UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
SANTIAGO - CHILE

“SISTEMA DE CONTROL DE ACCESO Y PAGOS INTELIGENTE PARA RED METROPOLITANA DE MOVILIDAD DE SANTIAGO”

DIEGO ESTEBAN ROSALES LEÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA

Profesor Guía: Mauricio Olivares
Profesor Correferente: Jose Luis Martí

Septiembre - 2025

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: Sistema de Control de Acceso y Pagos Inteligente para RED Metropolitana de Movilidad de Santiago

Nombre del candidato(a): Diego Esteban Rosales León

Carrera / Grado: Ingeniería Civíl Informática

Campus: Santiago San Joaquin **;** **Departamento**: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Olivares, 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

☒ 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:

☐ 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: 23/09/2025 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/09/2025 ; **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.

DEDICATORIA

No hay nada permanente, excepto el cambio. — Heráclito

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer con todo mi corazón a mi familia, especialmente a mi papá y mamá, por darme siempre el mayor de los apoyos, su confianza absoluta y esa fe inquebrantable de que podría sacar esto adelante. A mi hermana Jossa, por estar siempre ahí cuando la necesité, incluso en los detalles más pequeños, y a Thiare, quien fue un apoyo fundamental en lo intelectual y emocional, ayudándome a mantenerme firme en los momentos más difíciles. A mi cuñado Matías y a mi sobrina Emma, por sacarme de la rutina, hacerme reír sin parar y recordarme que la vida sigue más allá de la tesis. Al resto de mi familia —mi abuela, primos, primas, tías— por su cariño, apoyo y convicción de que lograría llegar hasta el final. También agradezco a Katty, con quien compartimos esta misma etapa, dándonos apoyo mutuo para completar este proceso tan importante en nuestras vidas, y a Sofía, por acompañarme en tantas reuniones de Zoom, donde entre estudios y avances cada uno iba empujando al otro. Gracias al grupo de El Perro, mis amigos que siempre estuvieron ahí para escuchar, reír y hacerme sentir que no estaba solo, y a los Wenos pa Química, por acompañarme incluso solo con su presencia, cambiando mi ánimo con una risa o una conversación al paso. A mi profesor Mauricio, por confiar en mí desde el primer momento y por estar siempre dispuesto a tender una mano, a mi profesor y jefe de carrera José Luis Martí, por haberme dado la oportunidad de guiarme en el cambio a Ingeniería Civil en Informática cuando más lo necesitaba; nunca olvidaré el apoyo que me ofreció en esa etapa ni la confianza que puso en mí cuando yo aún estaba en otra carrera. Y especialmente a Ariel e Isaías, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida y me impulsaron a seguir adelante cuando más lo necesitaba.

Los quiero a todos. Sin ustedes, este camino habría sido mucho más difícil, y sin duda, no estaría hoy tan cerca de convertirme en la persona que quiero ser.

RESUMEN

Resumen— Este trabajo explora el uso del sensor RFID YR903 como alternativa al sistema PagoBIP en el transporte público chileno. Se realizaron pruebas considerando cercanía, dispositivo de portabilidad, posicionamiento del sensor e interferencias. Los resultados muestran un alto rendimiento en condiciones ideales y limitaciones ante obstrucciones de señal. Se concluye que la tecnología es viable y escalable, con oportunidades de mejora.

Palabras Clave— RFID; Sensor YR903; Interferencia; PagoBIP; transporte público RED.

ABSTRACT

Abstract— This study explores the use of the YR903 RFID sensor as an alternative to the PagoBIP system in Chilean public transportation. Tests were conducted considering proximity, portability device, sensor positioning, and interference. The results show high performance under ideal conditions and limitations when signal obstructions are present. It is concluded that the technology is viable and scalable, with opportunities for improvement.

Keywords— RFID; RED public transportation; Validation; YR903 sensor; Interference; PagoBIP.

GLOSARIO

DI: Departamento de Informática.
UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.
DTPM: Directorio de Transporte Público Metropolitano
UN: Unidad de de Negocio
AIM: Asociación de Investigadores de Mercado
INE: Instituto Nacional de Estadística
BCN: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
MTT: Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones
AM: Acustomagnético
RFID: Radio Frequency Identification
RED: Red Metropolitana de Movilidad
SII: Servicio de Impuestos Internos
SPSS: Paquete Estadístico para Ciencias Sociales
BDD: Base de Datos
LF: Low Frequency
HF: High Frequency
UHF: Ultra High Frequency
RGPD: Reglamento General de Protección de Datos
CSV: Comma Separated Values
QR: Quick Response
PUCV: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
API: Application Programming Interface
PDCA: Planificar-Hacer-Verificar-Actuar
SQL: Structured Query Language
SSMS: SQL Server Management Studio
MHz: Megahercio
EPC: Electronic Product Code
Gen2: Generation 2
COM: Communication Port

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN iv

ABSTRACT iv

GLOSARIO v

ÍNDICE DE FIGURAS viii

ÍNDICE DE TABLAS viii

ÍNDICE DE CÓDIGOS ix

INTRODUCCIÓN **1**

CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA **2**
- 1.1 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL . . . 2
- 1.2 NIVELES SOCIECONÓMICOS EN CHILE . . . 3
- 1.3 OMISIÓN DEL PAGO DE TARIFAS . . . 4
- 1.4 PAGO CON QR . . . 5
- 1.5 ÁRBOL DEL PROBLEMA . . . 6
  - 1.5.1 OBJETIVOS . . . 7
  - 1.5.2 OBJETIVO GENERAL . . . 7
  - 1.5.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . 7

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL **8**
- 2.1 BASE DE DATOS . . . 8
- 2.2 ENTORNO DE ADMINISTRACIÓN DE BASE DE DATOS: SQL SERVER MANAGEMENT STUDIO (SSMS) . . . 8
- 2.3 POWER BI . . . 8
- 2.4 PYTHON . . . 9
- 2.5 OBSERVACIÓN DIRECTA . . . 9
- 2.6 MEJORA CONTINUA . . . 9
- 2.7 CALIDAD DE SOFTWARE . . . 10
- 2.8 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS . . . 10
- 2.9 IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID) . . . 11
- 2.10 CÓDIGO ELECTRÓNICO DE PRODUCTO (EPC) . . . 11
- 2.11 SELECCIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL . . . 12
  - 2.11.1 MÉTODO DE COCHRAN . . . 13
- 2.12 MÉTODOS ESTADÍSTICOS INFERENCIALES . . . 14
  - 2.12.1 TEST DE CHI-CUADRADO . . . 14
  - 2.12.2 DISTINCIÓN ENTRE VARIABLE Y CONSTANTE . . . 15
- 2.13 PAQUETE ESTADÍSTICO PARA CIENCIAS SOCIALES (SPSS) . . . 15

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE SOLUCIÓN **16**
3.1 MACRO PROPUESTA 17
3.2 SUB PROPUESTA: PRIMERA ETAPA 17
3.3 ESQUEMA DE DISEÑO DE METODOLOGÍA MACRO PROPUESTA 18
3.4 ESQUEMA DE DISEÑO DE METODOLOGÍA: PRIMERA ETAPA 18
3.5 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN 19
3.6 TESTING DE USO 21
3.7 PROCESAMIENTO DE DATOS 24
3.8 ANÁLISIS Y MEJORAS CONTINUAS 26

CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN **27**
4.1 OBSERVACIÓN DIRECTA NO PARTICIPATIVA 27
4.2 DEFINICIÓN DEL ENTORNO DE PRUEBA 28
4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO POR DISTANCIA 29
4.4 RESULTADOS GLOBALES POR CADA SIMULACIÓN 31
4.5 TIPO DE SIMULACIÓN - CERCANÍA DIRECTA 33
4.6 TIPO DE SIMULACIÓN - A DISTANCIA 35
4.7 TIPO DE SIMULACIÓN - CASOS ESPECIALES 37
4.8 ANÁLISIS COMPARATIVO Y CRUZADO 38
4.8.1 CERCANÍA VS LEJANÍA 39
4.8.2 DISPOSITIVOS DE PORTABILIDAD 41
4.8.3 UBICACIÓN DE LA TARJETA EN VESTIMENTA 44
4.8.4 VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL SENSOR 46
4.8.5 PRESENCIA DE INTERFERENCIAS 48

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES **49**
5.1 CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS Y ALCANCE GENERAL 49
5.2 PRINCIPALES RESULTADOS Y PATRONES OBSERVADOS 49
5.3 LIMITACIONES DETECTADAS 51
5.4 SUGERENCIAS PARA MEJORA CONTINUA 52
5.5 REFLEXIÓN FINAL 53

6 ANEXOS **55**
6.1 RESULTADOS GLOBALES POR CASO DE USO (SIN DISTANCIAS) 55
6.2 RESULTADOS GLOBALES POR CASO DE USO 56
6.3 TABLA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL ESTÁNDAR 57
6.4 VALIDACIÓN EXTENDIDA DEL SISTEMA 58
6.5 TABLA TARJETAS CON SALDO Y DEUDA 60

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **63**

ÍNDICE DE FIGURAS

1 ¿Con cuál de estas frases Ud. asocia la conducta de no pagar?. 4
2 Árbol de Causa y Efecto. 6
3 Esquema de Metodología 18
4 Esquema de Metodología para la Primera Etapa 19
5 Sensor RFID UHF YR903 20
6 Herramienta UHF Demo 20
7 Proceso de Automatización de Datos. 24
8 Resumen visual de los métodos de pagos observados en paraderos 27
9 Resultados visuales de lectura a diferentes distancias 30
10 Desempeño global de los casos evaluados 31
11 Resultados globales de SPSS por caso de uso (sin pruebas de distancia). . . . 32
12 Resultados por Cercanía Directa 34
13 Casos observados distancia 36
14 Casos de Usos especiales 37
15 Comparativa visual entre los casos de Cercanía y Lejanía 39
16 Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre los casos a distancia en SPSS . . 40
17 Comparativa visual entre dispositivos de portabilidad utilizados. 41
18 Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre dispositivos de portabilidad en SPSS 43
19 Comparativa visual según la prenda de ropa utilizada para portar la tarjeta. . 44
20 Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre ubicación en vestimenta en SPSS 45
21 Comparativa visual al variar la altura del sensor 46
22 Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre alturas en SPSS 47
23 Representación visual con todos los casos de estudio y de pruebas. 56
24 Imagen de la Tabla de Distribución Normal Estándar. 57
25 Consulta para conocer el estado de una tarjeta 59

ÍNDICE DE TABLAS

1 Empresa Operadora y el porcentaje de evasión por semestre en el año 2023. 2
2 Ingresos promedios para los grupos socioeconómicos en el año 2019. 3
3 Extrapolación de usuarios evasores utilizando la población total proyectada. . 4
4 Rangos de Frecuencia 11
5 Ejemplo de un EPC. 12
6 Ejemplo de formato archivo.csv. 21
7 Estructura de la tabla `Registros` en SQL Server. 24
8 Resumen de métodos de pago observados en paraderos. 27
9 Estatura promedio en Chile por género (cm). 28
10 Distancias horizontales de prueba (en centímetros). 29
11 Resultados por Distancia en centímetros 29
12 Resultados por Cercanía Directa. 34

13 Resultados Obtenidos a Distancia. 35
14 Resultados Obtenidos de Casos de Prueba Especiales. 37
15 Comparativa entre los casos de Cercanía y Lejanía (distancias). 39
16 Comparativa entre dispositivos de portabilidad utilizados. 41
17 Comparativa según la prenda de ropa utilizada para portar la tarjeta. 44
18 Comparativa al variar la altura del sensor. 46
19 Resultados globales por caso de uso (sin pruebas de distancia). 55
20 Extracto de resultados de la tabla Tarjetas que contiene el saldo y deuda. . . 58
21 Tabla completa de tarjetas con su respectivo saldo y deuda. 60

ÍNDICE DE CÓDIGOS

1 Pseudocódigo del programa principal 25

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades y el aumento sostenido del uso del transporte público han impulsado la necesidad de modernizar los sistemas de acceso y pago, especialmente en entornos urbanos densos como Santiago. En este contexto, la validación mediante tarjetas electrónicas ha sido clave para optimizar los flujos de pasajeros, reducir el uso de pago en efectivo y mejorar el control operativo. Sin embargo, el sistema PagoBIP, vigente desde hace más de una década, presenta limitaciones tecnológicas importantes que dificultan su integración con nuevas soluciones digitales, restringiendo la experiencia del usuario.

A su vez, esta memoria busca abordar el desafío de disminuir la tasa de evasión, a través de la evaluación de la factibilidad de reemplazar el actual sistema de validación por uno basado en sensores RFID asociados a un usuario único. En particular, se propone trabajar en una primera etapa con el uso del sensor YR903 como posible alternativa tecnológica que permita habilitar un sistema de validación sin contacto directo, ampliando la flexibilidad del proceso. En específico, el problema abordado tiene una doble naturaleza: técnica y operativa. Por un lado, se busca verificar si la tecnología seleccionada es capaz de detectar tarjetas RFID en distintas condiciones de uso, con una tasa de acierto suficiente para ser considerada viable. Por otro, se analiza la manera en que ciertos factores como el dispositivo de portabilidad, la distancia de lectura, la presencia de interferencias o la ubicación del sensor pueden afectar su rendimiento. En esa línea, la propuesta consiste en diseñar, implementar y analizar un entorno de pruebas que permita simular situaciones reales de validación a distancia, evaluando el comportamiento del sistema bajo múltiples escenarios.

Teniendo en cuenta lo anterior, la metodología empleada se desarrolla en cuatro fases principales: levantamiento de antecedentes; construcción del entorno de prueba con el sensor YR903; ejecución de pruebas controladas con variación de condiciones clave (como cercanía, dispositivos de portabilidad, altura del sensor y ubicación de la tarjeta en la vestimenta); y finalmente el estudio de los datos recolectados a través de visualizaciones gráficas y análisis comparativo.

Por último, esta memoria se organiza de la siguiente forma: en el capítulo uno se define el problema y los objetivos del proyecto, contextualizando con antecedentes teóricos y técnicos de la tecnología RFID y su uso en el transporte público de Santiago de Chile. El capítulo dos se centra en la profundización del marco conceptual, describiendo las tecnologías a utilizar para resolver el problema. El capítulo tres explica una macro propuesta de cuatro etapas para resolver el problema, especificando el trabajo de esta memoria solo en el desarrollo de la primera, que incluye el diseño, la implementación, las pruebas y el procesamiento de datos de esta subpropuesta. El capítulo cuatro expone los resultados obtenidos en cada grupo de pruebas, donde se realiza un análisis estadístico a través de Chi-cuadrado. Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones generales del trabajo, sus limitaciones, algunas sugerencias para avanzar en las etapas siguientes de la macro propuesta y una mejora continua enmarcada en un código para revisar el saldo de la tarjeta.

CAPÍTULO 1
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

La evasión en el transporte público es una temática global que plantea diferentes tipos de desafíos tanto para sus autoridades encargadas, como para sus usuarios y la sociedad en su conjunto. Este problema no sólo abarca la omisión voluntaria del pago de tarifas, sino también considera la manipulación de los sistemas de validación, las condiciones socioeconómicas desfavorables de las personas y las respectivas amenazas físicas a los conductores para que puedan utilizar el transporte de manera gratuita. Esto no sólo afecta la viabilidad económica y la calidad de los servicios de transporte, sino que también a la equidad y a la seguridad de nuestras comunidades, con ramificaciones que afectan desde la congestión del tráfico hasta la pérdida de ingresos y la desigualdad de acceso. En Chile, como en muchas otras partes del mundo, la evasión en el transporte público es una preocupación constante y en continuo crecimiento y de la que es necesario hacerse cargo.

Por otro lado, según el DTPM, a nivel chileno, el índice de evasión para el primer semestre del año 2023 fue de un 45,8 % y para el segundo semestre fue de un 39,8 % [Directorio de Transporte Público Metropolitano, 2023]; una baja sustancial de un 6 % aproximadamente. En el mismo estudio se incluye una tabla comparativa que detalla y diferencia a cada empresa operadora de transporte con su respectivo porcentaje de evasión por semestre:

Tabla 1: Empresa Operadora y el porcentaje de evasión por semestre en el año 2023. Fuente: DTPM [Directorio de Transporte Público Metropolitano, 2023]

UN	Empresa	1er Semestre	2do Semestre
U2	Subus	53.1 %	53.6 %
U3	Vule	31.4 %	29.3 %
U4	Voy	67.9 %	62.2 %
U5	Metbus	24.1 %	26.0 %
U7	STP	38.6 %	32.2 %
U8	Metropol	64.5 %	50.2 %
U9	Metropol	67.3 %	52.3 %
U10	STU	56.2 %	49.3 %
U11	RBU	37.1 %	22.1 %
U12	STU	50.2 %	38.1 %
U13	RBU	52.8 %	39.7 %

De la tabla 1 se observa que diferentes empresas tuvieron bajas sustanciales en el porcentaje de evasión para el año 2023, pero otras empresas tuvieron pequeñas alzas comparado con su primer semestre. No obstante, incluso con esta tasa de disminución, la evasión del pago en el transporte público persiste en niveles considerablemente elevados.

1.2. NIVELES SOCIECONÓMICOS EN CHILE

Uno de los principales factores que influye en este comportamiento, es el nivel socioeconómico de los usuarios. Este factor se manifiesta de diversas formas, desde limitaciones financieras que dificultan el pago de tarifas hasta percepciones de injusticia en el costo del servicio. En esa línea y según un estudio del académico PUCV Franco Basso publicado en el Diario El Mercurio [Basso, 2019], Chile se encontraba en la novena posición del *ranking* del transporte público más caro en función del ingreso medio a nivel mundial. En relación a lo anterior, se vuelve necesario contrastar los niveles socioeconómicos de Chile y para esto, el sitio web Percepciones Económicas, se basó en un estudio realizado por AIM [Percepciones Económicas, 2021], para organizar y presentar esta información de manera simple:

Tabla 2: Ingresos promedios para los grupos socioeconómicos en el año 2019. Fuente: Percepciones Económicas [Percepciones Económicas, 2021].

Grupo Socioeconómico	Ingreso promedio del hogar
AB	$7.177.530
C1a	$3.010.391
C1b	$2.072.853
C2	$1.500.774
C3	$1.003.426
D	$640.667
E	$361.583

Franco Basso afirma que un chileno gasta en promedio $41.429 al mes en transporte, considerando 50 pasajes en horario punta. Así podemos extrapolar este costo para un caso hipotético: supongamos que una familia está compuesta por cuatro personas, de las cuales dos viajan continuamente en el transporte público. Esto resultaría en un gasto aproximado de $83.000 mensuales. Sin embargo, si comparamos estos gastos con los ingresos promedios de la tabla 2, se hace evidente que para muchas familias este costo puede ser prohibitivo. Por ejemplo, para los hogares que pertenecen al Grupo Socioeconómico E, cuyo ingreso promedio es de $361.583, este gasto en el transporte público representaría alrededor de un 23 %, lo que significa una gran carga financiera y posiblemente insostenible.

1.3. OMISIÓN DEL PAGO DE TARIFAS

La omisión o evasión del pago de tarifas en el transporte público RED es un desafío que afecta a la viabilidad económica y la equidad del servicio. Es más, según una publicación de Juan Pablo Guzmán [Guzmán, 2024] en Diario El Mercurio, "Cuatro de cada 10 personas no pagaron al usar el sistema RED durante el año pasado". Si proyectamos esta información con lo publicado por el INE en la BCN [BCN, 2023], referente a la cantidad de habitantes en Santiago para el año 2023 obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 3: Extrapolación de usuarios evasores utilizando la población total proyectada. Fuente: Elaboración Propia.

Usuarios Evasores	Población Total
4	10
3.347.116	8.367.790

En la tabla 3 se observa que un total de 3.347.116 personas no realizarían el pago correspondiente al utilizar el sistema RED. En términos de porcentaje la evasión correspondería a un 40 % de la población de Santiago, cifra altamente significativa. Las posibles razones que explican lo anterior, son detalladas por la BCN, siguiendo un estudio del Diario El Mercurio en el año 2017 [Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, 2017], las razones fueron plasmadas en un gráfico ilustrativo:

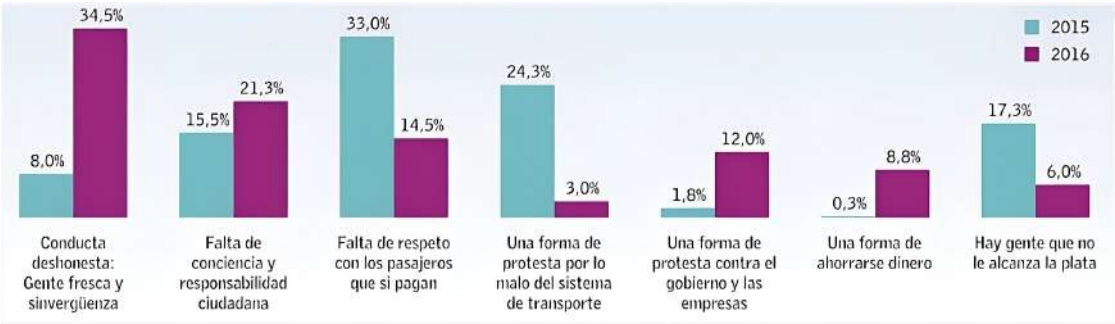

Figura 1: ¿Con cuál de estas frases Ud. asocia la conducta de no pagar?. Fuente: BCN, estudio realizado por el Diario el Mercurio.

Se desprende del gráfico anterior que en el año 2015 las personas asociaban la evasión a: (1) una falta de respeto a las personas que sí pagan. (2) Una forma de protesta por lo malo del sistema de transporte y (3) hay gente que no le alcanza la plata. Y que en el año 2016 esta percepción cambió drásticamente y las razones relacionándose a comportamientos más oportunistas, como: (1) Conducta deshonesta: gente fresca y sinvergüenza, (2) Falta de conciencia y responsabilidad ciudadana y (3) una falta de respeto a las personas que sí pagan [Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, 2017].

Finalmente, cabe mencionar un enfoque diferente propuesto por Néstor Gallegos [Reyes, 2017] donde identifica dos tipos de evasión relacionadas a la frecuencia y no a la intencionalidad de los pasajeros:

1. Evasión Circunstancial: Asociada a los usuarios que se subieron al transporte público y no pagan el viaje debido a que no tienen saldo suficiente o en el horario de alta tasa de ocupación del bus (horario punta) usuarios suben por las puertas traseras sin pagar su viaje.
2. Evasión Dura: Asociada a las personas que sistemáticamente evaden el pago del servicio, ya sea por razones económicas, razones políticas, etc.

1.4. PAGO CON QR

"Dale con QR" es una iniciativa propuesta por el Gobierno de Chile que establece la utilización de una aplicación de celular para pagar en el transporte público. Se genera un código QR diferente para cada viaje y se escanea en el TotémBIP. Este registro de los pasajes se va sumando y cuando se llega a un monto máximo mensual (determinado por el Gobierno), todos los viajes posteriores tienen costo cero hasta que se empiece un nuevo mes. Según un estudio de MTT [Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2024], en diciembre de 2022, el pago con QR alcanzó los 900 mil usuarios, y en 2023, esta cifra casi se duplicó, llegando a casi 1 millón 700 mil personas, lo que podría ser considerado como una ante la evasión existente.

Sin embargo, a pesar de los beneficios que esta iniciativa ofrece, el pago con QR presenta numerosos desafíos para los usuarios, como por ejemplo la existencia de cuatro aplicaciones:

- Red Movilidad
- Banco Estado
- Mercado Pago
- Movired

El uso de cualquiera de ellas puede resultar confuso para los usuarios, debido a que no hay criterios estandarizados para la elección de las mismas. Se puede optar por la más intuitiva, la que sea de fácil uso o la que ofrezca mayores beneficios asociados. A esto se le suma, que todas estas aplicaciones requieren de una conexión a internet estable, lo que puede ser un desafío en áreas con señal débil o intermitente o para quiénes no pueden pagar por un servicio de internet móvil. Por otro lado, un nuevo obstáculo tiene que ver con la capacidad de las personas de escanear el código QR de manera correcta, es decir, se debe considerar el

posicionamiento del lector del Tótem BIP con el dispositivo móvil. Lo anterior puede impactar en el tiempo de demora de la validación del pasaje, ralentizando así el proceso de ingreso y pago en el transporte público, lo que indudablemente provoca un aumento en las filas de ingreso y el descontento de la gente.

1.5. ÁRBOL DEL PROBLEMA

A continuación se presenta el Árbol del Problema que resume las causas, el problema central y los efectos de la resolución de este problema:

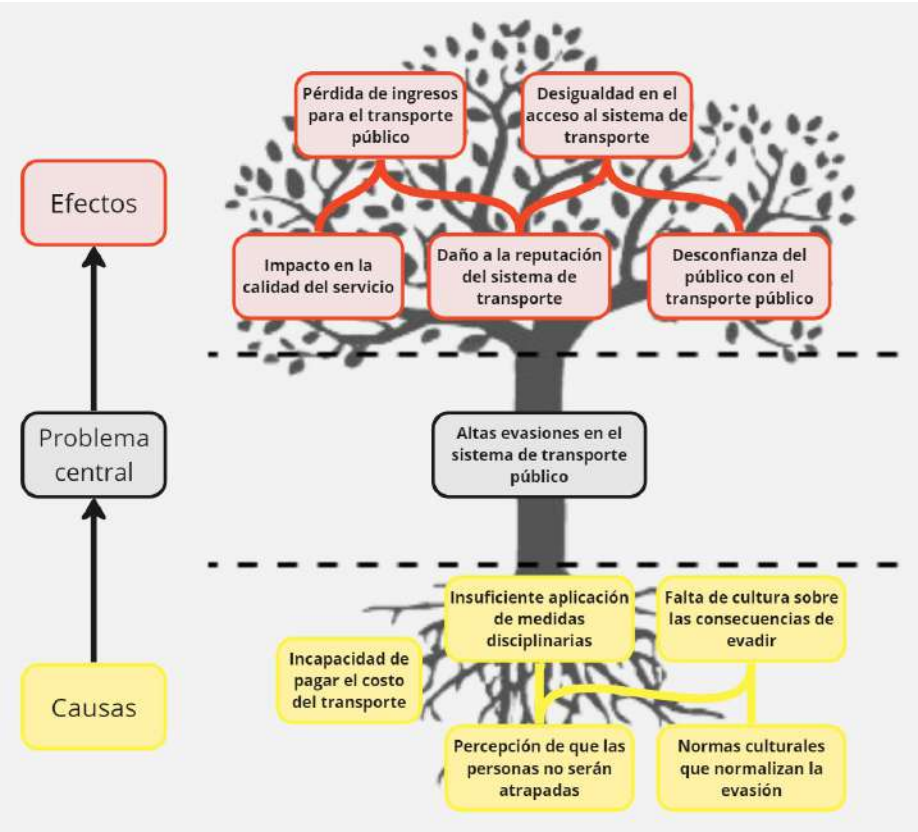

Figura 2: Árbol de Causa y Efecto.
Fuente: Elaboración Propia.

1.5.1. OBJETIVOS

1.5.2. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de control de acceso inteligente basado en tecnología RFID UHF, con el propósito de evaluar su funcionamiento como alternativa al sistema de pago actual en el transporte público de Santiago, integrando herramientas de automatización, almacenamiento y visualización de datos para facilitar el análisis del comportamiento de los usuarios. Este objetivo responde solo a la primera etapa de una macro propuesta, la que no será abordada por completo en esta memoria.

1.5.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar e implementar un sistema de detección de tarjetas RFID que permita reconocer de manera confiable el paso de usuarios en condiciones representativas del transporte público.
- Desarrollar una aplicación de captura y registro de eventos que facilite el almacenamiento estructurado de datos de validación, con foco en eficiencia y trazabilidad.
- Integrar herramientas de visualización y análisis que permitan interpretar los datos recolectados mediante métricas clave y paneles interactivos, orientados a evaluar patrones de uso y condiciones de éxito/fallo en la lectura.
- Evaluar el desempeño del sistema propuesto en un entorno controlado, mediante pruebas experimentales que simulen escenarios reales de uso, incluyendo variaciones en soporte, distancia, altura y posibles interferencias.

CAPÍTULO 2
MARCO CONCEPTUAL

2.1. BASE DE DATOS

Microsoft SQL Server es un sistema de gestión de bases de datos centrado en el modelo relacional, lo que significa que la información se almacena en tablas que pueden estar interconectadas mediante claves primarias y foráneas. Esta estructura permite representar de forma lógica y coherente grandes volúmenes de información, facilitando el acceso, la consulta y la actualización eficiente de los datos. Además, incorpora herramientas que permiten la automatización de procesos, la integración con otras plataformas (como Power BI) y el manejo seguro de transacciones, lo que lo convierte en una solución robusta para proyectos que requieren trazabilidad, integridad y eficiencia en el tratamiento de datos [Microsoft Corporation, 2024a].

2.2. ENTORNO DE ADMINISTRACIÓN DE BASE DE DATOS: SQL SERVER MANAGEMENT STUDIO (SSMS)

Para la gestión de la base de datos relacional utilizada en este proyecto, se empleó SQL Server Management Studio (SSMS), una herramienta gráfica oficial desarrollada por Microsoft para la administración de servidores SQL. SSMS permite ejecutar consultas, diseñar estructuras de datos, monitorear el rendimiento de la base y realizar tareas de mantenimiento mediante una interfaz visual y funcional. Su uso facilita la interacción con el sistema de base de datos sin necesidad de operar exclusivamente mediante comandos, lo cual resulta especialmente útil en procesos de carga de datos desde archivos.csv o en el análisis preliminar de los datos almacenados [Microsoft Corporation, 2023].

2.3. POWER BI

Power BI es una herramienta de inteligencia de negocios que permite representar datos mediante gráficos interactivos y paneles visuales. Su principal ventaja radica en la capacidad de conectarse a diversas fuentes, como SQL Server, y entregar visualizaciones dinámicas para el análisis y toma de decisiones. En contextos académicos y profesionales, su uso se ha consolidado como una solución eficiente para representar datos complejos de forma accesible y visualmente clara [Microsoft Corporation, 2024b].

2.4. PYTHON

Para los procesos de recolección, análisis e integración de datos, Python fue el lenguaje de programación de alto nivel elegido. Esta herramienta fue seleccionada debido a su sintaxis simple y cercana al lenguaje humano, lo que facilita su aprendizaje y uso. Además, cuenta con una amplia comunidad y un ecosistema de bibliotecas especializadas que permiten realizar tareas complejas de forma eficiente, especialmente en el ámbito del análisis de datos.

Python ha adquirido gran relevancia en el mundo académico y profesional por su versatilidad y la facilidad con la que puede integrarse con diferentes tecnologías. Su uso es especialmente común en áreas como la ciencia de datos, inteligencia artificial y análisis estadístico, donde permite desarrollar soluciones rápidas y efectivas sin necesidad de una compilación previa. Según [Pérez *et al.*, 2011] el ecosistema de Python ofrece una plataforma robusta y flexible que facilita el desarrollo de soluciones científicas y computacionales a gran escala.

2.5. OBSERVACIÓN DIRECTA

La observación directa es una técnica cualitativa de recolección de datos que consiste en registrar el comportamiento de personas, objetos o fenómenos tal como ocurren en su entorno natural. A diferencia de otras metodologías, esta técnica no requiere necesariamente la intervención del investigador, permitiendo captar información contextual rica, espontánea y no mediada por cuestionarios o entrevistas. Su principal fortaleza radica en la posibilidad de detectar patrones conductuales y dinámicas sociales que pueden pasar desapercibidas en métodos más estructurados [Díaz Sanjuán y Hernández García, 2010, p. 5].

Dentro de sus modalidades, se encuentra la observación no participante, la cual implica que el observador no interactúa con los sujetos estudiados, limitándose únicamente a registrar lo que ocurre. Esta forma de observación es especialmente útil cuando se busca minimizar el sesgo provocado por la presencia del investigador en el entorno.

2.6. MEJORA CONTINUA

La mejora continua es un enfoque estratégico y operativo que busca optimizar progresivamente procesos, productos o sistemas mediante evaluaciones cíclicas, implementación de cambios y aprendizaje basado en resultados. Uno de los fundamentos más reconocidos de este enfoque es el ciclo PDCA (Planificar–Hacer–Verificar–Actuar), formulado por W. Edwards Deming, quien lo planteó como un modelo dinámico para el perfeccionamiento constante en cualquier ámbito organizacional [Deming, 1986].

En el ámbito del desarrollo de soluciones tecnológicas, la mejora continua implica observar el comportamiento del sistema en contextos reales, identificar puntos críticos y aplicar

correcciones o adaptaciones iterativas. Este proceso se apoya en la recolección y análisis sistemático de datos de funcionamiento, que permiten emitir juicios objetivos sobre el desempeño y fundamentar decisiones de rediseño.

2.7. CALIDAD DE SOFTWARE

La calidad de software es un concepto que hace referencia al grado en que un sistema informático cumple con los requisitos funcionales y no funcionales establecidos, así como con las expectativas de los usuarios. Este concepto se basa en una serie de atributos medibles que permiten evaluar la robustez y eficacia del software a lo largo de su ciclo de vida.

Según el estándar internacional ISO/IEC 25010:2011, la calidad de software se clasifica en ocho características principales: funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, rendimiento, sostenibilidad, portabilidad, compatibilidad y seguridad. Cada una de estas dimensiones considera aspectos tanto internos como externos del producto, desde la estructura del código hasta el comportamiento observable del sistema [International Organization for Standardization, 2011].

Por ejemplo, la fiabilidad hace referencia a la capacidad del software para mantener su desempeño previsto bajo condiciones específicas durante un periodo determinado. La usabilidad evalúa el grado en que un usuario puede interactuar con el sistema de forma satisfactoria, eficiente y eficaz. Finalmente, el rendimiento analiza si el software responde con tiempos adecuados y utiliza óptimamente los recursos disponibles en diferentes contextos de carga [International Organization for Standardization, 2011, p.13-15].

2.8. AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS

La automatización de procesos se refiere al uso de tecnologías para ejecutar tareas o flujos de trabajo de manera autónoma, con mínima o nula intervención humana. Esta práctica busca optimizar la eficiencia operativa, reducir errores manuales y garantizar la ejecución consistente de actividades repetitivas o estructuradas. A través de herramientas de software, códigos o sistemas integrados, la automatización permite mejorar tiempos de respuesta y liberar recursos humanos para tareas de mayor valor agregado [Davenport y Ronanki, 2018, p. 3].

Desde una perspectiva organizacional, la automatización se vincula estrechamente con la transformación digital, permitiendo integrar datos, plataformas y servicios en entornos cada vez más dinámicos. Su implementación puede abarcar desde simples tareas, como el procesamiento de archivos o envío de notificaciones, hasta flujos complejos que conectan sensores, bases de datos y visualización en tiempo real.

2.9. IDENTIFICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA (RFID)

El RFID es una tecnología que permite la identificación automática de objetos mediante el uso de ondas de radio. Un sistema RFID típico consta de tres componentes principales: una etiqueta o TAG, un lector o interrogador y un sistema de procesamiento de datos. Las etiquetas RFID pueden ser pasivas, activas o semipasivas, dependiendo de su fuente de energía y capacidad de transmisión.

Los sistemas RFID operan en diferentes rangos de frecuencia, cada uno con características específicas en términos de alcance, velocidad de transmisión de datos y sensibilidad a interferencias. A continuación, se presenta una tabla con los rangos de frecuencia más comunes:

Tabla 4: Rangos de Frecuencia
Fuente: How to Select a Correct Tag – Frequency [RFID4U, 2023].

Frecuencia	Rango	Características
LF	125–134.2 kHz	Alcance corto (hasta 10 cm), menos sensible a interferencias.
HF	13.56 MHz	Alcance medio (hasta 1 m), sensibilidad media a interferencias.
UHF	860–960 MHz	Alcance largo (hasta 12 m), alta velocidad de lectura, más sensible a interferencias.

Cabe mencionar que este tipo de sistemas tienen riesgos asociados a la ciberseguridad y la privacidad de los datos, por ejemplo, la lectura no autorizada (skimming), que permite obtener datos de una tarjeta RFID sin consentimiento del usuario; la clonación de tarjetas (cloning); las colisiones electromagnéticas, generadas por la presencia simultánea de múltiples señales que interfieren en el proceso de lectura; las interferencias intencionales (jamming), que buscan degradar o bloquear el funcionamiento de los lectores RFID mediante la emisión deliberada de señales de ruido [Rieback *et al.*, 2006].

2.10. CÓDIGO ELECTRÓNICO DE PRODUCTO (EPC)

Por otro lado, el EPC, el cual es un identificador único diseñado para proporcionar una identidad global a cada objeto físico. A diferencia de los códigos de barras tradicionales, que identifican tipos de productos, el EPC permite la identificación individual de cada ítem, facilitando una trazabilidad más precisa en la cadena de suministro.

Un EPC típico de 96 bits se estructura en varios campos, incluyendo un número de versión, un identificador del fabricante, una referencia del objeto y un número de serie único. Es-

ta estructura permite una codificación detallada y estandarizada de información relevante sobre el producto.

Un ejemplo de estructura de un EPC de 96 bits es el número **01.0000389.000162.000169740**, el cual se compone de cuatro campos principales que pueden verse a continuación:

Tabla 5: Ejemplo de un EPC.
Fuente: Adaptado de [ResearchGate, 2023].

Header	**EPC Manager**	**Object Class**	**Serial Number**
01	0000389	000162	000169740

Los campos señalados en la tabla 5 se interpretan del siguiente modo; en primer lugar, el campo Header señala el esquema de codificación utilizado en el EPC. Segundo, se encuentra el EPC Manager que identifica al fabricante o a la entidad responsable del objeto etiquetado. En tercer lugar, Object Class describe el tipo o categoría del producto al que pertenece el ítem. Y por último, Serial Number representa un número único que permite distinguir individualmente cada producto dentro de su clase.

2.11. SELECCIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL

En investigaciones cuantitativas, determinar adecuadamente el tamaño de muestra es un paso clave para garantizar la validez estadística de los resultados. Existen diversos métodos para calcularlo, dependiendo del tipo de variable, el tamaño de la población, el nivel de confianza deseado y los recursos disponibles.

Entre los enfoques más utilizados se encuentran:

- La estimación clásica basada en proporciones.
- La corrección para poblaciones finitas.
- Los métodos empíricos aplicados a estudios piloto.
- El método de Cochran

2.11.1. MÉTODO DE COCHRAN

Este método, [Cochran, 1977] permite calcular el tamaño mínimo de muestra para estimar proporciones en poblaciones grandes con un nivel de confianza y un margen de error específico. Este enfoque asume una variabilidad máxima al considerar $p = 0{,}5$, lo que garantiza un tamaño de muestra conservador.

La fórmula general es:

$$n_0 = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{e^2} \tag{1}$$

Donde:

- n_0 es el tamaño de muestra sin corregir.
- Z es el valor crítico de la distribución normal estándar (ver anexo 6.3).
- p es la proporción esperada de éxito.
- e es el margen de error tolerado.

Cuando se calcula el tamaño de la muestra para estimar una proporción en una población conocida y finita, se recomienda aplicar una **corrección para población finita**, especialmente cuando la muestra representa una fracción significativa del total poblacional. Esta corrección se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{n_0 - 1}{N}\right)} \tag{2}$$

Donde:

- n es el tamaño de muestra ajustado.
- n_0 es el tamaño de muestra sin corrección.
- N es el tamaño total de la población.

Este ajuste reduce el tamaño requerido cuando la población es relativamente pequeña, ya que tomar una muestra grande en este contexto aporta mayor representatividad. No obstante, su impacto se vuelve **despreciable cuando la población es muy grande** (por ejemplo, del orden de cientos de miles o millones). En ese caso, el valor de N tiende a infinito y el denominador de la expresión tiende a 1, por lo tanto $n \approx n_0$.

2.12. MÉTODOS ESTADÍSTICOS INFERENCIALES

Los métodos estadísticos inferenciales permiten extraer conclusiones sobre una población a partir del análisis de una muestra. Su propósito principal es estimar parámetros poblacionales desconocidos, contrastar hipótesis o evaluar relaciones entre variables, siempre bajo un cierto nivel de confianza.

2.12.1. TEST DE CHI-CUADRADO

La prueba de Chi-cuadrado de Pearson (χ^2), propuesta originalmente por Karl Pearson en 1900 [Pearson, 1900], es un método estadístico no paramétrico que permite evaluar si existe una relación significativa entre dos variables categóricas, mediante el análisis de una tabla de contingencia. Su aplicación ha sido ampliamente desarrollada y explicada en textos modernos de estadística aplicada, como el de Zar [Zar, 2010], donde se utiliza para contrastar hipótesis de independencia en muestras observacionales.

La fórmula general para calcular el estadístico de Chi-cuadrado es:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \tag{3}$$

Donde:

- O_i: Frecuencia observada en la celda i.
- E_i: Frecuencia esperada en la celda i (bajo la hipótesis de independencia).

El valor de χ^2 se compara con un valor crítico extraído de la distribución Chi-cuadrado, de acuerdo a los grados de libertad (gl), definidos como:

$$gl = (n_{\text{filas}} - 1)(n_{\text{columnas}} - 1) \tag{4}$$

Los grados de libertad representan la cantidad de valores independientes que pueden variar en un sistema dado. En el contexto de una tabla de contingencia, indican cuántas celdas pueden cambiar libremente antes de que las demás queden determinadas por las sumas totales. Cuanto mayor sea el número de grados de libertad, más flexible es el sistema y más exigente es el valor crítico para considerar una diferencia como estadísticamente significativa.

Si el valor calculado de χ^2 supera el valor crítico, o si el *p-valor* es menor que el nivel de significancia (α), se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables.

2.12.2. DISTINCIÓN ENTRE VARIABLE Y CONSTANTE

En estadística, una variable es toda característica o atributo que puede adoptar distintos valores en los diferentes individuos o unidades de estudio. Por ejemplo, la distancia de lectura, la intensidad de señal o el estado de detección son variables porque, en cada observación, pueden tomar valores distintos [Stevens, 1946]. Por el contrario, una constante es un valor fijo que no varía en el conjunto de datos analizado; tiene varianza nula y, por tanto, no contribuye a la dispersión ni al cálculo de estadísticos de variación [Harrell, 2015].

Cuando en un experimento se incluyen niveles prefijados o factores inmutables, estos aparecen como constantes. Dado que no generan variabilidad interna, no es necesario estimar su distribución ni calcularles estadísticos de dispersión: se usan directamente como condiciones fijas del diseño experimental.

2.13. PAQUETE ESTADÍSTICO PARA CIENCIAS SOCIALES (SPSS)

SPSS es un software de análisis estadístico desarrollado por IBM [IBM Corp., 2020], ampliamente utilizado en disciplinas como sociología, psicología, educación, salud e ingeniería. Proporciona un entorno gráfico amigable para ejecutar análisis estadísticos avanzados sobre conjuntos de datos estructurados, y ha sido adoptado como una herramienta estándar en la investigación científica cuantitativa.

Entre sus principales funcionalidades destacan:

- Pruebas de hipótesis (Chi-cuadrado, t de Student, ANOVA)
- Tablas de contingencia y análisis cruzado de variables categóricas
- Estadísticas descriptivas, correlaciones y regresión
- Análisis de residuos ajustados y estandarizados
- Generación de gráficos, tablas y reportes automáticos

CAPÍTULO 3
PROPUESTA DE SOLUCIÓN

A pesar de las diversas medidas implementadas a lo largo del tiempo para subsanar la omisión o evasión del pago en el transporte público, la misma sigue representando un desafío significativo tanto en Chile como en otros países. Esta práctica no solo genera importantes pérdidas económicas, sino que también afecta la planificación, calidad y sostenibilidad del sistema de transporte urbano.

En esta línea, diversos países ya han adoptado soluciones tecnológicas efectivas para abordar este problema. Por ejemplo, en 2018, Brasil detectó un uso indebido de tarjetas estudiantiles en el transporte público, tanto por uso fuera del horario permitido como por suplantación ilegal de identidad. Para enfrentar este problema, se implementó un sistema de reconocimiento facial en los buses, lo que permitió identificar a 2.200 usuarios irregulares en solo una semana [Mercurio, 2018].

Un enfoque distinto e innovador se adoptó en el Metro de Valparaíso, donde se instalaron cámaras en los tótems de pago para comparar datos biométricos de los usuarios con los registros previamente almacenados. Si no se detectaba una coincidencia, el chip de la tarjeta era bloqueado automáticamente [Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2018].

Actualmente, el sistema de transporte público en Santiago opera con la tarjeta BIP!, heredera de la antigua tarjeta Multivía [Labraña, 2017]. La misma no se asocia a un usuario en particular, tiene un saldo monetario recargable y funciona mediante un sensor que lee la tarjeta y descuenta el valor del pasaje validando la entrada del usuario al transporte público. Si bien la información técnica sobre sus dimensiones y frecuencias es limitada, pertenece al rango de frecuencia LF. Además, es necesario entender que el problema del no uso de la tarjeta BIP no radica en su funcionalidad, sino en el factor humano de su utilización.

Tecnologías similares ya se utilizan en otros servicios y pueden servir de referencia para el transporte público. En aeropuertos, se emplean arcos magnéticos que detectan objetos metálicos mediante la distorsión de un campo magnético constante [Skorupski y Uchroński, 2017]. En autopistas, los sistemas TAG permiten identificar vehículos y aplicar cobros automáticos al leer un dispositivo instalado en el parabrisas. Por su parte, en supermercados, se utilizan arcos con tecnologías RFID, electromagnéticas o acustomagnética que detectan productos no pagados al pasar por puntos de control, activando alarmas si no han sido registrados correctamente [Nueno y Videla, 2009].

3.1. MACRO PROPUESTA

Considerando las tecnologías mencionadas, **se propone el desarrollo e implementación de un sistema de control de acceso y pago inteligente para el transporte público RED, basado en tecnología RFID de banda UHF, asociada a un usuario específico a través de su Cédula de Identidad**. Para llevar a cabo esta propuesta, se han definido **cuatro etapas de acción**: (1) el testeo de la tarjeta con el sensor en una frecuencia distinta a la utilizada por la tarjeta BIP, (2) la homologación de la tarjeta propuesta con la Cédula de Identidad chilena, (3) el testeo del dispositivo creado en un ambiente real que entregue datos empíricos que validen su eficacia y eficiencia (considerando las dinámicas de las personas, el tipo de transporte, las rutas, el tiempo y cualquier imprevisto), y finalmente, (4) el análisis ético y moral del dispositivo como nuevo método de pago del transporte, con el fin de escalar esta propuesta a una política pública y así solucionar fehacientemente el problema de la evasión.

3.2. SUB PROPUESTA: PRIMERA ETAPA

Esta memoria se centrará en la primera etapa antes mencionada, que contempla específicamente el uso de una tarjeta con chip RFID pasivo, adherida o transportada por el usuario, la cual puede ser leída a distancia por sensores RFID UHF ubicados estratégicamente en los accesos del transporte público, como buses o paraderos. A diferencia del sistema PagoBIP actual —que requiere contacto físico directo con el tótem validador—, esta nueva propuesta permite una validación sin contacto, ya que los sensores son capaces de detectar la presencia de tarjetas dentro de un mayor radio de distancia. El proceso de validación se inicia automáticamente cuando la tarjeta entra en el campo de lectura del sensor. La detección es instantánea y no requiere que el usuario extraiga la tarjeta ni la oriente de forma específica, siempre que se mantenga dentro de un rango definido.

El uso de esta tecnología de las tarjetas busca agilizar el ingreso de los pasajeros al transporte, reducir los tiempos de espera, mejorar la experiencia de usuario y así contribuir a una mayor eficiencia operativa del sistema de transporte público chileno. Además, la arquitectura planteada permite registrar múltiples eventos de validación en tiempo real, lo que abre la posibilidad de incorporar herramientas de control, análisis de datos y generación de reportes con enfoque en trazabilidad, patrones de uso y detección de anomalías.

3.3. ESQUEMA DE DISEÑO DE METODOLOGÍA MACRO PROPUESTA

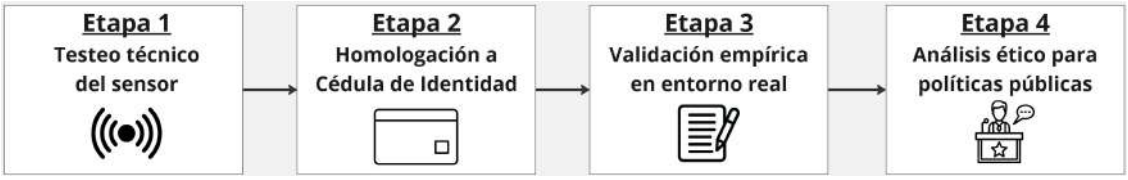

Figura 3: Esquema de Metodología
Fuente: Elaboración Propia.

Tal como fue mencionado anteriormente, la memoria se centrará en la primera etapa de la Figura 3

3.4. ESQUEMA DE DISEÑO DE METODOLOGÍA: PRIMERA ETAPA

- **Diseño e Implementación:** Esta primera instancia contempla el diseño físico y logístico de los componentes que integran el sistema de lectura basado en RFID. Comienza con la selección del sensor YR903 y continúa con el desarrollo de un código en Python encargado de capturar los datos emitidos por el sensor. Posteriormente esta información se almacena automáticamente en una base de datos SQL mediante una conexión estructurada, lo que permite su disponibilidad y posterior análisis. Este flujo automatizado constituye el núcleo técnico del sistema. Además, se considera desde el inicio la integración con herramientas de visualización como Power BI, que permiten representar los datos capturados en tiempo real mediante gráficos y dashboards. Esto posibilita una comprensión más accesible y dinámica de la información registrada, lo que facilitará la toma de decisiones en instancias posteriores.

- **Testing del Sensor y Observación Directa:** Ya con el sistema operativo diseñado, se procede a realizar pruebas de uso mediante una fase de observación directa no participante, en la que se registran comportamientos reales de los usuarios respecto al uso de medios de pago en el transporte público. Luego, se definen los objetivos del testing y se ejecutan pruebas experimentales controladas simulando condiciones cotidianas. Estas pruebas permiten recopilar datos empíricos sobre el desempeño del sensor YR903 frente a diversos escenarios, los que incluyen formas de portar la tarjeta, distancias de lectura, interferencias físicas, entre otros.

- **Procesamiento de los datos e Inteligencia de Negocios:** En esta nueva instancia, se realiza el procesamiento estructurado de los datos obtenidos en las fases anteriores. Esto incluye limpieza y transformación de datos, y análisis de registros a través de códigos y consultas automatizadas. Además, aquí se definen las métricas clave que permiten alimentar dashboards dinámicos mediante Power BI. Este procesamiento no solo

permite observar el comportamiento del sistema, sino que además habilita el uso de herramientas de inteligencia de negocios, como el análisis y visualizaciones de datos, orientadas a generar conocimiento a partir de los resultados.

- **Análisis y Mejoras Continuas:** En la última instancia, los resultados visualizados y procesados se someten a un análisis estructurado bajo un enfoque de mejora continua, que permite identificar fallas, cuellos de botella u oportunidades de optimización. Mediante el monitoreo de indicadores y la retroalimentación basada en evidencia, se priorizan acciones correctivas que puedan mejorar el funcionamiento del sistema, su eficiencia y su adaptabilidad. Este ciclo de evaluación y mejora constituye una parte esencial del enfoque metodológico, asegurando que el desarrollo del sistema no sea lineal, sino iterativo y evolutivo.

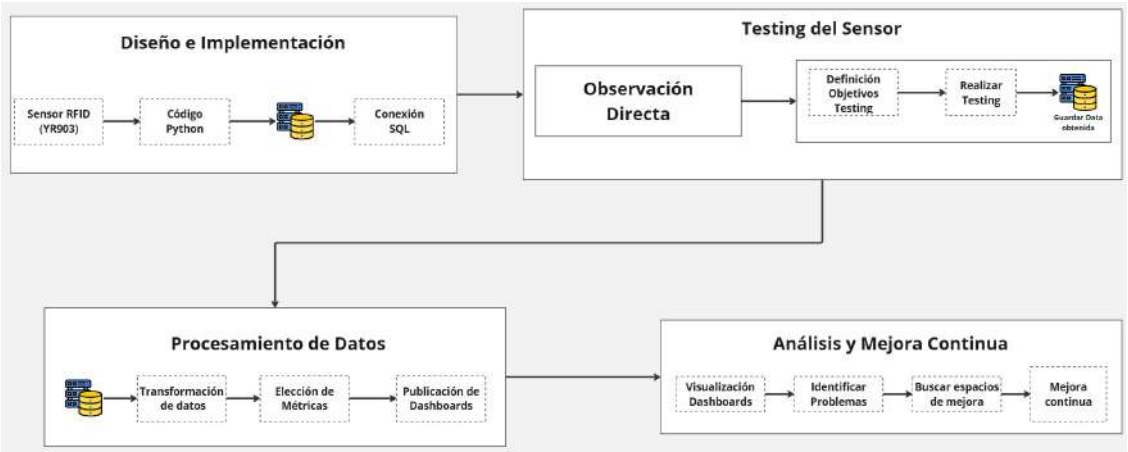

Figura 4: Esquema de Metodología para la Primera Etapa
Fuente: Elaboración Propia.

3.5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño e implementación del sistema comenzó con la selección del sensor YR903, un lector RFID UHF de alta frecuencia, el cual permite detectar tarjetas mediante señales electromagnéticas sin necesidad de contacto físico.

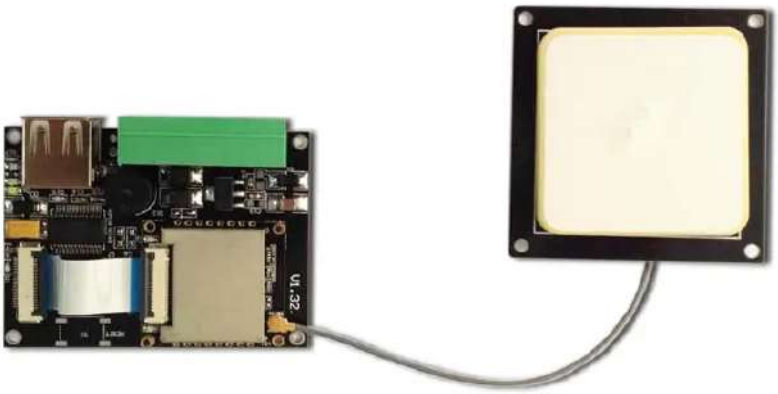

Figura 5: Sensor RFID UHF YR903
Fuente: Recuperado del sitio oficial de Invelion [Invelion, sf]

Este sensor es compatible con tarjetas del tipo EPC Gen2, y cuenta con conectividad USB, lo que facilita su integración con plataformas de desarrollo como Python. Además, para garantizar el funcionamiento correcto de las tarjetas y del lector, se utilizó la herramienta UHF DEMO, una interfaz de prueba que permite visualizar los códigos EPC únicos de cada tarjeta.

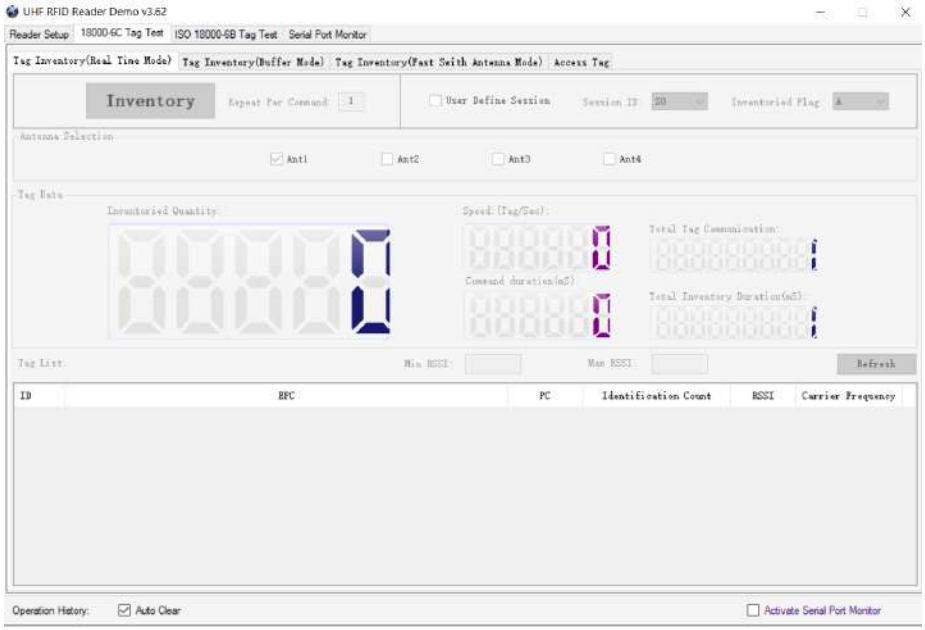

Figura 6: Herramienta UHF Demo
Fuente: Recuperado del sitio oficial de Invelion [Invelion, sf]

Una vez obtenido el listado de EPC, se desarrolló un código en Python encargado de gestionar la comunicación con el sensor a través del puerto serial COM. Este código permite identificar qué tarjeta fue leída, registrar la detección en un archivo.csv con marca de tiempo, y clasificar los registros según el tipo de prueba o caso de uso, como se muestra a continuación:

Tabla 6: Ejemplo de formato archivo.csv.
Fuente: Elaboración Propia

Tarjeta	**Fecha**	**Caso de Uso**	**Estado**
Tarjeta 1	03-06-2025	Totem Directo	Detectada

Finalmente, el programa incorpora la opción de subir automáticamente los datos recolectados a una base de datos relacional desarrollada en Microsoft SQL Server, permitiendo centralizar la información para su posterior análisis.

3.6. TESTING DE USO

Para comprender los comportamientos reales de los usuarios del transporte público chileno en relación con los medios de pago, se empleó la técnica de observación directa no participativa. Esta metodología cualitativa implica observar de forma sistemática a individuos en su entorno natural sin intervenir ni interactuar con ellos, permitiendo registrar patrones de conducta en contextos reales [Díaz Sanjuán y Hernández García, 2010].

La observación se llevó a cabo de manera presencial en dos paraderos de buses de alta afluencia en la comuna de Puente Alto, la cual, con una población de 568.106 habitantes según el Censo de 2017, es la comuna más poblada de Chile [Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2017]. Esta elección se hizo con el objetivo de que la observación llevada a cabo fuera la que mejor representara y de manera fiel las dinámicas de la población santiaguina en cuanto a la diversidad de usuarios.

En esta línea, durante los períodos de mayor congestión (horas punta), se registraron los diferentes métodos de pago utilizados por los pasajeros al interactuar con los tótems de carga y validación de la tarjeta BIP. La observación se centró en identificar las distintas formas en que los usuarios portaban y utilizaban sus tarjetas de transporte, con el objetivo de establecer una tipología de casos de uso representativos para las pruebas experimentales posteriores.

A fin de que los resultados obtenidos pudieran ser estadísticamente extrapolables a la población de Santiago, se calculó el tamaño mínimo de muestra necesario utilizando la ecuación 1. Es por esta razón que para este estudio se definieron los siguientes parámetros:

- **Nivel de confianza:** Se seleccionó un **90 % de nivel de confianza**, lo cual implica aceptar un 10 % de incertidumbre en la estimación. Esta decisión se justificó en función de

la naturaleza exploratoria del estudio y la disponibilidad limitada de recursos, balanceando precisión con factibilidad operativa. El valor crítico de la distribución normal estándar para este nivel de confianza es $Z =$ 1.645, obtenido desde la tabla de valores acumulados de la distribución normal, correspondiente a una probabilidad acumulada de 0.95 en un test bilateral (ver anexo 6.3).

- **Proporción esperada (p):** Dado que no se disponía de antecedentes previos fiables sobre la tasa de éxito esperada en la lectura de tarjetas RFID en condiciones reales, se optó por utilizar el valor conservador $p =$ 0.5 . Este valor maximiza la varianza de la fórmula $p(1-p)$, lo que implica asumir el escenario de máxima incertidumbre posible. Su uso garantiza que el tamaño de muestra calculado sea suficiente, incluso si la proporción real difiere del valor asumido.

- **Margen de error (e):** Se estableció un **margen de error aceptable de ±10 %** ($e = 0{,}10$), considerando que el objetivo del estudio no es la estimación exacta de una proporción puntual, sino la validación general de un comportamiento funcional del sensor. Este valor permite captar una tendencia robusta sin exigir una precisión estadística excesiva que aumentaría innecesariamente el tamaño muestral.

Sustituyendo estos valores en la Ecuación (1), se obtiene:

$$n_0 = \frac{(1{,}645)^2 \cdot 0{,}5 \cdot (1-0{,}5)}{(0{,}10)^2} = \frac{2{,}706 \cdot 0{,}25}{0{,}01} = 67{,}65 \Rightarrow \boxed{n = 68} \tag{5}$$

Dado que la población total observada es suficientemente grande, no se consideró necesaria la aplicación de la corrección para población finita (ecuación 2). Por lo tanto, se definió que el número mínimo de simulaciones por caso debía ser de **68**, asegurando así una representatividad estadística con un 90 % de nivel de confianza y un margen de error aceptado de ±10 %.

Con la información recabada se definieron los objetivos del proceso de testing del sensor RFID YR903. Esta fase tuvo como propósito evaluar el desempeño del sensor bajo distintas condiciones de uso, tanto para pruebas en terreno como para los casos en un entorno controlado.

Los objetivos del testing se dividieron en cuatro segmentos clave:

1. **Determinación de la distancia de funcionamiento óptima:** Se realizó una investigación sobre la altura promedio de hombres y mujeres adultos en Chile, con el objetivo de definir una altura representativa para la instalación del sensor en entornos reales. A partir de esa base, se ejecutaron pruebas progresivas para determinar la distancia máxima a la que el sensor YR903 podía detectar tarjetas RFID de manera precisa y sin errores. Con esta información se definió una distancia estándar de lectura, calibrada según criterios técnicos y ergonómicos.

2. **Evaluación de los casos de uso observados en terreno:** Se seleccionaron los tres métodos de pago más frecuentes detectados durante la observación (excluyendo el uso de QR), los cuales fueron:

   - Tarjeta BIP usada directamente sobre el tótem.
   - Tarjeta BIP dentro de la billetera.
   - Tarjeta BIP colgada en porta credenciales.

   Para cada uno de estos casos se realizaron **68 simulaciones de validación**, para verificar si el sensor propuesto detectaba correctamente las tarjetas. Estos resultados se almacenaron en un archivo `.csv`, indicando el número de tarjeta, fecha, hora, caso de uso y si la lectura fue exitosa o fallida.

3. **Evaluación de los casos en un entorno controlado:** Se propusieron casos de prueba adicionales que podrían representar comportamientos futuros o situaciones menos frecuentes. Estos incluyeron:

   - Sostener la tarjeta a distancia dentro del rango operativo del sensor propuesto.
   - Portar la tarjeta en una prenda de vestir (abrigo o polerón, pantalón).
   - Transportar la tarjeta en un bolso o mochila.
   - Tarjeta dentro de la billetera con tarjetas bancarias.

   Nuevamente, se efectuaron 68 simulaciones por cada nuevo caso y se registraron los resultados de manera estructurada en el mismo archivo `.csv`.

4. **Almacenamiento en base de datos:** Una vez recopilada la información de todas las simulaciones, se utilizó el código desarrollado en Python para automatizar la carga del archivo `.csv` en una base de datos SQL Server previamente configurada. Esto permitió centralizar los datos y dejarlos disponibles para su análisis posterior mediante herramientas de inteligencia de negocios.

3.7. PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez finalizadas las pruebas experimentales y recopilada la información en archivos `.csv`, se procedió al procesamiento estructurado de los datos mediante una arquitectura de automatización compuesta por tres ciclos principales: captura, almacenamiento y visualización. Este diagrama de trabajo permite que los datos fluyan de forma continua y controlada desde el sensor YR903 hasta el entorno de análisis, sin intervención manual intermedia, como se ilustra en la Figura 7.

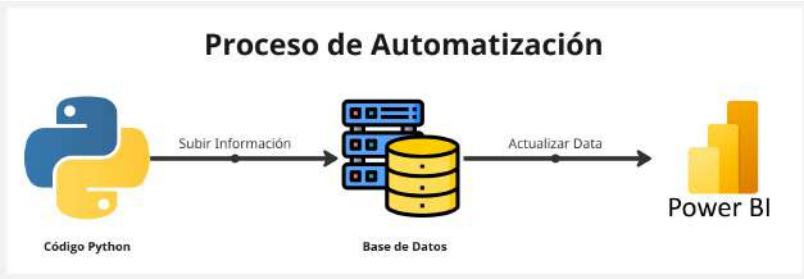

Figura 7: Proceso de Automatización de Datos.
Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, el código de Python 1 desarrollado (expuesto más adelante), permite capturar y guardar automáticamente la información obtenida desde el sensor RFID YR903. Este archivo `.csv` contiene campos estandarizados como el nombre de la tarjeta, la fecha y hora del intento, el caso de uso correspondiente y si la detección fue exitosa. Una vez finalizado el proceso de recolección, el código cuenta con una función que permite subir esta información directamente a una base de datos SQL mediante una conexión local, asegurando la integridad y centralización de los datos. La estructura de la tabla SQL utilizada para almacenar los registros puede verse a continuación:

Tabla 7: Estructura de la tabla `Registros` en SQL Server.
Fuente: Elaboración Propia.

Nombre de Campo	Tipo de Dato	Descripción
Tarjeta	VARCHAR(50)	Nombre o alias de la tarjeta RFID
Fecha	DATETIME	Fecha y hora del intento de lectura
Caso	VARCHAR(100)	Descripción del caso de uso evaluado
Estado	VARCHAR(20)	Resultado (Detectada / No Detectada)

Posteriormente, se establece una conexión entre Power BI y SQL. Esta vinculación permite que Power BI acceda y actualice los datos automáticamente, generando un entorno dinámico donde cada ejecución del código y cada inserción en la base de datos se ve reflejada en las visualizaciones.

Una vez cargada la información, se procede a una fase de transformación de datos, tanto desde consultas SQL como dentro del entorno de Power BI. En esta etapa se realiza limpieza, ordenamiento y filtrado de registros, eliminando redundancias y preparando los datos para su análisis. A partir de esta información depurada se definen las métricas clave, como las tasas de detección por caso de uso, la distancia óptima de lectura, el comportamiento por ubicación física de la tarjeta, entre otras.

```
Inicio del programa
  Mostrar menú:
    1 a 16. Casos de Prueba
    17. Subir archivo CSV a SQL
    18. Salir del menú

  Si se elige una prueba:
    Asignar número de caso
    Limpiar lista de EPC detectados
    Iniciar lector RFID YR903
      Mientras el lector esté activo:
        Si se detecta un EPC:
          Verificar si ya fue registrado
          Si no:
            Guardar EPC en archivo CSV con:
              - Nombre de tarjeta
              - Fecha y hora
              - Caso de uso
              - Estado: Detectada
        Si pasa cierto tiempo sin detección:
          Registrar EPCs no detectados. Estado: No Detectada
          Detener lector

  Si se elige subir archivo:
    Conectar a SQL Server
    Leer archivo CSV
    Insertar registros en tabla SQL
  Repetir hasta seleccionar Salir
Fin del programa
```

Código 1: Pseudocódigo del programa principal

3.8. ANÁLISIS Y MEJORAS CONTINUAS

El trabajo del sensor propuesto no termina con la implementación ni con el procesamiento de datos. Una de las premisas fundamentales del proyecto es su capacidad de adaptación y mejora continua, a partir del análisis sistemático de la información recolectada.

Una vez finalizado el proceso de recopilación y visualización de los datos, se llevará a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos en cada uno de los casos de uso evaluados. Este análisis tendrá como objetivo principal identificar patrones de comportamiento en la detección de tarjetas, diferencias de rendimiento entre escenarios y posibles inconsistencias que puedan evidenciar limitaciones técnicas o errores en el diseño de la propuesta.

A partir de la información procesada en Power BI, se realizarán comparaciones entre los distintos escenarios de prueba con el fin de evaluar la eficacia del sensor en diversas condiciones. Esta comparación permitirá establecer conclusiones preliminares respecto a qué casos resultan más favorables para su uso en entornos reales y cuáles presentan barreras que requieren ser abordadas.

En base a los resultados obtenidos, se buscará identificar oportunidades de mejora dentro del sistema diseñado, tanto desde el punto de vista técnico como metodológico. Esto incluirá, por ejemplo, ajustes en la posición del sensor, optimización del procesamiento de datos o redefinición de algunos casos de uso que hayan presentado un bajo nivel de detección.

En esta misma línea y bajo el enfoque de mejora continua, se propondrá una estrategia de evolución iterativa del sistema, en la que los aprendizajes derivados de esta fase inicial permitirán redefinir ciertos parámetros del diseño y ejecutar nuevas rondas de pruebas. Este ciclo permitirá avanzar progresivamente hacia un sistema más robusto, adaptado a las condiciones reales del transporte público, y con una capacidad de integración sostenida a herramientas de inteligencia de negocios para su monitoreo y ajuste permanente.

Finalmente, se analizarán los casos definidos como escenarios especiales, diseñados para explorar condiciones de uso menos convencionales pero igualmente relevantes.

CAPÍTULO 4
VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1. OBSERVACIÓN DIRECTA NO PARTICIPATIVA

Para este estudio, se observó un total de 323 personas, clasificando los métodos de pago utilizados por las mismas de la siguiente manera:

Tabla 8: Resumen de métodos de pago observados en paraderos.
Fuente: Elaboración Propia

Método de Pago	Cantidad de Usuarios
Tarjeta BIP en tótem directo	184
Código QR de celular	88
Tarjeta BIP en billetera	35
Tarjeta BIP en portatarjetas	16
Total	**323**

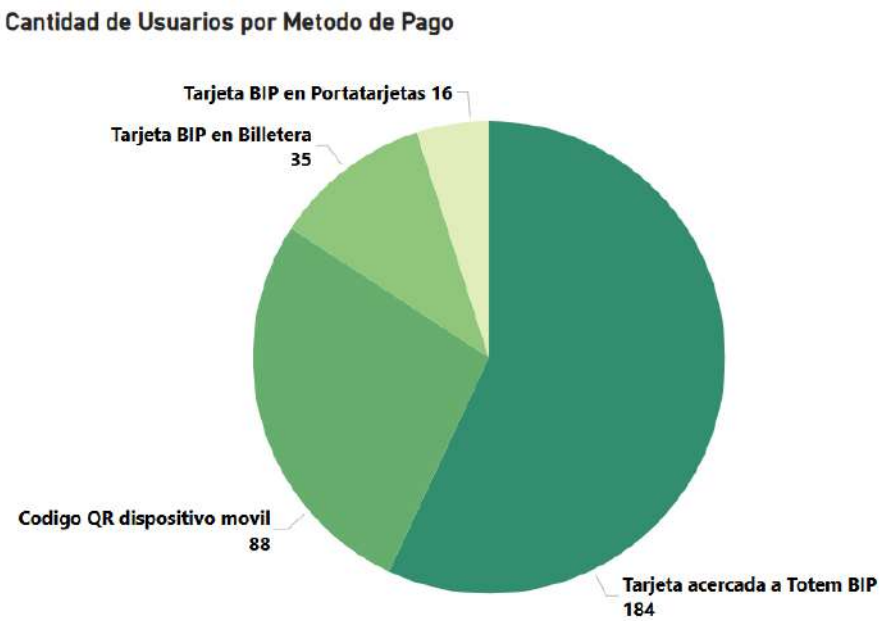

Figura 8: Resumen visual de los métodos de pagos observados en paraderos
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la tabla 8 y el gráfico 8 proporcionan una visión clara de los comportamientos predominantes en el uso de medios de pago en el transporte público dentro de la comuna de Puente Alto.

Se observa que la mayoría de los usuarios utiliza la tarjeta BIP directamente en el tótem bip, esto es seguido por el uso del código QR en celulares, aunque también se registran formas alternativas como el uso de billetera o colgantes portatarjetas. No obstante, para el diseño y evaluación del prototipo desarrollado en esta investigación, se consideraron únicamente los métodos basados en tecnología RFID, excluyendo el caso del código QR, ya que este opera bajo un principio distinto y escapa al enfoque técnico del estudio.

4.2. DEFINICIÓN DEL ENTORNO DE PRUEBA

Luego de la observación directa no participativa, se realizó una investigación sobre las estaturas promedio de hombres y mujeres en Chile para determinar la distancia vertical a la que debería posicionarse el sensor. Según estudios de la organización NCD Risk Factor Collaboration, la estatura promedio de los hombres chilenos es de aproximadamente 172.9 centímetros, mientras que la de las mujeres es de 159.4 centímetros [NCD Risk Factor Collaboration, 2024]:

Tabla 9: Estatura promedio en Chile por género (cm).
Fuente: Elaboración Propia.

Hombres	**Mujeres**
172.9	159.4

En base a esta información, y considerando que en la interacción con el sensor no es relevante capturar señales desde zonas como la parte superior de la cabeza o desde las rodillas hacia abajo —por ser áreas poco utilizadas para portar tarjetas—, se definió una altura aproximada de 1.20 metros como punto de instalación del sensor RFID.

Luego de definir la altura de instalación del sensor, se dio inicio a una serie de pruebas centradas en evaluar el comportamiento del sensor YR903 frente a la proximidad de validación de la tarjeta o distancia horizontal. Estas pruebas se realizaron manteniendo el sensor en una posición fija y acercando la tarjeta RFID progresivamente desde diferentes lugares, como se muestra a continuación:

Tabla 10: Distancias horizontales de prueba (en centímetros).
Fuente: Elaboración Propia.

Distancias en centímetros			
40	50	60	70

De la tabla 10 se desprende que el último valor corresponde al valor máximo estimado como rango límite efectivo de detección. Aunque la documentación técnica del sensor sugiere un alcance teórico superior, se optó por no realizar mediciones más allá de este umbral debido a la creciente inestabilidad en la respuesta del lector observada en pruebas preliminares informales.

4.3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO POR DISTANCIA

Luego de definir el entorno de pruebas, se realizaron 68 intentos consecutivos por ubicación de la tarjeta, manteniendo constante tanto la posición como la orientación de la tarjeta respecto al sensor. Para asegurar la consistencia de la medición, el sensor se mantenía encendido de forma continua durante toda la sesión, sin aplicar pausas entre intentos. El sistema evaluaba de forma constante si una tarjeta era detectada o no. En caso de ser detectada, se anotaba el registro en el archivo correspondiente. Al terminar con todas las tarjetas, se presionaba la tecla “s” del teclado y se detenía la ejecución del sensor. Todas las tarjetas que no eran detectadas durante la ejecución del sensor fueron registradas como “No Detectada” en el archivo.csv.

Tabla 11: Resultados por Distancia en centímetros
Fuente: Elaboración Propia.

Caso	**Detectada**	**No Detectada**	**Total**	**Tasa de Éxito**
Distancia 40 cms	66	2	68	97.0 %
Distancia 50 cms	68	0	68	100 %
Distancia 60 cms	68	0	68	100 %
Distancia 70 cms	67	1	68	98.5 %

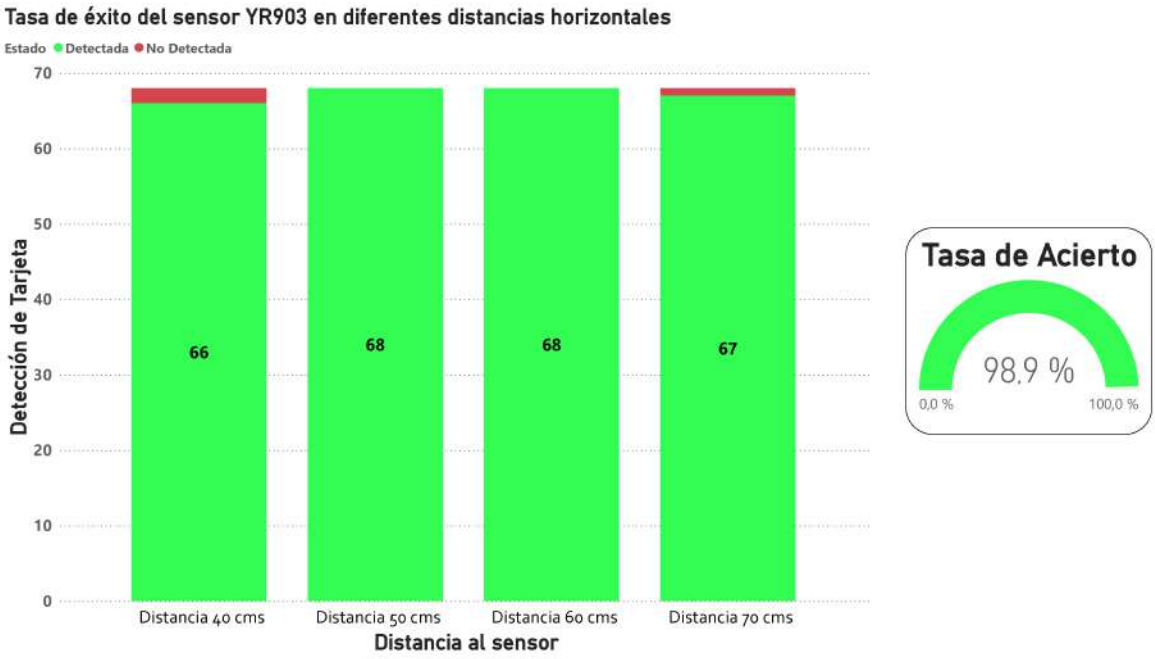

Figura 9: Resultados visuales de lectura a diferentes distancias
Fuente: Elaboración Propia

Como se desprende de la tabla 11 y del gráfico 9, las cuatro distancias evaluadas alcanzaron tasas de lectura superiores al 97 %, con 100 % de éxito a 50 cm y 60 cm.

Dado que los niveles de distancia (40 cm, 50 cm, 60 cm, 70 cm) se emplearon como constantes del diseño experimental (cada una fija e inmutable en su categoría), no existe variación interna para comparar mediante estadísticos de Chi-cuadrado; por tanto, una interpretación comparativa es suficiente para hablar de representatividad y extrapolar los resultados a la población objetivo. Por otro lado, cabe mencionar, que todas las tarjetas RFID usadas en este estudio provienen de un único lote (mismo proveedor), lo que pudo afectar la variabilidad en su detección.

El línea con lo anterior, es que la elección de la distancia operativa óptima utilizada en las demás pruebas se fundamentó en las tasas de éxito observadas: al registrar un 100 % de detección tanto a 50 cm como a 60 cm, se estandarizó el rango de trabajo en ese intervalo. Esta decisión responde a dos criterios:

1. Mantiene la máxima confiabilidad del sensor (tasa completa de éxito).
2. Facilita la experiencia de usuario, al evitar posicionamientos excesivamente precisos.

4.4. RESULTADOS GLOBALES POR CADA SIMULACIÓN

Una vez finalizada la etapa de pruebas de distancia, se procedió a evaluar el comportamiento general del sensor YR903 frente a una amplia variedad de situaciones representativas y extendidas en el uso real de tarjetas RFID. La tabla que resume el desempeño global del sensor en cada una de las simulaciones, excluyendo las pruebas de distancia, se encuentra en el Anexo 6.1 y el gráfico presentado a continuación representa visualmente los resultados ya mencionados, exponiendo la cantidad de intentos exitosos y fallidos para cada escenario:

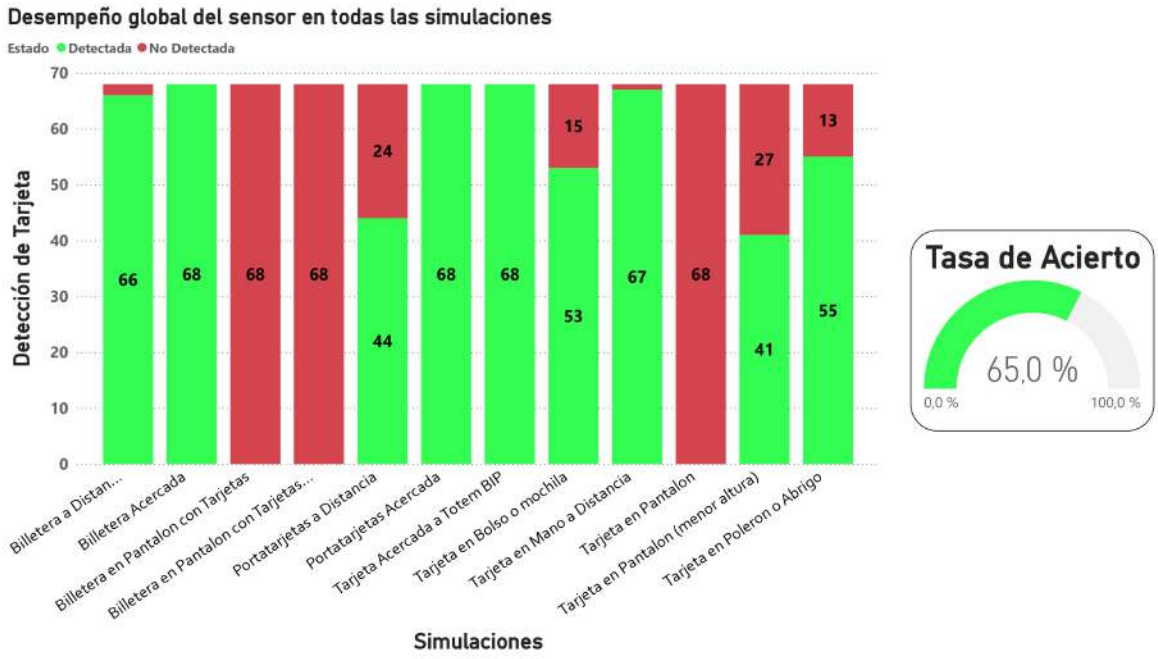

Figura 10: Desempeño global de los casos evaluados
Fuente: Elaboración Propia

En términos generales, se observa que el sensor YR903 presenta un alto nivel de precisión en la mayoría de las simulaciones, especialmente en aquellas donde la tarjeta se encuentra expuesta directamente. En contraste, se identifican ciertos casos en los que la tasa de detección disminuye, particularmente cuando existen obstáculos físicos, como prendas de vestir gruesas o múltiples capas de material entre la tarjeta y el lector. Este análisis global permite visualizar rápidamente los patrones de funcionamiento y fiabilidad del sensor en un entorno mixto de pruebas reales.

A modo de resumen cuantitativo, se obtuvo una tasa de acierto general del 65 %, lo que indica que el sensor YR903 logró detectar exitosamente la tarjeta en cerca de dos tercios de los intentos realizados bajo distintos escenarios experimentales. Este rendimiento global puede considerarse aceptable, pero se encuentra por debajo del umbral de confianza del 90 %

definido como referencia para esta investigación. Esto sugiere la necesidad de identificar qué condiciones específicas afectan el desempeño del sistema, para asegurar su efectividad en un entorno de uso real. Complementariamente, se aplicó la prueba de Chi-cuadrado de Pearson para evaluar la relación entre el tipo de situación experimental y la probabilidad de detección:

Tabla de contingencia Caso_num * Estado

			Estado		Total
			Detectada	No Detectada	
Caso_num	Billetera a Distancia	Recuento	66	2	68
		Residuos corregidos	5,8	-5,8	
	Billetera Acercada	Recuento	68	0	68
		Residuos corregidos	6,3	-6,3	
	Billetera en Pantalon con Tarjetas	Recuento	0	68	68
		Residuos corregidos	-11,7	11,7	
	Billetera en Pantalon con Tarjetas	Recuento	0	68	68
		Residuos corregidos	-11,7	11,7	
	Portatarjetas a Distancia	Recuento	44	24	68
		Residuos corregidos	,0	,0	
	Portatarjetas Acercada	Recuento	68	0	68
		Residuos corregidos	6,3	-6,3	
	Tarjeta Acercada a Totem BIP	Recuento	68	0	68
		Residuos corregidos	6,3	-6,3	
	Tarjeta en Bolso o mochila	Recuento	53	15	68
		Residuos corregidos	2,3	-2,3	
	Tarjeta en Mano a Distancia	Recuento	67	1	68
		Residuos corregidos	6,1	-6,1	
	Tarjeta en Pantalon	Recuento	0	68	68
		Residuos corregidos	-11,7	11,7	
	Tarjeta en Pantalon (menor altura)	Recuento	41	27	68
		Residuos corregidos	-,8	,8	
	Tarjeta en Poleron o Abrigo	Recuento	55	13	68
		Residuos corregidos	2,9	-2,9	
Total		Recuento	530	286	816

Pruebas de chi-cuadrado

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)	Sig. de Monte Carlo (bilateral)		
				Sig.	Intervalo de confianza al 90%	
					Límite inferior	Límite superior
Chi-cuadrado de Pearson	565,871[a]	11	,000	,000[b]	0,000	,000
Razón de verosimilitudes	710,876	11	,000	,000[b]	0,000	,000
Estadístico exacto de Fisher	678,252			,000[b]	0,000	,000
N de casos válidos	816					

Figura 11: Resultados globales de SPSS por caso de uso (sin pruebas de distancia).
Fuente: Elaboración Propia

$$\chi^2(\text{gl} = 11,\ N = 816) = 565{,}871, \quad p < 0{,}001 \tag{6}$$

De la ecuación 6 se confirma que las diferencias entre condiciones no son producto del azar, lo cual fue corroborado al analizar los residuos corregidos de cada categoría de la figura 11. Considerando el valor de Z correspondiente a un nivel de confianza del 90 %, se observa que en la mayoría de los escenarios evaluados los residuos superan dicho umbral, lo cual permite afirmar que estos resultados son estadísticamente significativos y extrapolables a una población mayor.

No obstante, existen dos condiciones particulares en las que los residuos corregidos no superan el umbral definido, específicamente en el caso del "portatarjetas a distancia" y del "tarjeta en pantalón (menor altura)", ambos con residuos cercanos a 0. Esto implica que, en estos casos, no puede garantizarse una extrapolación válida ni una asociación significativa con el resultado de detección, al menos bajo el criterio de significancia adoptado para este estudio.

4.5. TIPO DE SIMULACIÓN - CERCANÍA DIRECTA

En primer lugar, se procedió a evaluar el desempeño del sensor propuesto bajo condiciones que replicaran fielmente el comportamiento habitual de los usuarios del sistema de transporte público. Esta etapa tuvo por objetivo verificar si el sensor RFID YR903 era capaz de detectar tarjetas bajo las condiciones de uso más comunes y espontáneas observadas en terreno. Para ello, se realizaron pruebas en un entorno controlado en el que se posicionó la tarjeta RFID a una distancia corta —entre 3 y 5 centímetros del sensor—, emulando el acto cotidiano de acercar la tarjeta a un lector o tótem de validación. Esta distancia representa el rango más habitual en el sistema actual, en el cual los usuarios acercan sus tarjetas con la expectativa de una validación rápida y sin errores.

Las pruebas se centraron exclusivamente en las simulaciones previamente mencionadas en el gráfico 8, lo que permitió contrastar el rendimiento del sensor con escenarios reales y representativos. Para cada uno de estos casos, se ejecutaron nuevamente 68 intentos consecutivos con el objetivo de medir la confiabilidad del dispositivo en condiciones reales de uso.

Tabla 12: Resultados por Cercanía Directa.
Fuente: Elaboración Propia.

Caso	Detectada	Total	Tasa de Éxito
Billetera Acercada	68	68	100 %
Portatarjetas Acercada	68	68	100 %
Tarjeta Acercada a Tótem BIP	68	68	100 %

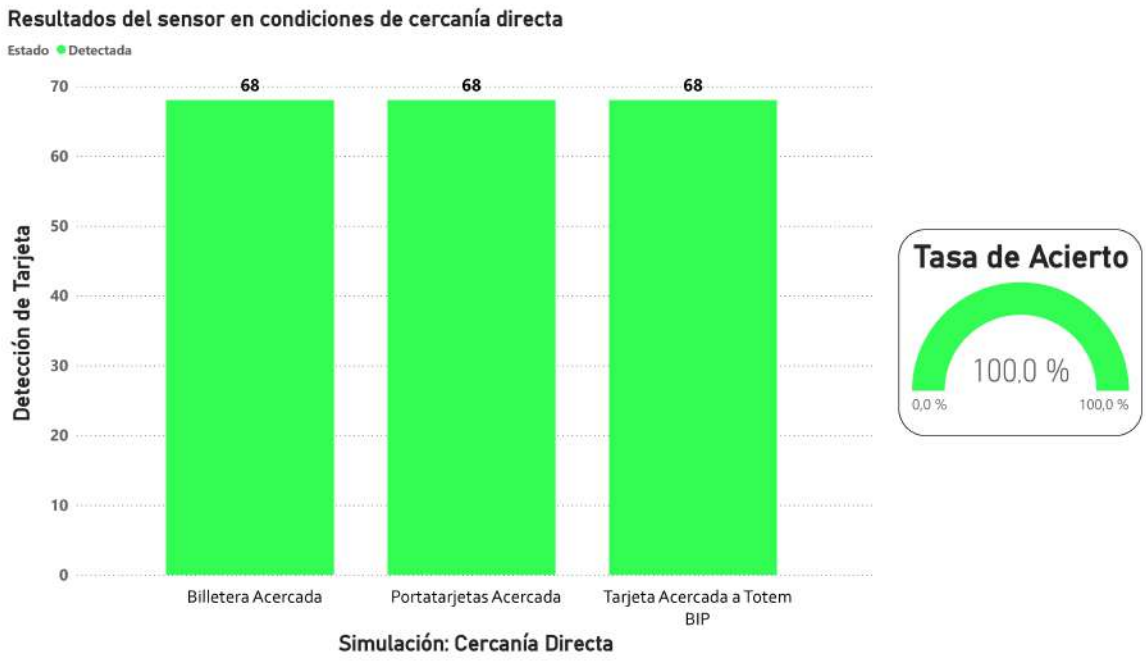

Figura 12: Resultados por Cercanía Directa
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla 12 y el gráfico 12, los resultados obtenidos fueron consistentes: en todos los escenarios evaluados se registraron tasas de lectura iguales al 100 %, evidenciando un alto nivel de precisión del sensor YR903. Esta relación, de acuerdo al análisis de Chi-Cuadrado explicado anteriormente, es estadísticamente significativa al 90 % de confianza.

Al mismo tiempo, este comportamiento sugiere que el mismo presenta una compatibilidad absoluta con los hábitos de los usuarios y que es capaz de operar de manera eficiente en los formatos de interacción ya instalados en el sistema actual. La baja tasa de error en estas condiciones confirma que el sensor puede integrarse como reemplazo viable al sistema PagoBIP sin requerir cambios significativos en el comportamiento del usuario. Además, este nivel de

rendimiento es crucial para generar confianza en una eventual implementación durante la Etapa 3 de la Macro Propuesta, pues reduce la posibilidad de errores de validación, podría minimizar la frustración del usuario y evitar retrasos operativos.

4.6. TIPO DE SIMULACIÓN - A DISTANCIA

Después de evaluar el desempeño del sensor en condiciones de cercanía directa, se procedió a replicar los casos observados en terreno, pero esta vez sometiéndolos a una condición más exigente: la lejanía. En esta fase, la tarjeta RFID fue ubicada entre 50 y 60 centímetros del sensor YR903 (rango definido previamente como distancia de operación estable), para simular escenarios en los que el usuario porta la tarjeta sin necesidad de acercarla manualmente. Se mantuvieron las mismas estrategias de pago del gráfico 8 previamente identificadas y se realizaron nuevamente las mismas pruebas, registrando tanto los intentos exitosos como fallidos.

Tabla 13: Resultados Obtenidos a Distancia.
Fuente: Elaboración Propia

Caso	**Detectada**	**No Detectada**	**Total**	**Tasa de Éxito**
Billetera a Distancia	66	2	68	97.0 %
Portatarjetas a Distancia	44	24	68	64.7 %
Tarjeta en Mano a Distancia	67	1	68	98.5 %

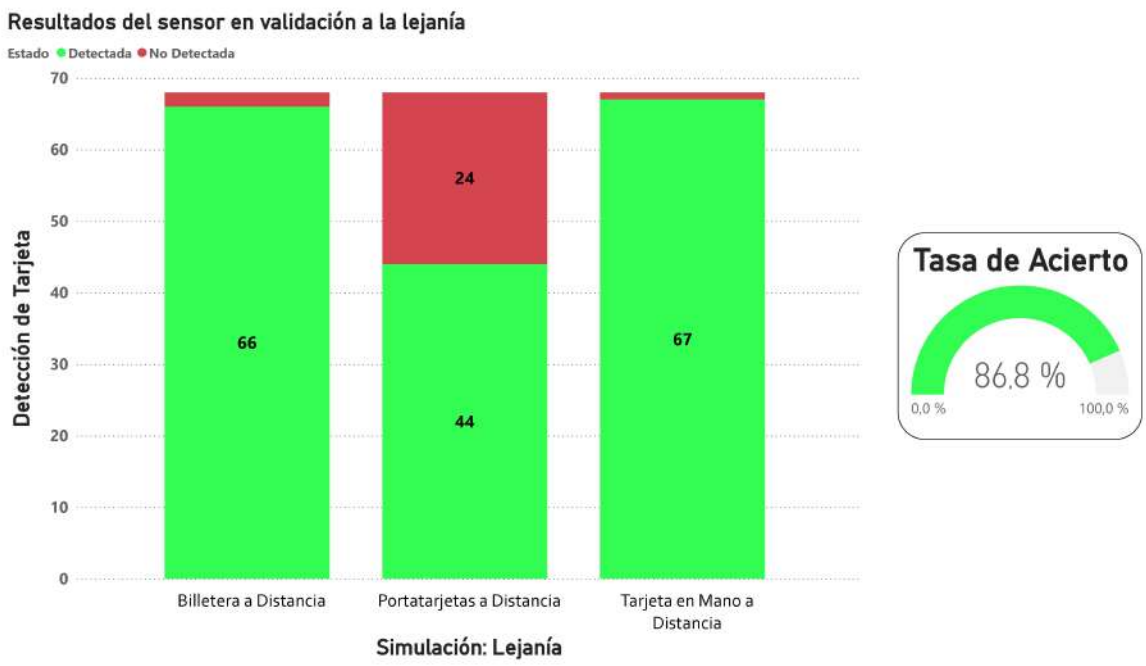

Figura 13: Casos observados distancia
Fuente: Elaboración Propia

Tal como se observa en la tabla 13 y en la figura 13, los resultados fueron mayoritariamente positivos. La tasa de acierto general fue del 86.8 %, evidenciando un rendimiento robusto incluso sin contacto directo, pero aún así se encuentra por debajo del umbral de confianza definido. En la misma línea, se advierten diferencias entre los casos evaluados. Por ejemplo, para el caso del "portatarjetas a distancia", se obtuvo una tasa de éxito del 64 %; sin embargo, esta relación no es extrapolable a la población objetivo de este estudio, según el análisis de residuos corregidos proveniente del análisis global anterior, donde el residuo tipificado corregido fue cercano a 0, es decir, menor que el umbral crítico definido de $Z = 1.645$.

En contraste, tanto la tarjeta en mano a distancia como la billetera acercada mantuvieron niveles altos de detección, superando el 98 % de éxito. En ambos casos, los residuos corregidos superaron el umbral crítico, lo que confirma que sus tasas de detección son estadísticamente significativas al 90 % de confianza y, por tanto, extrapolables a la población objetivo.

Estos resultados consolidan la viabilidad de utilizar el sensor YR903 en contextos de validación sin contacto, siempre que se consideren ciertas condiciones prácticas, tales como la orientación del chip RFID y el tipo de soporte utilizado para portar la tarjeta.

4.7. TIPO DE SIMULACIÓN - CASOS ESPECIALES

Finalmente, se analizaron los casos definidos como escenarios especiales, diseñados para explorar condiciones de uso menos convencionales pero igualmente relevantes. Estos incluyeron tarjetas ubicadas en bolsillos, mochilas o prendas de vestir, y en particular, la coexistencia con otras tarjetas bancarias en espacios reducidos, como billeteras.

Tabla 14: Resultados Obtenidos de Casos de Prueba Especiales.
Fuente: Elaboración Propia.

Caso	Detectada	No Detectada	Total	Tasa de Éxito
Billetera en Pantalón con Tarjetas	0	68	68	0 %
Tarjeta en Bolso o Mochila	53	15	68	77.9 %
Tarjeta en Pantalón	0	68	68	0 %
Tarjeta en Polerón o Abrigo	55	13	68	80.9 %

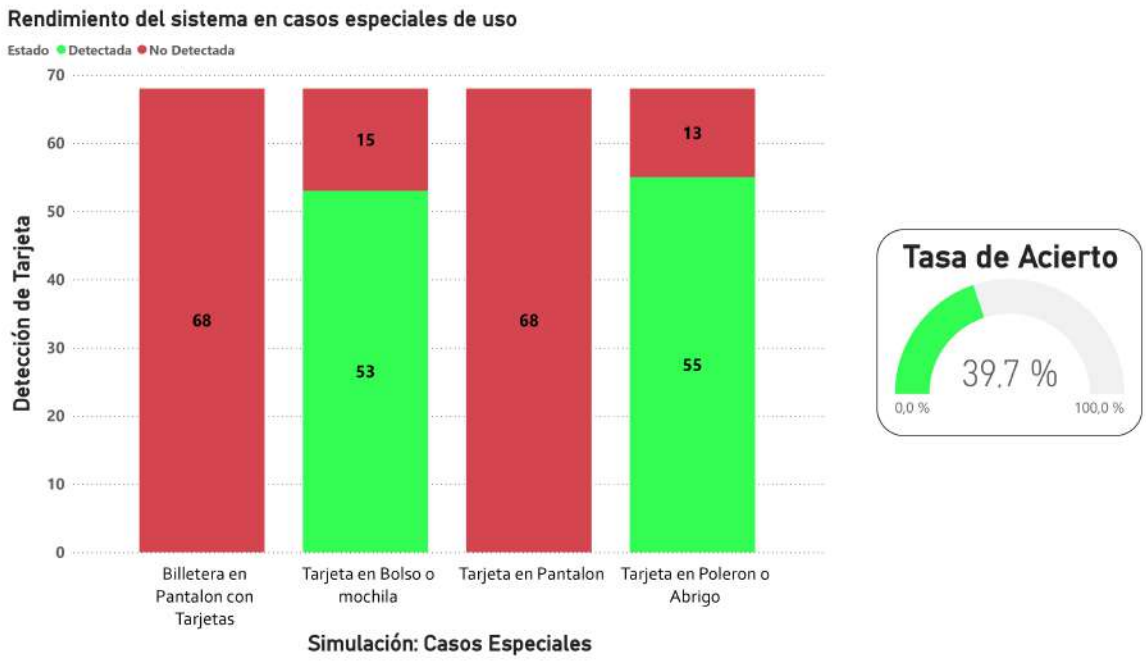

Figura 14: Casos de Usos especiales
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la tabla 14 y el gráfico 14 muestran una tasa de acierto global de 39,7 %, siendo esta la más baja de todos los grupos evaluados. Dentro de estos casos, destacan los siguientes hallazgos:

- El único caso con desempeño sobresaliente fue “tarjeta en polerón o abrigo”, con una tasa de detección del 80.8 %, lo que sugiere que, a pesar de la presencia de una prenda gruesa, la orientación o ubicación de la tarjeta permitió una lectura efectiva.
- Le sigue el caso “tarjeta en bolso o mochila”, con una tasa de éxito del 77.9 %. Este rendimiento podría atribuirse a una menor interferencia física dentro del bolso y una cercanía favorable entre la tarjeta y el sensor.
- En cambio, los peores desempeños se registraron en “tarjeta en pantalón” y “billetera en pantalón con tarjetas”, ambos con una tasa de detección de 0 %. Esto puede explicarse por el grosor del material y/o la orientación de la tarjeta y, en el segundo caso, la presencia simultánea de otros dispositivos RFID o tarjetas bancarias que generan interferencia electromagnética.

Aunque todas las tasas de éxito obtenidas en estos casos están por debajo del umbral del 90 % de confianza definido como referencia, el análisis de residuos corregidos realizado anteriormente indica que la mayoría de estas condiciones presentan residuos superiores a $Z = 1.645$, lo que permite considerarlas como estadísticamente significativas y extrapolables a la población objetivo. La única excepción corresponde al caso “tarjeta en pantalón”, cuyo residuo corregido fue inferior al umbral crítico, lo que implica que, bajo los criterios estadísticos adoptados, su resultado no puede ser extrapolado con confianza. Esta condición refuerza la necesidad de considerar cuidadosamente el contexto de uso y la portabilidad del dispositivo en aplicaciones reales.

Es importante mencionar que durante el análisis de los diferentes casos de uso, surgieron reiteradamente comportamientos que podrían explicarse por la presencia de interferencias. Si bien esta variable será abordada de forma detallada en su propia subsección, su impacto aparece reflejado preliminarmente en varios de los análisis cruzados que se presentan a continuación.

4.8. ANÁLISIS COMPARATIVO Y CRUZADO

Con el fin de identificar patrones y relaciones entre variables relevantes del proceso de validación con tarjetas RFID, se realizó un análisis cruzado de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Este análisis se enfocó en cinco dimensiones claves:

1. Cercanía vs Lejanía

2. Dispositivos de Portabilidad
3. Ubicación de la Tarjeta en Vestimenta
4. Variación Altura del Sensor
5. Presencia de Interferencias

A continuación, se presentan los gráficos comparativos y su respectiva interpretación para cada uno de estos casos:

4.8.1. CERCANÍA VS LEJANÍA

Tabla 15: Comparativa entre los casos de Cercanía y Lejanía (distancias).
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Detectado	No Detectado	Total	Tasa de Éxito
Cercanía	204	0	204	100 %
Lejanía	177	27	204	86.8 %

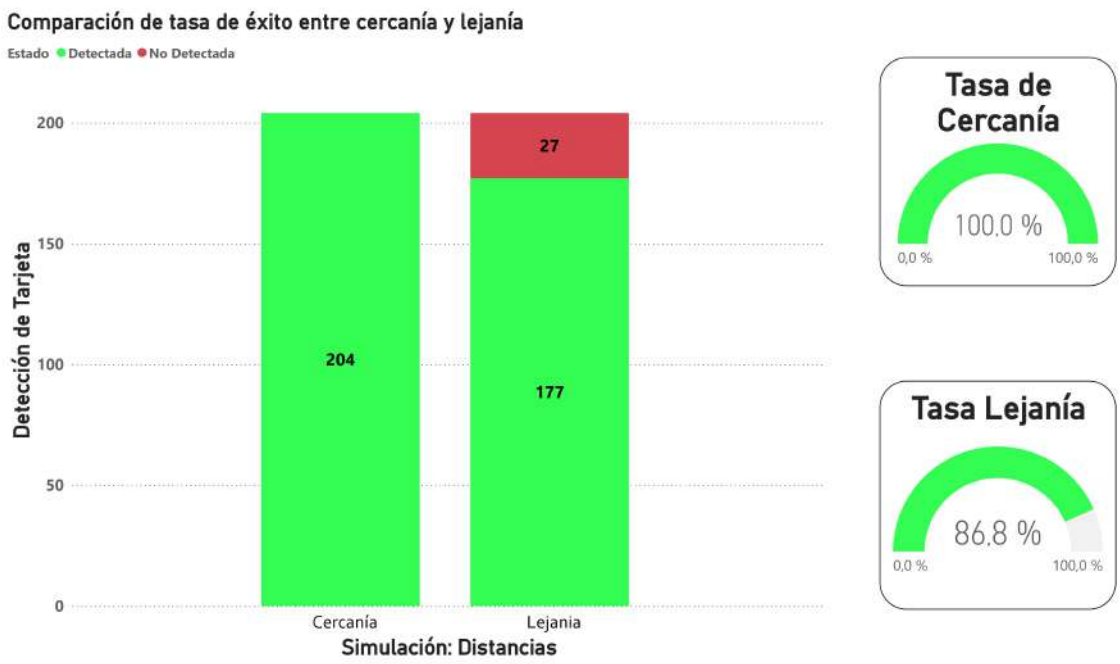

Figura 15: Comparativa visual entre los casos de Cercanía y Lejanía
Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla 15 y en la figura 15, los resultados muestran una diferencia clara en el desempeño del sistema según la proximidad del medio de pago respecto al lector RFID, diferenciando entre escenarios de cercanía directa (donde el usuario acerca intencionalmente la tarjeta al lector) y aquellos de lectura a distancia (donde la tarjeta se encuentra pasivamente dentro del rango de distancia propuesto).

En los casos de cercanía, el sensor logró una tasa de éxito del 100 %, lo que demuestra una fiabilidad total bajo condiciones controladas y una interacción directa entre usuario y dispositivo. En contraste, los escenarios de lejanía presentaron una tasa de detección del 86,8 %, lo cual, si bien está por debajo del umbral de confianza del 90 % definido para esta investigación, sigue siendo un resultado destacable.

Complementariamente, en base al análisis realizado con SPSS y utilizando la prueba de Chi-cuadrado de Pearson, se obtuvo lo siguiente:

Tabla de contingencia Cercania_Lejania_num * Estado

			Estado		Total
			Detectada	No Detectada	
Cercania_Lejania_num	Lejanía	Recuento	177	27	204
		Residuos corregidos	-5,4	5,4	
	Cercanía	Recuento	204	0	204
		Residuos corregidos	5,4	-5,4	
Total		Recuento	381	27	408

Pruebas de chi-cuadrado[c]

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)	Sig. exacta (bilateral)	Sig. exacta (unilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	28,913[a]	1	,000	,000	,000
Corrección por continuidad[b]	26,811	1	,000		
Razón de verosimilitudes	39,345	1	,000	,000	,000
Estadístico exacto de Fisher				,000	,000
N de casos válidos	408				

Figura 16: Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre los casos a distancia en SPSS
Fuente: Elaboración Propia

$$\chi^2(\text{gl} = 1,\ N = 408) = 28{,}913, \quad p < 0{,}001 \tag{7}$$

Lo anterior confirma que la diferencia entre las lecturas a distintas distancias es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 90 %. Además, los residuos corregidos ($\pm 5{,}4$) superan con creces el valor crítico Z, lo que indica que la diferencia observada no es producto del azar.

Cabe mencionar que cuando el residuo corregido es positivo, se detectan casos de los es-

perados bajo independencia; pero cuando es negativo, se detectan menos valores de los esperados. Aún así, en ambos supuestos la diferencia sigue siendo estadísticamente significativa y extrapolable con un nivel de confianza del 90 %.

En conjunto, los resultados respaldan el uso de lectura a distancia como una modalidad viable, aunque se recomienda que, para garantizar una experiencia más robusta, se prioricen ubicaciones del sensor que favorezcan una posición frontal o cercana a la tarjeta, o bien que el sistema notifique al usuario si es necesario acercar el medio de pago.

4.8.2. DISPOSITIVOS DE PORTABILIDAD

Tabla 16: Comparativa entre dispositivos de portabilidad utilizados.
Fuente: Elaboración propia.

Dispositivo de Portabilidad	Detectado	No Detectado	Total	Tasa de Éxito
Billetera	134	2	136	98.5 %
Portatarjetas	112	24	136	82.4 %
Mochila	53	15	68	77.9 %

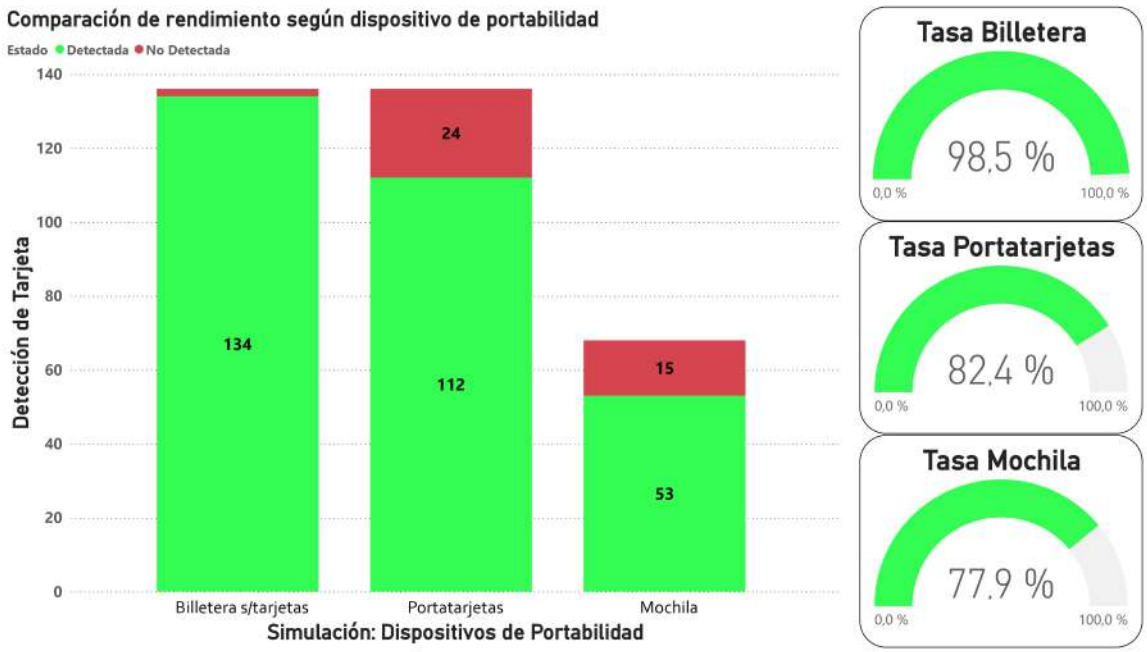

Figura 17: Comparativa visual entre dispositivos de portabilidad utilizados.
Fuente: Elaboración Propia

Es necesario detallar que la diferencia en la cantidad de simulaciones entre los tres dispositivos de portabilidad se explica porque, en los casos de “billetera” y “portatarjetas”, se suman las simulaciones realizadas tanto en condiciones de cercanía como de lejanía (68 y 68 por caso), mientras que para la “mochila”, solo se consideraron 68 simulaciones en modalidad de lejanía.

Tal como se presenta en la tabla 16 y en la figura 17, se observa una variación en el desempeño del sistema de validación según el dispositivo utilizado para portar la tarjeta RFID. En el caso de la “billetera”, el sensor YR903 alcanzó una tasa de éxito del 98.5 %, lo que representa un rendimiento sobresaliente, incluso considerando el uso de una billetera vacía específicamente diseñada para portar únicamente la tarjeta BIP. Este resultado indica que, bajo condiciones favorables (sin tarjetas bancarias ni objetos metálicos), el uso de la billetera no afecta significativamente la detección.

El “portatarjetas”, con una tasa de detección del 82.4 %, también demostró un desempeño sólido, tanto en cercanía como en lejanía. Este resultado sugiere que este tipo de dispositivo representa una opción confiable para los usuarios, al no introducir interferencias significativas en el proceso de lectura.

Por su parte, el uso de *mochila* alcanzó una tasa de éxito del 77.9 % . A pesar de tratarse de una condición menos controlada y con mayor posibilidad de atenuación de la señal, el sensor logró un rendimiento razonable, evidenciando su capacidad para operar incluso cuando la tarjeta se encuentra dentro de un bolso y sin contacto directo.

Complementariamente, el análisis estadístico mediante la prueba de Chi-cuadrado de Pearson entregó los siguientes resultados:

Tabla de contingencia Dispositivo_num * Estado

			Estado		Total
			Detectada	No Detectada	
Dispositivo_num	Billetera	Recuento	134	2	136
		Residuos corregidos	4,9	-4,9	
	Portatarjetas	Recuento	112	24	136
		Residuos corregidos	-2,6	2,6	
	Bolso o mochila	Recuento	53	15	68
		Residuos corregidos	-2,8	2,8	
Total		Recuento	299	41	340

Pruebas de chi-cuadrado

				Sig. de Monte Carlo ...	
					Intervalo de ...
	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)	Sig.	Límite inferior
Chi-cuadrado de Pearson	24,795[a]	2	,000	,000[b]	,000
Razón de verosimilitudes	30,944	2	,000	,000[b]	,000
Estadístico exacto de Fisher	29,849			,000[b]	,000
N de casos válidos	340				

Figura 18: Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre dispositivos de portabilidad en SPSS
Fuente: Elaboración Propia

$$\chi^2(\text{gl} = 2,\ N = 340) = 24{,}795, \quad p < 0{,}001 \tag{8}$$

Además, los residuos corregidos evidencian que la condición de “billetera” presenta un valor superior al del umbral crítico Z propuesto, lo que confirma que su rendimiento es estadísticamente significativo al 90 % y que es extrapolable a una población mayor. En cambio, tanto el “portatarjetas” como la “mochila” presentan residuos corregidos de -2.6 y -2.8, respectivamente. Si bien estos valores también superan el umbral en valor absoluto, su signo negativo indica que se detectaron menos casos de los esperados bajo independencia, aunque la diferencia sigue siendo significativa al 90 % de confianza.

En síntesis, el dispositivo físico donde se transporta la tarjeta influye directamente en la tasa de detección del sistema. Se recomienda fomentar el uso de portatarjetas o mochilas con materiales delgados, y mantener un diseño liviano y plano si se busca maximizar la fiabilidad del proceso de validación.

4.8.3. UBICACIÓN DE LA TARJETA EN VESTIMENTA

Tabla 17: Comparativa según la prenda de ropa utilizada para portar la tarjeta.
Fuente: Elaboración propia.

Ubicación	Detectado	No Detectado	Total	Tasa de Éxito
Pantalón	0	136	136	0 %
Polerón o Abrigo	55	13	68	80.9 %

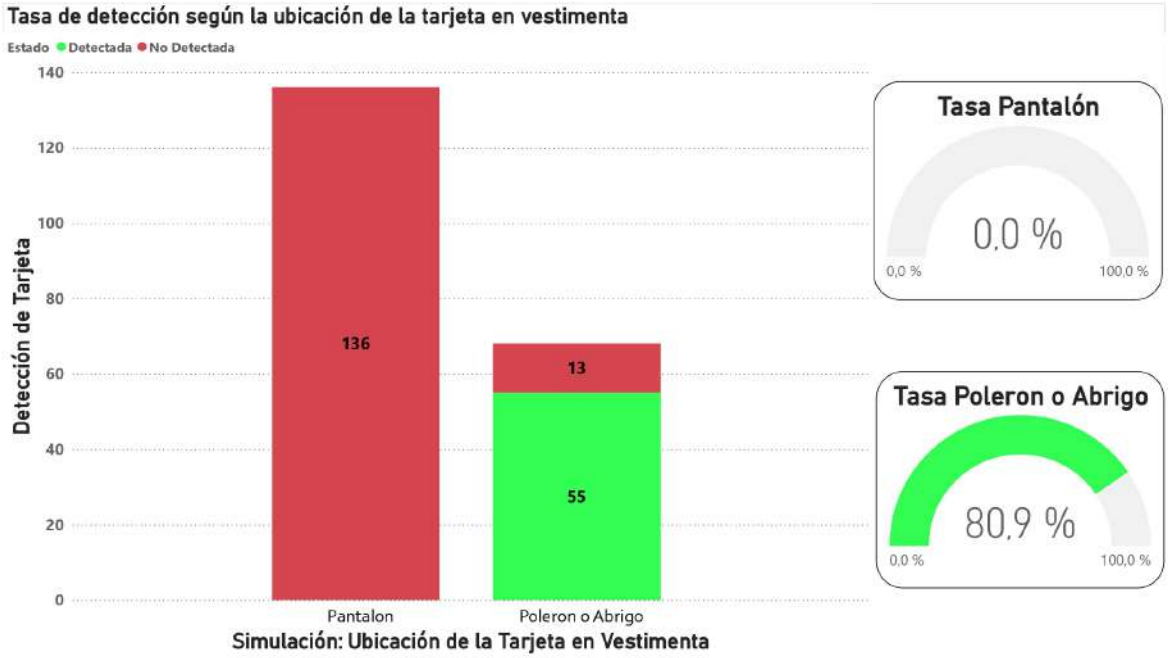

Figura 19: Comparativa visual según la prenda de ropa utilizada para portar la tarjeta.
Fuente: Elaboración Propia.

Es necesario detallar que la diferencia en la cantidad de simulaciones entre las dos prendas de ropa se explica porque, para el caso del pantalón, se suman las simulaciones del caso “tarjeta en pantalón” y caso “billetera con múltiples tarjetas bancarias” (68 y 68 respectivamente), mientras que para el caso del “polerón o abrigo”, solo se realizaron 68 simulaciones asociadas a esa condición.

La tabla 17 y la figura 19 presentan los resultados obtenidos al analizar el desempeño del sistema según la prenda de vestir utilizada para portar la tarjeta RFID, comparando los casos

donde esta se encontraba en un pantalón versus un polerón o abrigo. En los casos asociados al pantalón, no se obtuvo ninguna detección exitosa, mientras que en el caso del polerón o abrigo, la tasa de éxito alcanzó un 80.9 %.

Complementariamente, el análisis estadístico mediante la prueba de Chi-cuadrado de Pearson entregó lo siguiente:

Tabla de contingencia Ubicación_num * Estado

			Estado		
			Detectada	No Detectada	Total
Ubicación_num	Polerón o abrigo	Recuento	0	136	136
		Residuos corregidos	-12,3	12,3	
	Pantalon	Recuento	55	13	68
		Residuos corregidos	12,3	-12,3	
Total		Recuento	55	149	204

Pruebas de chi-cuadrado[c]

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)	Sig. exacta (bilateral)	Sig. exacta (unilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	150,604[a]	1	,000	,000	,000
Corrección por continuidad[b]	146,525	1	,000		
Razón de verosimilitudes	171,453	1	,000	,000	,000
Estadístico exacto de Fisher				,000	,000
N de casos válidos	204				

Figura 20: Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre ubicación en vestimenta en SPSS
Fuente: Elaboración Propia

$$\chi^2(\text{gl} = 1,\ N = 204) = 150{,}604, \quad p < 0{,}001 \tag{9}$$

Los residuos corregidos muestran una diferencia significativa entre ambas condiciones, con valores de $\pm 12{,}3$, los cuales superan el umbral de significancia definido. Por lo tanto, se concluye que esta diferencia es estadísticamente significativa y extrapolable a una población más amplia con un 90 % de confianza.

Esta diferencia evidencia que ciertas prendas permiten una mejor alineación con el sensor, posiblemente por la cercanía al eje de lectura, la flexibilidad del tejido o la menor cantidad de interferencias materiales. En consecuencia, se recomienda evitar ubicar la tarjeta en zonas del cuerpo cubiertas por múltiples capas o materiales gruesos que puedan obstaculizar la lectura RFID.

4.8.4. VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL SENSOR

Tabla 18: Comparativa al variar la altura del sensor.
Fuente: Elaboración Propia.

Altura	Detectado	No Detectado	Total	Tasa de Éxito
Altura normal (120 cm)	0	136	136	0 %
Menor altura (80 cm)	41	95	136	30.1 %

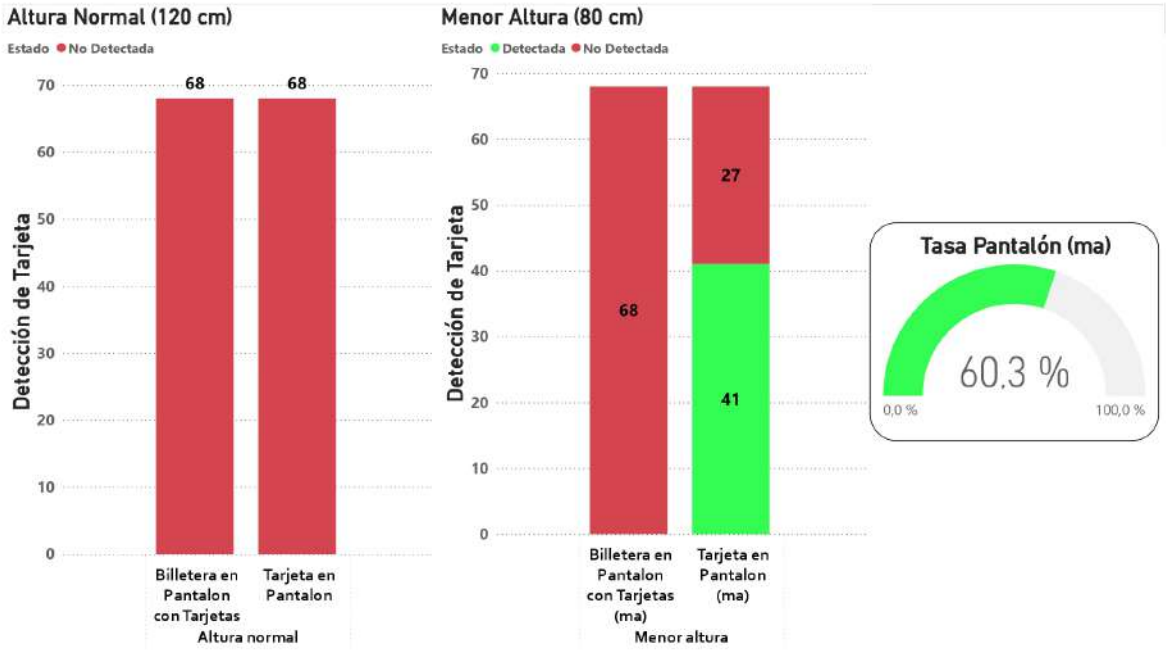

Figura 21: Comparativa visual al variar la altura del sensor
Fuente: Elaboración Propia.

En base a los resultados obtenidos en la dimensión anterior, se decidió utilizar los mismos dispositivos de portabilidad, pero variar la altura del sensor para observar si existían diferencias significativas en el desempeño del sistema.

En línea con lo anterior, la figura 21 y la tabla 18 muestran los resultados obtenidos al cruzar estos datos. Durante el desarrollo del estudio, todas las pruebas se realizaron inicialmente con el sensor ubicado a una altura estándar de 120 centímetros; sin embargo, para esta simulación se disminuyó a 80 centímetros.

A simple vista, se aprecia que en el caso de la “billetera con múltiples tarjetas” la variación de altura no impacta en su funcionalidad, ya que se registró una tasa de éxito de 0 % en ambas condiciones. En contraste, para el caso de “tarjeta en pantalón”, la tasa de éxito aumentó de forma considerable: desde 0 % a 60.3 %, lo que demuestra que una simple modificación en la altura del sensor puede mejorar significativamente la tasa de detección cuando no existen interferencias adicionales.

Este cambio en el rendimiento fue confirmado estadísticamente mediante la prueba de Chi-cuadrado de Pearson:

Tabla de contingencia Altura_num * Estado

			Estado		Total
			Detectada	No Detectada	
Altura_num	Altura normal (120 cm)	Recuento	0	136	136
		Residuos corregidos	-6,9	6,9	
	Menor altura (80 cm)	Recuento	41	95	136
		Residuos corregidos	6,9	-6,9	
Total		Recuento	41	231	272

Pruebas de chi-cuadrado[c]

	Valor	gl	Sig. asintótica (bilateral)	Sig. exacta (bilateral)	Sig. exacta (unilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	48,277[a]	1	,000	,000	,000
Corrección por continuidad[b]	45,951	1	,000		
Razón de verosimilitudes	64,154	1	,000	,000	,000
Estadístico exacto de Fisher				,000	,000
N de casos válidos	272				

Figura 22: Test de Chi-Cuadrado para las lecturas entre alturas en SPSS
Fuente: Elaboración Propia

$$\chi^2(\text{gl} = 1,\ N = 272) = 48{,}277, \quad p < 0{,}001 \tag{10}$$

Además, los residuos corregidos obtenidos ($\pm 6{,}9$) superan ampliamente el umbral de $Z = 1.645$, lo que indica que la diferencia observada es estadísticamente significativa y extrapolable a una población más amplia con un 90 % de confianza.

4.8.5. PRESENCIA DE INTERFERENCIAS

Es necesario detenerse en la falla total del dispositivo billetera con tarjetas mostrada en la figura anterior. En ambos casos evaluados —tanto con el sensor a 120 cm como a 80 cm de altura— la tasa de detección fue del 0 %, sin que se lograra una sola lectura exitosa en ninguno de los 136 intentos. Este patrón sugiere que el fallo no está relacionado con la ubicación corporal ni con la altura del sensor, sino con un fenómeno de interferencia electromagnética directa entre tarjetas. Estudios previos han demostrado que la presencia simultánea de múltiples chips RFID dentro de un mismo dispositivo de validación puede generar colisiones de señal, desincronización o bloqueo de la respuesta individual de cada tarjeta, especialmente cuando no existe aislamiento físico ni apantallamiento entre ellas [Marin *et al.*, 2018].

En consecuencia, para la Etapa 3 de la Macro Propuesta sería prudente recomendar evitar el uso de billeteras que contengan varias tarjetas RFID en el entorno de validación, o bien incorporar soluciones tecnológicas complementarias, como carcasas anticolisión o el uso exclusivo de un portador dedicado para el medio de pago.

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

5.1. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS Y ALCANCE GENERAL

El presente proyecto se enmarcó en una Macro Propuesta de cuatro etapas diseñada para disminuir la evasión en el transporte público RED. Específicamente esta memoria se focalizó en la primera etapa de la propuesta, relacionada a la evaluación respecto a la viabilidad tanto técnica como funcional del uso de sensores RFID en el proceso de validación de tarjetas en el transporte público. Lo anterior, teniendo como objetivo el explorar una alternativa tecnológica realista en contraste con el actual sistema utilizado en Santiago, a saber, el PagoBIP. En esta línea, se vuelve necesario mencionar que durante el desarrollo de la investigación se cumplieron a cabalidad todas las instancias propuestas, en otras palabras, hubo una definición del entorno experimental, se propuso un diseño de pruebas controladas, se realizó la implementación del sistema de detección basado en el sensor YR903, hubo una exhaustiva recopilación de datos y se llevó a cabo un análisis cuantitativo e interpretación de los resultados obtenidos utilizando Chi-cuadrado.

Los objetivos específicos del proyecto fueron abordados de forma progresiva y lineal: primero, se diseñó e implementó un sistema de detección de tarjetas RFID con la intención de que permitiera reconocer de manera confiable el paso de usuarios en condiciones representativas del transporte público (altura promedio de la persona, medio utilizado para transportar la tarjeta, posicionamiento del sensor, entre otros); segundo, se inventó y desarrolló un sistema para la captura y registro estructurado de eventos con el foco puesto en la eficiencia y trazabilidad de los mismos; tercero, se integraron diferentes herramientas de visualización y análisis que permitieron interpretar los datos recolectados a través de métricas clave y paneles interactivos; y cuarto y final, se evaluó el desempeño del sistema propuesto dentro de un entorno controlado mediante variadas pruebas experimentales que simularon posibles escenarios reales de uso de la tarjeta, incluyendo variaciones en soporte, distancia aproximada, altura y posibles interferencias entre la tarjeta y el sensor. El cumplimiento de todos estos objetivos permitió no solo validar de manera positiva el uso del sensor en condiciones controladas, sino que también facilitó la generación de evidencia empírica suficiente para proyectar su utilización en las siguientes etapas de la Macro Propuesta.

5.2. PRINCIPALES RESULTADOS Y PATRONES OBSERVADOS

En línea con lo anterior y a modo de profundización, uno de los aportes más significativos visualizados dentro de este estudio tiene relación con la identificación de patrones claros de éxito y fracaso en la detección de tarjetas RFID. Se logró observar que en casos de cercanía directa al sensor YR903 y con dispositivos de portabilidad —como portatarjetas o tarjetas en

mano— el sensor logró una tasa de detección perfecta del 100 %, lo cual confirma su aplicación en escenarios tradicionales de validación. Asimismo, se pudo apreciar que los mejores rendimientos del sensor YR903 se concentraron en dispositivos de portabilidad de la tarjeta expuestas (en la mano) o de baja interferencia (portatarjetas en cercanía), mientras que para el caso de un usuario que utiliza una billetera con tarjetas de banco se observó una tasa de éxito nula, resaltando esto como una limitante a tener en consideración para las Etapas posteriores.

Un hallazgo adicional relevante es que la billetera sola —sin otras tarjetas bancarias en su interior— sí funciona correctamente como dispositivo de portabilidad, y esta condición es independiente de la altura a la que se ubique el sensor. En contraste, cuando se utiliza una billetera con múltiples tarjetas y esta se encuentra en el bolsillo del pantalón, el sistema falla consistentemente en todos los casos, también independiente de la altura. Esto sugiere que el pantalón introduce una interferencia relevante en el proceso de validación, posiblemente debido al tipo de material, orientación y/o barrera electromagnética que representa.

En el caso de los portatarjetas, el comportamiento general fue favorable, sin embargo, se observó que bajo condiciones de mayor distancia la tasa de éxito alcanzó un 64,7 %, la cual —aunque no despreciable— no fue estadísticamente extrapolable al resto de la población, tal como lo demuestra el análisis de Chi-cuadrado. Esto indica que se requiere profundizar más en la evaluación del portatarjetas, particularmente cuando se utiliza sin contacto cercano o con variabilidad en la orientación de la tarjeta.

En cambio, cuando se realiza el pago mediante la tarjeta sin billetera ni portatarjetas —es decir, sostenida directamente por el usuario—, la metodología utilizada fue efectiva en todos los casos. No solo se alcanzó una alta tasa de éxito total, sino que además los resultados fueron extrapolables a una población mayor según los análisis estadísticos realizados. Un desempeño similar se observó cuando la tarjeta se encontraba al interior de un polerón o abrigo.

Otra contribución relevante de este estudio guarda relación con el análisis de la distancia. La metodología propuesta logró resultados exitosos tanto a 40 cm como a 70 cm, lo que demuestra que el sensor YR903 tiene la capacidad de funcionar adecuadamente en un rango amplio sin necesidad de contacto directo.

Por otro lado, los datos obtenidos en las pruebas de rendimiento general del sensor YR903, evidenciaron una tasa de éxito global de 65 % (10), lo cual, si bien demuestra un nivel de detección mayoritario y positivo, también expone márgenes de mejora necesarios si se busca alcanzar estándares industriales y más completos. Entre los pros más destacables del proyecto se encuentra la capacidad del sensor para operar sin contacto físico directo, lo que reduce los puntos de fricción con el usuario y evita el desgaste mecánico; además de su integración con sistemas automatizados que permite recopilar información de forma estructurada y en tiempo real de los usuarios, sus hábitos y el funcionamiento del transporte público.

En síntesis, los hallazgos del estudio podrían resumirse en cuatro puntos clave:

- La billetera sola funciona correctamente.
- El portatarjetas funciona en general, pero requiere más estudio.
- La tarjeta sola funciona sin problemas.
- El pantalón genera interferencia transversal y consistente.

5.3. LIMITACIONES DETECTADAS

Se identificaron limitaciones técnicas en el sensor frente a interferencias por múltiples tarjetas bancarias que se encuentren simultáneamente a la RFID a la hora de su utilización (18), lo que innegablemente afecta la confiabilidad de la propuesta en ciertas situaciones reales. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de orientar el diseño del sistema hacia una lógica que entienda y considere el contexto real de los usuarios (en general, en la billetera se portan todas las tarjetas de una persona), siendo necesario realizar recomendaciones orgánicas al público objetivo en pro de hacer su experiencia más simple y eficiente.

Además, si bien el presente estudio analizó condiciones promedio de altura y posicionamiento del sensor, resulta imprescindible considerar los denominados casos bordes, como personas usuarias en sillas de ruedas, personas con baja estatura, entre otros. Estos perfiles requieren una atención especial en la configuración del sistema, ya que podrían quedar fuera del rango óptimo de lectura si no se ajusta el sensor o no se utilizan múltiples puntos de detección. Esta inclusión es clave para garantizar la equidad y accesibilidad universal del sistema propuesto.

Una gran limitación detectada en el estudio guarda relación con el uso de esta metodología específicamente con pantalones. Dado que se identificó una interferencia sistemática en este contexto, futuras investigaciones podrían enfocarse con mayor profundidad en este punto, utilizando distintos materiales y modelos de ropa para evaluar su impacto en el proceso de validación.

Cabe mencionar también que, debido al carácter exploratorio de esta memoria, se utilizó un punto de corte estadístico del 90 % de confianza. Futuras investigaciones podrían replantear este umbral y trabajar con niveles más exigentes, como 95 % o incluso 99 %, lo que permitiría validar con mayor rigurosidad los resultados y generar conclusiones más sólidas en contextos reales de implementación.

Por último, podría considerarse como una limitación de este estudio la definición de las distancias (40 cm, 50 cm, 60 cm y 70 cm) como factores inmutables, lo que impidió emplear pruebas de Chi-cuadrado entre ellas al no contar con una variación interna. Del mismo modo, al utilizar tarjetas RFID de un único lote y proveedor, se redujo la diversidad de respuestas,

limitando la generalización de los resultados. Por tanto, investigaciones futuras deberían introducir niveles de distancia variables junto con tarjetas procedentes de distintos fabricantes o lotes, a fin de evaluar la robustez y consistencia del sensor en escenarios más heterogéneos.

5.4. SUGERENCIAS PARA MEJORA CONTINUA

Con base en la evidencia obtenida, se recomienda que antes de pasar a la Etapa 2 de la Macro Propuesta (homologar el CI) se debería profundizar en este estudio ya realizado, avanzando en pruebas piloto con validadores RFID reales e integrados físicamente en buses, paraderos o estaciones de metro-tren, para validar el funcionamiento del sensor YR903 en condiciones no controladas y con comportamientos humanos orgánicos y habituales. Lo anterior, para subsanar las limitantes obtenidas en los resultados de este estudio. En otras palabras, incluir pruebas de usabilidad con pasajeros reales permitiría observar sus preferencias, las barreras de adopción del sistema y las percepciones sobre comodidad y eficiencia, fortaleciendo el factor humano de la propuesta.

En línea con lo anterior, también sería valioso incluir perfiles diversos (personas mayores, personas con movilidad reducida, mujeres embarazadas, grupos de niños, estudiantes, entre otros) para capturar un espectro amplio de las necesidades y expectativas existentes en la población objetivo. Este tipo de validación centrada en el usuario no solo refuerza la aceptación del sistema, sino que también permite detectar mejoras tempranas en la interacción o barreras no previstas durante el diseño técnico inicial.

Asimismo, dentro de estas pruebas con usuarios reales se podrían aplicar encuestas de satisfacción, entrevistas semiestructuradas o pruebas exploratorias inspiradas en métodos de evaluación de software como los test de usabilidad, pruebas heurísticas o validaciones tipo ”think-aloud”—técnicas reconocidas dentro del campo de la ingeniería de la usabilidad [Nielsen, 1994]—; con la finalidad de entender de manera más cercana las preferencias de las personas, obtener sugerencias, apreciar puntos de vista no considerados y mejorar de manera continua el sistema.

Por otro lado, se propone que utilizar sensores RFID de mayor alcance y potencia podrían resolver algunas de las limitaciones identificadas ya mencionadas. Igualmente, la utilización de múltiples sensores distribuidos en una misma unidad podría garantizar una detección robusta de las tarjetas sin la necesidad de una alineación precisa del usuario, lo que elevaría la efectividad del portatarjetas a distancia y podría resolver la poca efectividad en los casos en que se utilizó el pantalón (independiente del dispositivo de portabilidad).

Esta estrategia permitiría cubrir una mayor diversidad de posiciones corporales y condiciones físicas, lo que contribuiría a un sistema más equitativo e inclusivo de validación. En esta línea, la incorporación de inteligencia artificial o algoritmos de optimización podría potenciar aún más estos sistemas, permitiendo, por ejemplo, la adaptación automática a variaciones

en la señal, el filtrado de colisiones o la detección de patrones de evasión sospechosos en tiempo real. Lo anterior pensando que en la vida real existen usuarios que dependiendo de la situación no quieren hacer uso de su tarjeta si pueden evitarlo.

Podrían implementarse también medidas que subsanen los riesgos asociados al sensor RFID YR903 en cuanto a ciberseguridad (2.9), como por ejemplo: la encriptación de datos transmitidos entre el lector RFID y el servidor central; la autenticación robusta que valide el origen de las señales captadas; el control de acceso a las bases de datos que limite la visualización o modificación de registros sensibles únicamente a usuarios autorizados; y la detección temprana de anomalías, que permita identificar intentos de intrusión o patrones de comportamiento sospechoso. Estas estrategias han sido ampliamente discutidas en la literatura especializada como respuestas necesarias ante la inseguridad estructural de los sistemas RFID de bajo costo [Weis *et al.*, 2004].

Por otro lado y pensando en la implementación de este sistema en la Etapa 2 de la Macro Propuesta cabe considerar que el sensor YR903 podría presentar riesgos para la protección de la información personal asociada al CI, por lo que se debe trabajar en cómo garantizar que los datos recopilados se utilicen exclusivamente para temas de transporte público; que se restrinja el acceso a los datos sólo a personal autorizado; y que existan mecanismos efectivos para ejercer los derechos de los usuarios respecto a su información.

Adicionalmente, se exploró una extensión del sistema hacia la gestión de pagos, incorporando un registro de saldo y deuda por tarjeta mediante una base de datos SQL. Esta funcionalidad (detallada en el anexo 6.4) demostró la factibilidad técnica de simular transacciones, sentando así una base para futuras implementaciones más integrales del sistema.

Por otra parte, el desarrollo de un software que filtre colisiones, identifique patrones de lectura fallida o aplique machine learning, permitiría mejorar la confiabilidad del sistema incluso en condiciones adversas. Además, integrar este sistema con plataformas de visualización en tiempo real y herramientas de análisis predictivo podría ofrecer a los operadores una capacidad inédita de monitoreo y planificación, mejorando la asignación de recursos humanos y económicos, de transportes, de puntos de validación y de la respuesta ante contingencias climáticas, sociales y fallas en la maquinaria.

5.5. REFLEXIÓN FINAL

El mundo, las personas y la tecnología avanzan a un ritmo cada vez más acelerado con cada descubrimiento que aparece, y el transporte público no puede quedarse atrás en ningún escenario. Modernizar los sistemas de validación no es solo una mejora a nivel técnico: es una necesidad cultural, económica y social. Aquí es importante admitir que en general cualquier tipo de cambio, sobre todo si se relaciona a las dinámicas cotidianas de las personas, implica cierto grado de incomodidad, pero es innegable que también significa un progreso para sus vidas. Por lo que estudiar y abrir temáticas como la de este estudio se vuelve relevante si se

quiere seguir avanzando como sociedad y que la tecnología sea una herramienta más que un enemigo del cual desconfiar.

Si bien el objetivo a largo plazo es disminuir y erradicar la evasión en el transporte público de Santiago, esta nueva tarjeta y su sistema asociado representan una primera fase estratégica para construir una solución viable y sostenible, permitiendo validar el ingreso de manera más segura y fluida al transporte público. Es necesario relevar que este estudio contribuye de manera positiva a la discusión existente sobre la modernización del transporte público chileno desde una perspectiva tecnológica. Comprobar que un sensor económico como el YR903 puede ofrecer un nivel de rendimiento aceptable es un avance importante en términos de accesibilidad, escalabilidad y potencial de integración en contraste con el sistema actual utilizado.

Esta propuesta se alinea con los desafíos en temas de transporte público que enfrentan todas las ciudades contemporáneas existentes: mejorar la eficiencia operativa, reducir costos administrativos, fomentar una movilidad más inclusiva y mejorar la calidad de vida de los usuarios. Los dispositivos de portabilidad de la tarjeta como mochilas o portatarjetas entregan mejores resultados que billeteras, y este tipo de información permite generar lineamientos de diseño centrado en el usuario para futuros sistemas de validación, guiando así decisiones técnicas, gubernamentales, ergonómicas y de comunicación de información. Además, este estudio evidencia la importancia de considerar las prácticas culturales locales y los hábitos cotidianos de los usuarios al diseñar soluciones tecnológicas si se busca que tengan un real impacto positivo. No se trata solo de implementar dispositivos porque el avance de tecnología así lo permite, sino de entender profundamente cómo interactúan las personas con ellos, entendiendo que cualquier mejora de este tipo está al servicio de quienes la utilizan.

Es por todo lo anterior que esta memoria ha buscado dar un primer paso, pequeño pero firme, hacia un sistema más inteligente, justo y conectado de transporte para Santiago. Porque no sabemos qué depara el futuro, pero sí sabemos que cambiar es el único camino para avanzar y es la constante que nos caracteriza como seres humanos: no estaríamos aquí si no nos hubiésemos adaptado al paso del tiempo, los cambios ambientales y la necesidad de vivir mejor. Por lo que, con la evidencia recopilada, se establece un punto de partida sólido para continuar explorando nuevas soluciones, perfeccionar las existentes y, sobre todo, construir un transporte público más eficiente, accesible y alineado con las necesidades reales de sus usuarios en los tiempos actuales.

ANEXOS

6.1. RESULTADOS GLOBALES POR CASO DE USO (SIN DISTANCIAS)

En el siguiente anexo se muestran los resultados globales para cada caso de uso, sin considerar las distancias al sensor:

Tabla 19: Resultados globales por caso de uso (sin pruebas de distancia).
Fuente: Elaboración Propia

Caso	Detectada	No Detectada	Total	Tasa de Éxito
Billetera Acercada	68	0	68	100 %
Billetera a Distancia	66	2	68	97.0 %
Billetera en Pantalón con Tarjetas	0	68	68	0 %
Billetera en Pantalón con Tarjetas (menor altura)	0	68	68	0 %
Portatarjetas Acercada	68	0	68	100 %
Portatarjetas a Distancia	44	24	68	64.7 %
Tarjeta Acercada a Tótem BIP	68	0	68	100 %
Tarjeta en Mano a Distancia	67	1	68	98.5 %
Tarjeta en Mochila	53	15	68	77.9 %
Tarjeta en Pantalón	0	68	68	0 %
Tarjeta en Pantalón (menor altura)	41	27	68	60.3 %
Tarjeta en Polerón o Abrigo	55	13	68	80.9 %

6.2. RESULTADOS GLOBALES POR CASO DE USO

En el siguiente anexo se muestran los resultados globales para cada caso de uso incluyendo el caso de las distancias:

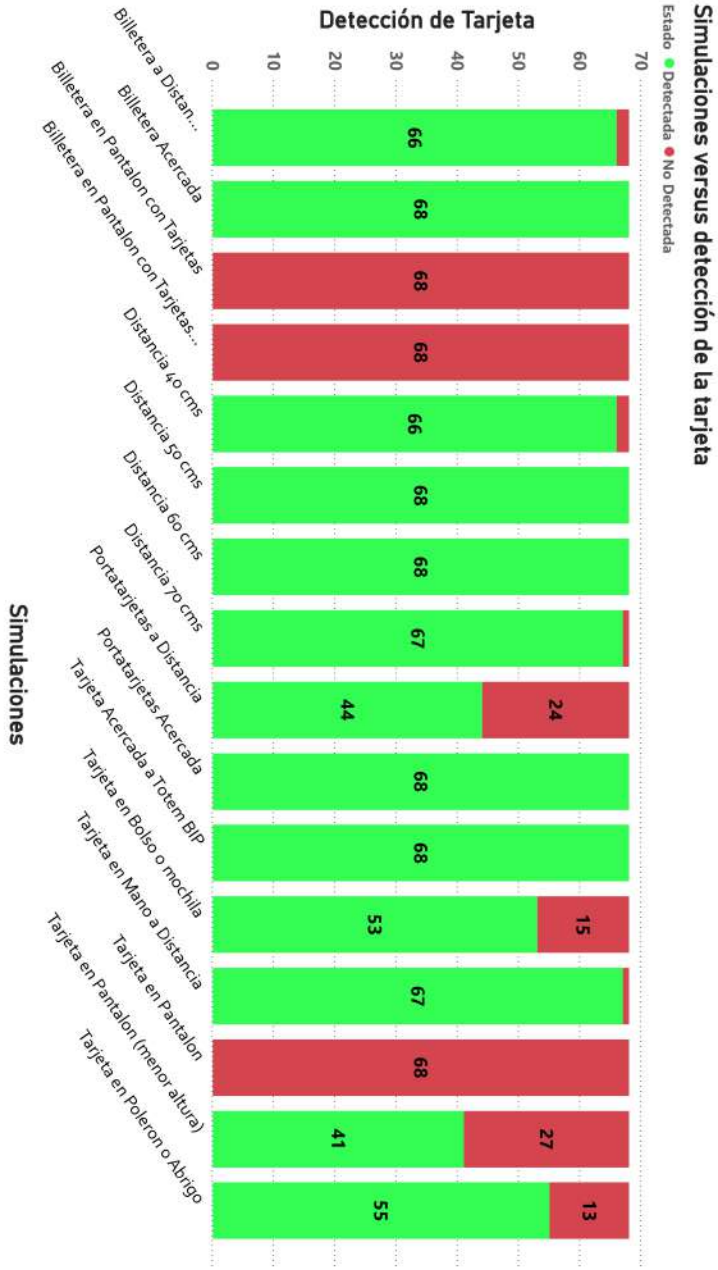

Figura 23: Representación visual con todos los casos de estudio y de pruebas.
Fuente: Elaboración Propia

6.3. TABLA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL ESTÁNDAR

La siguiente imagen presenta los valores de la distribución normal estándar acumulada, conocidos comúnmente como valores Z:

z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
+0	.50000	.50399	.50798	.51197	.51595	.51994	.52392	.52790	.53188	.53586
+0.1	.53983	.54380	.54776	.55172	.55567	.55966	.56360	.56749	.57142	.57535
+0.2	.57926	.58317	.58706	.59095	.59483	.59871	.60257	.60642	.61026	.61409
+0.3	.61791	.62172	.62552	.62930	.63307	.63683	.64058	.64431	.64803	.65173
+0.4	.65542	.65910	.66276	.66640	.67003	.67364	.67724	.68082	.68439	.68793
+0.5	.69146	.69497	.69847	.70194	.70540	.70884	.71226	.71566	.71904	.72240
+0.6	.72575	.72907	.73237	.73565	.73891	.74215	.74537	.74857	.75175	.75490
+0.7	.75804	.76115	.76424	.76730	.77035	.77337	.77637	.77935	.78230	.78524
+0.8	.78814	.79103	.79389	.79673	.79955	.80234	.80511	.80785	.81057	.81327
+0.9	.81594	.81859	.82121	.82381	.82639	.82894	.83147	.83398	.83646	.83891
+1	.84134	.84375	.84614	.84849	.85083	.85314	.85543	.85769	.85993	.86214
+1.1	.86433	.86650	.86864	.87076	.87286	.87493	.87698	.87900	.88100	.88298
+1.2	.88493	.88686	.88877	.89065	.89251	.89435	.89617	.89796	.89973	.90147
+1.3	.90320	.90490	.90658	.90824	.90988	.91149	.91308	.91466	.91621	.91774
+1.4	.91924	.92073	.92220	.92364	.92507	.92647	.92785	.92922	.93056	.93189
+1.5	.93319	.93448	.93574	.93699	.93822	.93943	.94062	.94179	.94295	.94408
+1.6	.94520	.94630	.94738	.94845	.94950	.95053	.95154	.95254	.95352	.95449
+1.7	.95543	.95637	.95728	.95818	.95907	.95994	.96080	.96164	.96246	.96327
+1.8	.96407	.96485	.96562	.96638	.96712	.96784	.96856	.96926	.96995	.97062
+1.9	.97128	.97193	.97257	.97320	.97381	.97441	.97500	.97558	.97615	.97670
+2	.97725	.97778	.97831	.97882	.97932	.97982	.98030	.98077	.98124	.98169
+2.1	.98214	.98257	.98300	.98341	.98382	.98422	.98461	.98500	.98537	.98574
+2.2	.98610	.98645	.98679	.98713	.98745	.98778	.98809	.98840	.98870	.98899
+2.3	.98928	.98956	.98983	.99010	.99036	.99061	.99086	.99111	.99134	.99158
+2.4	.99180	.99202	.99224	.99245	.99266	.99286	.99305	.99324	.99343	.99361
+2.5	.99379	.99396	.99413	.99430	.99446	.99461	.99477	.99492	.99506	.99520
+2.6	.99534	.99547	.99560	.99573	.99585	.99598	.99609	.99621	.99632	.99643
+2.7	.99653	.99664	.99674	.99683	.99693	.99702	.99711	.99720	.99728	.99736
+2.8	.99744	.99752	.99760	.99767	.99774	.99781	.99788	.99795	.99801	.99807
+2.9	.99813	.99819	.99825	.99831	.99836	.99841	.99846	.99851	.99856	.99861
+3	.99865	.99869	.99874	.99878	.99882	.99886	.99889	.99893	.99896	.99900
+3.1	.99903	.99906	.99910	.99913	.99916	.99918	.99921	.99924	.99926	.99929
+3.2	.99931	.99934	.99936	.99938	.99940	.99942	.99944	.99946	.99948	.99950
+3.3	.99952	.99953	.99955	.99957	.99958	.99960	.99961	.99962	.99964	.99965
+3.4	.99966	.99968	.99969	.99970	.99971	.99972	.99973	.99974	.99975	.99976
+3.5	.99977	.99978	.99978	.99979	.99980	.99981	.99981	.99982	.99983	.99983
+3.6	.99984	.99985	.99985	.99986	.99986	.99987	.99987	.99988	.99988	.99989
+3.7	.99989	.99990	.99990	.99990	.99991	.99991	.99992	.99992	.99992	.99992
+3.8	.99993	.99993	.99993	.99994	.99994	.99994	.99994	.99995	.99995	.99995
+3.9	.99995	.99995	.99996	.99996	.99996	.99996	.99996	.99996	.99997	.99997
+4	.99997	.99997	.99997	.99997	.99997	.99997	.99998	.99998	.99998	.99998

Figura 24: Imagen de la Tabla de Distribución Normal Estándar.
Fuente: *ztable.net* [ztable.net, nd]

6.4. VALIDACIÓN EXTENDIDA DEL SISTEMA

Dentro del alcance definido para la Etapa 1 de la Macro Propuesta para esta investigación, la simulación del proceso de pago y la gestión de saldos asociados a las tarjetas RFID no se encontraba inicialmente contemplada. No obstante, con el objetivo de proyectar funcionalidades futuras y avanzar hacia una implementación más realista, se desarrolló una mejora complementaria que sienta las bases para una posible Etapa 2 del sistema propuesto.

Para ello, se integró una nueva tabla en la base de datos SQL, la cual contiene los siguientes campos:

1. EPC
2. Número de Tarjeta
3. Saldo
4. Deuda

Cada una de las tarjetas utilizadas en los resultados anteriores fue asociada a un saldo inicial aleatorio entre 100 y 400 pesos. Posteriormente, durante la ejecución de las pruebas, cada vez que una tarjeta fue registrada en el archivo.csv correspondiente, se aplicó un descuento automático de 20 pesos, simulando así un flujo de pago básico. Esto se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 20: Extracto de resultados de la tabla Tarjetas que contiene el saldo y deuda. Fuente: Elaboración Propia.

EPC	Número de Tarjeta	Saldo	Deuda
E280699500004006D5536192	Tarjeta 11	0	134
E280699500004006D556D190	Tarjeta 6	0	18
E280699500004006D5571990	Tarjeta 46	0	142
E280699500005006D5516D70	Tarjeta 2	0	143
E280699500005006D553F992	Tarjeta 16	139	0
E280699500005006D5570590	Tarjeta 7	28	0

Tal como muestra el extracto de la tabla 20, el sistema fue capaz de registrar adecuadamente tanto los descuentos por uso como los saldos y deudas asociados a cada tarjeta. Este resultado valida la funcionalidad propuesta y permite avanzar hacia una implementación más integral. La tabla completa con los 68 registros utilizados puede revisarse en el anexo 6.5.

Adicionalmente, se habilitó una funcionalidad por línea de comandos que permite consultar el estado de una tarjeta determinada, entregando como respuesta el saldo actual y la deuda acumulada, si existiera:

```
🔎 Ingresa el número de tarjeta (ej: Tarjeta 3) o el EPC: Tarjeta 7

📄 Estado de Tarjeta 7 (E280699500005006D5570590)
----------------------------------------
🕒 Último uso: 2025-07-11 18:10:35
💰 Saldo actual: 28
💸 Deuda: 0
```

Figura 25: Consulta para conocer el estado de una tarjeta
Fuente: Elaboración Propia

6.5. TABLA TARJETAS CON SALDO Y DEUDA

La siguiente tabla representa todas las tarjetas con su respectivo saldo y deuda:

Tabla 21: Tabla completa de tarjetas con su respectivo saldo y deuda.

Fuente: Elaboración Propia

EPC	Número de Tarjeta	Saldo	Deuda
E280699500004006D5522191	Tarjeta 51	65	0
E280699500004006D5536192	Tarjeta 11	0	134
E280699500004006D553796E	Tarjeta 1	12	0
E280699500004006D553856E	Tarjeta 34	122	0
E280699500004006D5539D92	Tarjeta 15	0	23
E280699500004006D553F191	Tarjeta 47	13	0
E280699500004006D5542D91	Tarjeta 22	156	0
E280699500004006D5546591	Tarjeta 24	79	0
E280699500004006D555B193	Tarjeta 49	0	9
E280699500004006D5565590	Tarjeta 39	103	0
E280699500004006D5567193	Tarjeta 61	124	0
E280699500004006D5568190	Tarjeta 5	110	0
E280699500004006D5568D90	Tarjeta 19	0	86
E280699500004006D556A990	Tarjeta 8	116	0
E280699500004006D556BD90	Tarjeta 40	6	0
E280699500004006D556D190	Tarjeta 6	0	18
E280699500004006D556E190	Tarjeta 28	0	94
E280699500004006D556FD92	Tarjeta 55	0	16
E280699500004006D5570190	Tarjeta 38	135	0
E280699500004006D5570D93	Tarjeta 56	65	0
E280699500004006D5571192	Tarjeta 14	0	85
E280699500004006D5571593	Tarjeta 54	124	0
E280699500004006D5571990	Tarjeta 46	0	142
E280699500004006D5572593	Tarjeta 21	0	45

Continúa en la siguiente página

EPC	Número de Tarjeta	Saldo	Deuda
E280699500004006D5572993	Tarjeta 50	45	0
E280699500004006D5574590	Tarjeta 43	0	84
E280699500004006D5574990	Tarjeta 45	0	26
E280699500004006D5577993	Tarjeta 10	0	119
E280699500004006D5583193	Tarjeta 30	133	0
E280699500004006D5584192	Tarjeta 44	65	0
E280699500004006D5593D92	Tarjeta 29	160	0
E280699500004006D559A993	Tarjeta 64	35	0
E280699500004006D559D992	Tarjeta 31	66	0
E280699500004006D559E992	Tarjeta 59	21	0
E280699500005006D5516D70	Tarjeta 2	0	143
E280699500005006D5518970	Tarjeta 33	0	61
E280699500005006D551B591	Tarjeta 63	0	100
E280699500005006D5527D90	Tarjeta 4	87	0
E280699500005006D552C191	Tarjeta 9	189	0
E280699500005006D553396E	Tarjeta 66	0	79
E280699500005006D5537D6E	Tarjeta 35	137	0
E280699500005006D553F992	Tarjeta 16	139	0
E280699500005006D5540191	Tarjeta 42	0	135
E280699500005006D5546191	Tarjeta 25	70	0
E280699500005006D554F990	Tarjeta 3	0	63
E280699500005006D5560193	Tarjeta 62	0	76
E280699500005006D5563190	Tarjeta 36	100	0
E280699500005006D5565190	Tarjeta 32	0	13
E280699500005006D5565D93	Tarjeta 23	0	100
E280699500005006D5567590	Tarjeta 12	145	0
E280699500005006D5568990	Tarjeta 20	14	0
E280699500005006D556F190	Tarjeta 37	0	20
E280699500005006D556F992	Tarjeta 53	127	0
E280699500005006D556FD90	Tarjeta 27	0	90
E280699500005006D556FD93	Tarjeta 48	0	105

Continúa en la siguiente página

EPC	Número de Tarjeta	Saldo	Deuda
E280699500005006D5570590	Tarjeta 7	28	0
E280699500005006D5570993	Tarjeta 41	0	99
E280699500005006D5571992	Tarjeta 17	74	0
E280699500005006D5572190	Tarjeta 26	0	117
E280699500005006D557D193	Tarjeta 65	77	0
E280699500005006D5585192	Tarjeta 68	87	0
E280699500005006D5585D92	Tarjeta 18	0	1
E280699500005006D5586D92	Tarjeta 67	0	43
E280699500005006D558E992	Tarjeta 13	0	87
E280699500005006D5590992	Tarjeta 52	8	0
E280699500005006D5598993	Tarjeta 60	0	82
E280699500005006D559DD92	Tarjeta 58	17	0
E280699500005006D559E192	Tarjeta 57	0	63

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[BCN, 2023] (2023). Biblioteca del congreso nacional de chile. Sitio web, https://www.bcn.cl/siit/reportesregionales/pdf_region.html?anno=2023&cod_region=13.

[Basso, 2019] Basso, F. (2019). Estudio ubica a santiago en el top 10 del ranking del transporte público más caro en función del ingreso medio. *El Mercurio*.

[Cochran, 1977] Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques*. John Wiley & Sons, New York, 3rd edición.

[Davenport y Ronanki, 2018] Davenport, T. H. y Ronanki, R. (2018). *The AI Advantage: How to Put the Artificial Intelligence Revolution to Work*. MIT Press.

[Deming, 1986] Deming, W. E. (1986). *Out of the Crisis*. MIT Press, Cambridge, MA.

[Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, 2017] Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones (2017). Transantiago: medidas antievasión y grupos vulnerables. Documento PDF, https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24513/1/BCN_Evasi%C3%B3n_transantiago_social.pdf.

[Directorio de Transporte Público Metropolitano, 2023] Directorio de Transporte Público Metropolitano (2023). Índice de evasión en buses del sistema de transporte público metropolitano. Documento PDF, https://www.dtpm.cl/archivos/Evasion%202023.pdf.

[Díaz Sanjuán y Hernández García, 2010] Díaz Sanjuán, M. y Hernández García, J. (2010). *La observación en la investigación cualitativa*. Editorial Síntesis, Madrid.

[Guzmán, 2024] Guzmán, J. P. (2024). Cuatro de cada 10 personas no pagaron al usar el sistema red durante el año pasado.

[Harrell, 2015] Harrell, F. E. (2015). *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis*. Springer, New York, NY, 2nd edición.

[IBM Corp., 2020] IBM Corp. (2020). *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0*. IBM Corp., Armonk, NY. Software utilizado para análisis estadístico.

[Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2017] Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2017). Censo de población y vivienda 2017. Sitio web oficial. Recuperado de: https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2024&idcom=13201.

[International Organization for Standardization, 2011] International Organization for Standardization (2011). Iso/iec 25010:2011 systems and software engineering — systems and software quality requirements and evaluation (square) — system and software quality models. Disponible en: https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010.

[Invelion, sf] Invelion (s.f.). Uhf rfid gate reader - invelion. http://www.invelion.net/product/html/?139.html. Accedido el 12 de mayo de 2025.

[Labraña, 2017] Labraña, C. M. (2017). ¿cómo cambió el transantiago a 10 años de su inicio? *Biobio Chile*.

[Marin *et al.*, 2018] Marin, L., Zanella, A., y Vangelista, L. (2018). Interference among multiple rfid cards: Experimental evaluation and mitigation techniques. *IEEE Journal on Radio Frequency Identification*, 2(1):44–52.

[Mercurio, 2018] Mercurio, E. (2018). Transporte urbano en brasil: El sistema de cámaras que descubrió 2.200 fraudes en el uso del pase escolar en una semana. *Cero Papel, el Mercurio*.

[Microsoft Corporation, 2023] Microsoft Corporation (2023). *SQL Server Management Studio (SSMS) Documentation*. Disponible en: https://learn.microsoft.com/en-us/sql/ssms/overview.

[Microsoft Corporation, 2024a] Microsoft Corporation (2024a). *Microsoft SQL Server Documentation*. Disponible en: https://learn.microsoft.com/en-us/sql/sql-server/.

[Microsoft Corporation, 2024b] Microsoft Corporation (2024b). *Power BI Documentation*. Disponible en: https://learn.microsoft.com/en-us/power-bi/.

[Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2018] Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2018). Subsecretario de transportes supervisa sistema de reconocimiento facial y novedades tecnológicas de pago implementadas en metro de valparaíso. https://mtt.gob.cl/archivos/19293.

[Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2024] Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2024). En 86 % aumentan los usuarios del qr en el transporte público capitalino. https://www.mtt.gob.cl/archivos/35722.

[NCD Risk Factor Collaboration, 2024] NCD Risk Factor Collaboration (2024). Estatura promedio en chile, 1985–2019. BioBioChile / 24 Horas. Altura promedio de 172.9 cm en hombres y 159.4 cm en mujeres.

[Nielsen, 1994] Nielsen, J. (1994). *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann, San Francisco.

[Nueno y Videla, 2009] Nueno, J. L. y Videla, P. (2009). Estudio sobre el impacto de la crisis en el comportamiento del consumidor. http://www.jlnueno.com/wordpress/wp-content/uploads/Estudio-sobre-impacto-IESE.pdf. Accedido el 12 de mayo de 2025.

[Pearson, 1900] Pearson, K. (1900). On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *Philosophical Magazine Series 5*, 50(302):157–175.

[Percepciones Económicas, 2021] Percepciones Económicas (2021). Los grupos socioeconómicos en chile. https://www.percepcioneseconomicas.cl/desarrollo-economico/los-grupos-socioeconomicos-en-chile/#:~:text=Los%20hogares%20son%20clasificados%20en,)%20y%20E%20(pobres). Basado en información de: AIM.

[Pérez *et al.*, 2011] Pérez, F., Granger, B. E., y Hunter, J. D. (2011). Python: An ecosystem for scientific computing. *Computing in Science & Engineering*, 13(2):13–21.

[ResearchGate, 2023] ResearchGate (2023). The electronic product code (epc): example of a 96 bit epc tag. Sitio web. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/The-Electronic-Product-Code-EPC-example-of-a-96-bit-EPC-tag-Adapted-from-Leong-et_fig3_28149608.

[Reyes, 2017] Reyes, N. A. G. (2017). Construcción de factores de corrección por evasión para la matriz origen-destino de viajes. Tesis de magíster en ingeniería de transporte, Universidad de Chile, Santiago, Chile. Accedido el 12 de mayo de 2025.

[RFID4U, 2023] RFID4U (2023). Understanding choosing rfid tag based on the tag frequency. Sitio web. Recuperado de https://rfid4u.com/rfid-frequency/.

[Rieback *et al.*, 2006] Rieback, M. R., Crispo, B., y Tanenbaum, A. S. (2006). The evolution of rfid security. *IEEE Pervasive Computing*, 5(1):62–69.

[Skorupski y Uchroński, 2017] Skorupski, J. y Uchroński, P. (2017). A fuzzy model for evaluating metal detection equipment at airport security screening checkpoints. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 16:39–48.

[Stevens, 1946] Stevens, S. S. (1946). On the theory of scales of measurement. *Science*, 103(2684):677–680.

[Weis *et al.*, 2004] Weis, S. A., Sarma, S. E., Rivest, R. L., y Engels, D. W. (2004). Security and privacy aspects of low-cost radio frequency identification systems. En *Security in Pervasive Computing*, pp. 201–212. Springer.

[Zar, 2010] Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 5th edición.

[ztable.net, nd] ztable.net (n.d.). Z table - standard normal distribution. Recuperado el 8 de julio de 2025.