla 5.3: Alternativas y tecnologías elegidas para la gestión de estacionamientos de visita

Tipo de tecnología	Alternativas consideradas	Elección
Sensor de presencia	Lazo inductivo, infrarrojo, ultrasónico	Ultrasónico HC-SR04
Microcontrolador	Arduino UNO, ESP32, STM32	ESP32
Firmware	MicroPython, Arduino, ESP-IDF	Núcleo Arduino para ESP32
Medio de comunicación	Wi-Fi, Zigbee, LoRa, NB-IoT	LoRa (915 MHz) con un receptor ESP32

5.1.2.3. Interfaces de Usuario

Las tecnologías de este módulo debían permitir que la aplicación móvil funcione en Android e iOS (RNF07) y que la plataforma web refleje los cambios sin recargar la

página (RNF02). Sus elecciones son las siguientes:

Aplicación móvil. Se desarrolló con React Native. Frente al desarrollo nativo, que habría exigido mantener dos bases de código, una en Kotlin [84] y otra en Swift [85], React Native genera la aplicación para Android y para iOS a partir de una misma base de código, como exige RNF07, y la presenta con los componentes nativos de cada plataforma, de modo que su apariencia y su comportamiento corresponden a los de una aplicación nativa [86]. Flutter ofrece también una base de código única, pero dibuja la interfaz con su propio motor de renderizado y usa el lenguaje Dart [87]. La razón para preferir React Native fue su continuidad con la plataforma web, que se describe a continuación.

Plataforma web. Se desarrolló con React, cuyo modelo declarativo describe cada vista en función del estado de los datos y la vuelve a dibujar cuando dicho estado cambia [91]. Dicho modelo corresponde a lo que exige RNF02: cuando cambia la ocupación de un espacio o se registra un ingreso, la grilla de estacionamientos y el último ingreso se actualizan sin recargar la página. En el prototipo, el estado se consulta a los servicios centrales cada 5 s, en lugar de recibirse por un canal persistente como WebSocket [88]. Angular y Vue ofrecen capacidades equivalentes [89, 90], pero habrían supuesto un modelo de componentes distinto del de la aplicación móvil.

La elección conjunta de React y React Native permitió, además, escribir ambas interfaces en TypeScript, que agrega tipos estáticos a JavaScript [101]. Con ello, los datos que entregan los servicios centrales, como una reserva o el estado de un estacionamiento, pueden definirse como tipos comunes a ambas interfaces, y una discrepancia entre lo que la API entrega y lo que una vista espera se detecta al compilar, antes de llegar al usuario.

La Tabla 5.4 resume las elecciones del módulo.

Tabla 5.4: Alternativas y tecnologías elegidas para las interfaces de usuario

Tipo de tecnología	Alternativas consideradas	Elección
Aplicación móvil	Desarrollo nativo, React Native, Flutter	React Native con TypeScript
Plataforma web	Angular, Vue, React	React con TypeScript

5.1.2.4. Servicios Centrales

Las tecnologías de este módulo debían resolver el enrutamiento, la validación y la autenticación sin implementarlos desde cero, mantener la integridad de las relaciones entre reservas, patentes, unidades y espacios (RA09), y quedar accesibles para todos los componentes de ResiPark (RA06). Sus elecciones son las siguientes:

Framework para la API. Las tres alternativas se compararon según los aspectos que exige RA09 (enrutamiento, validación de los datos y autenticación), la generación

de la documentación de la API, que facilita integrar componentes desarrollados por separado, la atención de solicitudes concurrentes, y el lenguaje, que determina si el servidor comparte bibliotecas con el orquestador y el servicio de reconocimiento, escritos en Python (Tabla 5.5).

Tabla 5.5: Comparación de los frameworks para la API. Fuente: [92], [93], [102] y [94]

Aspecto	Express	Django	FastAPI
Lenguaje	JavaScript (Node.js)	Python	Python
Enrutamiento	Incluido	Incluido	Incluido
Validación de datos	Mediante bibliotecas externas	Mediante formularios o serializadores de Django REST framework	Incluida, a partir de anotaciones de tipo
Autenticación	Mediante bibliotecas externas	Incluida, por sesiones; por tokens con Django REST framework	Utilidades incluidas para OAuth2 y tokens JWT
Documentación de la API	Mediante bibliotecas externas	Mediante extensiones	Generada de forma automática (OpenAPI)
Solicitudes concurrentes	Modelo asíncrono de Node.js	Vistas asíncronas desde la versión 3.1	Soporte asíncrono nativo
Componentes adicionales	No incluye	Mapeo objeto-relacional y panel de administración	No incluye

FastAPI es la única de las tres que incluye la validación de los datos y la documentación de la API sin componentes adicionales. Valida cada solicitud contra un modelo de datos tipado antes de procesarla, de modo que un mensaje con un formato incorrecto se rechaza antes de llegar a la base de datos, y atiende solicitudes en paralelo, lo que permite responder a la vez al orquestador, al receptor y a las dos interfaces sin que una consulta lenta retrase a las demás [94]. Django ofrece más componentes integrados, como el mapeo objeto-relacional y el panel de administración, pero ResiPark requería solo una API, y su validación y su documentación dependen de extensiones. Express, por su parte, habría introducido un segundo lenguaje en el servidor. FastAPI, en cambio, usa Python, el mismo lenguaje del orquestador y del servicio de reconocimiento, que también se expone como una API en FastAPI. Para el acceso a la base de datos se empleó SQLAlchemy.

Base de datos. Se eligió PostgreSQL, alojado en Supabase. SQLite se descartó porque

su documentación lo desaconseja cuando varios clientes escriben de forma concurrente a través de la red [95], que es el caso del orquestador, el receptor y las interfaces. Entre PostgreSQL y MySQL, ambos motores relacionales con transacciones y claves foráneas [97, 96], la diferencia no estuvo en el motor, sino en el servicio que lo aloja. Supabase es una plataforma de código abierto que ofrece una base de datos PostgreSQL gestionada junto con funcionalidades que ResiPark requiere, como la autenticación de usuarios, una API generada a partir de las tablas y la suscripción a cambios en tiempo real [98], y cuenta con un plan gratuito suficiente para un prototipo [103]. Con MySQL, en cambio, habría sido necesario administrar un servidor propio o contratar un servicio gestionado, y resolver la autenticación por separado.

Despliegue del servidor central. El despliegue combina dos de las alternativas. La base de datos se aloja en Supabase, que la mantiene accesible por internet sin administrar un servidor propio [98]. Firebase, el servicio equivalente de Google, se descartó porque su base de datos no es relacional [100]. Las APIs en FastAPI, en cambio, se ejecutan con el servidor Uvicorn en un computador local, lo que simplificó su desarrollo y depuración durante las pruebas.

La Tabla 5.6 resume las elecciones del módulo.

Tabla 5.6: Alternativas y tecnologías elegidas para los servicios centrales

Tipo de tecnología	Alternativas consideradas	Elección
Framework para la API	Express, Django, FastAPI	FastAPI, con SQLAlchemy como capa de acceso a los datos
Base de datos	SQLite, MySQL, PostgreSQL	PostgreSQL en Supabase
Despliegue	Servidor en el condominio, máquina virtual en la nube, backend como servicio	APIs en un computador local y base de datos en Supabase

La Figura 5.1 reúne las tecnologías elegidas para cada módulo y los protocolos por los que se comunican. Las relaciones entre módulos se mantienen respecto del diseño: M1 y M2 se comunican con M4 mediante solicitudes HTTPS, y las dos interfaces de M3 consumen la API REST de M4. La única relación que no figura en el diseño es la imagen en vivo que muestra la plataforma web, que proviene de una segunda cámara IP, distinta de la que usa el reconocimiento de patentes.

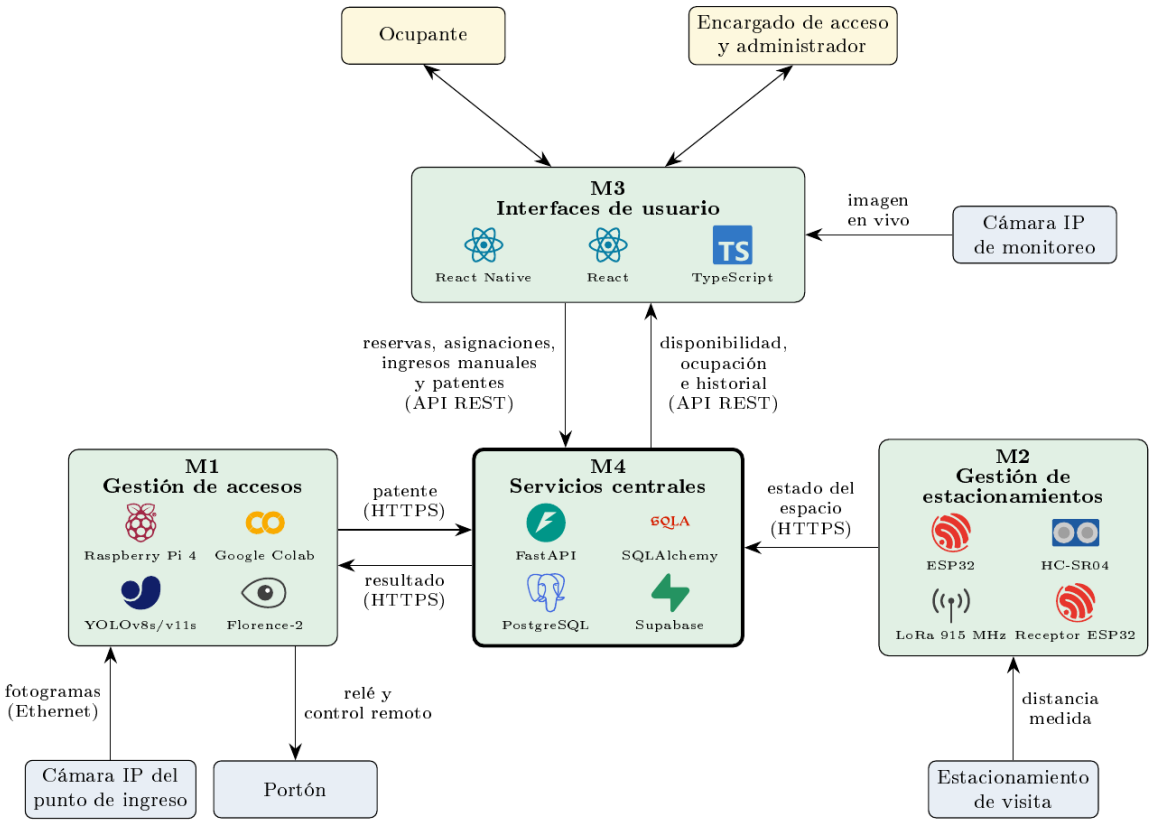


Figura 5.1: Módulos del prototipo de ResiPark, tecnologías que los implementan y relaciones entre ellos

5.1.3. Implementación del Prototipo

Los componentes del prototipo se distribuyen entre la infraestructura local, instalada en el condominio, y la nube (Véase en la Figura 5.2). La infraestructura local se divide a su vez en tres grupos, según el lugar donde se instala cada componente, de modo que el recorrido completo comprende cinco partes:

- **Estacionamientos de visita**. Cada estacionamiento instrumentado cuenta con un nodo sensor, compuesto por un microcontrolador ESP32 y un sensor ultrasónico, que transmite el estado del espacio por radio LoRa a un receptor, basado también en un ESP32.
- **Punto de ingreso**. Una cámara IP capta los vehículos que se detienen frente al portón y entrega los fotogramas por Ethernet a una Raspberry Pi 4, que ejecuta el orquestador. La Raspberry Pi acciona un relé conectado a un control remoto del portón, de modo que la orden de apertura llega al portón por la misma vía que usan los ocupantes. Una segunda cámara IP, conectada por Wi-Fi, entrega la imagen en vivo que muestra la plataforma web.

- **Red local**. Un router con punto de acceso inalámbrico conecta a internet al receptor de los sensores, por Wi-Fi con cifrado TLS, a la Raspberry Pi, por Ethernet o Wi-Fi, y al computador que ejecuta las APIs de los servicios centrales.
- **Nube**. La base de datos se aloja en Supabase. El servicio de reconocimiento se ejecuta en Google Colab y se expone a internet mediante un túnel de Cloudflare.
- **Usuarios**. El ocupante accede a ResiPark con una aplicación móvil, y el encargado de acceso y el administrador, con una plataforma web. Ambas interfaces se comunican con los servicios centrales mediante una API REST.

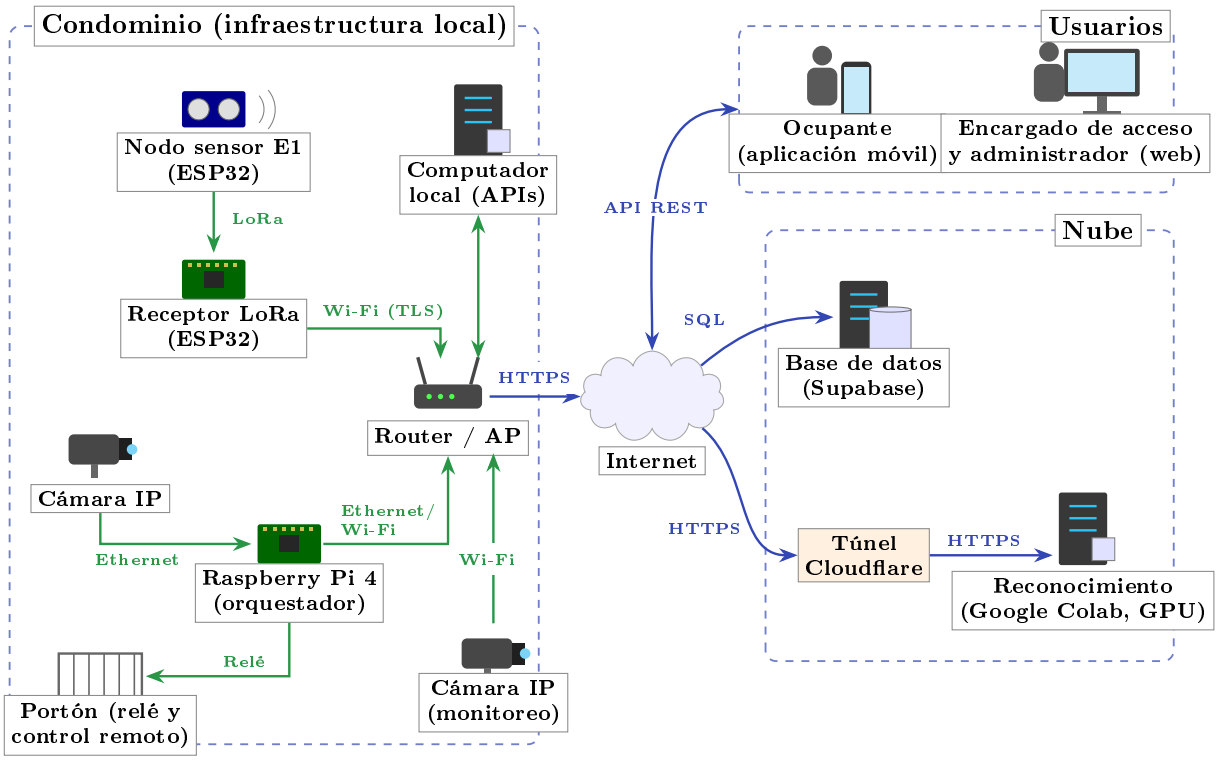


Figura 5.2: Diagrama de red del prototipo de ResiPark

En el punto de ingreso, la cámara se instaló en la parte superior de la reja contigua al portón, y la Raspberry Pi con el relé, en una caja estanca ubicada junto al portón (Véase en la Figura 5.3). En el estacionamiento E1, el nodo sensor se fijó a un árbol al costado del espacio, como se detalla en la implementación del módulo de gestión de estacionamientos de visita.



Figura 5.3: Punto de ingreso del condominio del caso de estudio, con la ubicación de la cámara y del relé

Las secciones siguientes describen cada módulo con un mismo orden: qué se construyó y qué resultados se obtuvieron. Las tecnologías empleadas y las razones de su elección se presentaron en el stack tecnológico.

5.2. Gestión de Accesos Vehiculares

El módulo de gestión de accesos vehiculares resuelve la identificación de la patente y la acción sobre el portón. En el prototipo se divide en dos componentes que se ejecutan en lugares distintos: el orquestador, instalado en el punto de ingreso, y el servicio de reconocimiento, alojado en la nube. A continuación se describe cada uno y, al final, los resultados obtenidos por el módulo.

5.2.1. Orquestador de Borde

El orquestador se ejecuta en una Raspberry Pi 4 instalada junto al portón. Como el reconocimiento se realiza en la nube, su trabajo se limita a capturar fotogramas, coordinar las solicitudes y accionar el portón. Para cada vehículo que se presenta en el punto de ingreso, el orquestador sigue la secuencia siguiente:

1. De los 10 fotogramas por segundo que entrega la cámara, toma uno de cada cinco, es decir, dos por segundo, lo que limita el número de solicitudes enviadas al servicio de reconocimiento.

2. Envía cada fotograma tomado al servicio de reconocimiento mediante una solicitud HTTPS y recibe la patente transcrita.

3. Compara cada patente recibida con las anteriores. Solo cuando la misma patente se ha transcrito en cinco fotogramas consecutivos, solicita a los servicios centrales su verificación.

4. Si la verificación es positiva, solicita el registro del ingreso y, una vez confirmado, acciona el relé.

5. Si la verificación es negativa, descarta la detección y la consigna en el registro local del orquestador.

La exigencia de cinco lecturas consecutivas responde a dos condiciones que se contraponen. Por una parte, una transcripción errónea que coincida con una patente autorizada no debe bastar para abrir el portón: una lectura aislada no se verifica, y basta que un fotograma entregue una patente distinta para que la cuenta se reinicie. Por otra parte, la espera del conductor frente al portón no debe alargarse, como exige el requisito de tiempo de decisión (RNF01). A razón de dos fotogramas por segundo, cinco lecturas equivalen a 2,5 s de video, a los que se suman el envío de cada fotograma y su procesamiento en el servicio de reconocimiento. El número de lecturas se fijó con dicho criterio y no se calibró con una medición de la tasa de error de la transcripción.

El relé está conectado a los contactos del botón de un control remoto del portón, de modo que cerrar el relé equivale a presionar dicho botón (Véase en la Figura 5.4). La integración no modifica el portón ni su receptor, y los ocupantes conservan sus controles remotos. Así, una falla del orquestador o de la conexión no impide abrir el portón de la forma habitual, como exige el requisito de continuidad ante fallas (RNF06).

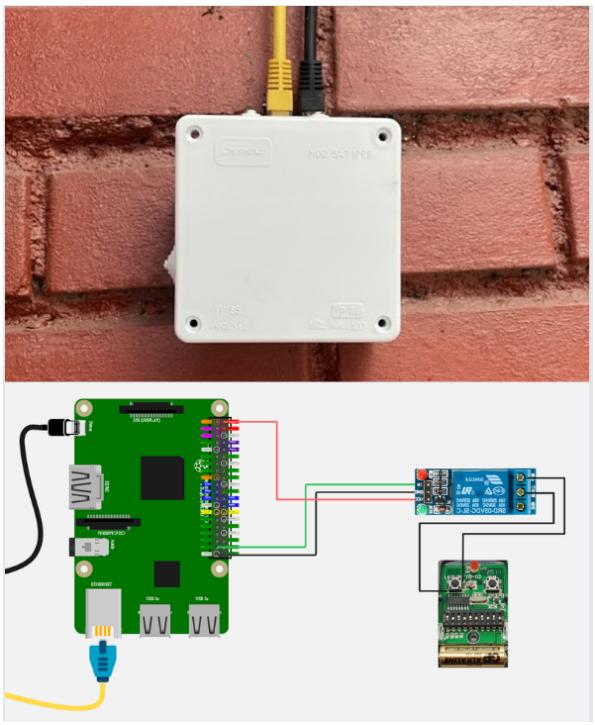


Figura 5.4: Caja estanca con la Raspberry Pi 4 instalada en el punto de ingreso (arriba) y conexión entre la Raspberry Pi, el relé y el control remoto del portón (abajo)

5.2.2. Servicio de Reconocimiento

El servicio de reconocimiento recibe un fotograma y entrega la patente transcrita. Se implementó como una API en FastAPI que, al iniciarse, carga en memoria los tres modelos que emplea: dos detectores de objetos de la familia YOLO y un modelo de visión y lenguaje para transcribir los caracteres. Sobre cada fotograma aplica cinco pasos:

1. **Zona de interés**. Se delimita un rectángulo que cubre el 80 % central del ancho del fotograma y la franja entre el 40 % y el 90 % de su altura, que corresponde al área donde se detienen los vehículos frente a la cámara.

2. **Detección del vehículo**. El modelo YOLOv8s [67] localiza los vehículos del fotograma, y se conservan solo aquellos cuya caja delimitadora se superpone con la zona de interés en un área mínima configurable. Así se descartan los vehículos que circulan al fondo de la escena.

3. **Detección de la patente**. Sobre el recorte de cada vehículo conservado, el modelo YOLOv11s [68] localiza la patente. Se toma la detección de mayor confianza y se amplía el recorte en un 8 % por lado, para no cortar caracteres en el borde.

4. **Transcripción**. El recorte de la patente se procesa con Florence-2 [72], un modelo de visión y lenguaje que, entre otras tareas, transcribe el texto presente en una imagen.

5. **Validación del texto**. El texto transcrito se convierte a mayúsculas, se le quitan los espacios y se acepta solo si tiene entre 5 y 8 caracteres alfanuméricos, con al menos una letra y un dígito. Los textos que no cumplen la condición se descartan.

El servicio responde con la patente transcrita y con la confianza de cada detección. Las razones para emplear dos versiones de YOLO y Florence-2 se presentaron en el stack tecnológico (Sección 5.1.2.1).

Ambos detectores se entrenaron durante 50 épocas con conjuntos públicos de Roboflow Universe. El detector de vehículos usó un conjunto de 9.689 imágenes [104] y el de patentes, uno de 10.125 imágenes [105]. En ambos casos, el 70 % de las imágenes se destinó al entrenamiento, el 20 % a la validación y el 10 % a la prueba.

El servicio se ejecuta en Google Colab y se expone mediante un túnel de Cloudflare, que le asigna una dirección accesible desde el orquestador sin requerir una dirección IP pública fija.

5.2.3. Resultados

Los resultados del módulo se obtuvieron en tres niveles: el desempeño de cada detector sobre su conjunto de validación, la transcripción de patentes durante las pruebas en terreno y el accionamiento del portón. La Tabla 5.7 resume el primero de ellos.

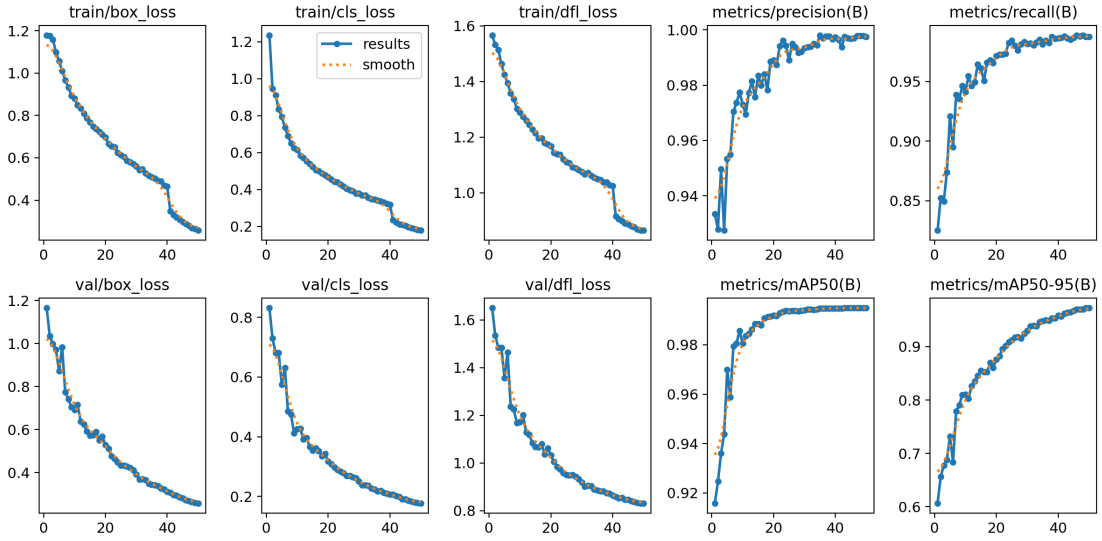
Tabla 5.7: Desempeño de los detectores sobre sus conjuntos de validación

Detector	Precisión	Recall	mAP50	mAP50-95
Vehículo (YOLOv8s)	0,997	0,988	0,995	0,973
Patente (YOLOv11s)	0,989	0,948	0,977	0,716

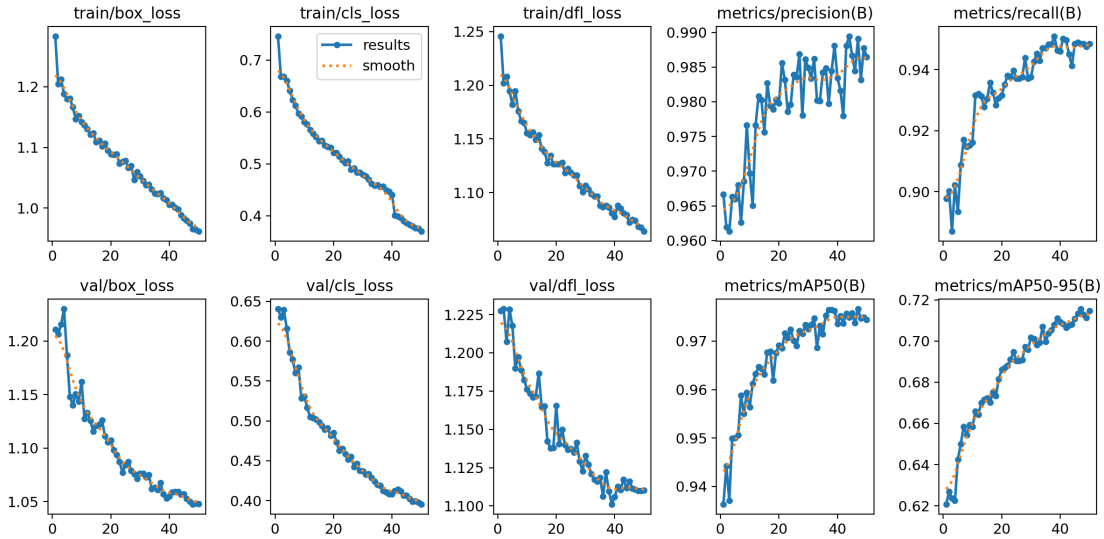
Ambos detectores superan 0,97 en precisión y en mAP50. La diferencia aparece en el mAP50-95, que exige una coincidencia geométrica más estricta entre la caja detectada y la caja etiquetada: el detector de patentes baja a 0,716. La caída es consistente con el menor tamaño de la patente dentro del fotograma, donde un error de pocos píxeles representa una fracción mayor del objeto. Estas métricas se calcularon sobre los conjuntos de validación de Roboflow, compuestos por imágenes de otros lugares y tomadas con otras cámaras, y no sobre imágenes del punto de ingreso del caso de estudio. Por lo tanto, no equivalen al desempeño del prototipo en dicho lugar.

La Figura 5.5 muestra la evolución del entrenamiento de ambos detectores. En los dos casos, las pérdidas sobre el conjunto de validación descienden junto con las de

entrenamiento durante las 50 épocas, sin el aumento de la pérdida de validación que indicaría un sobreajuste. El mAP50 del detector de vehículos se estabiliza cerca de la época 20, mientras que el mAP50-95 del detector de patentes sigue aumentando en la última época, por lo que un entrenamiento más largo podría mejorar la precisión geométrica de sus cajas.



(a) Detector de vehículos (YOLOv8s)

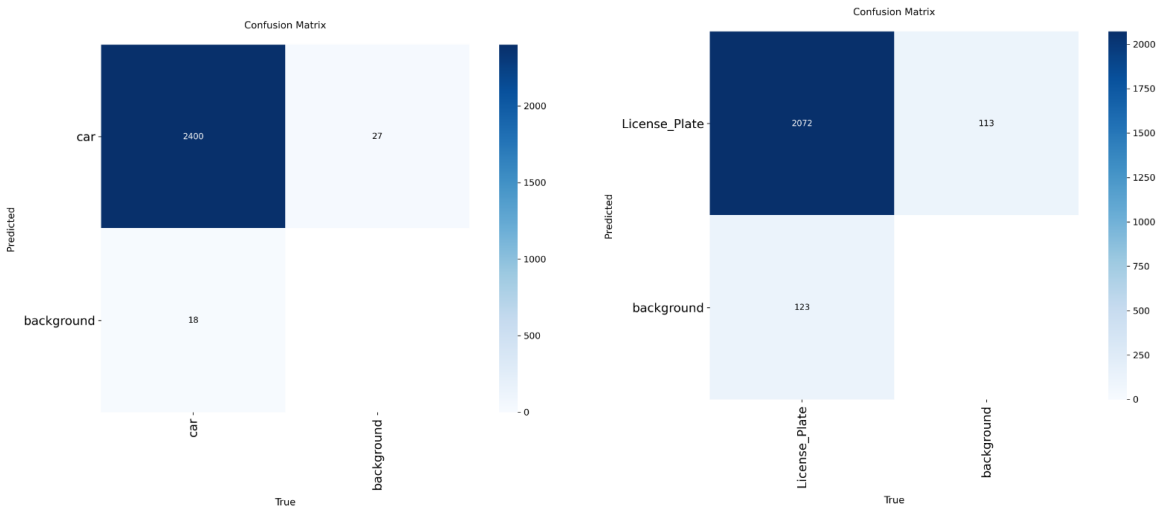


(b) Detector de patentes (YOLOv11s)

Figura 5.5: Evolución de las pérdidas de entrenamiento y validación y de las métricas de validación durante las 50 épocas de entrenamiento de cada detector

Las matrices de confusión (Véase en la Figura 5.6) detallan los aciertos y errores de cada detector sobre su conjunto de validación. El detector de vehículos localizó 2.400 de las 2.418 instancias etiquetadas y produjo 27 detecciones sobre el fondo de la escena.

El detector de patentes localizó 2.072 de las 2.195 patentes etiquetadas, omitió 123 y produjo 113 detecciones sobre el fondo. Ambos tipos de error tienen consecuencias distintas en el punto de ingreso: una patente omitida retrasa la verificación, y una detección sobre el fondo se descarta si el texto transcrito no supera la validación.



(a) Detector de vehículos (YOLOv8s) **(b)** Detector de patentes (YOLOv11s)

Figura 5.6: Matrices de confusión de los detectores sobre sus conjuntos de validación

La Figura 5.7 muestra la salida del servicio sobre un video de prueba: la zona de interés, el vehículo detectado dentro de ella, la patente localizada y el texto transcrito.

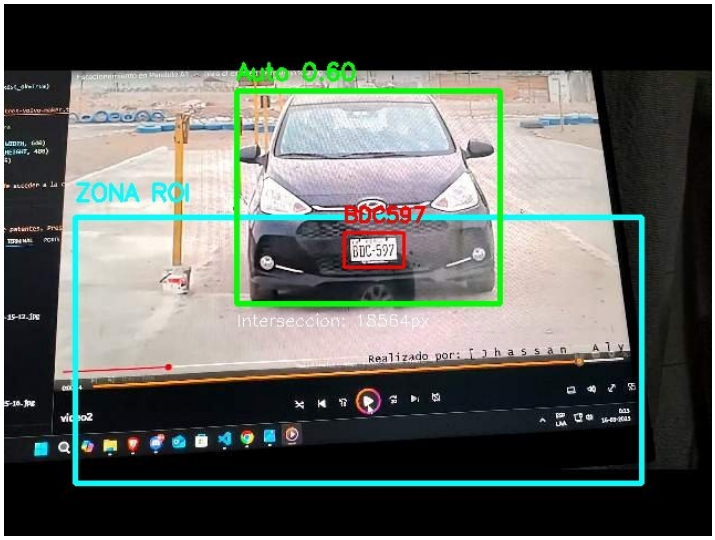


Figura 5.7: Salida del servicio de reconocimiento sobre un video de prueba, con la zona de interés, el vehículo detectado, la patente localizada y su transcripción

Para observar la transcripción y la regla de cinco lecturas en el punto de ingreso, se

registraron las respuestas del servicio de reconocimiento durante la prueba in situ del 9 de noviembre de 2025, con la configuración final del orquestador, mientras un vehículo con la patente autorizada BYPF45 se presentaba en el punto de ingreso (Tabla 5.8). Las respuestas llegaron a razón de dos por segundo, de acuerdo con la frecuencia de envío de fotogramas.

Tabla 5.8: Respuestas del servicio de reconocimiento durante la prueba in situ con el vehículo de patente BYPF45. El guion indica que el texto transcrito no superó la validación, y las patentes en negrita son las cinco lecturas consecutivas que llevaron a la verificación

Hora	Confianza del vehículo	Patente transcrita	Confianza de la patente
18:28:58	0,712	–	0,786
18:28:58	0,745	–	0,791
18:28:59	0,834	8YPF4S	0,803
18:28:59	0,768	–	0,798
18:29:00	0,876	BYP446	0,812
18:29:00	0,745	–	0,805
18:29:01	0,823	BTPF4S	0,817
18:29:01	0,889	BYPF45	0,809
18:29:02	0,916	BYPF4S	0,821
18:29:02	0,931	**BYPF45**	0,814
18:29:03	0,902	**BYPF45**	0,826
18:29:03	0,918	**BYPF45**	0,819
18:29:04	0,895	**BYPF45**	0,831
18:29:04	0,927	**BYPF45**	0,823
18:29:05	0,909	BYPF45	0,835
18:29:05	0,941	8YPF45	0,828
18:29:06	0,884	–	0,839
18:29:06	0,719	–	0,832
18:29:07	0,732	–	0,841
18:29:07	0,698	–	0,836
18:29:08	0,681	–	0,844

De las 21 respuestas, 9 no produjeron una patente, porque el texto transcrito no superó la validación, y 12 sí la produjeron. De estas 12, siete corresponden a la patente correcta y cinco contienen un error: 8YPF4S, BYP446, BTPF4S, BYPF4S y 8YPF45. Los errores reemplazan caracteres de forma similar, como la B por un 8, el 5 por una S o la Y por una T, y se concentran en los extremos de la secuencia: tres de las cuatro primeras lecturas son erróneas, al igual que la última. Entre ambos extremos, desde la segunda lectura de las 18:29:01 hasta la primera de las 18:29:05, la transcripción fue correcta en siete de ocho lecturas. Los extremos corresponden a los momentos en que el vehículo se acerca y se aleja de la cámara, lo que indica que la transcripción es sensible a la distancia y al movimiento del vehículo.

La secuencia muestra también el efecto de la regla de cinco lecturas consecutivas. La primera lectura correcta, a las 18:29:01, no bastó para verificar la patente, porque la siguiente, BYPF4S, reinició la cuenta. La cuenta volvió a comenzar a las 18:29:02 y se completó a las 18:29:04, unos 6 s después de la primera respuesta del servicio. Ninguna de las lecturas erróneas se repitió de forma consecutiva, por lo que ninguna habría llegado a verificarse aunque hubiese coincidido con otra patente autorizada. A cambio, la regla postergó la decisión en unos 3 s respecto de la primera lectura correcta. El historial de la plataforma web consigna el ingreso de BYPF45 a las 18:29:07 (Véase en la Figura 5.12), unos 3 s después de la quinta lectura; dicho intervalo comprende la verificación de la patente y el registro del ingreso, tras el cual el orquestador acciona el relé. En total, entre la primera respuesta del servicio y el registro del ingreso transcurrieron unos 9 s.

Por último, el accionamiento mediante el relé se probó en el portón del caso de estudio, que se abrió con la señal emitida por el orquestador.

5.3. Gestión de Estacionamientos de Visita

El módulo de gestión de estacionamientos de visita resuelve la identificación de la ocupación. En el prototipo se compone de nodos sensores, uno por espacio, y de un receptor que reúne sus mensajes y los envía a los servicios centrales. A continuación se describen ambos componentes y los resultados obtenidos por el módulo.

5.3.1. Nodos Sensores y Receptor

Cada nodo sensor combina un microcontrolador ESP32, un sensor ultrasónico HC-SR04, un módulo de radio LoRa SX1276/78 y un LED que indica el estado del espacio (Véase en la Figura 5.8). El nodo mide la distancia al objeto más cercano cada 150 ms y considera ocupado el espacio cuando dicha distancia es menor que 60 cm. Solo transmite cuando el estado cambia, lo que reduce el número de mensajes enviados.

Como la literatura revisada asocia el sensor ultrasónico a un montaje en el techo de espacios interiores [47] y el estacionamiento de visita del caso de estudio es exterior, por lo que el nodo se montó en una carcasa fijada a un árbol al costado del espacio, con el sensor orientado de forma horizontal hacia el vehículo.

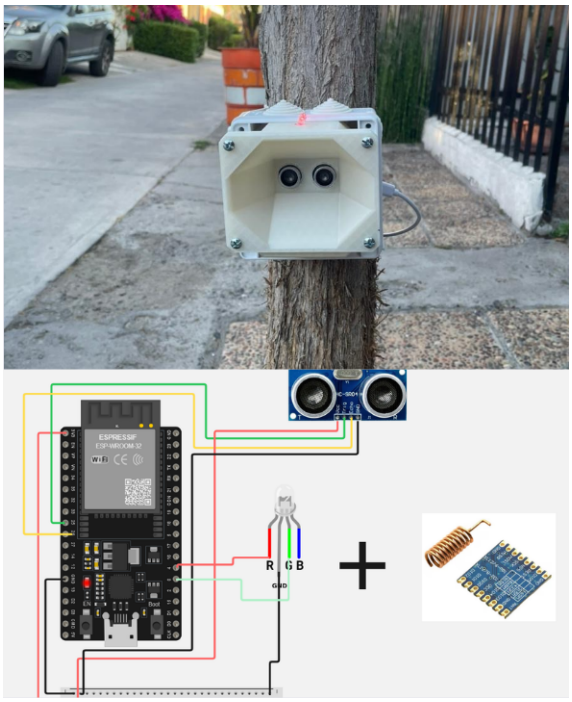


Figura 5.8: Nodo sensor instalado en el estacionamiento de visita del caso de estudio (arriba) y conexión entre el ESP32, el sensor ultrasónico, el LED y el módulo LoRa (abajo)

Los nodos se comunican con el receptor por LoRa en la banda de 915 MHz, mediante un enlace directo entre cada nodo y el receptor, sin la red de pasarelas que requiere LoRaWAN. El receptor es otro ESP32 con módulo LoRa. Cada mensaje que recibe contiene el identificador del nodo y el nuevo estado del espacio, y el receptor lo reenvía a los servicios centrales mediante una solicitud HTTPS a través de la red Wi-Fi del condominio. Los servicios centrales asocian el identificador de cada nodo a un estacionamiento de visita, por lo que agregar un espacio requiere instalar un nodo y registrar dicha asociación, sin modificar el receptor.

5.3.2. Resultados

Las pruebas del módulo verificaron primero cada componente por separado y luego el recorrido completo del estado, desde el sensor hasta la plataforma web. Sus resultados son los siguientes:

- **Lectura del sensor**. Antes de integrar la radio, se comprobó en la salida serial del ESP32 que el estado cambiaba al acercar y al alejar un objeto respecto del umbral de distancia.
- **Enlace LoRa**. Se enviaron mensajes de prueba desde un nodo al receptor a distintas distancias y con obstáculos intermedios, y se verificó su recepción. No se registraron valores de intensidad de la señal ni el alcance máximo del enlace.

- **Latencia**. Entre la detección de un objeto en el sensor y la actualización del estado en la plataforma web transcurrieron entre 2 y 5 s en condiciones normales de la red Wi-Fi. Como la plataforma web consulta el estado cada 5 s, el desfase observado por el encargado de acceso depende además del momento en que ocurre el cambio dentro de dicho intervalo.
- **Reconexión**. Se interrumpió la conexión Wi-Fi del receptor y se verificó que, al restablecerse, el receptor retomara el envío de los cambios de estado sin pérdida de información.
- **Varios nodos**. Con varios nodos activos, cada uno con su propio identificador, el estado de cada espacio se mantuvo independiente en la base de datos. Esta prueba se realizó fuera del caso de estudio, donde se instaló un solo nodo.

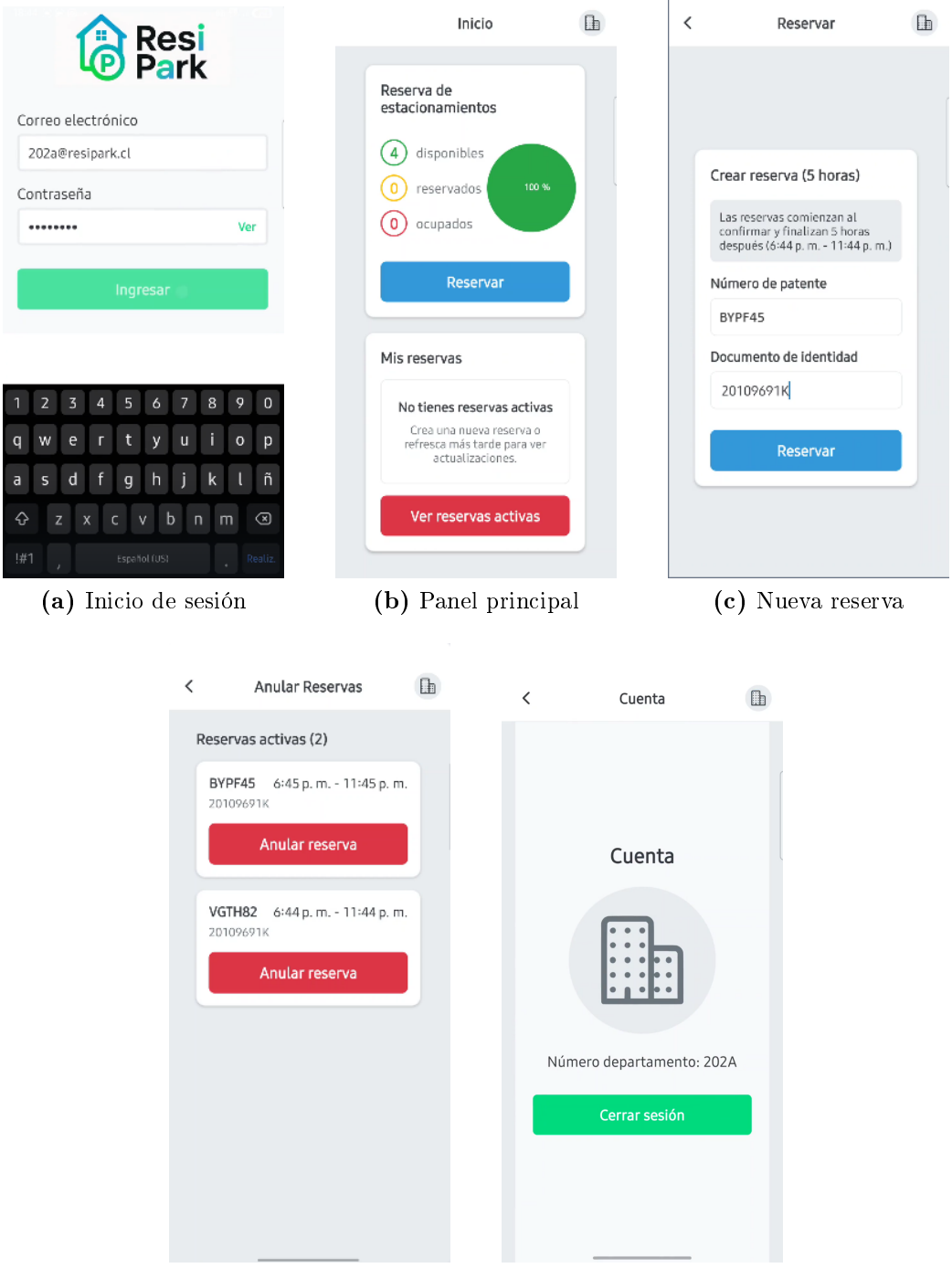
5.4. Interfaces de Usuario

El módulo de interfaces de usuario reúne las operaciones que quedan a cargo de personas: la autorización previa, que el ocupante ejecuta al crear una reserva, y la asignación de espacios y la decisión en las excepciones, que ejecuta el encargado de acceso. La aplicación móvil se desarrolló con React Native y la plataforma web con React, ambas en TypeScript, y las dos consumen la API REST de los servicios centrales.

5.4.1. Aplicación Móvil

La aplicación móvil implementa las vistas definidas en el diseño para el ocupante (Véase en la Figura 5.9). Sus vistas son las siguientes:

- **Inicio de sesión**. Solicita el correo electrónico y la contraseña del ocupante.
- **Panel principal**. Muestra el número de estacionamientos de visita disponibles, reservados y ocupados, junto con un gráfico de su proporción, un botón para crear una reserva y un resumen de las reservas activas del ocupante.
- **Nueva reserva**. Solicita la patente del vehículo y el documento de identidad del visitante, e informa la duración fija de la reserva, de cinco horas a partir de su confirmación. No permite elegir un espacio, pues la asignación corresponde al encargado de acceso.
- **Reservas activas**. Lista las reservas vigentes del ocupante, con la patente y el horario de cada una, y permite anularlas.
- **Perfil**. Muestra la unidad a la que pertenece el ocupante y permite cerrar la sesión.



(a) Inicio de sesión **(b)** Panel principal **(c)** Nueva reserva

(d) Reservas activas **(e)** Perfil

Figura 5.9: Vistas implementadas de la aplicación móvil

5.4.2. Plataforma Web

La plataforma web se organiza en tres vistas, accesibles desde un menú lateral: inicio, historial y patentes. La vista de inicio reúne en una sola pantalla lo que el diseño separaba en las vistas de estacionamientos y de portón, de modo que el encargado de acceso sigue el punto de ingreso y la ocupación sin cambiar de vista. Las tres vistas son las siguientes:

- **Inicio**. Muestra la imagen en vivo del punto de ingreso, que proviene de una segunda cámara IP, el último ingreso registrado y una grilla con el estado de cada estacionamiento de visita (Véase en la Figura 5.10). Cada estado se distingue por un color: verde para un espacio disponible, amarillo para uno asignado a una reserva, azul para uno ocupado con reserva y rojo para uno ocupado sin reserva. Bajo la grilla, tres pestañas reúnen las acciones del encargado de acceso (Véase en la Figura 5.11): agregar una visita, que registra de forma manual a un visitante con su patente, su documento de identidad y la unidad que lo recibe; asignar un estacionamiento a cada reserva pendiente, que se lista con su horario; y administrar las reservas, que permite quitar una asignación.
- **Historial**. Lista los ingresos registrados, con la patente, si corresponde a un ocupante o a un visitante, la unidad asociada, la hora de entrada y la de salida, y permite buscarlos por patente o por unidad.
- **Patentes**. Lista las patentes asociadas a cada unidad y permite editarlas (Véase en la Figura 5.12).

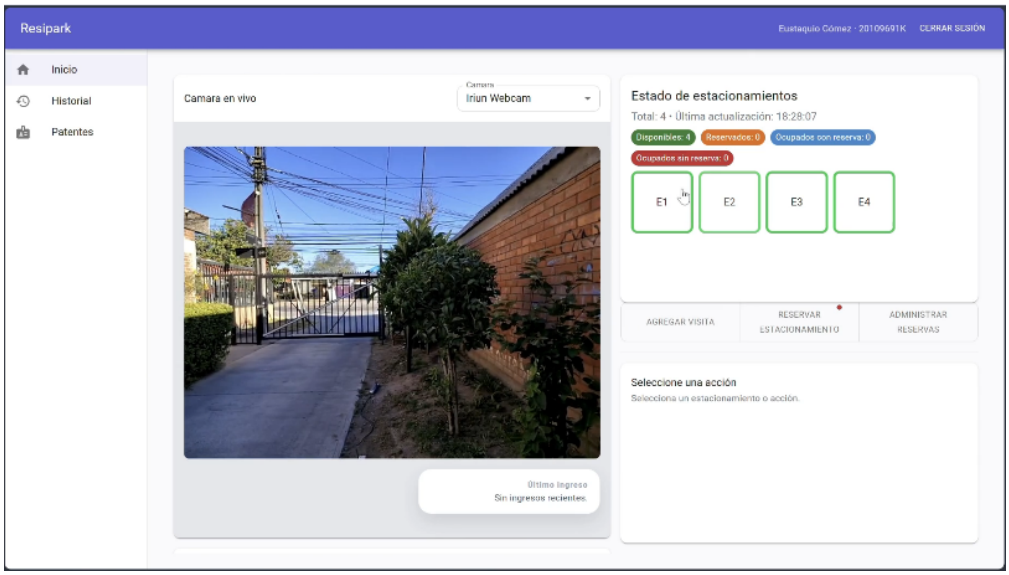
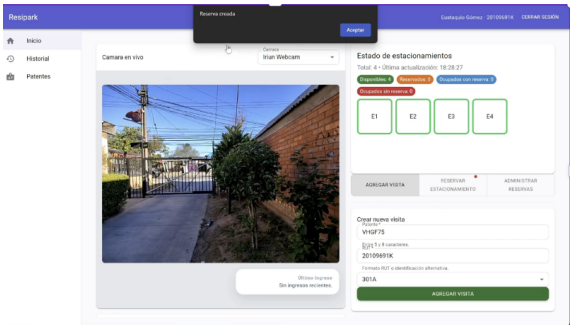
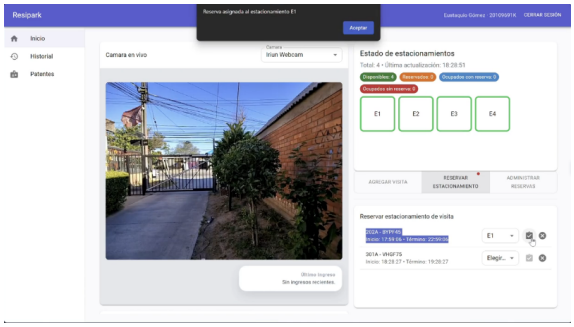


Figura 5.10: Vista de inicio de la plataforma web, con la cámara del punto de ingreso y el estado de los estacionamientos de visita

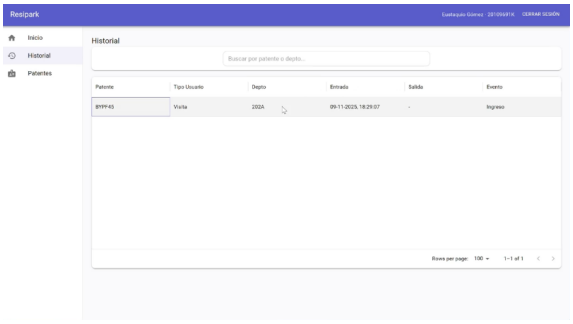


(a) Registro manual de una visita

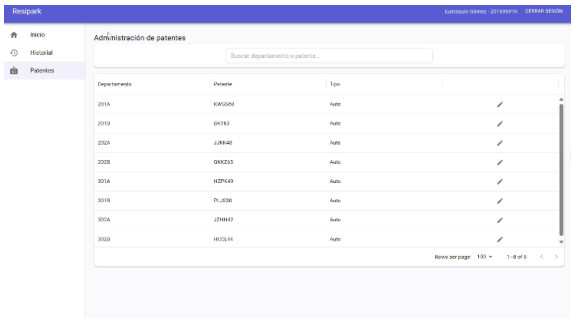


(b) Asignación de un estacionamiento a una reserva

Figura 5.11: Acciones del encargado de acceso en la vista de inicio de la plataforma web



(a) Historial de ingresos



(b) Patentes por unidad

Figura 5.12: Vistas de historial y de patentes de la plataforma web

5.4.3. Resultados

Sobre ambas interfaces se verificaron cuatro aspectos:

- **Consumo de la API**. Las respuestas de cada consulta a los servicios centrales se presentaron en las vistas sin errores y en el formato esperado.
- **Actualización del estado**. La grilla de estacionamientos de la plataforma web se actualizó sin recargar la página.
- **Sesiones**. El inicio y el cierre de sesión funcionaron con tokens JWT, incluida la expiración de los tokens y su renovación automática.
- **Compatibilidad**. La aplicación móvil se desplegó en Android y en iOS con las mismas vistas y la misma navegación, y la plataforma web se probó en navegadores basados en Chromium, en Firefox y en Safari.

Las interfaces no se evaluaron con encargados de acceso ni con administradores de condominios, por lo que no se cuenta con evidencia sobre su facilidad de uso para dichos usuarios.

5.5. Servicios Centrales

El módulo de servicios centrales resuelve la verificación y el registro, y es el que vincula en un mismo registro la reserva, la patente, el espacio asignado y la duración de la ocupación. Se implementó como tres APIs REST en FastAPI, una para la plataforma web, otra para la aplicación móvil y una tercera para la verificación y el registro de los ingresos, con SQLAlchemy como capa de acceso a los datos. Las APIs se ejecutan con Uvicorn en un computador local, y los datos se almacenan en una base de datos PostgreSQL administrada por Supabase.

5.5.1. Modelo de Datos

La base de datos reúne seis grupos de información, que corresponden a los elementos que intervienen en los dos procesos:

- **Usuarios y unidades**. Las cuentas de los ocupantes, del encargado de acceso y del administrador, y la unidad a la que pertenece cada ocupante.
- **Vehículos de los ocupantes**. Las patentes registradas por el administrador para cada unidad.
- **Reservas**. La patente y el documento de identidad del visitante, la unidad que lo autoriza y la hora de inicio y de término de la reserva.
- **Asignaciones**. La relación entre cada reserva y el estacionamiento de visita que le asigna el encargado de acceso.
- **Estado de los estacionamientos**. La relación entre cada nodo sensor y su estacionamiento, y el estado de cada espacio.
- **Eventos de acceso**. Cada ingreso registrado, con su fecha y su hora, asociado al vehículo del ocupante o a la reserva que lo autorizó.

La reserva es el elemento que une a los demás. Al crearla, el ocupante deja constancia de la autorización; al asignarle un espacio, la reserva queda asociada a un estacionamiento de visita; al ingresar el vehículo, el evento de acceso se asocia a la reserva; y al cambiar el estado del espacio, la ocupación se contrasta con la reserva asignada. A partir de una reserva es posible establecer quién autorizó la visita, qué vehículo ingresó y a qué hora, y qué espacio se le asignó.

5.5.2. Verificación y Registro

La verificación de una patente sigue dos rutas, según el tipo de autorización que se busca:

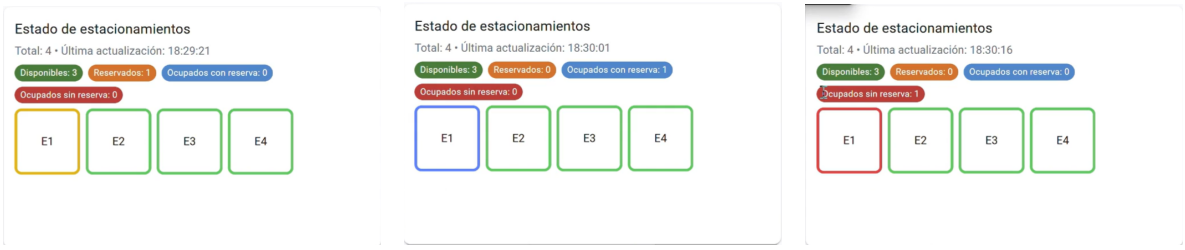
1. **Vehículo de un ocupante**. Se busca la patente entre los vehículos registrados de las unidades. Si se encuentra, el ingreso se autoriza y el evento de acceso se asocia al vehículo.
2. **Visitante con reserva**. Si la patente no pertenece a un ocupante, se busca una reserva vigente con dicha patente, es decir, una cuya hora de inicio sea anterior y cuya hora de término sea posterior al momento del ingreso. Si se encuentra, el ingreso se autoriza y el evento de acceso se asocia a la reserva.

La separación en dos rutas permite aplicar a cada caso su propia regla sin que el orquestador deba saber de antemano a qué tipo de vehículo corresponde la patente. Si ninguna ruta encuentra una autorización, la verificación resulta negativa: el portón no se abre y la decisión queda a cargo del encargado de acceso, que sigue el punto de ingreso en la imagen de la cámara de la plataforma web. Si decide permitir el ingreso, abre el portón con el control remoto y registra la visita de forma manual.

Además de los ingresos, los servicios centrales procesan los cambios de ocupación. Cada cambio de estado que llega desde el receptor se contrasta con las asignaciones vigentes del espacio, y el resultado determina el estado que la plataforma web muestra. Un espacio asignado que el sensor detecta libre figura como reservado sin ocupar, y un espacio ocupado sin una asignación vigente figura como ocupado sin reserva. Si un visitante se estaciona en un espacio distinto del asignado, el espacio asignado aparece sin ocupar y el ocupado, sin reserva. La plataforma web no emite notificaciones: el resultado del contraste se comunica mediante el color de cada espacio y un contador por estado, que el encargado de acceso consulta en la vista de inicio.

5.5.3. Resultados

Se verificó el recorrido completo de un ingreso a través de los componentes del borde y de la nube: la captura en la cámara, el reconocimiento en Google Colab, la verificación de la patente y el registro del evento en Supabase, sin pérdida de información entre los componentes. Se comprobó también que el identificador de cada nodo sensor quedara asociado a su estacionamiento y que cada cambio de estado se reflejara en la base de datos. El contraste entre ocupación y asignación se observó en el estacionamiento E1 durante la prueba del 9 de noviembre de 2025, en el que el espacio pasó por tres estados (Véase en la Figura 5.13). Primero, con el espacio asignado a la reserva y aún libre, figuró como reservado. Luego, cuando el vehículo se estacionó y el sensor detectó la ocupación, pasó a ocupado con reserva. Por último, al quitar la asignación con el vehículo todavía estacionado, pasó a ocupado sin reserva.



(a) Reservado **(b)** Ocupado con reserva **(c)** Ocupado sin reserva

Figura 5.13: Estados del estacionamiento E1 en la plataforma web según el contraste entre su ocupación y su asignación

5.6. Verificación de Requisitos

Para cerrar la implementación, se contrasta el prototipo con los requisitos definidos en el diseño. Cada requisito se clasifica en una de cuatro categorías: *cumple*, cuando el prototipo implementa lo que el requisito exige y este capítulo presenta evidencia de ello; *parcial*, cuando lo implementa solo en parte o la evidencia no cubre todo lo exigido; *no verificado*, cuando no se realizaron pruebas que permitan evaluarlo; y *no implementado*, cuando el prototipo no incluye la funcionalidad (Tabla 5.9).

Tabla 5.9: Verificación de los requisitos en el prototipo

Requisito	Estado	Evidencia u observación
RF01 — Reconocimiento de patentes	Cumple	Servicio de reconocimiento (Sección 5.2.2), con errores de transcripción en terreno (Tabla 5.8).
RF02 — Verificación contra ocupantes y reservas	Cumple	Verificación en dos rutas (Sección 5.5.2).
RF03 — Apertura del portón	Cumple	Relé probado en el portón del caso de estudio.
RF04 — Registro de cada ingreso	Cumple	Se registran los ingresos autorizados, asociados al vehículo o a la reserva.
RF05 — Ingresos en tiempo real para el encargado	Cumple	La vista de inicio muestra el último ingreso (Véase en la Figura 5.10).
RF06 — Notificación de vehículos sin autorización	No implementado	La plataforma web no emite notificaciones. El encargado de acceso observa el punto de ingreso en la imagen de la cámara.

Requisito	Estado	Evidencia u observación
RF07 — Registro manual de ingresos	Cumple	La pestaña de agregar visita registra al visitante, la unidad que lo recibe y el encargado de acceso que realizó el ingreso.
RF08 — Creación de reservas	Cumple	Vista de nueva reserva, con duración fija de cinco horas (Véase en la Figura 5.9).
RF09 — Descuento de la disponibilidad	Cumple	El panel principal descuenta las reservas de los disponibles, sin asignarles un espacio.
RF10 — Asignación de espacios	Cumple	Pestaña de asignación de la plataforma web (Véase en la Figura 5.11).
RF11 — Detección de la ocupación	Cumple	Nodo sensor en el estacionamiento E1 (Sección 5.3.1).
RF12 — Contraste entre ocupación y asignación	Cumple	Indicadores por color y contadores por estado (Véase en la Figura 5.13).
RF13 — Historial de uso de los estacionamientos	Parcial	El estado de cada espacio se actualiza en la base de datos, pero el historial no es visible mediante la aplicación web.
RF14 — Alerta por exceso de duración	Parcial	La ocupación que excede la reserva se registra en la base de datos, pero no se genera una alerta en la plataforma web.
RF15 — Disponibilidad para el ocupante	Cumple	Panel principal de la aplicación móvil.
RF16 — Autenticación y roles	Parcial	Inicio de sesión en ambas interfaces. No se presenta la distinción entre las vistas del encargado de acceso y las del administrador.
RF17 — Recuperación de contraseña	No implementado	El prototipo no incluye la recuperación de contraseña.
RF18 — Gestión de usuarios y patentes	Parcial	Vista de patentes por unidad (Véase en la Figura 5.12). No se presenta la gestión de cuentas.
RF19 — Configuración de estacionamientos	No implementado	No se presenta una vista de configuración.

Requisito	Estado	Evidencia u observación
RNF01 — Tiempo de decisión en el ingreso	Cumple	Unos 9 s entre la primera respuesta del servicio y el registro del ingreso: 6 s hasta la quinta lectura consecutiva y 3 s de verificación y registro (Tabla 5.8). Una sola prueba.
RNF02 — Vigencia del estado de ocupación	Cumple	Actualización sin recarga, con 2 a 5 s entre sensor y plataforma web.
RNF03 — Condiciones de operación	No verificado	No se realizaron pruebas nocturnas.
RNF04 — Protección de datos personales	Parcial	Acceso restringido a usuarios autenticados; los datos del visitante se usan solo para verificar y registrar la visita. No se evaluó la conformidad con la Ley 21.719.
RNF05 — Seguridad de la información	Cumple	HTTPS en las comunicaciones con la nube, TLS en el receptor y almacenamiento cifrado de las contraseñas.
RNF06 — Continuidad ante fallas	Cumple	El portón conserva su control remoto y la visita puede registrarse de forma manual.
RNF07 — Compatibilidad	Cumple	Aplicación móvil en Android e iOS. Y la plataforma web en Chromium, Firefox y Safari.
RNF08 — Escalabilidad	Cumple	Varios nodos con identificadores independientes, probados fuera del caso de estudio.
RI01 — Aplicación móvil para ocupantes	Cumple	Sección 5.4.1.
RI02 — Plataforma web para el encargado de acceso y el administrador	Parcial	Vistas de inicio, historial y patentes. No se presentan las vistas de usuarios y configuración.
RI03 — Cámara y dispositivo de borde	Cumple	Cámara IP conectada por Ethernet a la Raspberry Pi.
RI04 — Dispositivo de borde y servicio de reconocimiento	Cumple	Solicitudes HTTPS a través del túnel de Cloudflare.

Requisito	Estado	Evidencia u observación
RI05 — Transmisión del estado de ocupación	Cumple	Enlace LoRa en la banda de 915 MHz entre el nodo y el receptor, probado a distintas distancias.
RI06 — Estado de ocupación y servicios centrales	Cumple	El receptor reenvía cada cambio mediante solicitudes HTTPS por la red Wi-Fi del condominio, con 2 a 5 s entre sensor y plataforma web.
RI07 — Aplicaciones de usuario y servicios centrales	Cumple	APIs REST consumidas por ambas interfaces.
RI08 — Dispositivo de borde y portón	Cumple	Relé conectado al control remoto del portón.
RA01 — Cámara del punto de ingreso	Parcial	Cámara IP conectada por Ethernet al dispositivo de borde. No se evaluó la captura nocturna.
RA02 — Dispositivo de borde	Cumple	Raspberry Pi 4 con un relé conectado al control remoto del portón.
RA03 — Detección en los estacionamientos de visita	Cumple	ESP32 con sensor ultrasónico y módulo LoRa en el estacionamiento E1.
RA04 — Conectividad	Cumple	Red Wi-Fi y Ethernet del condominio con acceso a internet, y enlace LoRa entre los nodos y el receptor.
RA05 — Cómputo para el reconocimiento	Cumple	Google Colab con aceleración por GPU, dentro del tiempo de RNF01.
RA06 — Servidor central	Cumple	APIs en un computador local y base de datos en Supabase.
RA07 — Sistemas operativos y firmware	Cumple	Raspberry Pi OS en la Raspberry Pi 4 y firmware desarrollado con Arduino en los ESP32.
RA08 — Visión por computador	Cumple	YOLOv8s y YOLOv11s para la detección, Florence-2 para la transcripción y OpenCV para la captura y el procesamiento de los fotogramas.
RA09 — Servicios centrales y base de datos	Cumple	API en FastAPI y base de datos relacional en Supabase.
RA10 — Aplicación móvil	Cumple	React Native, con una misma base de código para Android e iOS.

Requisito	Estado	Evidencia u observación
RA11 — Plataforma web	Cumple	React, con actualización sin recarga.

De los 46 requisitos, 35 se cumplen, 7 se cumplen de forma parcial, uno no se verificó y 3 no se implementaron. Se cumplen todos los que sostienen la distribución de operaciones: el reconocimiento, la verificación, la apertura del portón, el registro de los ingresos, la reserva, la asignación y el contraste entre ocupación y asignación. Los que no se cumplen por completo corresponden a información que la plataforma web no presenta (RF06, RF13 y RF14), a la gestión de cuentas y a funcionalidades del administrador (RF16, RF17, RF18, RF19 y RI02) y a condiciones que no se evaluaron (RNF03, RA01 y RNF04). El tiempo de decisión en el ingreso (RNF01) fue de unos 9 s en la prueba in situ.

Con todo, el número de requisitos cumplidos dice menos que el impacto de los que no lo están. Las funcionalidades del administrador se usan de forma esporádica y no intervienen en los procesos que ResiPark automatiza. La falta de avisos, en cambio, afecta el propósito de la solución: el encargado de acceso queda liberado de identificar, verificar y registrar, pero debe seguir observando la plataforma web para advertir las excepciones. Las condiciones no evaluadas, por su parte, no indican una falla, sino que acotan lo que las pruebas permiten afirmar. Dichas brechas, junto con las decisiones tomadas para construir el prototipo, se analizan a continuación.

5.7. Análisis Crítico y Limitaciones

El prototipo implementa los cuatro módulos del diseño y su integración, pero las decisiones tomadas para construirlo y las condiciones en que se probó acotan lo que sus resultados permiten afirmar. Las limitaciones se agrupan según su origen en cinco tipos, que se describen a continuación.

5.7.1. Infraestructura del Reconocimiento

El servicio de reconocimiento se ejecuta en Google Colab, un entorno de desarrollo que no garantiza disponibilidad continua ni una capacidad de procesamiento estable. Si la sesión de Colab se interrumpe o la conexión a internet del punto de ingreso falla, el reconocimiento se detiene y el ingreso vuelve a depender por completo del encargado de acceso, que conserva el control remoto y el registro manual (RNF06).

La misma dependencia condiciona el tiempo de decisión en el ingreso. En la prueba in situ transcurrieron unos 9 s entre la primera respuesta del servicio de reconocimiento y el registro del ingreso, pero dicho valor proviene de una sola prueba y de registros

con resolución de un segundo, por lo que indica un orden de magnitud y no un tiempo garantizado. Su piso lo fija la exigencia de cinco lecturas consecutivas, que en condiciones ideales equivale a 2,5 s de video; sobre dicho piso, el tiempo varía con la calidad y la velocidad de la conexión y con la capacidad de procesamiento disponible.

5.7.2. Reconocimiento de Patentes

Las métricas de los detectores se obtuvieron sobre conjuntos de imágenes ajenos al caso de estudio, y en terreno se observaron errores de transcripción sobre un mismo vehículo. La exigencia de cinco lecturas consecutivas convierte un error aislado en una espera más larga, pero no excluye un error sistemático: una patente no autorizada que difiera en un carácter de una autorizada podría transcribirse de la misma forma errónea en cinco fotogramas seguidos. Además, el número de lecturas se fijó por criterio, sin medir la tasa de error de la transcripción ni la de aperturas indebidas. Por otra parte, el funcionamiento con iluminación nocturna no se probó, y tampoco se evaluaron condiciones como la lluvia, los reflejos o la suciedad sobre la cámara o la patente.

5.7.3. Gestión de Estacionamientos de Visita

El sensor ultrasónico se montó de forma lateral en un espacio exterior, a diferencia del montaje en el techo de espacios interiores que la literatura revisada asocia a dicha tecnología [47], y su desempeño en dicho montaje no se midió frente a condiciones como la lluvia o los objetos que se interponen entre el sensor y el vehículo.

Un sensor que falla puede quedar fijo en un estado y reportar una ocupación incorrecta hasta que se reinicie. A ello se suma el desfase entre el estado físico y el mostrado, por el intervalo de consulta de 5 s de la plataforma web.

Por último, ResiPark contrasta la ocupación de cada espacio con su asignación, pero no identifica qué vehículo lo ocupa: si dos reservas tienen espacios asignados en el mismo horario y los visitantes los intercambian, ambos espacios figuran ocupados con reserva y el intercambio pasa inadvertido. La verificación de qué vehículo ocupa cada espacio sigue a cargo del encargado de acceso.

5.7.4. Avisos al Encargado de Acceso

La plataforma web no emite notificaciones ni alertas. Un vehículo sin autorización en el punto de ingreso, un espacio ocupado sin reserva o una ocupación que excede la duración de su reserva solo se advierten si el encargado de acceso observa la vista de inicio. El exceso de duración y el historial de uso de cada estacionamiento quedan registrados en la base de datos, pero la plataforma web no los presenta. Es la limitación que más se aleja del propósito de la solución, como se señaló en la verificación de requisitos.

5.7.5. Preparación para un Uso Real

El prototipo no presenta la distinción entre las vistas del encargado de acceso y las del administrador, la gestión de cuentas, la recuperación de contraseña ni la configuración de los estacionamientos de visita. Dichas funcionalidades no intervienen en los procesos que ResiPark automatiza, pero son necesarias para que un condominio opere la solución sin apoyo externo. Además, las APIs de los servicios centrales se ejecutan en un computador local, que debería reemplazarse por un servidor de operación continua, y la plataforma web obtiene la imagen en vivo del punto de ingreso desde una dirección local de la cámara de monitoreo, por lo que solo la muestra cuando el encargado de acceso se conecta desde la red del condominio. Tampoco se evaluó si el tratamiento de los datos de los visitantes se ajusta a la Ley 21.719 [44], condición previa para tratar los datos de visitantes reales.

En síntesis, el prototipo permitió comprobar que los cuatro módulos funcionan de forma integrada en un condominio real y que la reserva creada por el ocupante queda vinculada a la patente reconocida en el punto de ingreso, al evento de acceso y al espacio asignado. Las limitaciones descritas acotan lo que dicha comprobación permite afirmar y orientan el trabajo futuro que se plantea en las conclusiones.

Capítulo 6

Conclusión

Esta memoria partió de una dificultad concreta: en un condominio, las reglas que definen quién puede ingresar en vehículo y cómo se usan los estacionamientos de visita se hacen cumplir en el punto de ingreso, a cargo del encargado de acceso y con el apoyo de una bitácora que no registra cómo se autorizó cada visita, qué espacio se ocupó ni por cuánto tiempo. Para abordarla se diseñó ResiPark y se implementó un prototipo, probado en un condominio de casas. En este capítulo se evalúa el cumplimiento de los objetivos planteados a partir de dichos resultados, se precisa el alcance de lo que permiten afirmar, se proponen líneas de trabajo futuro y, por último, se reflexiona sobre la respuesta que el trabajo entrega a la pregunta que lo orientó.

6.1. Cumplimiento de los Objetivos

El objetivo general consistía en diseñar e implementar una solución de control de accesos vehiculares y gestión de estacionamientos de visita para condominios, capaz de automatizar la validación de ingresos a partir del reconocimiento de patentes y de reportar en tiempo real la disponibilidad de dichos estacionamientos mediante una red de sensores IoT. Dicho objetivo se cumplió a nivel de prototipo. En el caso de estudio, la patente de un vehículo con reserva se reconoció, se verificó y se registró su ingreso, tras lo cual el portón se abrió sin intervención del encargado de acceso, y la ocupación del estacionamiento de visita instrumentado se reflejó en la plataforma web entre 2 y 5 s después de producirse. El grado de cumplimiento de cada objetivo específico es el siguiente:

1. **Arquitectura de la solución.** Se cumplió. El diseño distribuyó las operaciones de cada proceso entre ResiPark y las personas que intervienen en él, tradujo dicha distribución en 46 requisitos y organizó la solución en cuatro módulos, con

los componentes que dependen del lugar físico ubicados en el borde. El prototipo implementó los cuatro módulos y los integró en un mismo recorrido, desde la cámara del punto de ingreso hasta el registro del evento en la base de datos.

2. **Registro y consulta del historial.** Se cumplió en parte. La base de datos registra los ingresos, las reservas, las asignaciones y el estado de cada estacionamiento de visita, y la reserva vincula en un mismo registro la autorización del ocupante, la patente del visitante, el evento de acceso y el espacio asignado. El historial de ingresos puede consultarse en la plataforma web, pero el historial de uso de los estacionamientos de visita y los excesos de duración quedan en la base de datos sin que la plataforma web los presente.

3. **Interfaces de usuario.** Se cumplió. La aplicación móvil permite al ocupante crear reservas y consultar la disponibilidad, y la plataforma web permite al encargado de acceso asignar espacios, observar el estado de cada estacionamiento de visita, consultar el historial y registrar ingresos de forma manual. Quedaron sin presentar la distinción entre las vistas del encargado de acceso y las del administrador, la gestión de cuentas, la recuperación de contraseña y la configuración de los estacionamientos de visita, que no intervienen en los procesos que ResiPark automatiza.

4. **Reconocimiento de patentes.** Se cumplió, con una evidencia acotada. El servicio de reconocimiento se desplegó y, en la prueba in situ, la exigencia de cinco lecturas consecutivas descartó las cinco transcripciones erróneas observadas y verificó la patente correcta. Las métricas de los detectores, sin embargo, se obtuvieron sobre conjuntos de imágenes ajenos al caso de estudio, y el reconocimiento se probó en un solo ingreso y con luz diurna.

5. **Red de sensores IoT.** Se cumplió a la escala probada. En el caso de estudio se instaló un nodo sensor, cuyo estado llegó a la plataforma web por LoRa y Wi-Fi, y la independencia entre varios nodos se comprobó fuera de dicho caso. El alcance del enlace LoRa no se midió.

Los cinco objetivos comparten una misma condición: su cumplimiento se demostró en un prototipo funcional, probado en un caso de estudio, y no en una solución en uso continuo. Lo que falta en cada uno no impide los procesos que ResiPark automatiza, pero sí determina qué tan lejos se encuentra la solución de un uso real, como se precisa a continuación.

6.2. Alcances y Limitaciones del Trabajo

El trabajo aborda dos procesos dentro del ámbito del control de acceso de un condominio: la verificación del derecho de acceso de los visitantes que ingresan en vehículo, y la asignación y ocupación de los estacionamientos de visita. Quedan fuera la seguridad

física del perímetro, la administración de los gastos comunes y el funcionamiento de la asamblea y del comité de administración. Dentro de dichos dos procesos, lo que el trabajo permite afirmar está acotado por las limitaciones del prototipo y por las de su evaluación.

Las limitaciones del prototipo se analizaron junto a su implementación. Las de mayor peso son cuatro: el reconocimiento depende de un servicio en Google Colab, sin disponibilidad garantizada; la plataforma web no emite avisos, por lo que el encargado de acceso debe observarla para advertir las excepciones; el tiempo de decisión en el ingreso, de unos 9 s, proviene de una sola prueba; y el funcionamiento con iluminación nocturna no se probó.

La evaluación, por su parte, se realizó en un solo condominio, de casas y con un único punto de ingreso, con un nodo sensor en uno de sus estacionamientos de visita. El rol de encargado de acceso lo ejercieron quienes realizaron las pruebas, de modo que ResiPark no se evaluó con encargados de acceso ni con administradores de condominios, y no se cuenta con evidencia sobre su uso por parte de dichas personas. Tampoco se registraron la intensidad de la señal ni el alcance del enlace LoRa, que serían necesarios para dimensionar la instalación en un condominio con más estacionamientos de visita o con estructuras que obstaculicen la radio, como un subterráneo de hormigón armado. Finalmente, la integración con el portón mediante un relé conectado a un control remoto responde a las características del portón del caso de estudio, y otro portón podría requerir una integración distinta.

En consecuencia, los resultados muestran que la distribución de operaciones propuesta puede implementarse y funcionar de forma integrada en un condominio real, pero no permiten afirmar cómo se comportaría ResiPark en uso continuo, en condominios de otro tamaño o tipo, ni en manos de quienes lo usarían a diario.

6.3. Trabajo Futuro

Las líneas de trabajo futuro responden a dos propósitos. Las primeras atienden las limitaciones descritas, con el fin de llevar ResiPark desde un prototipo probado en un caso de estudio hasta una solución de uso continuo. Las últimas extienden la solución hacia aspectos del problema que el trabajo identificó, pero no abordó. Se presentan en dicho orden:

- **Servicios en una infraestructura de operación continua:** trasladar el servicio de reconocimiento desde Google Colab a un servidor con GPU, en la nube o en el propio condominio, y las APIs de los servicios centrales desde un computador local a un servidor permanente, de modo que el ingreso no dependa de una sesión sin disponibilidad garantizada.
- **Avisos al encargado de acceso:** emitir notificaciones ante un vehículo sin autorización, un espacio ocupado sin reserva o una ocupación que excede la duración

de su reserva, y presentar el historial de uso de cada estacionamiento de visita, para que las excepciones lleguen al encargado de acceso sin que deba vigilar la plataforma web.

- **Medición del reconocimiento en el punto de ingreso:** medir la tasa de error de la transcripción y la de aperturas indebidas con imágenes del caso de estudio, para fijar el número de lecturas consecutivas a partir de datos, y repetir la medición del tiempo de decisión en un número suficiente de ingresos.
- **Pruebas en condiciones adversas:** evaluar el reconocimiento y los nodos sensores con iluminación nocturna, lluvia, reflejos y suciedad sobre la cámara, la patente o el sensor.
- **Funcionalidades de administración y protección de datos:** incorporar la distinción entre las vistas del encargado de acceso y las del administrador, la gestión de cuentas y la configuración de los estacionamientos de visita, y evaluar la conformidad del tratamiento de los datos del visitante con la Ley de Protección de Datos Personales (Ley 21.719) [44].
- **Evaluación en otros condominios y con usuarios reales:** probar ResiPark con encargados de acceso y administradores, en condominios con más estacionamientos de visita o con subterráneos, registrando la intensidad de la señal y el alcance del enlace LoRa, y con portones que requieran una integración distinta.
- **Identificación del vehículo en cada espacio:** incorporar un mecanismo que asocie cada ocupación al vehículo que la produce, evaluando su proporcionalidad frente a la protección de datos personales que motivó el uso de un sensor por espacio, de modo que el contraste no se limite a la ocupación y la asignación, y permita advertir que dos visitantes intercambiaron sus espacios.
- **Respaldo para la aplicación del reglamento:** presentar a la administración, por unidad, las ocupaciones que excedieron la duración de su reserva, con la patente, el espacio y el horario de cada una, de modo que el registro sirva como antecedente para aplicar las sanciones que el reglamento de copropiedad fije a la unidad que autorizó la visita.

Las dos últimas líneas apuntan a la misma tarea: disponer de la información necesaria para sancionar un uso indebido del bien común, y no solo para advertirlo. Ambas se apoyan en el registro que ResiPark ya construye, en el que cada ocupación queda asociada a una reserva y, por medio de esta, a la unidad que la creó.

6.4. Reflexiones Finales

La definición del problema cerró con una pregunta: cómo apoyar el cumplimiento de las reglas de acceso vehicular y de uso de los estacionamientos de visita en un condominio,

sin eliminar el criterio humano en los casos que efectivamente lo requieren. La respuesta que entrega este trabajo descansa menos en una tecnología en particular que en la distribución de las operaciones. Se automatizan las que se repiten en cada ingreso y pueden resolverse contrastando un dato con una regla, y se dejan al encargado de acceso las que exigen evaluar una situación que la regla no anticipa. Para que dicho contraste sea posible, la autorización se traslada al momento en que el ocupante crea la reserva, de modo que, cuando el visitante llega, ya consta por escrito y no depende de una consulta a distancia.

Con dicha distribución, el registro que en la modalidad manual quedaba incompleto pasa a vincular quién autorizó la visita, qué vehículo ingresó, a qué hora y qué espacio se le asignó. En términos de los principios de diseño de un régimen de propiedad común [17], ResiPark reduce el costo del monitoreo, que deja de depender de la memoria del encargado de acceso y de sus rondas, y aporta la información que una sanción requiere. La sanción misma, sin embargo, sigue siendo una decisión de la comunidad y de su administración: la solución no hace cumplir las reglas por sí sola, sino que deja constancia de si se cumplieron. Del mismo modo, el propósito de liberar al encargado de acceso de lo repetitivo se alcanzó solo en parte, porque mientras la plataforma web no emita avisos, el encargado de acceso sigue debiendo observarla para advertir las excepciones.

Más allá de los resultados técnicos, el desarrollo de esta memoria deja una lección sobre el orden de las decisiones. Las preguntas que más influyeron en el diseño no fueron qué modelo de reconocimiento usar o qué sensor instalar, sino quién tiene derecho a usar un estacionamiento de visita, quién lo autoriza y qué decisiones conviene que siga tomando una persona. Entender el condominio como un régimen de propiedad común, y al encargado de acceso como el monitor que lo sostiene en el día a día, permitió plantear la automatización como un apoyo a dicha persona y no como su reemplazo. En dicho sentido, el trabajo se mantiene fiel a la premisa con que se inició: la tecnología resulta útil en una comunidad cuando se pone al servicio de quienes la ocupan, la cuidan y la administran, y no en su lugar.

Bibliografía

[1] E. Schlager and E. Ostrom, "Property-rights regimes and natural resources: A conceptual analysis," *Land Economics*, vol. 68, no. 3, pp. 249–262, 1992.

[2] J. M. Anderies, M. A. Janssen, and E. Ostrom, "A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective," *Ecology and Society*, vol. 9, no. 1, p. 18, 2004.

[3] O. Newman, "Creating defensible space," tech. rep., U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research, 1996.

[4] Congreso Nacional de Chile, "Ley 21.442: Fija el nuevo texto de la ley de copropiedad inmobiliaria." https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1174663, 2022.

[5] Ministerio de Vivienda y Urbanismo and Biblioteca del Congreso Nacional, "Soluciones comerciales y marco normativo para la administración de condominios en Chile: Plataformas SaaS (ComunidadFeliz, Edipro, Kastor, Swapi), servicios integrales (ACRPRO, Adec Chile, Gestión Condominios) y cumplimiento de la ley n° 21.442." Santiago, Chile, https://bcn.cl, 2024. Accedido: 22-abr-2024.

[6] F. Li, H. Yang, X. Gao, and H. Han, "Towards iot-based sustainable digital communities," *Intelligent and Converged Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 190–203, 2022.

[7] Q. Liu, Y. Zeng, X. Zhou, N. Liu, and M. Wang, "Design and implementation of smart community information management system," in *2023 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology (SCSET)*, pp. 636–639, IEEE, 2023.

[8] N. Xue, L. Liang, J. Zhang, and X. Huang, "An access control system for intelligent buildings," in *Proceedings of the 9th EAI International Conference on Mobile Multimedia Communications (MOBIMEDIA)*, pp. 11–17, 2016.

[9] K. Foster and L. Davis, "Physical access control and human vulnerabilities in gated residential environments," *Journal of Applied Security Research*, vol. 15, no. 3, pp. 310–328, 2020.

[10] A. Kumar, P. Sharma, and R. Gupta, "Limitations of manual entry systems and transition to automated gate security," in *International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, pp. 112–118, IEEE, 2021.

[11] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

[12] Z. Selmi, M. Ben Halima, and A. M. Alimi, "Deep learning system for automatic license plate detection and recognition," in *2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, vol. 1, pp. 1132–1137, IEEE, 2017.

[13] N. Kharina and S. Chernyadyev, "Software for car license plates recognition with minimal computing resources," in *2022 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, IEEE, 2022.

[14] S. V. Srikanth, P. J. Pramod, K. P. Dileep, S. Tapas, M. U. Patil, and S. C. Babu N, "Design and implementation of a prototype smart parking (spark) system using wireless sensor networks," in *2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp. 568–573, 2009.

[15] H. K. Alaoui, M. Coulibaly, and A. Errami, "Analyzing smart parking system: Wsn technologies, power saving and guidance," in *2024 International Conference on Circuit, Systems and Communication (ICCSC)*, pp. 1–6, 2024.

[16] Y.-Y. Chu and K.-H. Liu, "Iot in vehicle presence detection of smart parking system," in *2nd IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering 2020*, pp. 56–61, 2020.

[17] E. Ostrom, *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press, 1990.

[18] E. Ostrom, "Private and common property rights," in *Encyclopedia of Law and Economics* (B. Bouckaert and G. De Geest, eds.), vol. 2, pp. 332–379, Edward Elgar, 2000.

[19] M. A. McKean, "Common property: What is it, what is it good for, and what makes it work?," in *People and Forests: Communities, Institutions, and Governance* (C. C. Gibson, M. A. McKean, and E. Ostrom, eds.), pp. 27–55, MIT Press, 2000.

[20] G. Hardin, "The tragedy of the commons," *Science*, vol. 162, no. 3859, pp. 1243–1248, 1968.

[21] N. Johnston and E. Too, "Multi-owned properties in Australia: A governance typology of issues and outcomes," *International Journal of Housing Markets and Analysis*, vol. 8, no. 4, pp. 451–470, 2015.

[22] H. Easthope and B. Randolph, "Principal–agent problems in multi-unit developments: The impact of developer actions on the on-going management of strata titled properties," *Environment and Planning A: Economy and Space*, vol. 48, no. 9, pp. 1829–1847, 2016.

[23] J. Shin, A. Rajabifard, M. Kalantari, and B. Atazadeh, "Impact of ownership and architectural design on property disputes in multi-owned buildings," *Habitat International*, vol. 112, p. 102371, 2021.

[24] D. Levy, H. C. Perkins, and D. Ge, "Improving the management of common property in multi-owned residential buildings: Lessons from Auckland, New Zealand," *Housing Studies*, vol. 37, no. 7, pp. 1225–1249, 2022.

[25] K. Arkcoll, C. Guilding, D. Lamminmaki, L. McManus, and J. Warnken, "Funding common property expenditure in multi-owned housing schemes," *Property Management*, vol. 31, no. 4, pp. 282–296, 2013.

[26] L. W. Gao and D. C. W. Ho, "Explaining the outcomes of multi-owned housing management: A collective action perspective," *Habitat International*, vol. 57, pp. 233–241, 2016.

[27] G. Craighead, *High-Rise Security and Fire Life Safety*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 3 ed., 2009.

[28] E. Suryady, S. Tan, and R. Hidayat, "Design and implementation of gate control and visitor management system for residential areas," *Journal of Systems Engineering and Information Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 45–52, 2021.

[29] D. Kennedy and R. Hupp, "Apartment security and litigation: Key issues," *Security Journal*, vol. 11, pp. 21–28, 1998.

[30] A. Khanna and R. Anand, "Iot-based smart parking and occupancy monitoring system for residential complexes," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 24510–24522, 2021.

[31] D. C. Shoup, "Cruising for parking," *Transport Policy*, vol. 13, no. 6, pp. 479–486, 2006.

[32] S. Gössling, A. Humpe, R. Hologa, N. Riach, and T. Freytag, "Parking violations as an economic gamble for public space," *Transport Policy*, vol. 116, pp. 248–257, 2022.

[33] M. Nourinejad, A. H. Gandomi, and M. J. Roorda, "Illegal parking and optimal enforcement policies with search friction," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 141, p. 102026, 2020.

[34] A. Brudner, "On the management of residential on-street parking: Policies and repercussions," *Transport Policy*, vol. 138, pp. 94–107, 2023.

[35] M. Yahyaei, M. Gendreau, and N. Van Omme, "Tactical parking enforcement planning: Optimizing resource allocation under driver response," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 211, p. 105099, 2026.

[36] E. A. Coleman and B. C. Steed, "Monitoring and sanctioning in the commons: An application to forestry," *Ecological Economics*, vol. 68, no. 7, pp. 2106–2113, 2009.

[37] T. Slough, D. Rubenson, R. Levy, F. Alpizar Rodriguez, M. Bernedo del Carpio, M. T. Buntaine, D. Christensen, A. Cooperman, S. Eisenbarth, P. J. Ferraro, L. Graham, A. C. Hartman, J. Kopas, S. McLarty, A. S. Rigterink, C. Samii, B. Seim, J. Urpelainen, and B. Zhang, "Adoption of community monitoring improves common pool resource management across contexts," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 29, p. e2015367118, 2021.

[38] H. Benli, M. Cassiano, and G. Giannoccaro, "The application of remote sensing to improve irrigation accounting systems: A review," *Water*, vol. 17, no. 23, p. 3430, 2025.

[39] L. Ding, H. Li, W. Shen, X. Zhang, and T. Pan, "The digital transformation of global fisheries: A review of governance shifts and economic impacts," *Frontiers in Marine Science*, vol. 13, p. 1835277, 2026.

[40] M. Mohandes, M. Deriche, H. Ahmadi, M. Kousa, and A. Balghonaim, "An intelligent system for vehicle access control using RFID and ALPR technologies," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, pp. 3521–3530, 2016.

[41] P. Satanasaowapak, W. Kawseewai, S. Promlee, and A. Vilamat, "Residential access control system using QR code and the IoT," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 3267–3274, 2021.

[42] S. Du, M. Ibrahim, M. Shehata, and W. Badawy, "Automatic license plate recognition (alpr): A state-of-the-art review," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 311–325, 2012.

[43] J. Shashirangana, H. Padmasiri, D. Meedeniya, and C. Perera, "Automated license plate recognition: A survey on methods and techniques," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 11203–11225, 2021.

[44] Congreso Nacional de Chile, "Ley 21.719: Regula la protección y el tratamiento de los datos personales y crea la agencia de protección de datos personales." Diario Oficial de la República de Chile, 13 de diciembre de 2024, 2024.

[45] T. Lin, H. Rivano, and F. Le Mouël, "A survey of smart parking solutions," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 12, pp. 3229–3253, 2017.

[46] J. J. Barriga, J. Sulca, J. L. León, A. Ulloa, D. Portero, R. Andrade, and S. G. Yoo, "Smart parking: A literature review from the technological perspective," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 21, p. 4569, 2019.

[47] A. Fahim, M. Hasan, and M. A. Chowdhury, "Smart parking systems: Comprehensive review based on various aspects," *Heliyon*, vol. 7, no. 5, p. e07050, 2021.

[48] M. Balfaqih, W. Jabbar, M. M. Khayyat, and R. Hassan, "Design and development of smart parking system based on fog computing and Internet of Things," *Electronics*, vol. 10, no. 24, p. 3184, 2021.

[49] ComunidadFeliz, "Control de acceso ComunidadFeliz." https://www.comunidadfeliz.cl/control-de-acceso-comunidadfeliz, 2026. Consultado el 30 de septiembre de 2026.

[50] EdiPro, "EdiPro: Soluciones integrales para edificios y condominios." https://www.edipro.app/, 2026. Consultado el 30 de septiembre de 2026.

[51] Kastor, "Kastor: Plataforma de administración de comunidades." https://kastorsoftware.cl/, 2026. Consultado el 30 de septiembre de 2026.

[52] USB Implementers Forum, "Universal serial bus device class definition for video devices, revision 1.5." https://www.usb.org/document-library/video-class-v15-document-set, 2012. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[53] H. Schulzrinne, A. Rao, and R. Lanphier, "Real time streaming protocol (RTSP)." RFC 2326, Internet Engineering Task Force, 1998.

[54] ONVIF, "ONVIF profiles." https://www.onvif.org/profiles/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[55] IEEE, "IEEE standard for ethernet." IEEE Std 802.3-2022, 2022.

[56] Raspberry Pi Ltd, "Raspberry pi 4 model b: Product brief." https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf, 2024. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[57] NVIDIA, "NVIDIA jetson: Embedded systems for edge AI." https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[58] Microsoft, "Windows server: Documentación oficial." https://learn.microsoft.com/windows-server/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[59] Canonical, "Ubuntu server: Documentación oficial." https://documentation.ubuntu.com/server/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[60] Raspberry Pi Ltd, "Raspberry pi OS: Documentación oficial." https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[61] J. A. Clark and colaboradores, "Pillow: Documentación oficial." https://pillow.readthedocs.io/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[62] S. van der Walt, J. L. Schönberger, J. Nunez-Iglesias, F. Boulogne, J. D. Warner, N. Yager, E. Gouillart, T. Yu, and the scikit-image contributors, "scikit-image: Image processing in Python," *PeerJ*, vol. 2, p. e453, 2014.

[63] G. Bradski, "The OpenCV library," *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.

[64] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," in *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, vol. 28, pp. 91–99, 2015.

[65] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu, and A. C. Berg, "SSD: Single shot multibox detector," in *Computer Vision – ECCV 2016*, vol. 9905 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 21–37, 2016.

[66] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 779–788, 2016.

[67] Ultralytics, "YOLOv8: Documentación oficial." https://docs.ultralytics.com/es/models/yolov8/, 2023. Consultado en junio de 2025.

[68] Ultralytics, "YOLO11: Documentación oficial." https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/, 2024. Consultado en agosto de 2026.

[69] R. Smith, "An overview of the Tesseract OCR engine," in *Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*, vol. 2, pp. 629–633, 2007.

[70] Jaided AI, "EasyOCR: Ready-to-use OCR with 80+ supported languages." https://github.com/JaidedAI/EasyOCR, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[71] Y. Du, C. Li, R. Guo, X. Yin, W. Liu, J. Zhou, Y. Bai, Z. Yu, Y. Yang, Q. Dang, and H. Wang, "PP-OCR: A practical ultra lightweight OCR system." arXiv:2009.09941, 2020.

[72] B. Xiao, H. Wu, W. Xu, X. Dai, H. Hu, Y. Lu, M. Zeng, C. Liu, and L. Yuan, "Florence-2: Advancing a unified representation for a variety of vision tasks," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4818–4829, 2024.

[73] Google, "Google colaboratory: Preguntas frecuentes." https://research.google.com/colaboratory/faq.html, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[74] Amazon Web Services, "Amazon EC2 G4 instances." https://aws.amazon.com/ec2/instance-types/g4/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[75] Arduino, "Arduino UNO R3: Documentación oficial." https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[76] Espressif Systems, "ESP32 series datasheet." https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, 2025. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[77] STMicroelectronics, "STM32 ultra low power MCUs." https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[78] MicroPython, "MicroPython: Documentación oficial." https://docs.micropython.org/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[79] Espressif Systems, "Arduino ESP32: Documentación oficial." https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[80] Espressif Systems, "ESP-IDF programming guide." https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[81] J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen, "A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," in *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 46–51, 2007.

[82] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.

[83] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.

[84] Google, "Kotlin on Android." https://developer.android.com/kotlin, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[85] Apple, "Swift." https://developer.apple.com/swift/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[86] Meta Platforms, "React Native: Documentación oficial." https://reactnative.dev/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[87] Google, "Flutter: Documentación oficial." https://docs.flutter.dev/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[88] I. Fette and A. Melnikov, "The WebSocket protocol." RFC 6455, Internet Engineering Task Force, 2011.

[89] Google, "Angular: Documentación oficial." https://angular.dev/overview, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[90] E. You and colaboradores, "Vue.js: Documentación oficial." https://vuejs.org/guide/introduction.html, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[91] Meta Platforms, "React: Documentación oficial." https://react.dev/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[92] OpenJS Foundation, "Express: Documentación oficial." https://expressjs.com/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[93] Django Software Foundation, "Django: Documentación oficial." https://docs.djangoproject.com/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[94] S. Ramírez, "FastAPI: Documentación oficial." https://fastapi.tiangolo.com/, 2026. Consultado el 1 de octubre de 2026.

[95] SQLite, "Appropriate uses for SQLite." https://www.sqlite.org/whentouse.html, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[96] Oracle, "MySQL reference manual." https://dev.mysql.com/doc/refman/8.4/en/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[97] The PostgreSQL Global Development Group, "PostgreSQL documentation." https://www.postgresql.org/docs/current/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[98] Supabase, "Supabase: Documentación oficial." https://supabase.com/docs, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[99] Amazon Web Services, "Amazon EC2." https://aws.amazon.com/ec2/, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[100] Google, "Cloud firestore: Documentación oficial." https://firebase.google.com/docs/firestore, 2026. Consultado el 12 de octubre de 2026.

[101] Microsoft, "Typescript: Documentación oficial." https://www.typescriptlang.org/docs/, 2026. Consultado el 13 de octubre de 2026.

[102] Encode OSS, "Django REST framework: Documentación oficial." https://www.django-rest-framework.org/, 2026. Consultado el 13 de octubre de 2026.

[103] Supabase, "Supabase: Planes y precios." https://supabase.com/pricing, 2026. Consultado el 13 de octubre de 2026.

[104] huang77, "huaung77 object detection dataset." Roboflow Universe, https://universe.roboflow.com/huang77-8ldff/huaung77/dataset/1, 2024. Consultado el 31 de agosto de 2026.

[105] Roboflow Universe Projects, "License plate recognition dataset." Roboflow Universe, https://universe.roboflow.com/roboflow-universe-projects/license-plate-recognition-rxg4e/dataset/11, 2025. Consultado el 31 de agosto de 2026.