

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL RASTREO SATELITAL DE VEHICULOS DEL ECU 911 MEDIANTE SOFTWARE DE CODIGO ABIERTO

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Electrónica

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Electrónica, Telecomunicaciones y Sistemas de Control

AUTOR: Diego Vladimir Villarroel Carrillo

TUTOR: Ing. Jesús Israel Guamán Molina Mg.

Ambato - Ecuador

julio - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL RASTREO SATELITAL DE VEHICULOS DEL ECU 911 MEDIANTE SOFTWARE DE CODIGO ABIERTO, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Diego Vladimir Villarroel Carrillo, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, julio 2025.

Firmado electrónicamente por:
JESUS ISRAEL GUAMAN MOLINA
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Jesús Israel Guamán Molina, Mg.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL RASTREO SATELITAL DE VEHICULOS DEL ECU 911 MEDIANTE SOFTWARE DE CODIGO ABIERTO es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio 2025.



Diego Vladimir Villarroel Carrillo

C.C. 1805409834

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio 2025.



Diego Vladimir Villarroel Carrillo

C.C. 1805409834

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Diego Vladimir Villarroel Carrillo, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL RASTREO SATELITAL DE VEHICULOS DEL ECU 911 MEDIANTE SOFTWARE DE CODIGO ABIERTO, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, julio 2025.

Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN OSWALDO MAYORGA MAYORGA
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga, Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Firmado electrónicamente por:
JULIO ENRIQUE CUJI RODRIGUEZ
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Julio Cuji Rodriguez,Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

Firmado electrónicamente por:
TATIANA PAOLA ZAMBRANO VALVERDE
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Tatiana Zambrano Valverde,Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de titulación primeramente a mis papás, Cristina y Vladimir, que me brindaron todo el cariño, paciencia y apoyo necesario para poder culminar este trabajo, tanto emocional como económico, ya que sin su ayuda nada de esto no sería posible, por ser mi mayor ejemplo de lucha, perseverancia y amor. Gracias por su esfuerzo incansable, por todos los sacrificios que han hecho para brindarme una educación, por su comprensión en los días de ausencia y cansancio, y por nunca dejar de creer en mí. Este logro es tanto mío como suyo, también quiero dedicar este trabajo a mis amigos, conocidos, a todas las personas que tuve la oportunidad de poder convivir con ellas y de alguna manera compartimos experiencias, buenas o malas pero con la fortuna de siempre aprender lo mayor posible en el camino, todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron con su ayuda, que sin saberlo, inspiran con el ejemplo a la realización de esta tesis, gracias por ser parte de este capítulo tan importante en mi vida, en particular, a Cristiano Ronaldo, su trayectoria me recordó que, con esfuerzo y determinación, es posible alcanzar cualquier meta por lejana que parezca, agradecer a mis docentes, Juan Pablo Pallo, Mario García, Paulina Ayala, Patricio Córdova y demás docentes que me supieron brindar su apoyo aún en mis peores momentos y que gracias a su conocimiento y su cátedra este trabajo pudo ser realizado, a Anabel, a Verónica Gavilánez. Finalmente, me dedico este trabajo a mí mismo, como recordatorio de que la perseverancia, la fe y el esfuerzo constante rinden fruto. Este logro representa no solo el cierre de una etapa académica, sino el inicio de nuevos retos y sueños por alcanzar.

AGRADECIMIENTO

Al culminar esta etapa tan significativa en mi vida, quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, fueron parte esencial de este proceso académico y personal. Esta tesis no solo representa el resultado de muchos meses de trabajo, sino también el reflejo de la compañía, el apoyo y el aliento de quienes caminaron junto a mí, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis padres, pilares fundamentales en mi vida, por su amor incondicional, por su incansable sacrificio y por haberme enseñado, con su ejemplo, el valor del trabajo honesto, la humildad y la perseverancia. No hay palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí; este logro es tan suyo como mío. A mi familia, por su compañía, comprensión y palabras de ánimo en cada etapa de este proceso. Gracias por estar presentes incluso cuando no sabían cómo ayudar, simplemente con su apoyo emocional y su presencia en mi vida.

A mis docentes y tutores, por haber compartido su conocimiento con dedicación, por guiarme con paciencia, y por exigirme lo necesario para crecer académica y personalmente. Agradezco profundamente cada consejo, observación y sugerencia que contribuyó a la calidad de este trabajo.

A mis compañeros y amigos, quienes hicieron de este camino algo más llevadero. Gracias por los momentos compartidos, por las madrugadas de estudio, los debates, las risas en medio del cansancio y por nunca dejarme solo. En cada uno de ustedes encontré apoyo, complicidad y motivación.

Y finalmente, me agradezco a mí mismo. Por no rendirme, por seguir adelante aun en los momentos en que las fuerzas flaqueaban, por confiar, por aprender de los errores y por permitirme crecer a lo largo de este camino. Esta meta alcanzada es también una promesa de continuar esforzándome con humildad y convicción por todo lo que está por venir.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA ..... **i**

APROBACIÓN DEL TUTOR ..... **ii**

AUTORÍA ..... **iii**

DERECHOS DE AUTOR ..... **iv**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO ..... **v**

DEDICATORIA ..... **vi**

AGRADECIMIENTO ..... **vii**

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS ..... **viii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... ¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS ..... ¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE ANEXOS ..... **xix**

RESUMEN EJECUTIVO ..... **xx**

ABSTRACT ..... **xxi**

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO **1**

1.1 Tema de investigación 1

1.1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Antecedentes investigativos 3

1.3 Fundamentación teórica 5

1.3.1 Sistemas Satelitales de Comunicaciones..... 5

1.3.2 Leyes de Kepler..... 7

1.3.3 Sistemas de un satélite 9

1.3.4 Bandas de frecuencia..... 11

1.4 Sistemas de navegación..... 12

1.4.1 GPS…… 13

1.4.2 Glonass……...15

1.4.3 Galileo ……...16

1.4.4 BeiDou ……...17

1.5 Aplicaciones del GNSS en el Rastreo Vehicular 19

1.5.1 Evolución del del rastreo vehicular con GNSS..... 19

1.5.2 Precisión del GNSS..... 21

1.5.3 Beneficios del GNSS..... 23

1.5.4 Limitaciones del GNSS..... 24

1.6 Componentes del sistema de rastreo 26

1.6.1 Microcontrolador Arduino 1 26

1.6.2 Módulo SIM808 (GSM/GPRS + GPS)..... 27

1.6.3 Módulo GPS NEO-6M..... 28

1.6.4 Power Bank como fuente de alimentación..... 29

1.7 Telefonía Móvil..... 30

1.7.1 Primera generación..... 31

1.7.2 Segunda Generación..... 32

1.7.3 Tercera Generación..... 34

1.7.4 Cuarta Generación..... 37

1.8 Comunicación Celular para Transmisión de Datos..... 38

1.8.1 Sistemas GSM..... 39

1.8.2 Sistemas GPRS..... 41

1.8.3 GPRS y su uso con la telefonía móvil..... 44

1.9 Software y Hardware Libres en Sistemas de Rastreo..... 45

1.9.1 Hardware Libre en Sistemas de Rastreo..... 45

1.9.2 Software Libre en Sistemas de Rastreo..... 46

1.9.3 Integración y Aplicaciones..... 46

1.10 Arquitectura Cliente-Servidor en Sistemas de Rastreo GPS..... 47

1.10.1 Captura y Transmisión de Datos en el Cliente..... 47

1.10.2 Recepción y Procesamiento de Datos en el Servidor..... 47

1.10.3 Visualización y Monitoreo..... 48

1.10.4 Consideraciones Técnicas..... 48

1.11 Hardware libre..... 49

1.11.1 Servidores 50

1.11.2 Plataformas 52

1.11.3 Servidores en la Nube 52

1.11.4 Bases de Datos 52

1.11.5 Almacenamiento de Información 53

1.12 Programación Web 53

1.13 Operadoras móviles 56

1.14 Objetivos 57

1.14.1 Objetivo general 57

1.14.2 Objetivos específicos 57

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA 58

2.1 Materiales 58

2.2 Métodos 60

2.2.1 Modalidad de la investigación 60

2.2.2 Población y muestra 61

2.2.3 Recolección de información 61

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos 62

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 64

3.1 Arquitectura general del Sistema de Rastreo Satelital. 64

3.2 Selección de componentes para el sistema. 65

3.2.1 Justificación técnica de selección de componentes. 65

3.2.2 Plataforma servidor LAMP 71

3.2.3 Diseño del circuito. 75

3.3 Montaje del sistema de pruebas 77

3.3.1 Montaje físico 77

3.3.2 Configuración de software y levantamiento del servidor 79

3.3.3 Estructura de la base de datos 81

3.3.4 Visualización en tiempo real de los parámetros de monitoreo 84

3.3.5 Latencia de transmisión 85

3.3.6 Cobertura de red GSM 86

3.3.7 Consumo energético 86

3.4 Funcionamiento de la plataforma web 88

3.4.1 Proceso de acceso e inicio de sesión 89

3.4.2 Consulta de datos en tiempo real 91

3.4.3 Interacción en la plataforma web 91

3.5 Comparación técnica con otras soluciones de rastreo 98

3.6 Entrega de informes o reportes 100

3.7 Pruebas de funcionamiento 102

3.7.1 Prueba del funcionamiento del sistema de monitoreo vehicular 102

3.7.2 Precisión del GPS 104

3.8 Análisis económico del sistema propuesto 108

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 112

4.1 Conclusiones 112

4.2 Recomendaciones 114

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115

ANEXOS 121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del Arduino 1 R3 [40] 27

Tabla 2 características del SIM 808 EVB-V3.2.4 [41] 28

Tabla 3 Características del módulo GPS Neo-6m [42] 29

Tabla 4 Tabla de características de la batería externa [43] 30

Tabla 5. Comparativa de Soluciones Gratuitas de Rastreo GPS [64] 47

Tabla 6. Características de hardware del sistema 59

Tabla 7 Características de software del sistema 60

Tabla 8 Tabla de parámetros 62

Tabla 9 Comparación con soluciones GPS del mercado. 66

Tabla 10 Comparación entre Módulos GPS. 67

Tabla 11 Comparativa de módulos GSM/GPS. 68

Tabla 12 Comparativa de microcontroladores. 68

Tabla 13 Características técnicas de Operadoras en Ecuador. 69

Tabla 14 Comparación de baterías recargables. 71

Tabla 15 Estructura de la base de datos. 75

Tabla 16 Estructura de la tabla gps_data. 81

Tabla 17 Cobertura celular estimada por valores CSQ. 86

Tabla 18 Distribución de corriente y autonomía del sistema. 86

Tabla 19 Cálculo de autonomía del sistema. 87

Tabla 20 Comparación técnica de sistemas de rastreo satelital 99

Tabla 21 Alertas generadas 101

Tabla 22 Mapa de las rutas con trazado GPS superpuesto mediante Leaflet (rojo: Baños, azul: Latacunga) 103

Tabla 23 Comparación de coordenadas obtenidas y de referencia Ruta Ambato-Baños 104

Tabla 24 Comparación de coordenadas obtenidas y de referencia Ruta Ambato-Latacunga 104

Tabla 25 Error obtenido de las coordenadas GPS ruta Ambato-Baños 106

Tabla 26 Error obtenido de las coordenadas GPS ruta Ambato-Latacunga..... 107

Tabla 27 Presupuesto de elaboración 109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Comparación de retardos máximos de propagación unidireccional [13] 6

Figura 2. Primera ley de Kepler [15] 8

Figura 3 Segunda Ley de Kepler [13] 9

Figura 4 Bandas de Frecuencia [13] 12

Figura 5 Sistema de navegación por Satélite [20] 13

Figura 6 Sistema GPS [13] 14

Figura 7 Sistema de navegación Glonass [21] 15

Figura 8 Satélites Glonass [22] 16

Figura 9 Sistema Galileo [27] 17

Figura 10 Especificaciones de Satélites BeiDou [28] 18

Figura 11 Sistema BeiDou [28] 18

Figura 12 Uso del GPS en vuelos comerciales [20] 19

Figura 13 Evolución de Sistemas GNSS [33] 21

Figura 14 Arduino 1 R3 [40] 26

Figura 15 Módulo GPS/GSM SIM 808 EVB-V3.2.4 [41] 27

Figura 16 Módulo GPS Ublox Neo-6m [42] 28

Figura 17 Batería externa [43] 30

Figura 18 Evolución del 3G [49] 36

Figura 19 Países que soportan la banda 28 LTE [53] 38

Figura 20 Evolución de las redes celulares [33] 38

Figura 21 Subsistema GSM [54] 40

Figura 22 Arquitectura de un sistema GSM [57] 41

Figura 23. Estándares de las generaciones celulares [61] 45

Figura 24. Arquitectura Cliente-Servidor [69] 48

Figura 25 Cobertura 3G en Ecuador 56

Figura 26 Sistema general de funcionamiento del sistema. 64

Figura 27 Diagrama de conexión y envío de datos. 65

Figura 28 Versión de PHP existente en el servidor 74

Figura 29 Diagrama de arquitectura cliente-servidor 74

Figura 30 Conexión entre Dispositivos. 75

Figura 31 Case del prototipo. 76

Figura 32 Case del prototipo final 76

Figura 33 PCB desarrollada para el suministro de energía. 77

Figura 34 Montaje físico del dispositivo 78

Figura 35 Diagrama del levantamiento del dispositivo 79

Figura 36 Diagrama del montaje del servidor. 80

Figura 37 Visualización de la adquisición de datos 82

Figura 38 Ruta Ambato-Latacunga. 88

Figura 39 Ruta Ambato – Baños 89

Figura 40 Diagrama de flujo de autenticación básica en la plataforma web 89

Figura 41 Interfaz de Inicio de sesión 90

Figura 42 Interfaz de Inicio de sesión: Credenciales incorrectas 90

Figura 43 Interfaz de Inicio de sesion: Credenciales incorrectas 90

Figura 44 Diagrama de etapa de consulta de datos 91

Figura 45 Vista del mapa en tiempo real con Leaflet.js 92

Figura 46 Datos recibidos desde los módulos GPS 93

Figura 47 Diagrama de secuencia acciones que se pueden realizar en la plataforma web 93

Figura 48 Diagrama de la visualización de la ruta histórica 94

Figura 49 Diagrama de selección de conductor 95

Figura 50 Ajuste de Límite de Velocidad 96

Figura 51 Diagrama de activar/desactivar seguimiento 97

Figura 52 Diagrama de Geocerca 98

Figura 53 Configuración de la Geocerca. 98

Figura 54 Cobertura de red 3G/4G Claro Ecuador [81] 100

Figura 55 Diagrama de descarga de alertas 102

Figura 56 Formatos disponibles de descarga en la página web 102

Figura 57 Precio de otros modulos GPS en el mercado [83] 111

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Código utilizado para la programación del microcontrolador 121

Anexo B. Datasheet del módulo SIM808 124

Anexo C DataSheet módulo GPS GY-GPS6MV2 NEO6MV2 EEPROM 126

Anexo D Diversas pruebas realizadas 126

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un sistema de rastreo satelital en tiempo real para vehículos de emergencia del ECU 911, empleando hardware y software de código abierto. El sistema está compuesto por un microcontrolador Arduino Uno, un módulo GPS NEO-6M y un módulo GSM/GPRS SIM808, alimentados por una batería portátil de alta capacidad. La información de ubicación es transmitida vía GPRS a un servidor LAMP (Linux, Apache, MariaDB, PHP), donde se almacena y visualiza a través de una plataforma web desarrollada con Leaflet.js.

Se realizaron pruebas en campo utilizando dos rutas representativas (Ambato-Baños y Ambato-Latacunga), recolectando más de 100 puntos geográficos. El error promedio en la geolocalización fue de 3.23 metros, acorde con las especificaciones técnicas del módulo GPS. El sistema logró una autonomía de aproximadamente 161 horas con una power bank de 20 000 mAh, demostrando su viabilidad para operaciones prolongadas.

La plataforma web ofrece funcionalidades como monitoreo en tiempo real, visualización histórica, filtros por módulo y fecha, gestión de conductores, alertas por exceso de velocidad y zonas restringidas, y generación de reportes en PDF y Excel. Se comprobó que la solución es eficiente, económica y escalable para su integración en instituciones públicas que requieren una alternativa libre de licencias comerciales.

Palabras clave: Rastreo satelital, Arduino uno, Sim808, GPS NEO-6M, plataforma web, vehículos de emergencia, código abierto, GPRS.

ABSTRACT

This project presents the design and implementation of a real-time satellite tracking system for ECU 911 emergency vehicles, using open-source hardware and software. The system consists of an Arduino Uno microcontroller, a NEO-6M GPS module, and a SIM808 GSM/GPRS module, powered by a 20,000 mAh portable power bank. GPS data is transmitted via GPRS to a LAMP-based server (Linux, Apache, MariaDB, PHP), where it is stored and visualized through a responsive web platform built with Leaflet.js.

Field tests were conducted along two routes—Ambato to Baños and Ambato to Latacunga—collecting over 100 GPS points. The average geolocation error was 3.23 meters, consistent with the technical specifications of the NEO-6M module. The system achieved an autonomy of approximately 161 hours, validating its suitability for extended deployment without frequent recharging.

The web platform provides key functionalities such as real-time tracking, historical route visualization, module and date filtering, driver data management, alert generation for speed and geofence violations, and downloadable reports in PDF and Excel formats. The solution demonstrates a cost-effective, scalable, and license-free alternative for public institutions requiring reliable vehicle monitoring capabilities.

Keywords: Satellite tracking, Arduino uno, Sim808, Neo-6m, Web platform, GPRS, Open-source systems, Emergency vehicles.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA EL RASTREO SATELITAL DE VEHICULOS DEL ECU 911 MEDIANTE SOFTWARE DE CODIGO ABIERTO

1.1.1 Planteamiento del problema

La obsolescencia de las redes 2G ha generado la necesidad de adoptar tecnologías actuales, como 3G y 4G, para mejorar la seguridad y la eficiencia en el rastreo satelital de vehículos en instituciones articuladas. Muchas organizaciones carecen de sistemas de monitoreo efectivos que permitan gestionar sus flotas de manera precisa y en tiempo real, lo que limita su capacidad operativa. Este proyecto propone el diseño de un prototipo funcional basado en software de código abierto, permitiendo evaluar la viabilidad de un sistema escalable, económico y adaptado a las necesidades actuales de las instituciones articuladas al ECU 911 [1].

En este contexto, las entidades públicas enfrentan serias dificultades para gestionar adecuadamente sus recursos de transporte, especialmente en situaciones de emergencia, donde la inmediatez y la coordinación precisa son vitales. La falta de herramientas tecnológicas integradas que permitan un seguimiento en tiempo real de los vehículos compromete directamente la capacidad de respuesta ante eventos críticos. Esta deficiencia provoca desorganización logística, asignación ineficiente de recursos humanos y materiales, y dificultades en la planificación de rutas, lo que conlleva a retrasos operativos y menor efectividad institucional [2].

Diversos informes internacionales han advertido que la ausencia de un sistema de monitoreo robusto puede generar consecuencias graves en escenarios de emergencia. La Organización Mundial de la Salud (OMS), por ejemplo, estima que los retrasos en la llegada de unidades pueden reducir hasta en un 15 % las posibilidades de supervivencia de una persona en estado crítico. Esta realidad es especialmente preocupante para el ECU 911, ya que afecta directamente la calidad de los servicios

que brinda a la ciudadanía, poniendo en riesgo vidas humanas y comprometiendo la confianza pública [3].

Otro aspecto crítico es la carencia de una base de datos centralizada que permita integrar la información operativa de los vehículos en circulación. Esto impide realizar un control eficiente del estado, ubicación y disponibilidad de las unidades, dificultando la toma de decisiones estratégicas en tiempo real. La desarticulación de la información también genera retrasos en la detección de fallas logísticas, limita el seguimiento del cumplimiento de las rutas asignadas y reduce la capacidad de supervisión general de las operaciones [3].

A estas limitaciones se suma la dependencia que muchas instituciones públicas tienen respecto a soluciones tecnológicas comerciales. La adquisición de software privado implica un alto costo para el Estado, no solo por las licencias iniciales, sino también por el mantenimiento, las actualizaciones y la escasa posibilidad de adaptación a las necesidades locales. De acuerdo con la firma Gartner, las licencias de software pueden consumir hasta un 20 % del presupuesto tecnológico institucional, lo que representa un gasto significativo para organizaciones con recursos limitados [4].

Esta dependencia tecnológica también genera vulnerabilidades estratégicas, ya que las instituciones quedan sujetas a los calendarios de desarrollo, políticas de seguridad y decisiones comerciales de los proveedores externos. Además, las soluciones privadas muchas veces no están diseñadas con el entorno local en mente, lo que limita su aplicabilidad real y provoca la necesidad constante de ajustes o adquisiciones adicionales [5].

Por otro lado, la falta de tecnologías satelitales accesibles y adaptadas a las condiciones locales agrava la situación. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), aproximadamente el 25 % de los vehículos asignados a instituciones públicas en América Latina carecen de sistemas de rastreo satelital, lo que los hace vulnerables a robos, extravíos y uso indebido [5]. En el contexto del ECU 911, esta carencia puede tener implicaciones directas en la pérdida de activos públicos, fallos en la cobertura de rutas, y deficiencias en el control de desplazamientos, generando impactos negativos tanto económicos como operativos [4].

La situación descrita evidencia una problemática estructural que afecta múltiples dimensiones del funcionamiento institucional: desde la seguridad y eficiencia operativa, hasta la sostenibilidad financiera y la transparencia en la gestión pública. Mientras los desafíos aumentan debido a la expansión vehicular y la creciente demanda ciudadana, la infraestructura tecnológica actual resulta insuficiente para garantizar una administración adecuada de las flotas vehiculares. Esta realidad demanda una atención urgente, ya que la ineficiencia en la gestión de estos recursos compromete la capacidad de respuesta ante emergencias, eleva los costos institucionales y debilita el cumplimiento de los objetivos misionales del ECU 911 y de otras entidades articuladas [5].

La falta de una estrategia tecnológica integral para la gestión de flotas vehiculares en instituciones públicas como el ECU 911 constituye, por tanto, una problemática multifactorial. Esta situación no solo obstaculiza la eficiencia operativa, sino que también limita la capacidad institucional de adaptarse a los retos actuales en materia de seguridad, sostenibilidad y respuesta ante emergencias. La combinación de sistemas obsoletos, altos costos operativos y escasa adaptabilidad tecnológica plantea un escenario insostenible a largo plazo, que exige la identificación urgente de soluciones viables, accesibles y orientadas a mejorar la capacidad de supervisión, control y toma de decisiones en el entorno vehicular institucional [6].

1.2 Antecedentes investigativos

A continuación, se detallan estudios recientes sobre sistemas de rastreo vehicular basados en software de código abierto, resaltando porcentajes, valores numéricos y hallazgos clave:

La investigación *Antitheft Mobile Tracking System* [7]. Se orientó al desarrollo de un sistema móvil de rastreo vehicular con fines antirrobo, destinado a reforzar la seguridad de los automóviles. La propuesta integró funciones de localización en tiempo real con mecanismos de seguridad remota, permitiendo a los usuarios monitorear la posición del vehículo y activar respuestas de protección desde un dispositivo móvil. Aunque no se incluyen métricas precisas sobre reducción de robos o costos, el estudio evidenció la efectividad del sistema en la prevención y

recuperación de vehículos durante las pruebas. El trabajo resalta la importancia de los sistemas móviles de rastreo como herramientas clave en la seguridad vehicular actual [7].

La investigación [8]. resentó un sistema de rastreo vehicular basado en el protocolo CAN-Bus y una placa NodeMCU con el microcontrolador ESP8266. Esta solución permitía recopilar datos en tiempo real, como el consumo de combustible, la velocidad y códigos de fallas del vehículo. Aunque no se incluyen métricas específicas, el estudio subraya que se trata de una alternativa económica y eficiente para el monitoreo de vehículos, contribuyendo a una mejor gestión de flotas y al incremento de la eficiencia operativa [8].

El estudio [9]. Evaluó el impacto de un sistema de rastreo en una flota de vehículos pertenecientes a una institución pública. La implementación del sistema permitió reducir en un 13,2 % el consumo de combustible por kilómetro en automóviles, minibuses y midibuses, aunque no se registraron mejoras significativas en camiones. Asimismo, los costos por mantenimiento y reparaciones tras accidentes disminuyeron de 7.088,31 TRY a 5.901,94 TRY. La investigación concluye que el sistema es rentable en vehículos que superan los 18.300 km recorridos por año [9].

La investigación *An Advanced Public Transport with Tracking the Vehicle and Sending the Location Using GSM and GPS during Pandemic Situations* [10]. Propuso 4 un sistema de rastreo vehicular adaptado a contextos de pandemia, orientado al transporte público. La solución se basó en tecnologías GSM y GPS para enviar alertas y compartir la ubicación de los vehículos con usuarios y autoridades, facilitando el monitoreo en tiempo real. Aunque no se presentan datos cuantitativos sobre reducción de costos o tiempos, el estudio resalta el valor de la localización y la comunicación activa como elementos clave para la gestión de flotas en situaciones críticas. Se concluye que este tipo de sistemas fortalece la seguridad y mejora la operatividad del transporte en escenarios de emergencia sanitaria [10].

El estudio [11]. Se centró en el diseño y creación de un sistema de rastreo vehicular orientado a mejorar la supervisión y administración de flotas. La investigación abordó la arquitectura y los componentes clave necesarios para un seguimiento eficaz, resaltando el papel fundamental de la localización precisa y el monitoreo en tiempo

real para optimizar las operaciones. Aunque no se presentan métricas específicas sobre mejoras en tiempos de respuesta o costos, el trabajo destaca la viabilidad técnica y las ventajas operativas de estas soluciones, estableciendo una base sólida para desarrollos futuros en la gestión vehicular [11].

1.3 Fundamentación teórica

1.3.1 Sistemas Satelitales de Comunicaciones

La comunicación satelital emplea satélites artificiales para enviar y recibir señales de radiofrecuencia entre estaciones en tierra, permitiendo una cobertura global. Este sistema resulta especialmente útil en zonas con infraestructura terrestre limitada, ya que facilita la transmisión de datos, voz y vídeo. En esencia, los satélites funcionan como repetidores espaciales, captando señales desde una estación emisora y retransmitiendo las hacia otra estación receptora [12].

Los satélites se ubican en distintas órbitas alrededor del planeta, cada una con propiedades particulares que determinan su comportamiento y aplicaciones:

a. Órbita Terrestre Baja (LEO)

Las órbitas terrestres bajas (LEO, por sus siglas en inglés) se encuentran entre 160 y 2,000 km sobre la superficie terrestre. Debido a esta cercanía, los satélites en LEO completan una vuelta alrededor de la Tierra en aproximadamente 90 a 128 minutos, realizando entre 11 y 16 órbitas diarias. Esta baja altitud también contribuye a reducir significativamente la latencia en las comunicaciones, con tiempos de respuesta que oscilan entre 6 y 30 milisegundos, lo que las convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren transmisión en tiempo real, como videoconferencias y servicios de voz, como se aprecia en la Figura 1 [13].

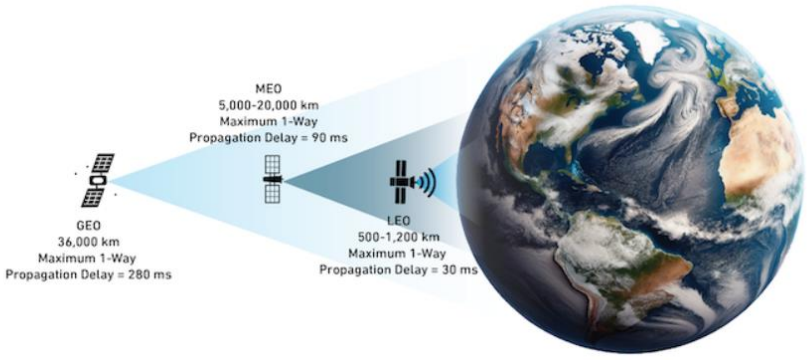


Figura 1 Comparación de retardos máximos de propagación unidireccional [13]

b. Órbita Terrestre Media (MEO)

Los satélites ubicados en la órbita terrestre media (MEO, por sus siglas en inglés) operan a altitudes comprendidas, en general, entre los 2,000 y los 35,786 kilómetros sobre la superficie terrestre. En el ámbito de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), la mayoría de estos satélites se sitúan en una banda orbital intermedia, usualmente entre los 18,000 y los 24,000 kilómetros. Un caso representativo es el sistema GPS, cuyos satélites orbitan a una altitud aproximada de 20,200 kilómetros, completando una vuelta alrededor del planeta en un periodo cercano a las 11 horas y 58 minutos [12].

A diferencia de los satélites en órbita baja (LEO), los satélites en órbita terrestre media (MEO) representan un equilibrio óptimo entre latencia y cobertura geográfica. Si bien presentan una mayor latencia en comparación con los satélites LEO, su mayor altitud les permite ofrecer una cobertura global más eficiente con un número reducido de unidades orbitales. Esta ventaja resulta especialmente significativa en los sistemas de posicionamiento global, ya que facilita la transmisión ininterrumpida de señales, garantizando una operación confiable tanto para funciones de navegación como de sincronización temporal [12].

c. Órbita Geoestacionaria (GEO)

Los satélites geoestacionarios (GEO) operan a una altitud aproximada de 35,786 kilómetros sobre el ecuador terrestre y mantienen un periodo orbital sincronizado con la rotación del planeta, completando una vuelta cada 24 horas. Esta característica

orbital les permite permanecer estacionarios respecto a un punto fijo en la superficie terrestre, lo que garantiza una cobertura continua y estable sobre amplias regiones. Gracias a esta capacidad, son fundamentales en aplicaciones como las telecomunicaciones, la meteorología y el monitoreo ambiental, ya que proporcionan observación constante y en tiempo real de zonas específicas. [12].

1.3.2 Leyes de Kepler

Las leyes de Kepler, desarrolladas por Johannes Kepler entre los años 1609 y 1619, representan un hito en la mecánica celeste al describir con precisión el movimiento de los cuerpos celestes alrededor del Sol. Estas formulaciones sustituyeron el antiguo paradigma geocéntrico y circular por un modelo heliocéntrico fundamentado en trayectorias elípticas, marcando un punto de inflexión en la evolución de la física y la astronomía. La primera de estas leyes, conocida como la ley de las órbitas, establece que los planetas describen órbitas elípticas en torno al Sol, el cual ocupa uno de los focos de la elipse. Esta caracterización matemática del movimiento orbital proporcionó una comprensión más rigurosa de la dinámica del sistema solar y allanó el camino para la posterior formulación de la ley de la gravitación universal por parte de Isaac Newton [15].

a. Primera ley de Kepler

La primera ley de Kepler, denominada ley de las órbitas, establece que los planetas se desplazan alrededor del Sol siguiendo trayectorias elípticas, con el Sol situado en uno de los focos de la elipse. Este hallazgo, formulado por Johannes Kepler en el siglo XVII, transformó radicalmente la concepción del movimiento planetario al sustituir la antigua noción de órbitas circulares por un modelo elíptico más preciso. La excentricidad de la elipse cuantifica el grado de alargamiento de la órbita, y en la mayoría de los planetas del sistema solar, este valor es relativamente bajo, lo que se traduce en órbitas casi circulares. Este principio constituye un pilar fundamental en la astronomía y la física, ya que permite describir con exactitud la dinámica orbital de los cuerpos celestes dentro del sistema solar [15].

Como se puede apreciar en la Figura 2 se explica sobre las leyes de Kepler

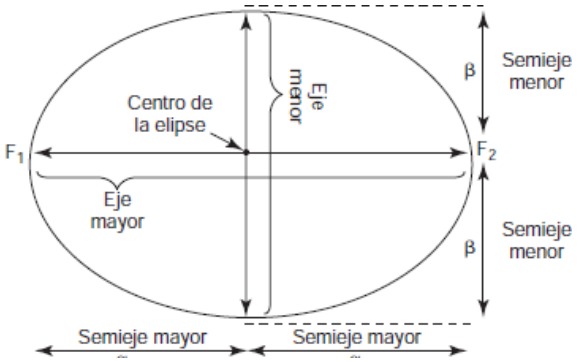


Figura 2. Primera ley de Kepler [15]

Para el semieje mayor (α) y el semieje menor (β) de la Figura 2, la excentricidad ∈ de la elipse se define como la ecuación (1):

$$\in = \frac{\sqrt{\boldsymbol{\alpha^2 - \beta^2}}}{\boldsymbol{\alpha}} \qquad (1)$$

b. Segunda ley de Kepler

La segunda ley de Kepler, conocida como la *ley de las áreas iguales*, establece que el radio vector que une un planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales a lo largo de su órbita. Esta ley implica que la velocidad orbital de un planeta varía: se incrementa conforme el planeta se aproxima al perihelio —el punto más cercano al Sol— y disminuye al acercarse al afelio, el punto más lejano. Este comportamiento es una manifestación directa del principio de conservación del momento angular en un sistema sin influencias externas. La velocidad areolar, entendida como el área barrida por unidad de tiempo, se mantiene constante a lo largo de toda la trayectoria orbital. Esta formulación fue clave en el desarrollo de la ley de la gravitación universal por parte de Newton, al proporcionar una base empírica sólida para la comprensión de las interacciones gravitatorias en el sistema solar, como se aprecia en la Figura 3 [14].

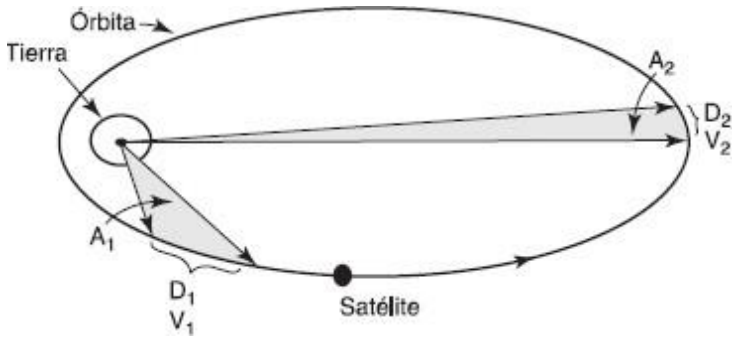


Figura 3 Segunda Ley de Kepler [13]

c. Tercera Ley de Kepler

La tercera ley de Kepler, conocida como la ley de los períodos, establece que el cuadrado del período orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita elíptica. Esta relación se expresa matemáticamente como $T^2 \propto a^3$, donde T representa el período orbital y a el semieje mayor. Esta ley implica que los cuerpos celestes ubicados a mayor distancia del Sol requieren más tiempo para completar una órbita. Por ejemplo, mientras Mercurio recorre su órbita en aproximadamente 88 días, Saturno necesita cerca de 10,759 días. Esta formulación fue esencial para que Isaac Newton desarrollara su ley de la gravitación universal, al evidenciar que la fuerza gravitatoria es el mecanismo subyacente que gobierna las trayectorias orbitales de los planetas, como se aprecia en la ecuación 2 [14].

$$\boldsymbol{\alpha = AP^{\frac{2}{3}}} \qquad \textbf{(2)}$$

Donde:

A = Es la constante en kilómetros (Km)

α = Es el semieje mayor, también en (Km)

P = Son los días solares medios en la Tierra

1.3.3 Sistemas de un satélite

Un satélite está constituido por una serie de subsistemas especializados que operan de manera integrada para asegurar su funcionamiento óptimo en el entorno espacial. A

continuación, se describen los principales subsistemas que conforman su arquitectura operativa.

a. Subsistema de potencia

Este subsistema se encarga de la generación, almacenamiento y distribución de la energía eléctrica requerida para el funcionamiento del satélite. La fuente principal de energía proviene de paneles solares equipados con células fotovoltaicas, las cuales convierten la radiación solar en electricidad. En situaciones en las que el satélite no recibe luz solar —como durante los eclipses o la fase de lanzamiento—, se recurre a baterías recargables, típicamente de níquel-hidrógeno, reconocidas por su elevada durabilidad y su capacidad para soportar múltiples ciclos de carga y descarga sin pérdida significativa de rendimiento [16].

b. Subsistema de Propulsión

El subsistema de propulsión tiene como función principal permitir al satélite ejecutar maniobras orbitales, mantener su posición y orientación espacial, así como corregir desviaciones en su trayectoria prevista. En misiones que requieren cambios sustanciales de órbita o un control de actitud preciso, se emplean comúnmente sistemas bipropelentes, los cuales utilizan por separado un combustible y un oxidante. Estos sistemas proporcionan una mayor eficiencia y capacidad de maniobra en comparación con los sistemas monopropelentes, resultando fundamentales en operaciones que exigen un alto rendimiento propulsivo [17].

c. Subsistema de Telemetría y Comando (TT&C):

Este subsistema resulta fundamental para establecer y mantener la comunicación bidireccional entre el satélite y las estaciones terrestres. A través del sistema de telemetría, se monitorean en tiempo real diversos parámetros operativos del satélite, tales como temperatura, niveles de voltaje, posición y estado de los subsistemas. Por su parte, el sistema de comando permite la recepción de instrucciones desde Tierra, posibilitando el control remoto de funciones como la reorientación del satélite o la activación de instrumentos a bordo. Las transmisiones se realizan generalmente en bandas de frecuencia designadas, como la banda C (5.9–6.5 GHz), que ofrece un

balance adecuado entre capacidad de transmisión de datos y resistencia a interferencias electromagnéticas [18].

d. Subsistema de Comunicaciones:

El subsistema de comunicaciones de un satélite desempeña un papel esencial en el establecimiento y mantenimiento de enlaces de datos tanto con estaciones terrestres como, en el caso de misiones en constelación, entre satélites. Este subsistema está compuesto por elementos clave como antenas, transpondedores y equipos electrónicos encargados de la modulación y demodulación de las señales. Si bien las comunicaciones por radiofrecuencia continúan siendo el estándar predominante, se están incorporando tecnologías de comunicación óptica con el objetivo de incrementar la velocidad y la capacidad de transmisión. Estas tecnologías emergentes ofrecen ventajas significativas, como un mayor ancho de banda y una menor vulnerabilidad a interferencias electromagnéticas; sin embargo, también plantean desafíos técnicos importantes, especialmente en lo que respecta a la alineación precisa y a la atenuación causada por la atmósfera terrestre [19].

1.3.4 Bandas de frecuencia

Las bandas de frecuencia empleadas en las comunicaciones satelitales corresponden a segmentos específicos del espectro electromagnético asignados para la transmisión y recepción de señales entre satélites y estaciones terrestres. Entre las más utilizadas se encuentran las bandas de 6/4 GHz y 14/12 GHz, donde el primer valor indica la frecuencia del enlace ascendente (de la estación terrestre al satélite) y el segundo, la del enlace descendente (del satélite a la estación terrestre). Esta separación de frecuencias es crucial para evitar interferencias entre los canales de subida y bajada. A medida que se incrementa la frecuencia, el tamaño requerido de las antenas para alcanzar una ganancia determinada disminuye, lo que tiene un impacto directo en el diseño y los costos de las estaciones terrestres. Las bandas de 6/4 GHz (banda C) y de 14/12 GHz (banda Ku) son ampliamente empleadas por su buen compromiso entre capacidad de transmisión y resistencia a las perturbaciones atmosféricas. Su asignación y regulación están a cargo de organismos internacionales, como la Unión

Internacional de Telecomunicaciones (UIT), con el fin de garantizar su uso eficiente y evitar interferencias entre sistemas, como se aprecia en la Figura 4 [18].

	Frecuencias de la banda (GHz)			
Banda	Enlace de subida	Enlace cruzado	Enlace de bajada	Ancho de banda (MHz)
C	5.9–6.4		3.7–4.2	500
X	7.9–8.4		7.25–7.75	500
Ku	14–14.5		11.7–12.2	500
Ka	27–30		17–20	—
	30–31		20–21	—
Q	—		40–41	1000
	—		41–43	2000
V	50–51		—	1000
(ISL)		54–58		3900
		59–64		5000

Figura 4 Bandas de Frecuencia [13]

1.4 Sistemas de navegación

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) funciona mediante una constelación de satélites que emiten señales altamente precisas de tiempo y posición. Los receptores ubicados en la superficie terrestre determinan su ubicación analizando el tiempo que tardan en recibir las señales de al menos cuatro satélites, utilizando la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas para calcular distancias mediante el método de trilateración. Para lograr una alta precisión, se aplican correcciones que compensan efectos como la dilatación temporal relativista, la refracción atmosférica y las discrepancias en los relojes de los satélites y receptores. Estas correcciones se gestionan mediante algoritmos avanzados y estaciones de control en tierra. Entre los principales sistemas GNSS se encuentran el GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia) y Galileo (Unión Europea), capaces de ofrecer precisiones que varían desde algunos metros hasta el rango centimétrico. Estos sistemas resultan esenciales en aplicaciones como la geolocalización, la cartografía de alta resolución y la sincronización precisa de redes y sistemas tecnológicos, como se aprecia en la Figura 5 [12].

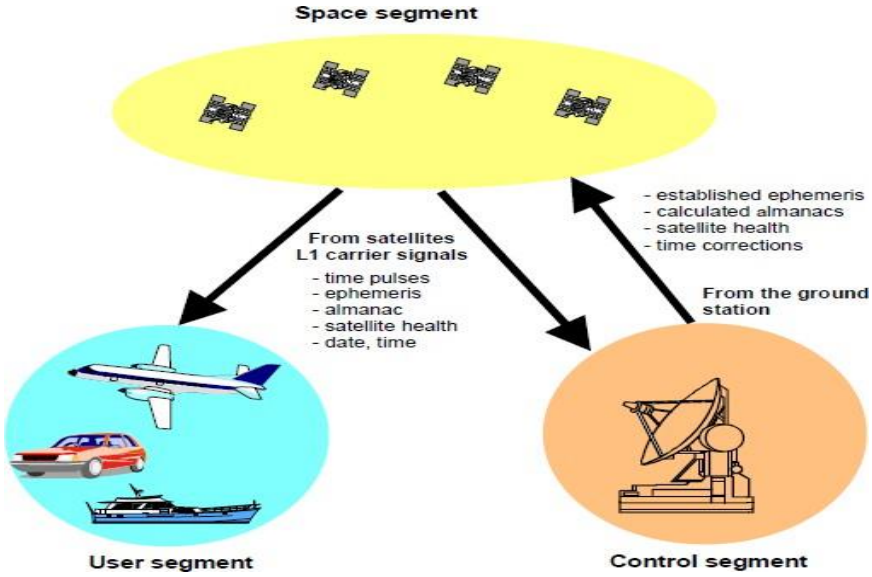


Figura 5 Sistema de navegación por Satélite [20]

1.4.1 GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una tecnología de radio navegación satelital que opera mediante una constelación de satélites en órbita terrestre, diseñada para proporcionar servicios de posicionamiento, navegación y sincronización temporal de alta precisión. Administrado por la Fuerza Espacial de los Estados Unidos, el sistema se estructura en tres segmentos fundamentales:

a. Segmento Espacial:

El segmento espacial está conformado por una constelación de al menos 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales, con cuatro satélites por plano, que orbitan a una altitud aproximada de 20,200 km sobre la superficie terrestre. Cada satélite emite señales en radiofrecuencia que incluyen datos sobre su posición orbital y un registro temporal altamente preciso [12].

b. Segmento de Control:

El segmento de control comprende una red global de estaciones terrestres encargadas de supervisar y gestionar el funcionamiento de los satélites. Estas estaciones monitorean continuamente las órbitas y el estado de los relojes atómicos a bordo,

enviando correcciones y actualizaciones para garantizar la precisión y estabilidad del sistema [12].

c. Segmento del Usuario:

El segmento del usuario está formado por receptores GPS que procesan las señales emitidas por al menos cuatro satélites con el fin de calcular su posición tridimensional —latitud, longitud y altitud— mediante un método denominado trilateración. Este proceso se basa en la medición del tiempo que tarda cada señal en llegar al receptor, lo que permite determinar la distancia a cada satélite y, en consecuencia, establecer con precisión la ubicación del usuario [12].

La precisión del sistema GPS puede optimizarse mediante el uso de sistemas de aumentación, como el Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS). Estos sistemas proporcionan correcciones adicionales en tiempo real, mejorando significativamente la exactitud y confiabilidad del posicionamiento. Son especialmente relevantes en aplicaciones críticas que exigen alta precisión, como la navegación aérea, la geodesia y otras operaciones técnicas especializadas [12].

El GPS desempeña un papel esencial en una amplia gama de aplicaciones, abarcando la navegación terrestre, marítima y aérea, así como la sincronización precisa de infraestructuras críticas, como redes de telecomunicaciones y sistemas eléctricos. Además, su integración es clave en tecnologías emergentes, tales como los vehículos autónomos, la agricultura de precisión y otros sistemas avanzados que dependen de información espacial en tiempo real, como se puede apreciar en la Figura 6 [13].

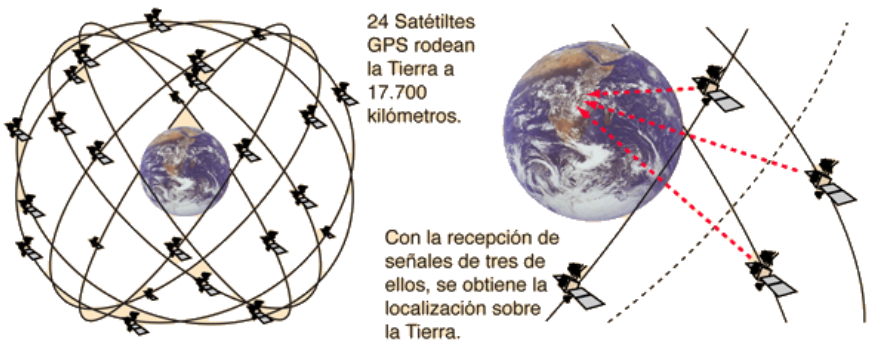


Figura 6 Sistema GPS [13]

1.4.2 Glonass

GLONASS (Sistema Global de Navegación por Satélite) es el sistema de navegación satelital desarrollado por la Federación Rusa como contraparte al GPS de Estados Unidos. Su arquitectura orbital está compuesta por una constelación de 24 satélites distribuidos en tres planos orbitales, con una inclinación de 64,8° y una altitud aproximada de 19.100 km. Cada satélite completa una revolución alrededor de la Tierra en aproximadamente 11 horas y 15 minutos, lo que garantiza una cobertura global continua y permite la observación simultánea de múltiples satélites desde prácticamente cualquier ubicación del planeta, tal como se muestra en la Figura 7 [21].

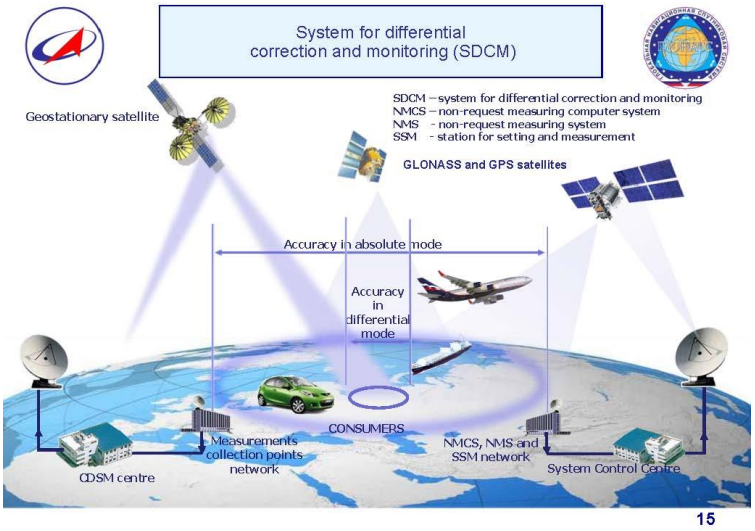


Figura 7 Sistema de navegación Glonass [21]

A diferencia del sistema GPS, que utiliza la técnica de acceso múltiple por división de código (CDMA), GLONASS implementa acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), asignando a cada satélite una frecuencia distinta para evitar interferencias en las señales. Esta estrategia permite que satélites ubicados en posiciones antipodales, es decir, en la misma órbita pero en ubicaciones opuestas, utilicen la misma frecuencia sin causar conflictos, ya que no son visibles simultáneamente desde un mismo punto en la superficie terrestre [21].

El sistema GLONASS ha experimentado una evolución progresiva a lo largo de distintas generaciones de satélites. La introducción de la serie GLONASS-M en 2003 representó un avance importante, al incrementar tanto la precisión del posicionamiento

como la vida útil de los satélites. Posteriormente, la serie GLONASS-K, lanzada por primera vez en 2011, incorporó mejoras sustanciales, entre las que destacan una mayor durabilidad operativa y la capacidad de emitir múltiples señales de navegación, ampliando su compatibilidad con otros sistemas GNSS y mejorando el rendimiento global del sistema, como se observa en la Figura 8 [21].

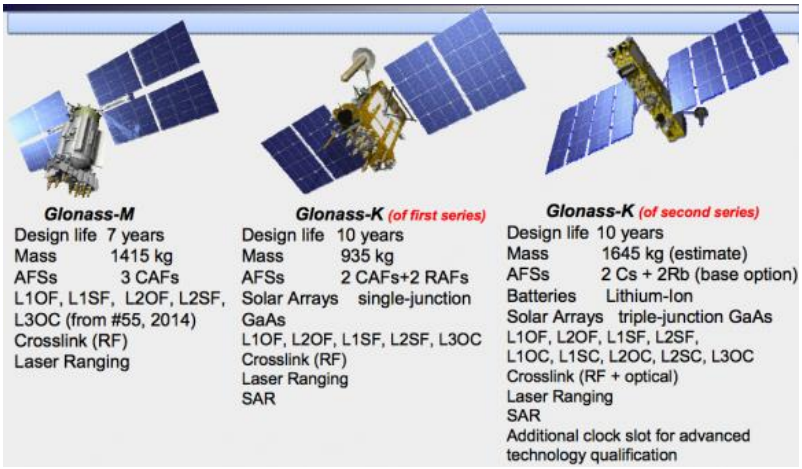


Figura 8 Satélites Glonass [22]

GLONASS desempeña un papel clave en múltiples aplicaciones, que abarcan la navegación terrestre, marítima y aérea, así como disciplinas técnicas como la geodesia, la cartografía y la sincronización de infraestructuras críticas. La integración de receptores multiconstelación, que combinan señales tanto de GLONASS como de GPS, permite mejorar significativamente la precisión y confiabilidad del posicionamiento, especialmente en entornos complejos como zonas urbanas densas o regiones de alta latitud, donde la visibilidad de satélites puede verse limitada [23].

1.4.3 Galileo

Galileo es el sistema global de navegación por satélite desarrollado por la Unión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), concebido como una alternativa civil y autónoma frente a sistemas como el GPS de Estados Unidos y el GLONASS de Rusia. Su constelación está integrada por 30 satélites distribuidos en tres planos orbitales a una altitud aproximada de 23.222 km y con una inclinación de 56°, lo que asegura una cobertura global constante. Cada satélite emite señales en varias bandas de frecuencia, permitiendo una precisión de posicionamiento de hasta

un metro para usuarios generales y hasta 20 centímetros mediante el Servicio de Alta Precisión (HAS). Galileo también incorpora el Servicio de Autenticación de Mensajes de Navegación Abiertos (OSNMA), que proporciona a los receptores la capacidad de verificar la integridad y autenticidad de las señales, reforzando la protección frente a interferencias o suplantaciones. Asimismo, el sistema colabora con la iniciativa internacional COSPAS-SARSAT, mejorando la respuesta ante emergencias al facilitar la detección y localización de señales de socorro. Con centros de control ubicados en Oberpfaffenhofen (Alemania) y Fucino (Italia), junto con una red global de estaciones en tierra, Galileo representa un hito en la navegación satelital, ofreciendo servicios avanzados con alta precisión y fiabilidad bajo supervisión civil europea, como se muestra en la Figura 9 [24][25][26].

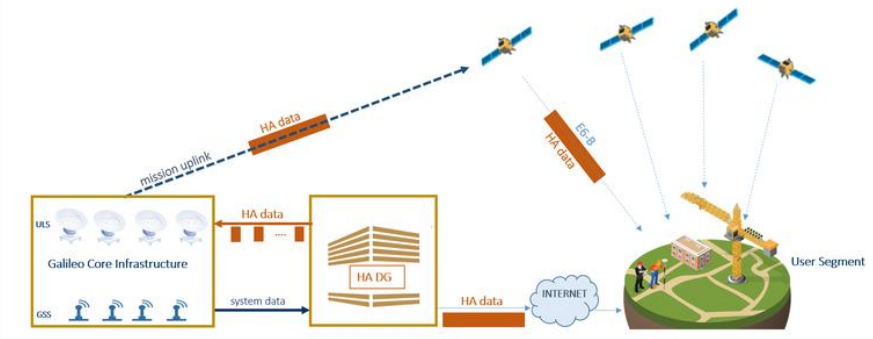
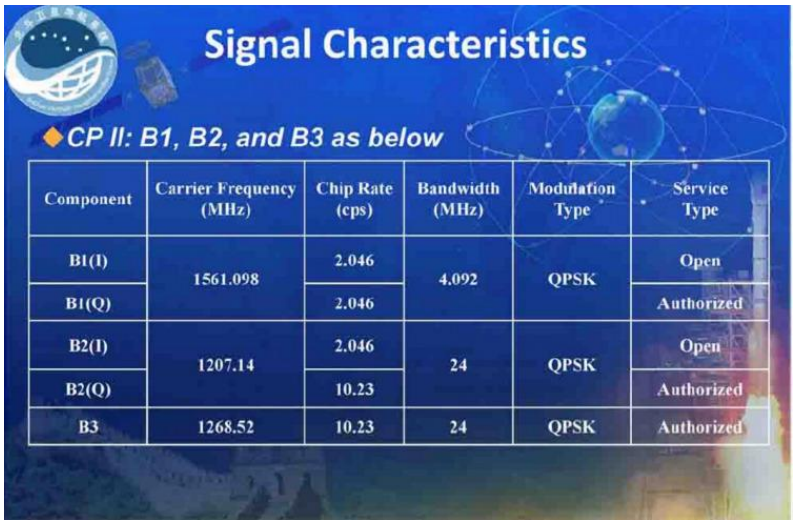


Figura 9 Sistema Galileo [27]

1.4.4 BeiDou

BeiDou (BDS) es el sistema de navegación por satélite desarrollado y gestionado por la República Popular China, diseñado para proporcionar servicios globales de posicionamiento, navegación y sincronización temporal. Su despliegue se realizó en tres etapas: BDS-1 con cobertura regional, BDS-2 con alcance extendido en Asia-Pacífico, y BDS-3, completado en 2020, que garantiza cobertura global y capacidades mejoradas. La arquitectura de BeiDou combina satélites en órbitas geosíncronas (GEO), inclinadas geosíncronas (IGSO) y medias (MEO), lo que permite una cobertura constante y precisa a nivel mundial. El sistema emite señales en múltiples bandas de frecuencia —como B1I, B1C, B2a, B2b y B3I—, ofreciendo tanto servicios

abiertos para uso civil como servicios restringidos orientados a aplicaciones estratégicas y de alta seguridad, como se puede apreciar en la Figura 10 [28].



Component	Carrier Frequency (MHz)	Chip Rate (cps)	Bandwidth (MHz)	Modulation Type	Service Type
B1(I)	1561.098	2.046	4.092	QPSK	Open
B1(Q)		2.046			Authorized
B2(I)	1207.14	2.046	24	QPSK	Open
B2(Q)		10.23			Authorized
B3	1268.52	10.23	24	QPSK	Authorized

Figura 10 Especificaciones de Satélites BeiDou [28]

En cuanto a rendimiento, el sistema BeiDou ofrece una precisión horizontal inferior a los 2 metros y una exactitud temporal dentro de los 50 nanosegundos, situándose a la par de otros sistemas GNSS líderes como GPS, GLONASS y Galileo. China continúa fortaleciendo su infraestructura satelital mediante inversiones sostenidas en investigación y desarrollo, con planes para iniciar las pruebas de una nueva generación de satélites BeiDou en 2027 y completar su despliegue hacia 2035. Esta evolución busca proporcionar servicios de navegación aún más precisos, estables y confiables en tiempo real, consolidando la posición de BeiDou como un componente clave en el ecosistema global de navegación por satélite., tal como se muestra en la Figura 11 [29].



Figura 11 Sistema BeiDou [28]

1.5 Aplicaciones del GNSS en el Rastreo Vehicular

El origen del rastreo vehicular mediante sistemas GNSS se remonta al contexto de la Guerra Fría, durante la cual Estados Unidos desarrolló el sistema GPS con propósitos estratégicos y militares. En 1983, tras el derribo del vuelo 007 de Korean Air, el gobierno estadounidense autorizó su uso en aplicaciones civiles, aunque inicialmente bajo una política de "disponibilidad selectiva" que degradaba intencionadamente la precisión. Esta limitación fue levantada en el año 2000, lo que permitió una mejora sustancial en la exactitud del posicionamiento para usuarios no militares. A partir de ese momento, la tecnología GPS fue progresivamente incorporada en dispositivos móviles y sistemas automotrices, impulsando el avance y la masificación de soluciones de rastreo vehicular con mayor precisión y asequibilidad, como se ve en la Figura 12 [30].

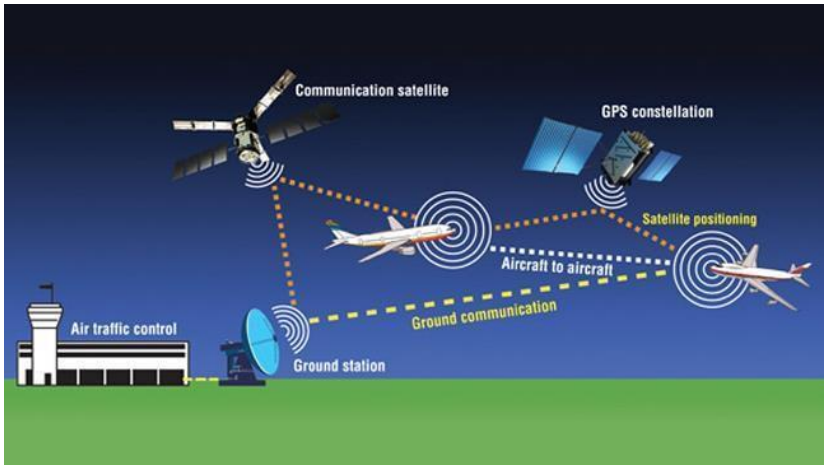


Figura 12 Uso del GPS en vuelos comerciales [20]

1.5.1 Evolución del del rastreo vehicular con GNSS

La incorporación de múltiples constelaciones GNSS, como GLONASS, Galileo y BeiDou, ha fortalecido significativamente la cobertura global y la precisión del posicionamiento en aplicaciones de rastreo vehicular. Esta mejora se ha potenciado con la integración de tecnologías de comunicación como GSM, GPRS y LTE, que

posibilitan la transmisión continua y en tiempo real de datos de localización. Asimismo, la convergencia con sistemas inteligentes basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático está impulsando el desarrollo de soluciones de gestión vehicular más eficientes, adaptativas y autónomas, marcando el camino hacia una nueva generación de sistemas de rastreo avanzados [31].

La evolución del rastreo vehicular basado en sistemas GNSS ha sido posible gracias a los constantes avances tecnológicos que han optimizado su precisión, funcionalidad y capacidad de adaptación. En sus primeras etapas, la incorporación de múltiples constelaciones GNSS permitió consolidar una cobertura global más fiable y mejorar significativamente la exactitud en la determinación de la ubicación de los vehículos. Paralelamente, la integración con tecnologías de comunicación como GSM, GPRS y LTE posibilitó la transmisión continua de datos en tiempo real, lo que representó un salto cualitativo en la eficiencia operativa de los sistemas de gestión de flotas [31].

En una etapa más reciente, la integración de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático ha convertido el rastreo vehicular en una herramienta estratégica para mejorar la seguridad y optimizar la eficiencia del transporte. Estas tecnologías permiten el procesamiento avanzado de los grandes volúmenes de datos generados por los sistemas GNSS, facilitando la identificación de patrones de comportamiento en la conducción, la optimización dinámica de rutas y la detección proactiva de anomalías que podrían señalar riesgos potenciales o deficiencias operativas [31][32][9].

El avance hacia sistemas más inteligentes y autónomos ha sido impulsado por la incorporación de sensores complementarios y algoritmos sofisticados que incrementan la capacidad de adaptación en entornos desafiantes. Un ejemplo de ello es la fusión de datos provenientes de sensores inerciales con señales GNSS, lo que mejora significativamente la precisión del posicionamiento en zonas urbanas densas o túneles, donde la recepción satelital puede verse limitada o interrumpida, como se aprecia en la Figura 13 [33].

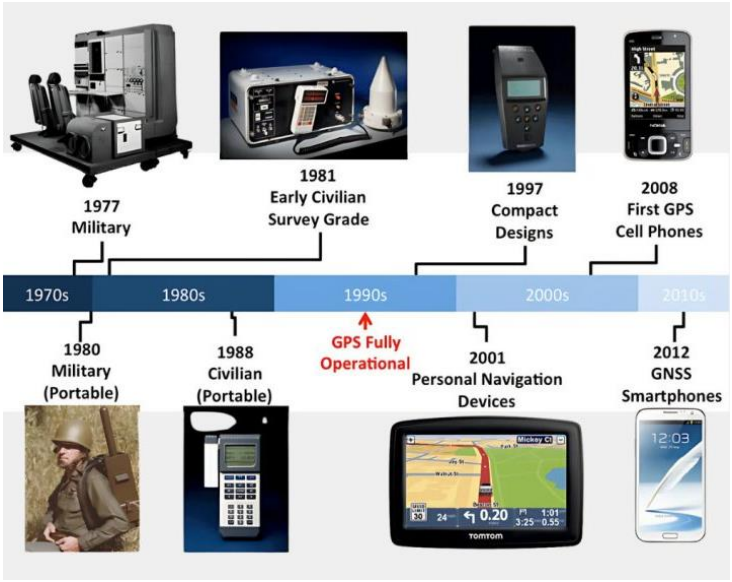


Figura 13 Evolución de Sistemas GNSS [33]

1.5.2 Precisión del GNSS

La exactitud de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) resulta esencial en ámbitos como el rastreo de vehículos, la topografía y la agricultura de precisión. Su desempeño depende de múltiples factores y de tecnologías complementarias que permiten incrementar la precisión del posicionamiento [34].

a. Factores que afectan la precisión del GNSS

El rendimiento de los sistemas GNSS puede verse influenciado por múltiples variables, como las perturbaciones atmosféricas, el efecto multitrayecto, la disposición geométrica de los satélites y las imprecisiones en los relojes. A continuación, se describen estos factores en detalle:

a. Errores atmosféricos:

- ***Ionosfera:***

Ubicada entre los 80 y 1.000 km de altitud, la ionosfera contiene partículas cargadas que pueden modificar la velocidad de propagación de las señales GNSS. Al ser un medio dispersivo, su índice de refracción varía según la frecuencia, lo que puede causar demoras o adelantos en las señales, afectando la precisión del posicionamiento.

No obstante, este efecto puede corregirse mediante el uso de señales en dos frecuencias distintas (como L1 y L2), aplicando combinaciones lineales que compensan el error ionosférico [21].

- ***Troposfera:***

La troposfera, que se extiende desde la superficie terrestre hasta unos 80 a 100 km de altitud, es un medio no dispersivo, por lo que afecta de manera uniforme a todas las frecuencias GNSS. Los retrasos introducidos por esta capa pueden promediar 2,5 metros en dirección cenital y aumentar hasta 25–30 metros en ángulos bajos de elevación. Para mitigar estos efectos, se aplican modelos de corrección troposférica como los propuestos por Hopfield o Saastamoinen [21].

- ***Efecto Multitrayecto***

El fenómeno de multitrayectoria se produce cuando las señales GNSS alcanzan el receptor tras reflejarse en superficies como edificaciones, cuerpos de agua o el terreno. Estas señales indirectas pueden interferir con las señales directas, generando errores en la estimación de distancias y afectando la precisión del posicionamiento. Este problema es particularmente relevante en entornos urbanos densamente edificados o con abundantes superficies reflectantes [21].

- ***Geometría de los Satélites***

La configuración espacial de los satélites, denominada geometría satelital, afecta directamente la exactitud del posicionamiento GNSS. Una distribución no óptima —como cuando los satélites se concentran en una zona reducida del cielo o presentan ángulos bajos de elevación— puede incrementar los errores en la estimación de la ubicación. Este impacto se evalúa mediante el Dilution of Precision (DOP), donde valores menores reflejan una geometría más favorable y, en consecuencia, una mayor precisión [21].

- ***Errores de Reloj***

Los errores de sincronización entre los relojes de los satélites y los receptores GNSS pueden generar desviaciones importantes en el posicionamiento, ya que este se basa

en la medición exacta del tiempo de propagación de la señal. Para reducir este tipo de errores, los sistemas GNSS incorporan relojes atómicos de alta precisión a bordo de los satélites y aplican correcciones temporales a partir de datos proporcionados por estaciones terrestres de control [21].

1.5.3 Beneficios del GNSS

Los sistemas GNSS proporcionan una amplia gama de ventajas aplicables a distintas áreas técnicas y científicas. A continuación, se describen algunos de sus beneficios más relevantes:

a. Precisión y fiabilidad en el posicionamiento:

Los sistemas GNSS facilitan la obtención precisa de coordenadas geográficas, lo cual es fundamental en campos como la topografía, la geodesia y la ingeniería civil. Mediante métodos avanzados como el posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK), es posible alcanzar niveles de precisión centimétrica, lo que resulta clave para minimizar errores y optimizar la ejecución de proyectos de cartografía y obras civiles [21].

b. Cobertura global y disponibilidad constante

En contraste con las técnicas tradicionales de medición, los sistemas GNSS ofrecen datos en tiempo real con cobertura global, eliminando la necesidad de puntos de referencia físicos. Esta capacidad permite llevar a cabo mediciones geoespaciales en cualquier ubicación del planeta, optimizando tanto los recursos como el tiempo invertido en el proceso [35].

c. Aplicaciones en múltiples sectores económicos

Los dispositivos GNSS encuentran aplicación en múltiples sectores, como el automotriz, ferroviario, aeronáutico, agrícola y de la construcción. En particular, en la agricultura de precisión, estos equipos facilitan una gestión optimizada de los cultivos, permitiendo un monitoreo y control detallado de las operaciones agrícolas para maximizar la productividad y eficiencia [35].

d. Integración con tecnologías avanzadas

Los sistemas GNSS pueden complementarse con otras tecnologías, como los sistemas de información geográfica (GIS) y la fotogrametría aérea, lo que amplía significativamente su rango de aplicaciones y funcionalidad. Esta integración resulta especialmente valiosa para la adquisición y el procesamiento eficiente de datos geoespaciales en múltiples sectores industriales [36].

e. Mejora en la eficiencia y reducción de costos

Al ofrecer mediciones precisas y rápidas, los dispositivos GNSS incrementan la productividad y disminuyen los tiempos de ejecución en proyectos de ingeniería y construcción, lo que se traduce en una optimización de los costos y una mejora significativa en la calidad de los resultados finales [36].

1.5.4 Limitaciones del GNSS

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) enfrentan varias limitaciones técnicas que impactan su precisión y confiabilidad. Estas restricciones resultan especialmente relevantes en aplicaciones que demandan alta exactitud y disponibilidad constante, tales como la navegación autónoma, la geodesia y la gestión eficiente de flotas. A continuación, se presentan las principales limitaciones:

a. Vulnerabilidad a interferencias y ataques

Debido a su baja potencia, las señales GNSS son particularmente vulnerables a interferencias electromagnéticas, tanto de origen natural como artificial. Amenazas como el *jamming* (interferencia intencional) y el *spoofing* (falsificación de señales) pueden distorsionar o manipular los datos de posicionamiento, afectando seriamente la precisión y confiabilidad del sistema. Este tipo de ataques representa un riesgo considerable para aplicaciones críticas como la navegación marítima y la aviación [37].

b. Limitaciones en entornos urbanos y subterráneos

En entornos urbanos densamente edificados, las estructuras altas pueden obstruir o reflejar las señales GNSS, generando errores en la ubicación debido al fenómeno del multitrayecto. Asimismo, en espacios subterráneos o interiores, la recepción de señales satelitales es prácticamente inexistente, lo que restringe significativamente la eficacia del GNSS en este tipo de escenarios [9].

c. Errores atmosféricos y geométricos

Las condiciones atmosféricas, en particular las variaciones en la ionosfera y la troposfera, pueden generar demoras en la propagación de las señales GNSS, lo que repercute negativamente en la precisión del posicionamiento. Además, la geometría satelital —es decir, la disposición relativa de los satélites en el firmamento— también influye en la exactitud del cálculo de ubicación; una configuración desfavorable puede incrementar considerablemente el margen de error [21].

d. Dependencia de la infraestructura satelital

El desempeño del sistema GNSS está estrechamente ligado a la disponibilidad y al correcto funcionamiento de sus constelaciones satelitales. Fallos en los satélites, imprecisiones en las efemérides o deficiencias en el segmento de control terrestre pueden comprometer la precisión del posicionamiento e incluso provocar interrupciones en el servicio [38].

e. Limitaciones en la precisión de receptores de bajo costo

Los receptores GNSS de bajo costo, como los incorporados en dispositivos móviles, tienden a ofrecer una menor precisión y presentan una mayor vulnerabilidad frente a errores e interferencias. Esta limitación reduce su idoneidad para aplicaciones que exigen alta exactitud, como la topografía de precisión o los sistemas de navegación autónoma [21].

1.6 Componentes del sistema de rastreo

El prototipo desarrollado para el rastreo vehicular se basa en componentes de bajo costo y una arquitectura abierta. Esta elección favorece un diseño modular, flexible y accesible, ideal para instituciones que buscan implementar soluciones tecnológicas eficientes sin depender de plataformas comerciales propietarias. A continuación, se detallan los elementos clave que integran el sistema.

1.6.1 Microcontrolador Arduino 1

El Arduino Uno es una plataforma de desarrollo ampliamente utilizada en proyectos de automatización y electrónica, basada en el microcontrolador ATmega328P. Dispone de 14 pines digitales de entrada/salida —6 de ellos compatibles con salidas PWM—, 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, puerto USB, conector de alimentación, encabezado ICSP y un botón de reinicio [39].

Su función principal dentro del sistema es gestionar la lectura de datos provenientes del módulo GPS y supervisar la transmisión de información al módulo SIM808 a través de comunicación serial. Se distingue por su facilidad de programación, extensa documentación disponible y alta compatibilidad con una amplia variedad de sensores y módulos externos, como se muestra en la Figura 14 y la Tabla 1 [40].



Figura 14 Arduino 1 R3 [40]

Tabla 1 Características del Arduino 1 R3 [40]

Parámetro	Especificación
Microcontrolador	ATmega328P
Frecuencia de reloj	16 MHz
Memoria Flash	32 KB (0.5 KB usados por bootloader)
Pines digitales	14 (6 con PWM)
Entradas analógicas	6
Voltaje de operación	Voltaje de operación 5 V
Corriente Recomendada	Corriente recomendada 50 mA
Comunicación serial	Comunicación serial UART, SPI, I2C
Dimensiones	Dimensiones 68.6 mm × 53.4 mm

1.6.2 Módulo SIM808 (GSM/GPRS + GPS)

El SIM808 es un módulo de comunicación multifuncional que combina capacidades GSM/GPRS y GPS en un solo dispositivo. Permite la transmisión de datos a través de redes móviles mediante GPRS, adquisición de coordenadas de ubicación utilizando señales satelitales GPS [41].

En este proyecto se empleó el modelo SIM808 EVB v3.2.4, el cual se comunica con el Arduino Uno a través de una interfaz UART utilizando comandos AT, como se detalla en la Tabla 2 Para la conectividad móvil, se optó por una tarjeta SIM de la operadora Claro, debido a su amplia cobertura en Ecuador, especialmente en áreas rurales, lo que garantiza una transmisión de datos estable y confiable [41].

Proporciona el envío de datos a través del protocolo HTTP, la obtención de información de posicionamiento por GPS y parámetros como la velocidad y la altitud. Su versatilidad lo posiciona como un elemento fundamental en sistemas de rastreo vehicular de bajo costo, como se puede apreciar en la Tabla 2 y Figura 15.

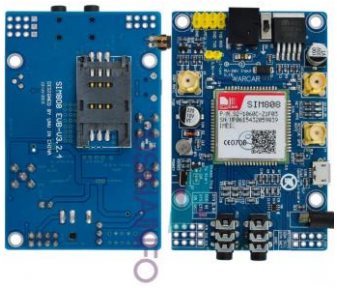


Figura 15 Módulo GPS/GSM SIM 808 EVB-V3.2.4 [41]

Tabla 2 características del SIM 808 EVB-V3.2.4 [41]

Parámetro	Característica
Tecnología celular	GSM/GPRS (2G)
Módulo GPS integrado	Sí (receptor GPS independiente)
Bandas de operación	850/900/1800/1900 MHz
Voltaje de operación	5 V
Corriente pico	Hasta 500 mA
Interfaces de comunicación	UART (comandos AT para GPS y GSM)
Conectores	SMA para antenas GPS y GSM
Antenas incluidas	Sí (GPS activa y GSM pasiva)
Dimensiones	76 mm × 45 mm

1.6.3 Módulo GPS NEO-6M

El NEO-6M, desarrollado por u-blox, es un receptor GPS compacto y de alto rendimiento, como se muestra en la Figura 16. Permite obtener datos precisos de latitud, longitud, altitud y velocidad. Incorpora una antena cerámica integrada y una batería de respaldo que conserva la configuración incluso tras cortes de energía. Su comunicación con el microcontrolador Arduino se realiza a través de una interfaz serial (UART) configurada a 9600 baudios. Ofrece una precisión horizontal cercana a 2.5 metros CEP (circular error probable) y puede actualizar la información de posicionamiento con una frecuencia de hasta 5 Hz [42].

Gracias a su bajo consumo energético, buena precisión y compatibilidad con plataformas de arquitectura abierta, este módulo resulta especialmente adecuado para aplicaciones móviles, como se muestra en la Tabla 3.



Figura 16 Módulo GPS Ublox Neo-6m [42]

Tabla 3 Características del módulo GPS Neo-6m [42]

Parámetro	Especificación
Chip GPS	Ublox NEO-6M
Frecuencia de actualización	1 Hz (configurable hasta 5 Hz)
Precisión de posicionamiento	2.5 m CEP (circular error probable)
Voltaje de alimentación	3.3 V – 5 V
Interfaz de comunicación	UART (9600 bps por defecto)
Dimensiones	25 mm × 35 mm
Antena integrada	Cerámica
Batería de respaldo	Incluida

1.6.4 Power Bank como fuente de alimentación

Para proporcionar autonomía operativa en campo, se utilizó una batería externa tipo *power bank* de 20,000 mAh con una salida de 5V/4.2A, como se muestra en la Figura 17. Esta fuente de alimentación permite mantener en funcionamiento continuo al Arduino, el módulo SIM808 y el receptor GPS durante varias horas. Además, se incorporó un regulador de voltaje personalizado montado en una PCB, diseñado específicamente para estabilizar la corriente y proteger los componentes ante posibles sobrecargas. Esta solución portátil fue seleccionada por su disponibilidad comercial, facilidad de recarga y compatibilidad con los requerimientos energéticos del sistema [43].

La batería externa Tzumi Pocket Juice de 20,000 mAh representa una fuente de alimentación portátil robusta y confiable, ideal para operaciones prolongadas en campo. Equipada con dos salidas USB que proporcionan una capacidad total de hasta 3.4 A, permite alimentar simultáneamente el microcontrolador, el módulo SIM808 y el GPS NEO-6M sin comprometer la estabilidad del sistema, como se detalla en la Tabla 4. Su diseño compacto y resistente la hace especialmente adecuada para aplicaciones móviles, mientras que la tecnología QuickChip integrada brinda protección contra sobrecalentamiento y sobrecargas, salvaguardando la integridad de los componentes. Gracias a su alta capacidad energética, el sistema de rastreo puede operar de manera continua por más de 80 horas, lo que la convierte en una opción eficaz para proyectos de monitoreo vehicular en tiempo real, como se aprecia en la Figura 17 y Tabla 4 [43].



Figura 17 Batería externa [43]

Tabla 4 Tabla de características de la batería externa [43]

Característica	Valor / Descripción
Marca / Modelo	Tzumi Pocket Juice 20,000 mAh
Capacidad nominal	20,000 mAh
Salida	2 puertos USB con salida combinada de 5V / 3.4 A
Compatibilidad	Dispositivos USB (smartphones, tablets, Arduino, etc.)
Tamaño	6.0” x 2.6” x 1.0” pulgadas
Peso	1.2 lb (≈ 544 g)
Tiempo de recarga completa	Aproximadamente 8 a 10 horas (dependiendo del cargador utilizado)
Seguridad	Tecnología QuickChip (protección contra sobrecalentamiento y sobrecarga)
Certificación	Certificación UL (Underwriters Laboratories)
Conectividad incluida	Cable micro-USB incluido; cable Lightning no incluido
Observaciones adicionales	Viene precargada y lista para su uso inmediato; carcasa resistente y portátil

1.7 Telefonía Móvil

La telefonía móvil es un sistema de comunicación inalámbrica que permite la transmisión de voz y datos a través de una red de estaciones base distribuidas geográficamente. Esta infraestructura divide el territorio en celdas, cada una atendida por una antena que enlaza los dispositivos móviles con la red central. Con la evolución

de tecnologías como GSM, UMTS, LTE y 5G, se han logrado mejoras significativas en capacidad, velocidad de transmisión y eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico. Esto ha permitido habilitar servicios como llamadas en alta definición, acceso a internet, videoconferencias y aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT). La progresiva evolución de la telefonía móvil ha sido clave para impulsar la conectividad global y el desarrollo de sistemas de comunicación inteligentes [44].

1.7.1 Primera generación

La primera generación de telefonía móvil, denominada 1G, representó el punto de partida de las comunicaciones móviles contemporáneas. Lanzada comercialmente en 1979 por Nippon Telegraph and Telephone (NTT) en Japón, esta tecnología empleaba sistemas analógicos para la transmisión de voz y no ofrecía soporte para el intercambio de datos [45].

Los sistemas de primera generación (1G) operaban en bandas de frecuencia comprendidas entre 800 y 900 MHz, utilizando modulación en frecuencia (FM) y acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA). Esta configuración permitía asignar canales de 30 kHz por llamada, alcanzando una capacidad total de hasta 832 canales dúplex en ciertos sistemas, como el AMPS (Advanced Mobile Phone System) [45], [46].

Aunque representó un avance trascendental en las comunicaciones inalámbricas, la tecnología 1G presentaba limitaciones notables. Entre sus principales desventajas se encontraban la baja calidad de audio, la escasa seguridad en las comunicaciones, debido a la ausencia de cifrado, y una limitada capacidad de red que restringía el número de usuarios concurrentes, a continuación se detallan las más importantes [44]:

a. Calidad de voz:

Aunque representó un avance trascendental en las comunicaciones inalámbricas, la tecnología 1G presentaba limitaciones notables. Entre sus principales desventajas se encontraban la baja calidad de audio, la alta susceptibilidad a interferencias y ruido, la escasa seguridad en las comunicaciones ,debido a la ausencia de cifrado, y una limitada capacidad de red que restringía el número de usuarios concurrentes [44].

b. Seguridad:

Aunque representó un avance trascendental en las comunicaciones inalámbricas, la tecnología 1G presentaba limitaciones notables. Entre sus principales desventajas se incluían la baja calidad de audio, la alta susceptibilidad a interferencias y ruido, y la falta de mecanismos de cifrado, lo que hacía posible la interceptación de las comunicaciones. Además, su capacidad de red era limitada, restringiendo el número de usuarios que podían acceder simultáneamente al servicio [44].

c. Roaming:

Aunque representó un avance trascendental en las comunicaciones inalámbricas, la tecnología 1G presentaba limitaciones notables. Entre sus principales desventajas se incluían la baja calidad de audio, la alta susceptibilidad a interferencias y ruido, y la ausencia de cifrado, lo que permitía la interceptación de las comunicaciones. Además, su capacidad de red era limitada, restringiendo el número de usuarios concurrentes, y la falta de estándares globales dificultaba la interoperabilidad entre redes, limitando la cobertura y la compatibilidad internacional [44].

d. Capacidad limitada:

La capacidad para manejar llamadas simultáneas era limitada, lo que restringía significativamente el número de usuarios que podían acceder al servicio de forma concurrente [44].

e. Tamaño y autonomía de los dispositivos:

Los dispositivos móviles de esta generación eran de gran tamaño y contaban con baterías de autonomía reducida, lo que limitaba su portabilidad y tiempo de uso continuo [44].

1.7.2 Segunda Generación

La segunda generación de telefonía móvil, denominada 2G, representó un cambio crucial al introducir tecnologías digitales en reemplazo de los sistemas analógicos. Implementada durante la década de 1990, esta evolución permitió mejoras

significativas en la calidad de las comunicaciones, la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico y la capacidad de las redes. Además, habilitó nuevos servicios como la mensajería de texto (SMS) y la transmisión de datos, gracias a la incorporación de técnicas avanzadas de modulación y multiplexación [44].

Los sistemas 2G se construyeron sobre protocolos digitales desarrollados de forma independiente en distintas regiones, lo que dio lugar a una variedad de estándares no compatibles entre sí. Entre los más representativos se encuentran:

a. GSM (Global System for Mobile Communications):

Utiliza acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) junto con modulación GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Opera principalmente en las bandas de 900 y 1800 MHz, donde cada canal de 200 kHz se divide en ocho intervalos de tiempo, permitiendo una tasa de transmisión de 33.8 kbps por ranura. Para la transmisión de datos, tecnologías complementarias como GPRS permiten velocidades de hasta 114 kbps, mientras que EDGE incrementa esta capacidad hasta un máximo de 384 kbps [33].

b. IS-95 (cdmaOne):

Basado en la técnica de acceso múltiple por división de código (CDMA), este estándar emplea modulación BPSK y QPSK. Opera en canales de 1.25 MHz de ancho de banda, permitiendo velocidades de transmisión de datos de hasta 28.8 kbps por usuario. Para la compresión de voz, utiliza el códec VSELP (Vector Sum Excited Linear Prediction) a una tasa de 8 kbps [33].

c. D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System):

Como una evolución digital del sistema AMPS, este estándar implementa acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y utiliza modulación π/4-DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying). Cada canal de 30 kHz se segmenta en tres intervalos de tiempo, lo que incrementa la capacidad de usuarios por canal. La transmisión de voz se realiza a una velocidad de 8 kbps, empleando el códec VSELP (Vector Sum Excited Linear Prediction) [47].

1.7.3 Tercera Generación

La tercera generación de tecnología móvil (3G) se distingue por la adopción de esquemas de acceso múltiple por división de código (CDMA) y por la introducción de transmisión de datos basada en paquetes. Estas innovaciones optimizan el aprovechamiento del espectro radioeléctrico y elevan considerablemente la calidad y eficiencia de las comunicaciones móviles [48].

Estándares Principales

a. UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) / W-CDMA

Desarrollado por el 3rd Generation Partnership Project (3GPP), el estándar UMTS se basa en la tecnología de acceso múltiple por división de código de banda ancha (W-CDMA). A lo largo del tiempo, este sistema ha experimentado múltiples actualizaciones y mejoras a través de sucesivas versiones, ampliando sus capacidades y rendimiento:

- ***Rel-99:***

La versión inicial del UMTS permitía velocidades de transmisión de hasta 384 kbps tanto en el enlace descendente como en el ascendente, marcando una mejora significativa respecto a las generaciones anteriores en términos de capacidad para servicios multimedia y navegación en internet [48].

- ***HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access):***

Introducido en la Release 5 del 3GPP, el estándar HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) incrementó notablemente la capacidad de descarga, alcanzando velocidades de hasta 7.2 Mbps en el enlace descendente [48].

- ***HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access):***

Posteriormente, con la incorporación de HSUPA (High Speed Uplink Packet Access), se mejoró la velocidad de transmisión en el enlace ascendente, alcanzando tasas de

hasta 5.8 Mbps, lo que potenció aplicaciones interactivas y de envío de datos en tiempo real [48].

- ***HSPA+ (Evolved HSPA):***

En la Release 7 del 3GPP, la evolución hacia HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access) permitió alcanzar velocidades de hasta 42 Mbps en el enlace descendente y hasta 11.5 Mbps en el enlace ascendente, optimizando significativamente el rendimiento para aplicaciones de alta demanda de datos [48].

b. CDMA2000

Desarrollado por el consorcio 3GPP2, CDMA2000 constituye la evolución del estándar IS-95. Emplea acceso múltiple por división de código (CDMA) con un ancho de banda de 1.25 MHz por canal [49]. Este estándar ha sido implementado en diversas revisiones, cada una introduciendo mejoras en capacidad y velocidad de transmisión, los principales son:

- ***1xRTT (Radio Transmission Technology):***

La versión CDMA2000 1xRTT proporciona velocidades de transmisión de hasta 153 kbps tanto en el enlace descendente como en el ascendente, representando una mejora respecto a su predecesor al incorporar servicios de datos junto con voz en el mismo canal [49].

- ***EV-DO (Evolution-Data Optimized):***

En su versión Rev. 0, CDMA2000 EV-DO (Evolution-Data Optimized) mejora significativamente la velocidad de transmisión de datos, alcanzando hasta 2.4 Mbps en el enlace descendente, mientras mantiene una tasa de hasta 153 kbps en el enlace ascendente [49].

- ***EV-DO Rev A:***

En su versión Rev. A, CDMA2000 EV-DO incrementa la velocidad de transmisión en el enlace ascendente hasta 1.8 Mbps, al tiempo que introduce mejoras en la eficiencia

del uso del canal y reduce la latencia, optimizando el rendimiento en aplicaciones interactivas y en tiempo real [49].

- ***EV-DO Rev B:***

La versión Rev. B de CDMA2000 EV-DO habilita velocidades de hasta 4.9 Mbps en el enlace descendente y 1.8 Mbps en el ascendente, gracias a la agregación de múltiples portadoras de 1.25 MHz, lo que mejora significativamente el rendimiento en escenarios de alta demanda de datos [49].

La tercera generación de tecnología móvil (3G) ofrece velocidades de transmisión superiores a 144 Kbit/s, lo que habilita el acceso a servicios multimedia avanzados como videollamadas, transmisión de video en tiempo real y navegación en Internet a alta velocidad. Para garantizar este nivel de rendimiento, las redes 3G operan dentro de bandas de frecuencia dedicadas y estandarizadas a nivel internacional:

- ***Enlace ascendente (de usuario a estación base):***

1885 a 2025 MHz

- ***Enlace descendente (de estación base a usuario):***

2110 a 2200 MHz

Las bandas de espectro correspondientes fueron identificadas y reservadas por la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (WARC) en 1992 para los sistemas móviles de tercera generación, denominados inicialmente FPLMTS y, más tarde, IMT-2000, como se aprecia en la Figura 18 [50].

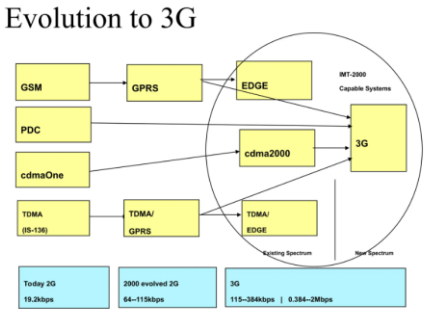


Figura 18 Evolución del 3G [49]

1.7.4 Cuarta Generación

La cuarta generación de tecnología móvil (4G) supone un salto cualitativo frente a generaciones anteriores, al proporcionar velocidades de transmisión considerablemente más altas, una latencia reducida y una infraestructura totalmente basada en el protocolo IP. Estas características han mejorado notablemente la experiencia del usuario en aplicaciones como videollamadas, transmisión de contenido en alta definición y acceso a servicios en la nube de forma más ágil y estable [51].

En cuanto al rendimiento, las redes 4G permiten velocidades de descarga de hasta 100 Mbps para usuarios en movimiento y hasta 1 Gbps en entornos estacionarios, lo que habilita la transmisión fluida de video en alta definición y una experiencia de juego en línea sin interrupciones. Además, la latencia se reduce notablemente, situándose entre 10 y 50 milisegundos, lo que incrementa la capacidad de respuesta del sistema en aplicaciones que requieren interacción en tiempo real, como videoconferencias o servicios de control remoto [51].

La red 4G adopta una arquitectura totalmente orientada a IP, lo que elimina la dependencia de los sistemas de conmutación de circuitos tradicionales para las comunicaciones de voz. Esta transición permite una integración más eficiente entre servicios de voz y datos, optimizando la gestión de recursos y simplificando la infraestructura. Como resultado, se mejora la eficiencia operativa y se reducen significativamente los costos de implementación y mantenimiento para los proveedores de servicios móviles [52].

Técnicamente, las redes 4G incorporan tecnologías avanzadas como el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) en el enlace descendente y el Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA) en el ascendente, optimizando la eficiencia en la asignación de recursos del espectro. Asimismo, se emplean sistemas MIMO (Múltiples Entradas, Múltiples Salidas), que permiten transmitir y recibir múltiples señales simultáneamente, incrementando la capacidad de transmisión y la cobertura sin necesidad de más ancho de banda, como se muestra en la Figura 19 [48].



Figura 19 Países que soportan la banda 28 LTE [53]

En términos de espectro, las redes 4G operan dentro de un amplio rango de frecuencias, que abarca desde los 700 MHz hasta los 2600 MHz. Las bandas más bajas, como la de 700 MHz (Banda 28) y 800 MHz (Banda 20), se destacan por su excelente capacidad de penetración y mayor alcance, lo que las hace especialmente adecuadas para ofrecer cobertura en interiores y en zonas rurales. Estas características las convierten en una opción estratégica para desplegar servicios móviles en regiones con infraestructura limitada, como se ilustra en la Figura 20 [53].



Figura 20 Evolución de las redes celulares [33]

1.8 Comunicación Celular para Transmisión de Datos

La transmisión de datos en redes celulares se basa en tecnologías móviles como GSM, UMTS, LTE y 5G, que permiten el intercambio de información a través de estaciones base distribuidas geográficamente. Al segmentar los datos en paquetes y aplicar

técnicas de modulación sofisticadas, se maximiza la eficiencia espectral, posibilitando aplicaciones como el rastreo vehicular y la telemetría. La evolución hacia redes con mayor velocidad y menor latencia ha favorecido el desarrollo de soluciones más eficaces en automatización y sistemas de transporte. No obstante, desafíos como la cobertura desigual y las interferencias persisten, lo que exige una gestión de red avanzada y la integración con tecnologías complementarias [44].

1.8.1 Sistemas GSM

GSM (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles) es un estándar digital de segunda generación (2G) desarrollado por el ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones), con el objetivo de unificar y digitalizar las redes móviles en Europa, asegurando la compatibilidad entre distintos operadores y países. Inicialmente desplegado en la banda de 900 MHz, el sistema se adaptó posteriormente a frecuencias como 850, 1800 y 1900 MHz, permitiendo su implementación global conforme a las necesidades específicas de cada región [54] .

a. Arquitectura del sistema GSM

La arquitectura de GSM se organiza en varios subsistemas integrados, diseñados para operar de forma coordinada y asegurar la prestación eficiente de servicios móviles. Estos subsistemas incluyen la Estación Móvil (MS), encargada de la interacción directa con el usuario; el Subsistema de Estación Base (BSS), que gestiona la comunicación radioeléctrica; el Subsistema de Conmutación de Red (NSS), responsable del enrutamiento de llamadas y gestión de usuarios; y el Subsistema de Operación y Soporte (OSS), que supervisa y optimiza el desempeño de toda la red. Cada uno cumple un rol esencial dentro de la infraestructura global del sistema [55].

La Estación Móvil (MS) constituye la interfaz principal entre el usuario y la red GSM, albergando tanto el terminal físico como la Tarjeta SIM (Subscriber Identity Module). Esta tarjeta inteligente desempeña un papel clave al contener datos esenciales como la identidad del suscriptor, credenciales de autenticación y parámetros de configuración de red. Gracias a esta integración, se habilita una conexión segura, personalizada y

adaptable, que permite al usuario desplazarse entre distintas áreas de cobertura sin perder continuidad en el servicio [55].

La BSS (Subsistema de Estación Base) actúa como puente entre la Estación Móvil (MS) y el núcleo de la red GSM, gestionando tanto el tráfico de datos como la señalización. Este subsistema está compuesto por dos elementos clave: la Estación Transceptora Base (BTS), que realiza la transmisión y recepción de señales de radio con los dispositivos móviles, y el Controlador de Estación Base (BSC), que coordina múltiples BTS y se encarga de funciones esenciales como la administración de canales de radio y la gestión de traspasos de llamadas entre celdas para asegurar una comunicación fluida y continua., como se aprecia en la Figura 21 [55].

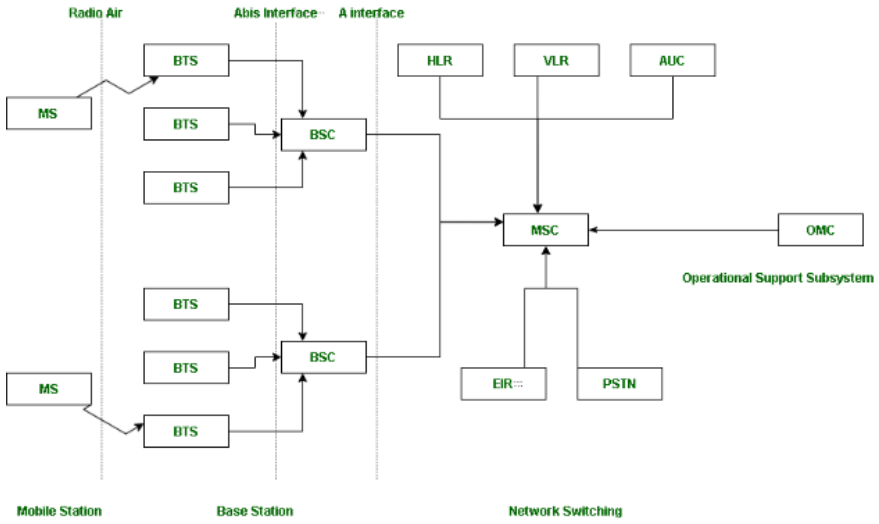


Figura 21 Subsistema GSM [54]

El Subsistema de Conmutación de Red (NSS) constituye el núcleo operativo de la red GSM, siendo responsable de la gestión de la conmutación de llamadas y del control de la movilidad de los usuarios. Este subsistema integra varios elementos clave: el Centro de Conmutación de Servicios Móviles (MSC), que se encarga de enrutar las llamadas y coordinar la interoperabilidad con otras redes; el Registro de Ubicación de Visitantes (VLR), que almacena temporalmente los datos de los usuarios activos dentro de su área; el Registro de Ubicación de Abonados (HLR), que conserva de forma permanente la información de los suscriptores; el Centro de Autenticación (AUC), que

genera los parámetros criptográficos necesarios para validar la identidad del usuario y garantizar la seguridad de las comunicaciones; y el Registro de Identidad de Equipos (EIR), que mantiene un listado actualizado de dispositivos móviles autorizados, robados o defectuosos [56].

El OSS (Subsistema de Operación y Soporte) centraliza las funciones necesarias para garantizar el mantenimiento, control y supervisión técnica de la red GSM. Entre sus principales componentes se encuentra el Centro de Gestión de Red (NMC), encargado de coordinar de forma global las operaciones de administración de la red, y el Centro de Mantenimiento y Operación (OMC), que realiza el monitoreo continuo del rendimiento de los elementos de red, permitiendo detectar fallos, optimizar recursos y asegurar la estabilidad del sistema, como se muestra en la Figura 22 [9].

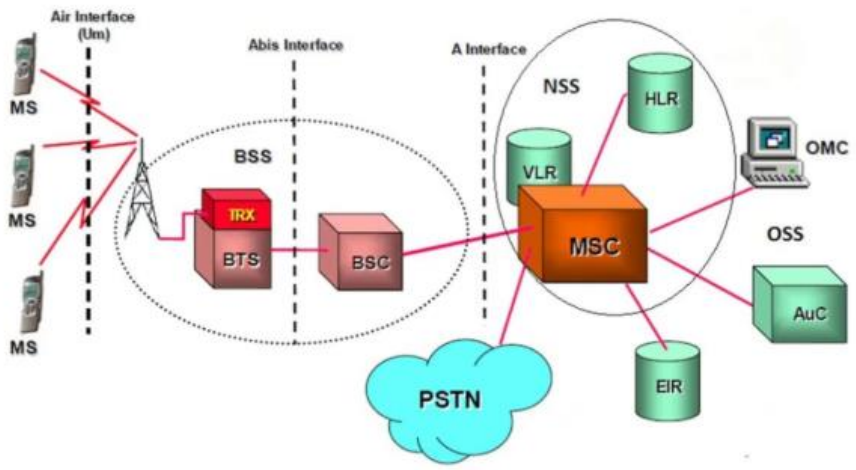


Figura 22 Arquitectura de un sistema GSM [57]

1.8.2 Sistemas GPRS

El GPRS (Sistema General de Paquetes por Radio) amplía las capacidades de la red GSM mediante la incorporación de la conmutación de paquetes, lo que permite una transmisión de datos más eficiente y adaptable. A diferencia del enfoque tradicional de conmutación de circuitos en GSM —donde los recursos se asignan durante toda la conexión—, GPRS asigna capacidad de red únicamente cuando se envían o reciben datos, optimizando significativamente el uso del espectro radioeléctrico. Esta arquitectura habilita el acceso continuo a servicios basados en datos, como navegación web, correo electrónico y aplicaciones móviles en tiempo real [58].

a. Arquitectura del sistema GPRS

La arquitectura del GPRS se construye sobre la infraestructura ya establecida de la red GSM, añadiendo componentes específicos que permiten gestionar eficientemente la transmisión de datos en forma de paquetes. Esta integración se logra mediante la incorporación de nuevos nodos funcionales, diseñados para habilitar y controlar el flujo de datos en entornos móviles. Entre los elementos principales que conforman esta arquitectura se encuentran:

- ***Estación Móvil (MS):***

El equipo terminal del usuario, conocido como *Estación Móvil GPRS (MS)*, es el dispositivo encargado de establecer la conexión con la red y acceder a los servicios GPRS. Este dispositivo debe ser compatible con la funcionalidad de conmutación por paquetes, y se compone del terminal móvil propiamente dicho y la tarjeta SIM, que contiene la información del abonado necesaria para la autenticación y la gestión del acceso a la red [57].

- ***Subsistema de Estación Base (BSS):***

La interfaz de acceso radioeléctrico en la arquitectura GPRS está compuesta por la Estación Transceptora Base (BTS) y el Controlador de Estación Base (BSC). Estos elementos, heredados del sistema GSM, son responsables de gestionar la comunicación entre la Estación Móvil (MS) y la red núcleo. La BTS se encarga de la transmisión y recepción de señales de radio, mientras que el BSC coordina múltiples BTS, controlando la asignación de recursos de radio, la gestión de la movilidad y el traspaso de llamadas (handover) [9].

- ***Unidad de Control de Paquetes (PCU):***

Integrado dentro del Controlador de Estación Base (BSC), el Packet Control Unit (PCU) es el componente responsable de gestionar el tráfico de datos en conmutación por paquetes. Su función principal es coordinar la asignación dinámica de recursos radioeléctricos para servicios GPRS, controlando además parámetros asociados a la calidad de servicio (QoS) y facilitando la entrega eficiente de datos entre la Estación Móvil (MS) y la red núcleo [57], [59].

- ***Nodo de Soporte GPRS de Servicio (SGSN):***

El Serving GPRS Support Node (SGSN) es el nodo encargado de administrar la transmisión de paquetes de datos hacia y desde las estaciones móviles dentro de su zona de cobertura. Además de gestionar el enrutamiento de datos, el SGSN ejecuta funciones clave como la autenticación del usuario, el control de acceso a los servicios y el seguimiento continuo de la ubicación de los terminales móviles, manteniendo actualizada la información necesaria para garantizar la movilidad y continuidad de la conexión [59].

- ***Nodo de Soporte GPRS de Pasarela (GGSN):***

El Gateway GPRS Support Node (GGSN) funciona como el punto de interconexión entre la red GPRS y otras redes de datos externas, como Internet. Su responsabilidad principal incluye la asignación de direcciones IP a los dispositivos móviles y la gestión eficiente del enrutamiento de los paquetes de datos hacia y desde dichas redes [59].

La interacción entre el GGSN y el SGSN se realiza mediante el Protocolo de Tunelización GPRS (GTP), que facilita el transporte seguro y confiable de datos. Para la gestión de enlaces lógicos y la adaptación de los datos a las particularidades de la red, se emplean protocolos como el LLC (Logical Link Control) y el SNDCP (Subnetwork Dependent Convergence Protocol), asegurando así una comunicación óptima y eficiente dentro del entorno GPRS [59].

b. Funcionamiento y características técnicas

GPRS permite la transmisión de datos en modo de conmutación de paquetes, lo que significa que los recursos de red se asignan dinámicamente según la demanda de datos, en lugar de reservar un canal completo durante toda la sesión de comunicación. Esto mejora la eficiencia del uso del espectro y permite a múltiples usuarios compartir los mismos recursos de red [57].

La velocidad de transmisión en GPRS depende del número de ranuras de tiempo (time slots) asignadas y del esquema de codificación utilizado. En teoría, GPRS puede

alcanzar velocidades de hasta 171.2 kbps utilizando las ocho ranuras de tiempo disponibles, aunque en la práctica las velocidades suelen ser menores debido a limitaciones de red y condiciones de señal [60].

GPRS también introduce el concepto de contexto PDP (Packet Data Protocol), que define los parámetros necesarios para establecer una conexión de datos, incluyendo la dirección IP asignada al usuario y los parámetros de calidad de servicio. Este contexto se establece durante el proceso de activación de la sesión de datos y se mantiene mientras dure la conexión [58].

En resumen, GPRS representa un paso significativo en la evolución de las redes móviles, al introducir la conmutación de paquetes y permitir un acceso más eficiente y flexible a los servicios de datos móviles. Su arquitectura modular y la integración con la infraestructura GSM existente facilitaron su implementación y sentaron las bases para tecnologías posteriores como EDGE y UMTS [57].

1.8.3 GPRS y su uso con la telefonía móvil

El General Packet Radio Service (GPRS) representó un avance fundamental en la evolución de las redes móviles de segunda generación (2G), al incorporar la transmisión de datos mediante conmutación por paquetes. Esta innovación facilitó un acceso más eficiente y rápido a servicios de datos móviles, como la navegación web, la mensajería multimedia (MMS) y el correo electrónico, superando las limitaciones de las conexiones basadas en conmutación de circuitos. Además, GPRS estableció una plataforma tecnológica esencial que impulsó el desarrollo de las redes de tercera generación (3G), las cuales ampliaron las capacidades de transmisión para incluir funciones avanzadas como videollamadas y streaming de contenido multimedia [57]

El GPRS (General Packet Radio Service) fue una tecnología clave en la evolución de la telefonía móvil, al introducir la transmisión de datos por paquetes en las redes móviles de segunda generación (2G). Esto permitió a los usuarios acceder a servicios de datos como navegación web, mensajería multimedia y correo electrónico de manera más eficiente y a velocidades superiores a las conexiones anteriores basadas en conmutación de circuitos. GPRS sentó las bases para el desarrollo posterior de redes

de tercera generación (3G), que expandieron aún más las capacidades de transmisión de datos, incluyendo videollamadas y streaming multimedia, como se muestra en la Figura 23.

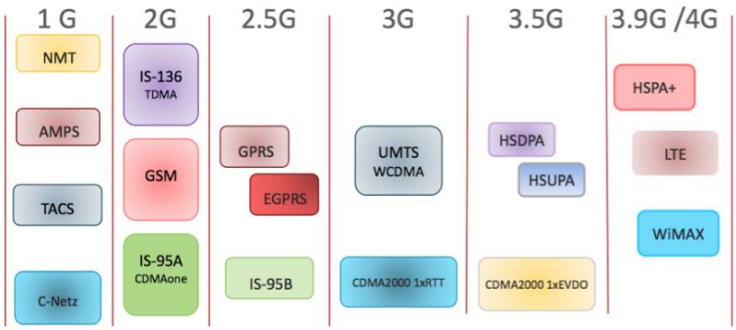


Figura 23. Estándares de las generaciones celulares [61]

1.9 Software y Hardware Libres en Sistemas de Rastreo

Los sistemas de rastreo que combinan hardware y software de código abierto constituyen una solución versátil y económica para múltiples aplicaciones, que van desde la gestión eficiente de flotas hasta el monitoreo de fauna silvestre. Gracias a la naturaleza abierta de estos sistemas, los usuarios pueden adaptar y escalar las herramientas de seguimiento según sus requerimientos particulares, beneficiándose además del soporte y la innovación continua de una comunidad global de desarrolladores [4].

1.9.1 Hardware Libre en Sistemas de Rastreo

El hardware abierto en sistemas de rastreo se fundamenta en el uso de componentes con especificaciones y diseños accesibles públicamente, lo que facilita su análisis, modificación y distribución libre. Un ejemplo representativo es el Custodium Tracker, un dispositivo de hardware abierto diseñado para aplicaciones de localización GPS y comunicaciones inalámbricas. Este equipo proporciona una alternativa accesible y adaptable para proyectos que requieren monitoreo en tiempo real, permitiendo su personalización para ajustarse a diferentes requerimientos y contextos [62][63].

Otra alternativa destacada en sistemas de rastreo es el diseño basado en placas microcontroladoras, como el Arduino UNO, integradas con módulos GPS/GSM, por

ejemplo, el Adafruit FONA808. Esta combinación posibilita el desarrollo de soluciones personalizadas para el seguimiento en tiempo real de vehículos, adaptándose a condiciones específicas y ofreciendo funcionalidades ampliadas en comparación con sistemas comerciales convencionales [62].

1.9.2 Software Libre en Sistemas de Rastreo

n el ámbito de los sistemas de rastreo, el software libre proporciona plataformas flexibles que los usuarios pueden modificar y adaptar según sus necesidades. Un ejemplo destacado es Traccar, un software de seguimiento GPS de código abierto reconocido por su amplia compatibilidad con múltiples dispositivos y sus funcionalidades avanzadas. Con una interfaz web moderna y capacidades para el seguimiento en tiempo real, Traccar resulta adecuado tanto para aplicaciones personales como empresariales [64].

Asimismo, existen soluciones especializadas como SnapperGPS, un sistema de rastreo diseñado para el monitoreo de fauna silvestre que destaca por su bajo consumo energético y costo reducido. Este sistema emplea técnicas de posicionamiento GNSS por instantánea, las cuales permiten determinar la ubicación del receptor utilizando apenas milisegundos de señales satelitales, optimizando así el uso de energía y prolongando la autonomía en aplicaciones donde la eficiencia energética es crítica [64].

1.9.3 Integración y Aplicaciones

La integración de hardware y software de código abierto posibilita el desarrollo de sistemas de rastreo a medida, adaptables a una amplia variedad de aplicaciones que incluyen desde la gestión de flotas hasta proyectos de investigación científica. Esta flexibilidad permite ajustar las soluciones a distintos entornos y necesidades específicas, tal como se ilustra en la Tabla 5, fomentando así la innovación y la cooperación en la creación de tecnologías de rastreo accesibles y de alto rendimiento [65].

Tabla 5. Comparativa de Soluciones Gratuitas de Rastreo GPS [64]

Pregunta	Respuesta
¿Cuáles son las mejores soluciones gratuitas de rastreo GPS?	Traccar, OpenGTS, AirDroid, Trackit, TrackMyRide, Navit, LocaToWeb
¿Qué funciones ofrecen los rastreadores GPS gratuitos?	Seguimiento en tiempo real, gestión de usuarios, soporte para múltiples dispositivos, geocercas, notificaciones, aplicaciones móviles
¿Cuáles son los beneficios únicos de cada rastreador GPS?	Varía según el software, incluidos mapas avanzados, informes personalizables y soporte multiplataforma.
¿Son estos rastreadores GPS adecuados para uso personal y empresarial?	Sí, la mayoría de ellos atienden necesidades tanto individuales como empresariales.
¿Estos rastreadores ofrecen aplicaciones móviles?	Sí, muchos ofrecen aplicaciones para plataformas Android e iOS.

1.10 Arquitectura Cliente-Servidor en Sistemas de Rastreo GPS

En un sistema de rastreo GPS que emplea una arquitectura cliente-servidor, los datos recopilados por el dispositivo instalado en el vehículo (cliente) son enviados a un servidor centralizado, donde se realiza su procesamiento y visualización. A continuación, se describe en detalle el flujo de información y los elementos que intervienen en este mecanismo:

1.10.1 Captura y Transmisión de Datos en el Cliente

En el lado del cliente, los dispositivos de rastreo equipados con receptores GPS reciben señales de un mínimo de cuatro satélites para calcular su posición geográfica exacta mediante técnicas de trilateración. Tras determinar la ubicación, el dispositivo procesa y envía esta información al servidor central utilizando redes de comunicación móviles, como GPRS, empleando protocolos de transmisión como HTTP o MQTT. Además de la posición, el dispositivo puede transmitir datos adicionales, tales como velocidad, rumbo y estado operativo, ofreciendo así un panorama completo del activo bajo monitoreo [44].

1.10.2 Recepción y Procesamiento de Datos en el Servidor

El servidor centraliza la recepción de datos enviados por los dispositivos clientes, almacenándolos en bases de datos estructuradas que facilitan su análisis posterior. Mediante el procesamiento de esta información, es posible generar informes

detallados, activar alertas en tiempo real y crear visualizaciones gráficas que optimizan la toma de decisiones. Asimismo, la implementación de interfaces web y aplicaciones móviles ofrece a los usuarios acceso remoto a la información, mejorando la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante eventos [66].

1.10.3 Visualización y Monitoreo

Mediante aplicaciones móviles o interfaces web, los usuarios pueden monitorizar el estado y la ubicación de los vehículos en tiempo real. Estas plataformas permiten además analizar patrones de movimiento y consultar trayectorias históricas. Entre las funcionalidades ofrecidas se encuentran la configuración de alertas para eventos específicos, como la salida de vehículos de áreas geográficas delimitadas, así como la generación de informes personalizados que facilitan la toma de decisiones [67].

1.10.4 Consideraciones Técnicas

En esta arquitectura, la escalabilidad y la seguridad representan factores fundamentales. Para salvaguardar la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos, resulta imprescindible la implementación de mecanismos de autenticación y cifrado. De igual modo, el sistema debe diseñarse para soportar la incorporación progresiva de dispositivos, garantizando un rendimiento óptimo y ofreciendo una solución robusta capaz de adaptarse a las demandas cambiantes de las organizaciones, como se muestra en la Figura 24 [68].

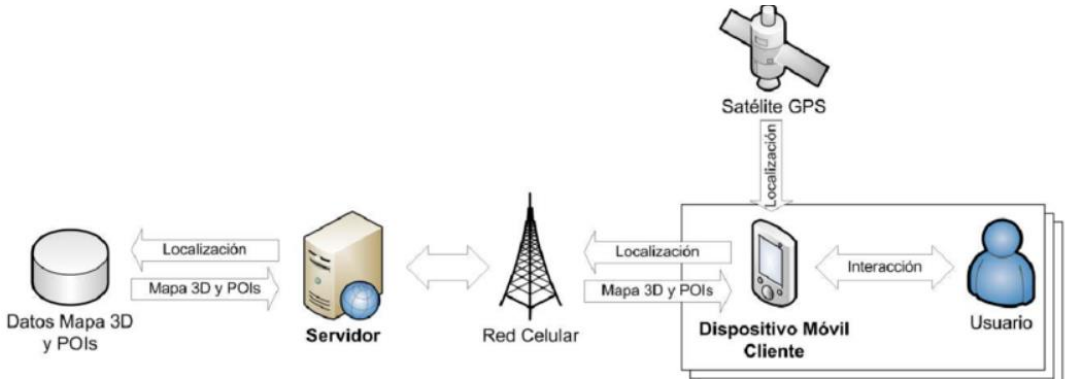


Figura 24. Arquitectura Cliente-Servidor [69]

1.11 Hardware libre

El hardware libre, también denominado hardware de código abierto, electrónica libre o máquinas libres, se caracteriza por ofrecer especificaciones técnicas y esquemas accesibles públicamente, lo que permite su estudio, modificación, distribución y fabricación por cualquier interesado. A diferencia del software libre, el hardware involucra componentes físicos—como resistencias, capacitores, diodos, transistores y microcontroladores—que generan costos materiales. Por consiguiente, aunque el diseño sea abierto y libre, la fabricación del hardware conlleva gastos asociados a los materiales necesarios para su construcción. [70].

Aunque la libertad asociada al hardware libre no garantiza la gratuidad de los componentes físicos, sí asegura el acceso abierto y la posibilidad de modificar y distribuir los diseños de hardware. Esta filosofía, alineada con los principios del software libre, fomenta la innovación, permite a los usuarios adaptar los dispositivos a sus necesidades específicas y promueve el intercambio de mejoras dentro de la comunidad [65].

Para la regulación del uso, copia, modificación y distribución tanto de la documentación de diseño de hardware como de la fabricación y comercialización de los productos resultantes, se emplean diversas licencias específicas para hardware libre. Entre las más reconocidas se encuentran las siguientes:

a. Licencia TAPR Open Hardware License (OHL):

Establece un marco legal que facilita la colaboración y creación en proyectos de hardware, permitiendo tanto el intercambio de documentación como la fabricación del hardware mismo [4].

b. Licencia Balloon Open Hardware:

Basada en la licencia GPL, esta licencia aplicada al proyecto "Balloon" asegura la libertad para compartir y desarrollar, condicionando que los productos derivados mantengan la misma licencia, garantizando así la continuidad del modelo abierto [65].

c. Licencia Hardware Design Public:

Originada en el proyecto Opencollector.org y desarrollada por Graham Seaman, esta licencia basada en la GPL busca trasladar los principios del software libre al ámbito del diseño de hardware [71].

d. Licencia Solderpad:

Esta licencia, una adaptación de la Licencia Apache 2.0, está diseñada para ajustarse mejor a las particularidades del hardware, permitiendo la creación de trabajos derivados que no necesariamente mantienen carácter libre [71].

e. Licencia CERN Open Hardware Licence (OHL):

Promoviendo la colaboración entre diseñadores, esta licencia publicada por el CERN respalda la libertad de usar, estudiar, modificar, compartir y distribuir tanto los diseños de hardware como los productos derivados de ellos [65].

1.11.1 Servidores

Un servidor es una aplicación de software que responde a solicitudes emitidas por un cliente, entregando respuestas basadas en dichas peticiones. Aunque puede ejecutarse en diversos sistemas operativos y computadoras, como Windows, Linux o macOS, para aplicaciones críticas —como el rastreo satelital— se recomienda emplear servidores dedicados, que ofrecen mayor fiabilidad, capacidad de procesamiento y seguridad. En esta arquitectura cliente-servidor, el servidor cumple el rol de proveedor de información, atendiendo las demandas generadas por el cliente [72].

Los requerimientos de hardware para servidores dependen de la naturaleza de las aplicaciones que soportan. Debido a que deben atender a múltiples usuarios en red, es fundamental contar con conexiones de alta velocidad y amplias capacidades de almacenamiento. Frecuentemente, estos servidores operan sin necesidad de dispositivos de entrada como monitores, y prescinden de interfaces gráficas para maximizar la eficiencia en el uso de recursos. Su operación ininterrumpida y la exigencia de alta disponibilidad hacen que la durabilidad y confiabilidad del hardware sean factores críticos [72].

a. Tipos de Servidores

Dentro de los sistemas de rastreo satelital, se emplean distintos tipos de servidores, cada uno encargado de funciones específicas dentro de la arquitectura general:

- ***Servidor Web:***

Se encarga de almacenar y proporcionar a los clientes documentos HTML, imágenes, videos y diversos tipos de contenido multimedia [68].

- ***Servidor de Correo:***

Es responsable de la gestión integral del correo electrónico, incluyendo su envío, recepción y almacenamiento [72].

- ***Servidor Proxy:***

Funciona como intermediario entre el cliente y otros servidores, garantizando anonimato y fortaleciendo la seguridad en las comunicaciones [68].

- ***Servidor de Bases de Datos:***

Se encarga del almacenamiento y la gestión de grandes volúmenes de datos, incluyendo los registros de ubicación generados por los dispositivos de rastreo [66].

- ***Servidor de Archivos:***

Administra y almacena archivos compartidos para su acceso dentro de una red [68].

- ***Servidor de Impresiones:***

Se encarga de administrar y procesar las solicitudes de impresión dentro de una red [69].

- ***Servidor Dedicado:***

Ofrece servicios dedicados exclusivamente a una sola organización, proporcionando un mayor nivel de control y seguridad [69].

1.11.2 Plataformas

Según los requerimientos del sistema, los servidores pueden ser implementados en distintas plataformas:

a. Linux:

Entre las distribuciones más populares por su estabilidad y seguridad se encuentran Debian, Ubuntu, Red Hat Enterprise y CentOS.

b. Windows Server:

Ofrece compatibilidad con múltiples aplicaciones empresariales y una interfaz intuitiva para los usuarios.

c. macOS Server:

Aunque su uso es menos frecuente, macOS se emplea en entornos específicos que demandan integración con dispositivos Apple. Además, existen paquetes como WAMP para Windows, LAMP para Linux, MAMP para macOS y XAMPP multiplataforma, que simplifican la instalación de servidores web con Apache, MySQL y PHP.

1.11.3 Servidores en la Nube

Las soluciones de servidores en la nube brindan flexibilidad, escalabilidad y reducen la inversión inicial en infraestructura física. Plataformas como Wialon facilitan el monitoreo en tiempo real, la generación de informes y la gestión de flotas sin requerir la administración de servidores físicos. Estas plataformas ofrecen almacenamiento para hasta 20,000 unidades y permiten un despliegue adaptable, ya sea en el servidor del cliente o en la propia infraestructura del proveedor [64].

1.11.4 Bases de Datos

Para una gestión eficiente de los datos generados por dispositivos de rastreo, es necesario contar con bases de datos robustas y escalables. Sistemas como PostgreSQL,

particularmente cuando se complementan con extensiones geoespaciales como PostGIS, optimizan el almacenamiento y la consulta de información de ubicación. Estas plataformas permiten realizar consultas complejas, elaborar informes detallados y analizar patrones de movimiento con mayor eficacia [73].

1.11.5 Almacenamiento de Información

Es fundamental que el almacenamiento de datos garantice seguridad, redundancia y accesibilidad. Las soluciones en la nube ofrecen capacidades para manejar grandes volúmenes de información con alta disponibilidad y respaldos automáticos. Además, estas plataformas facilitan la integración con herramientas de análisis y visualización, optimizando la toma de decisiones basadas en los datos recopilados [74].

El éxito de los sistemas de rastreo satelital depende de la implementación de servidores adecuados, bases de datos eficientes y soluciones de almacenamiento seguras. La decisión entre utilizar servidores locales o en la nube debe basarse en las necesidades particulares de cada organización, evaluando aspectos como el control sobre la infraestructura, la escalabilidad y los costos involucrados [75].

1.12 Programación Web

La programación web engloba el conjunto de lenguajes, técnicas y herramientas empleadas para crear aplicaciones accesibles a través de navegadores. En sistemas de rastreo satelital, esta programación facilita la visualización en tiempo real de datos provenientes de dispositivos de rastreo, además de la gestión de usuarios, generación de informes y administración remota de dispositivos. Para asegurar una interacción fluida y segura entre la interfaz del usuario y los datos en el servidor, se utilizan lenguajes tanto del lado cliente (frontend) como del lado servidor (backend) [76].

A continuación, se describen las tecnologías y lenguajes principales involucrados en este proceso:

a. HTML (HyperText Markup Language)

Como lenguaje de marcado esencial, HTML establece la estructura básica de las páginas web, definiendo elementos visibles como textos, imágenes, botones, formularios y enlaces. En sistemas de monitoreo satelital, HTML organiza la interfaz de usuario, permitiendo la presentación de mapas, tablas de datos, alertas y configuraciones. Aunque su naturaleza es estática, se integra con otros lenguajes para aportar dinamismo y funcionalidades avanzadas [76].

b. CSS (Cascading Style Sheets)

CSS es el lenguaje responsable de aplicar estilos visuales a los elementos estructurados con HTML, permitiendo definir colores, tipografías, tamaños, márgenes y diseños responsivos. En aplicaciones de rastreo, CSS posibilita la creación de interfaces adaptativas para diversos dispositivos —como computadoras, tablets y smartphones—, garantizando una experiencia de usuario consistente. Asimismo, al separar el diseño del contenido, facilita el mantenimiento y la escalabilidad de la aplicación web [77].

c. JavaScript

JavaScript, lenguaje interpretado que se ejecuta en el cliente (navegador), es fundamental para dotar de interactividad a las páginas web. Facilita funciones como la validación de formularios, la actualización dinámica de mapas y el envío de solicitudes asincrónicas mediante AJAX, permitiendo refrescar paneles sin necesidad de recargar la página. En sistemas de rastreo satelital, JavaScript juega un papel crucial al permitir la visualización en tiempo real de la ubicación de vehículos o activos, mediante el uso de APIs como Google Maps o Leaflet, y tecnologías de transmisión de datos como WebSockets [76].

d. PHP (Hypertext Preprocessor)

PHP es un lenguaje de programación orientado al servidor ampliamente utilizado en el desarrollo web. En sistemas de rastreo, PHP se encarga de la lógica del backend, gestionando tareas como la autenticación de usuarios, el almacenamiento de coordenadas GPS en bases de datos, la generación de reportes y el envío de notificaciones. Gracias a su compatibilidad con bases de datos como MySQL y

PostgreSQL, resulta especialmente adecuado para aplicaciones que requieren procesamiento de datos en tiempo real y altos estándares de seguridad [76].

e. ASP.NET

Desarrollada por Microsoft, ASP.NET es una tecnología enfocada en la creación de aplicaciones web dinámicas, utilizando lenguajes como C# o VB.NET. Es especialmente adecuada para entornos institucionales o corporativos que operan sobre infraestructuras basadas en Windows Server y el servidor web IIS (Internet Information Services). En sistemas de rastreo satelital, ASP.NET ofrece una plataforma escalable y robusta que facilita la implementación de arquitecturas basadas en servicios web (REST o SOAP), permitiendo la integración eficiente entre dispositivos IoT de rastreo y las interfaces de gestión y visualización de datos [78].

f. Python

Lenguaje de programación multiparadigma, Python ha ganado un papel destacado en el desarrollo web backend, la manipulación de datos y la ciencia computacional, gracias a su sintaxis clara y expresiva. En el contexto del rastreo satelital, su integración con frameworks como Flask y Django permite construir aplicaciones web funcionales de forma ágil. Además, facilita la conexión con bases de datos, APIs geoespaciales y herramientas de inteligencia artificial, permitiendo la implementación de módulos avanzados, como detección de comportamientos anómalos o predicción de trayectorias, optimizando así la inteligencia operativa del sistema de monitoreo [79].

En el diseño del sistema de rastreo satelital, la unidad vehicular representa el componente esencial desde el cual se gestionan las operaciones principales del monitoreo. La selección de sus elementos electrónicos se fundamentó en criterios técnicos como eficiencia energética, compatibilidad con otros módulos, precisión en la adquisición de datos y disponibilidad comercial en el entorno local. El prototipo desarrollado integra una serie de módulos que, en conjunto, permiten capturar coordenadas geográficas, transmitir los datos mediante redes móviles a un servidor remoto, y administrar el sistema utilizando una plataforma microcontrolada de bajo costo y alto rendimiento. Cada módulo fue sometido a una evaluación técnica

detallada, comparando sus prestaciones con otras opciones del mercado y verificando su desempeño bajo condiciones operativas reales [80].

1.13 Operadoras móviles

En los sistemas de rastreo satelital, las operadoras móviles desempeñan un papel clave, ya que proporcionan la conectividad necesaria —mediante tecnologías como GPRS o LTE— para transmitir los datos obtenidos por dispositivos como el módulo SIM808 hacia servidores remotos. Estas entidades, también conocidas como proveedores de servicios de red celular, implementan infraestructuras de telecomunicaciones que incluyen estaciones base, antenas, centros de conmutación y servidores, los cuales permiten el intercambio eficiente de voz y datos entre dispositivos móviles y otras plataformas conectadas. La elección de una operadora adecuada para aplicaciones de IoT o telemetría vehicular requiere considerar aspectos como la estabilidad del servicio, la compatibilidad de bandas de frecuencia y la cobertura geográfica disponible, factores que inciden directamente en la fiabilidad del sistema [44].

A pesar de que en Ecuador se han puesto en marcha planes para el apagado progresivo de las redes 2G, el módulo SIM808 EVB-V3.2.4 ofrece compatibilidad con bandas cuádruples, lo que garantiza su funcionamiento tanto en redes 2G como 3G, como se muestra en la Figura 25. Esta característica resulta clave para asegurar una transición gradual hacia tecnologías móviles más modernas sin comprometer la operatividad del sistema. En cuanto a la conectividad móvil, se comprobó de forma empírica que la operadora Claro mantiene una cobertura robusta en la región Sierra central, abarcando tanto la ciudad de Ambato como sectores periurbanos, lo cual respaldó la fiabilidad del sistema durante las pruebas de campo, como se muestra en la Figura 25 [60].

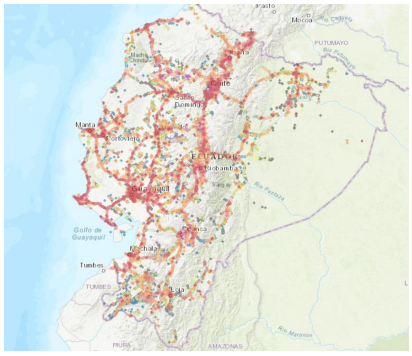


Figura 25 Cobertura 3G en Ecuador

1.14 Objetivos

1.14.1 Objetivo general

Implementar un sistema de rastreo satelital en tiempo real para vehículos de emergencia del ecu 911 mediante software de código abierto.

1.14.2 Objetivos específicos

- Analizar los sistemas de rastreo satelital basados en software de código abierto y su aplicabilidad en la gestión vehicular de emergencia.
- Implementar un prototipo de sistema de rastreo satelital basado en tecnologías de código abierto.
- Evaluar el desempeño del prototipo en vehículos seleccionados mediante métricas de eficiencia, costos y seguridad operativa.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El núcleo del sistema está constituido por una placa microcontroladora Arduino Uno, seleccionada por su compatibilidad con múltiples módulos y su facilidad de programación. Esta placa se encarga de coordinar la recepción de datos del módulo GPS y la transmisión de información a través del módulo GSM, como se muestra en la Tabla 6 y la Tabla 7.

Para la obtención de datos de ubicación, se empleó el módulo GPS GY-GPS6MV2, basado en el chip Ublox NEO-6M. Este módulo proporciona información precisa de latitud, longitud y altitud, y se comunica con la placa Arduino mediante una interfaz serial.

La transmisión de datos se realiza mediante el módulo GSM SIM800L, que permite enviar mensajes de texto con la información de ubicación a un número predefinido. Este módulo opera en un rango de voltaje de 3.4V a 4.4V y se comunica con la placa Arduino a través de comandos AT.

Para la alimentación del sistema se utilizó una batería externa Power Bank Tzumi Pocket Juice de 20 000 mAh, seleccionada por su alta capacidad energética y confiabilidad en entornos móviles. Este dispositivo ofrece una salida estable de 5 V y hasta 4.2 A, mediante puertos USB de alta velocidad, lo que permitió alimentar simultáneamente el Arduino Uno, el módulo GPS NEO-6M y el módulo SIM808 sin interrupciones. Su batería de polímero de litio de alta densidad garantiza autonomía por más de 80 horas bajo consumo promedio del sistema (~0.63 W medido), facilitando el funcionamiento continuo durante extensas jornadas de monitoreo vehicular. Además, su diseño compacto (6.0 ” × 2.6 ” × 1”) y su certificación UL con tecnología QuickChip ofrecen protección frente a sobrecargas, sobrecalentamiento y cortocircuitos. Esta fuente de energía portátil demostró ser una solución robusta, recargable y segura, adecuada para despliegues de campo donde no se dispone de una fuente de alimentación fija.

Tabla 6. Características de hardware del sistema

Material	Características Técnicas	Descripción
Arduino Uno R3	Microcontrolador ATmega328P, 14 pines digitales (6 PWM), 6 entradas analógicas, 32 KB de memoria Flash, reloj de 16 MHz, voltaje de operación de 5 V, dimensiones de 68.6 mm x 53.4 mm.	Placa de desarrollo versátil y ampliamente utilizada en proyectos electrónicos. Su arquitectura permite la conexión con diversos módulos y sensores, facilitando la implementación de sistemas embebidos y prototipos funcionales.
Módulo GPS NEO-6M	Voltaje de alimentación de 3.3 V a 5 V, interfaz UART, velocidad de transmisión de 9600 bps, frecuencia de actualización de 1 Hz (configurable hasta 5 Hz), precisión de posicionamiento de 2.5 m CEP, dimensiones de 25 mm x 35 mm.	Módulo de posicionamiento global que proporciona datos precisos de ubicación. Incluye una antena cerámica y una batería de respaldo para mantener la configuración. Ideal para aplicaciones de geolocalización en tiempo real.
Módulo GSM SIM800L	Banda cuádruple (850/900/1800/1900 MHz), voltaje de operación de 3.4 V a 4.4 V, consumo máximo de corriente de 500 mA, interfaz UART, dimensiones de 25 mm x 23 mm.	Módulo de comunicación que permite el envío y recepción de mensajes SMS y datos GPRS. Compatible con redes 2G, es adecuado para aplicaciones que requieren conectividad móvil, como sistemas de rastreo y monitoreo remoto.

Tabla 7 Características de software del sistema

Software	Características Técnicas	Descripción
AlmaLinux	Sistema operativo de código abierto, compatible con Red Hat Enterprise Linux (RHEL), versión 8 o superior. Núcleo Linux 4.18 o superior.	AlmaLinux es una distribución de Linux enfocada en la estabilidad y seguridad, ideal para entornos de servidor. Su compatibilidad binaria con RHEL garantiza un amplio soporte y actualizaciones regulares, proporcionando una base sólida para aplicaciones empresariales y de desarrollo web.
Apache HTTP Server	Servidor web de código abierto, versión 2.4 o superior. Soporte para módulos dinámicos, configuración flexible.	Apache es un servidor web robusto y ampliamente utilizado que permite servir contenido estático y dinámico. Su arquitectura modular facilita la integración con diversos lenguajes de programación y bases de datos, siendo una elección común para aplicaciones web en entornos LAMP.
MariaDB	Sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS), versión 10.3 o superior. Compatible con MySQL, soporte para transacciones ACID, almacenamiento en motores como InnoDB y MyISAM.	MariaDB es una bifurcación de MySQL mantenida por la comunidad, que ofrece mejoras en rendimiento y seguridad. Es utilizada para almacenar y gestionar datos estructurados, siendo esencial en aplicaciones que requieren operaciones complejas de consulta y manipulación de datos.
PHP	Lenguaje de programación del lado del servidor, versión 7.4 o superior. Soporte para programación orientada a objetos, manejo de sesiones, y amplia gama de extensiones para conectividad con bases de datos y servicios web.	PHP es un lenguaje de scripting ampliamente utilizado para el desarrollo de aplicaciones web dinámicas. Su integración con Apache y MariaDB en la pila LAMP permite la creación de sitios interactivos y funcionales, facilitando el procesamiento de formularios, autenticación de usuarios y generación de contenido dinámico.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

Las modalidades aplicadas en esta investigación fueron las siguientes:

Se trató de una investigación de tipo aplicada, ya que el objetivo principal fue desarrollar un sistema de monitoreo geoespacial que permita comparar el rendimiento y eficiencia de diferentes módulos GPS, integrados con tecnologías de transmisión inalámbrica como GSM, para su potencial uso en aplicaciones de geolocalización. El proyecto integró conocimientos en electrónica, telecomunicaciones, programación embebida y análisis de datos.

Además, se utilizó la modalidad documental-bibliográfica, debido a que se fundamentó en revisiones de artículos científicos, tesis, documentación técnica de los módulos GPS y GSM utilizados, así como recursos académicos extraídos de repositorios institucionales y bases de datos especializadas.

De igual manera, fue una investigación de campo, ya que implicó la recolección de datos en escenarios reales al aire libre, donde se evaluó el desempeño de cada módulo GPS bajo distintas condiciones ambientales. Estas pruebas permitieron obtener datos empíricos que enriquecieron el análisis comparativo.

Finalmente, fue una investigación de tipo experimental, dado que se diseñó, ensambló y puso en funcionamiento un prototipo compuesto por un microcontrolador Arduino Uno, el módulo GPS (como el NEO-6M) y el módulo de transmisión SIM800L. Este sistema fue sometido a pruebas para verificar su funcionamiento, medir parámetros como la precisión y el tiempo de respuesta, y realizar ajustes en la configuración con el fin de optimizar su desempeño.

2.2.2 Población y muestra

Debido a la naturaleza técnica del proyecto, no fue necesario considerar una población ni aplicar un proceso de muestreo.

2.2.3 Recolección de información

Para alcanzar los objetivos de la presente investigación sobre la implementación de un sistema de rastreo satelital en tiempo real para vehículos de emergencia del ECU 911 mediante software de código abierto, se procedió a recopilar y analizar información

relevante proveniente de diversas fuentes bibliográficas. En la Tabla 8 se presentan las preguntas que orientan la descripción y desarrollo del proyecto.

Tabla 8 Tabla de parámetros

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
¿Para qué?	Para mejorar el monitoreo y localización en tiempo real de vehículos de emergencia, optimizando la coordinación operativa del ECU 911.
¿De qué personas u objetos?	De los vehículos seleccionados pertenecientes al ECU 911.
¿Cómo?	Mediante un sistema de rastreo satelital implementado con tecnologías GPS y módulos de comunicación.
¿Con qué?	Con módulos GPS (como el NEO-6M), módulos GSM/GPRS (como el SIM800L) y una plataforma web de código abierto basada en LAMP.
¿Cuándo?	Durante el periodo comprendido entre marzo y julio de 2025.
¿Dónde?	En los vehículos operativos del ECU 911 de la ciudad de Ambato.

2.2.4 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos en esta investigación se desarrollaron de la siguiente manera:

- Se recopiló de forma detallada la información técnica necesaria sobre los módulos GPS y GSM, así como los requisitos de rastreo en tiempo real.
- Se revisó cuidadosamente la información obtenida para garantizar su pertinencia y veracidad.
- Se analizó la base teórica relacionada con los sistemas de localización satelital, comunicación móvil y plataformas de software libre.
- Se seleccionó la información más relevante para la implementación del sistema de rastreo propuesto.
- Se llevaron a cabo pruebas de funcionamiento del sistema en entornos reales, con vehículos de emergencia.

- Finalmente, se examinaron los datos obtenidos durante las pruebas para evaluar el rendimiento del sistema en condiciones reales de operación.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo detalla los resultados obtenidos de la investigación para implementar un sistema de rastreo satelital en tiempo real para vehículos de emergencia del ECU 911, utilizando tecnologías de código abierto. Se presentan los hallazgos relativos al desarrollo del prototipo, su integración hardware y software, y las pruebas de desempeño realizadas en condiciones reales. La discusión subsecuente interpreta estos resultados a la luz de los objetivos de la tesis, analizando el cumplimiento de las metas planteadas, comparando la solución propuesta con enfoques existentes y destacando su contribución potencial para la mejora de la gestión operativa de flotas de emergencia.

3.1 Arquitectura general del Sistema de Rastreo Satelital.

El prototipo del sistema de rastreo satelital destinado a vehículos de emergencia del ECU 911 fue diseñado siguiendo una arquitectura modular, lo que facilita la interoperabilidad entre componentes de hardware y software de código abierto. Esta estructura permite llevar a cabo todo el ciclo funcional del sistema: captura, envío, procesamiento y visualización de datos de geolocalización en tiempo real. En esta sección se expone la estructura lógica del sistema implementado, detallando los componentes principales y su integración funcional, con el fin de cumplir con las exigencias técnicas de un sistema de monitoreo vehicular eficiente y operativo. La visión general de la interrelación de estos componentes se presenta en la Figura 26.

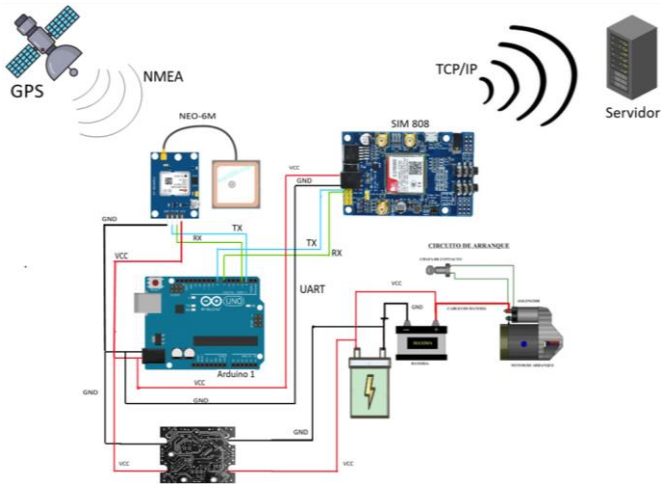


Figura 26 Sistema general de funcionamiento del sistema.

3.2 Selección de componentes para el sistema.

Durante la fase de implementación, se seleccionaron los componentes electrónicos del sistema de rastreo en función de su comportamiento en pruebas reales, su eficiencia energética y su integración práctica con la plataforma Arduino. La selección final respondió a criterios técnicos medibles, como el tiempo de adquisición de señal GPS, estabilidad de conexión GSM, consumo promedio en reposo y durante transmisión, así como facilidad de montaje en un entorno vehicular, como se aprecia en la Figura 27.

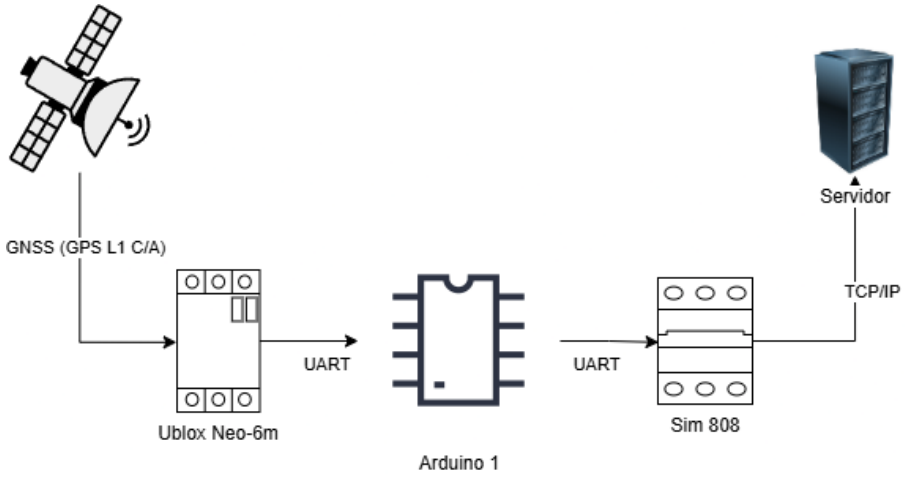


Figura 27 Diagrama de conexión y envío de datos.

3.2.1 Justificación técnica de selección de componentes.

Antes de seleccionar los componentes finales del sistema de rastreo vehicular, se analizaron diversas alternativas disponibles en el mercado nacional e internacional. Los criterios considerados fueron: compatibilidad técnica, precisión, consumo energético, costo y disponibilidad. A continuación, se presentan las tablas comparativas de cada uno de los elementos clave del sistema.

Como resultado del análisis comparativo, los componentes seleccionados ofrecieron el mejor equilibrio entre rendimiento, consumo, facilidad de integración y costo, cumpliendo con los requerimientos funcionales y operativos del sistema de rastreo satelital propuesto.

a. Módulo GPS NEO-6M

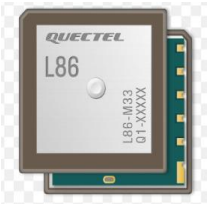
A continuación, se presenta una comparación técnica entre el sistema propuesto y varios dispositivos GPS comerciales disponibles en el mercado internacional, con el objetivo de analizar costos, funcionalidades, red utilizada, precisión y posibilidad de personalización, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9 Comparación con soluciones GPS del mercado.

Característica	TK303F	GL320MG (Queclink)	J16 GPS Tracker	Coban TK303F PRO (IP66)	Sistema propuesto (SIM808)
Gráfico					
Precio (USD)	136.89 (x5)	124.96	343.67	157.86 (x5)	94.30
Red utilizada	2G (GSM/GPRS)	4G Cat M1/NB2 + 2G	4G LTE + 2G	2G GSM	2G GSM/GPRS
Precisión GPS	≈ 5 m	≈ 2.5 m	< 5 m	≈ 5 m	2.5 – 5 m
Autonomía	Baja	Hasta 300 h	Muy limitada	Media (800 mAh)	≈ 83 h (20 000 mAh)
Plataforma web	Sí (cerrada)	Sí (cerrada)	Sí (comercial)	Sí (App + Web)	Sí (propia)
Código abierto	No	No	No	No	Sí
Observaciones destacadas	Económico, funciones básicas + inmovilizador	Alta autonomía, geocercas, resistente, botón SOS	Profesional, funciones remotas, caro	Impermeable, económico, alertas múltiples	Personalizable, plataforma propia, arquitectura abierta

Para la obtención de coordenadas geográficas en tiempo real, se utilizó el módulo GY-GPS6MV2, basado en el chip Ublox NEO-6M. Este componente ofrece buena precisión, rápida adquisición de señal y comunicación sencilla mediante interfaz UART. Incorpora una antena cerámica integrada y una batería de respaldo que permite mantener los parámetros configurados. Su fiabilidad y bajo consumo energético lo hacen adecuado para aplicaciones móviles, como se aprecia en la Tabla 10.

Tabla 10 Comparación entre Módulos GPS.

Característica	NEO-6M (seleccionado)	NEO-M8N	Quectel L86
Gráfico			
Constelaciones soportadas	GPS	GPS, GLONASS, Galileo	GPS, QZSS
Precisión	2.5 m CEP	1.5 m CEP	2.0 m CEP
Frecuencia de actualización	1 Hz (hasta 5 Hz)	1–10 Hz	1 Hz
Voltaje de operación	3.3 – 5 V	3.3 V	3.0 – 4.3 V
Tamaño	25 × 35 mm	18 × 18 mm	16 × 16 mm
Costo aproximado (USD)	10 – 12	20 – 30	15 – 20

b. Módulo GPS/GSM SIM808 EVB-V3.2.4

El módulo SIM808 EVB-V3.2.4 fue elegido como solución integrada de comunicación y posicionamiento, ya que combina en una sola placa un receptor GPS y un módem GSM/GPRS. Esta versión cuenta con conectores SMA para antenas externas, regulador interno de voltaje, y se comunica mediante comandos AT por interfaz UART. Se utilizó una tarjeta SIM activa de la operadora Claro Ecuador, la cual ofreció cobertura adecuada en las zonas urbanas y periurbanas donde se realizaron las pruebas. Este módulo permitió tanto la obtención de coordenadas mediante GPS como el envío de datos hacia el servidor mediante GPRS. Su integración redujo el número de componentes necesarios, facilitando el diseño y montaje del sistema embarcado, como se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11 Comparativa de módulos GSM/GPS.

Característica	SIM808 EVB-V3.2.4 (seleccionado)	SIM800L	SIM7600E (4G)
Gráficos			
GSM	Cuatribanda	Cuatribanda	Cuatribanda
GPS integrado	Sí	No	Sí
Soporte 3G/4G	Si	No	Sí (LTE B1/B3/B8)
Corriente pico	Hasta 500 mA	Hasta 500 mA	Hasta 800 mA
Interfaz	UART	UART	USB/UART
Costo aproximado (USD)	30 – 35	6 – 10	60 – 80

c. Microcontrolador (Arduino Uno R3):

Se optó por el Arduino Uno R3 tras evaluar su desempeño en pruebas de lectura continua de datos GPS y comunicación con el módulo GSM mediante UART. En comparación con alternativas como el NodeMCU o el STM32 Blue Pill, el Arduino Uno demostró una mayor estabilidad en entornos con alimentación variable, además de una curva de configuración más rápida. Durante las pruebas en campo, el consumo promedio medido fue de aproximadamente 50 mA en operación continua, lo cual, combinado con su bajo costo y amplia compatibilidad con librerías de control de módulos SIM y GPS, justificó su inclusión en el diseño final, como se aprecia en la Tabla 12.

Tabla 12 Comparativa de microcontroladores.

Característica	Arduino Uno (seleccionado)	ESP8266 NodeMCU	Raspberry Pi Pico
Gráficos			
Microcontrolador	ATmega328P	ESP8266	RP2040
Frecuencia de reloj	Frecuencia de reloj	Frecuencia de reloj	Frecuencia de reloj
Memoria Flash	32 KB	4 MB	2 MB
Comunicación GSM	UART disponible	UART + WiFi	UART disponible
Facilidad de uso	Muy alta	Alta	Media
Costo aproximado (USD)	10 – 12	6 – 8	5 – 7

d. Selección de la operadora móvil: Claro Ecuador

Para la transmisión de datos mediante el módulo SIM808, se optó por utilizar una tarjeta SIM de la operadora Claro Ecuador, tras realizar una evaluación comparativa con otras operadoras nacionales como Movistar y Tuenti. La decisión se basó principalmente en la cobertura de red 2G y 3G, ya que la conectividad GPRS es fundamental para el funcionamiento del sistema, como se aprecia en la Tabla 13.

A continuación, se presenta una comparación técnica entre operadoras:

Tabla 13 Características técnicas de Operadoras en Ecuador.

Parámetro	Claro Ecuador	Movistar Ecuador	Tuenti Ecuador
	Claro	movistar	tuenti
Bandas 2G	GSM 850 MHz (B5)	GSM 850 MHz (B5)	GSM 850 MHz (B5)
Bandas 3G (UMTS)	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)
Bandas 4G (LTE)	B4 (1700/2100 MHz AWS-1), B28a (700 MHz)	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz AWS-1), B28a (700 MHz)	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz AWS-1), B28a (700 MHz)
Cobertura nacional	Alta en zonas urbanas y rurales, especialmente en la región Sierra y Amazonía	Alta en zonas urbanas; cobertura media en áreas rurales	Cobertura urbana aceptable; limitada en zonas rurales
Compatibilidad con SIM808	Total (soporta GSM 850/900/1800/1900 MHz)	Total (soporta GSM 850/900/1800/1900 MHz)	Total (soporta GSM 850/900/1800/1900 MHz)
Costo chip prepago	USD 3.00	USD 2.50	USD 1.50
Costo promedio por MB	USD 0.01 – 0.02	USD 0.02 – 0.03	USD 0.015 – 0.025
Facilidad de activación	Alta (centros físicos y en línea)	Media (en línea o físicos)	Alta (solo en línea)
Soporte para M2M/IoT	Sí (configuración de APN disponible)	Limitado	No oficial
Estabilidad de red en pruebas	Estable y constante en zonas urbanas y rurales	Con interrupciones ocasionales en zonas rurales	Baja velocidad en zonas urbanas; limitada en rurales

Justificación de la elección de Claro Ecuador:

- ***Compatibilidad técnica:***

El módulo SIM808 EVB-V3.2.4 es compatible con las bandas GSM 850/900/1800/1900 MHz, las cuales son soportadas por Claro Ecuador, asegurando una comunicación efectiva para el sistema de rastreo vehicular.

- ***Cobertura:***

Claro ofrece una cobertura amplia y estable en la región Sierra y Amazonía, incluyendo zonas rurales donde se realizaron pruebas de campo, garantizando la transmisión de datos sin interrupciones.

- ***Soporte para IoT:***

Claro proporciona configuraciones de APN específicas para dispositivos M2M/IoT, facilitando la integración y operación del sistema.

- ***Costos:***

Los costos asociados a la adquisición y uso de chips prepago de Claro son competitivos, lo que contribuye a la viabilidad económica del proyecto.

e. Fuente de alimentación

La selección de la batería externa Tzumi Pocket Juice de 20,000 mAh se fundamentó en su alta capacidad energética, su doble salida USB con corriente combinada de 3.4 A, y su certificación de seguridad UL, lo que garantiza una operación estable y segura en entornos móviles. Durante las pruebas de consumo, se comprobó que podía alimentar el sistema completo (Arduino Uno, GPS y SIM808) de forma continua durante más de 80 horas, superando la autonomía ofrecida por baterías LiPo de menor capacidad. Además, su tecnología QuickChip integrada protege contra sobrecargas, cortocircuitos y picos de corriente, lo cual es especialmente relevante ante los requerimientos energéticos del módulo SIM durante la transmisión GPRS. Su disponibilidad comercial, facilidad de recarga mediante USB y compatibilidad con

múltiples dispositivos justificaron su elección frente a otras soluciones menos versátiles o con menores niveles de protección, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Comparación de baterías recargables.

Característica	Tzumi Pocket Juice 20,000 mAh (seleccionada)	Anker PowerCore 20,100 mAh	Xiaomi Mi Power Bank 3 Pro (20,000 mAh)
Gráfico			
Tipo de celda	Li-Ion de alta densidad	Li-Ion	Li-Poly
Voltaje de salida	5V (USB dual 3.4A total)	5V/4.8A (doble puerto USB)	5V–20V (PD y USB-A)
Capacidad nominal	20,000 mAh	20,100 mAh	20,000 mAh
Dimensiones aproximadas	6.0” x 2.6” x 1.0”	6.6” x 2.4” x 0.9”	6.1” x 2.9” x 0.9”
Peso	1.2 lb (544 g aprox.)	356 g	400 g
Costo aproximado (USD)	15 – 35	45 – 70	80 – 150
Número de puertos USB	2 (USB-A)	2 (USB-A)	2 (USB-A) + 1 USB-C
Tecnología de protección	QuickChip (anticalentamiento y sobrecarga)	PowerIQ + VoltageBoost	Protección contra sobrecarga y cortocircuito
Autonomía esperada (Arduino+GPS)	≈ 83 h	≈ 85 h	≈ 82 h

3.2.2 Plataforma servidor LAMP

El ECU 911 opera con servidores institucionales diseñados para garantizar alta disponibilidad, seguridad de datos y escalabilidad, empleando infraestructuras generalmente basadas en entornos Linux por su estabilidad y eficiencia en tareas críticas. En este contexto, para el desarrollo del presente sistema de rastreo satelital, se optó por implementar una plataforma LAMP (Linux, Apache, MySQL/MariaDB, PHP) debido a su carácter de código abierto, amplia documentación, y compatibilidad con sistemas embebidos. Esta arquitectura permite recibir, almacenar y consultar datos geoespaciales en tiempo real con bajo consumo de recursos, ofreciendo una solución técnica accesible, adaptable y alineada con las necesidades de proyectos públicos que

priorizan la soberanía tecnológica y la sostenibilidad operativa.Para recibir y almacenar los datos enviados por el módulo SIM808 desde la unidad vehicular, se configuró una plataforma web basada en la arquitectura LAMP (Linux, Apache, MariaDB y PHP). Esta elección responde a su naturaleza de código abierto, amplia documentación y compatibilidad con sistemas embebidos de bajo costo.

a. Instalación del servidor LAMP

Con el fin de alojar la plataforma de monitoreo web, se implementó un servidor con sistema operativo AlmaLinux 8, una distribución empresarial basada en RHEL. Esta elección responde a su estabilidad, soporte comunitario y compatibilidad con paquetes del ecosistema LAMP (Linux, Apache, MariaDB y PHP).

- Descargar la imagen ISO desde el sitio oficial: https://almalinux.org
- Crear un medio booteable (USB/DVD) con herramientas como Rufus o Balena Etcher.
- Iniciar el equipo desde el USB y seleccionar Install AlmaLinux 8.
- Elegir idioma, zona horaria y disposición del teclado.
- Seleccionar el disco de instalación y crear particiones automáticamente (o personalizadas si se requiere).
- Establecer una contraseña segura para el usuario root.
- Crear un usuario estándar con permisos de administrador (opcional pero recomendado).
- Finalizar la instalación y reiniciar el equipo.

b. Configuración básica del sistema

- Iniciar sesión como root o con el usuario creado.
- Actualizar el sistema:

```
sudo dnf update -y
```

c. Configurar red y habilitar conexión

- Verificar conectividad a Internet:

```
ping -c 4 google.com
```

- Habilitar y configurar IP si no está activa:

```
nmcli device status
nmcli con up [nombre_conexion]
```

d. Instalar el stack LAMP (Linux, Apache, MariaDB, PHP)

- **Instalar Apache (servidor web):**

```
sudo dnf install httpd -y
sudo systemctl enable httpd
sudo systemctl start httpd
sudo firewall-cmd --permanent --add-service=http
sudo firewall-cmd --reload
```

- **Instalar MariaDB (servidor de base de datos):**

```
sudo dnf install mariadb-server -y
sudo systemctl enable mariadb
sudo systemctl start mariadb
sudo mysql_secure_installation
```

- **Instalar PHP y extensiones necesarias:**

```
sudo dnf install php php-mysqlnd php-cli php-gd php-xml php-
mbstring -y
sudo systemctl restart httpd
```

- **Verificar PHP con un archivo de prueba,** Figura 28**:**

```
sudo nano /var/www/html/info.php
<?php phpinfo(); ?>
```

```
[      @localhost ~]$ php --version
PHP 8.0.30 (cli) (built: Aug  3 2023 17:13:08) ( NTS gcc x86_64 )
Copyright (c) The PHP Group
Zend Engine v4.0.30, Copyright (c) Zend Technologies
    with Zend OPcache v8.0.30, Copyright (c), by Zend Technologies
[      @localhost ~]$
```

Figura 28 Versión de PHP existente en el servidor.

El servidor fue implementado sobre el sistema operativo AlmaLinux 8, por su compatibilidad binaria con Red Hat Enterprise Linux (RHEL) y su enfoque en la estabilidad y seguridad. Se instaló el servidor web Apache 2.4, el motor de bases de datos MariaDB 10.3 y el lenguaje de servidor PHP 7.4, formando una pila tecnológica robusta y eficiente, como se aprecia en la Figura 29.

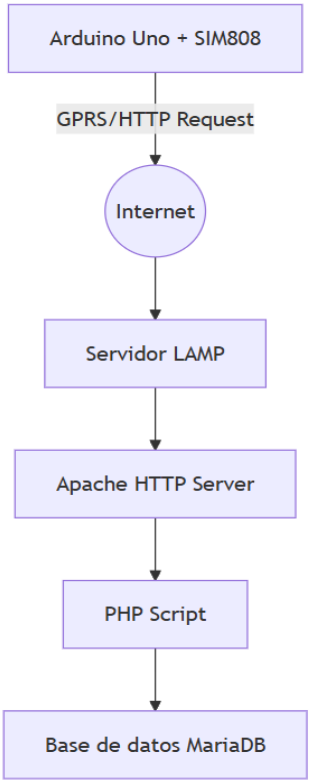


Figura 29 Diagrama de arquitectura cliente-servidor.

La base de datos fue diseñada para almacenar los parámetros clave enviados por el GPS: latitud, longitud, altitud, velocidad, ID del módulo y marca temporal. La estructura se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15 Estructura de la base de datos.

Campo	Tipo SQL	Descripción
id	INT AI	Identificador autoincremental
latitude	DECIMAL(10,6)	Latitud (grados decimales)
longitude	DECIMAL(10,6)	Longitud (grados decimales)
altitude	FLOAT	Altitud (m)
speed	FLOAT	Velocidad (km/h)
timestamp	DATETIME	Marca temporal generada por el GPS
id_modulo	TINYINT	Identificador del dispositivo (1 byte)

3.2.3 Diseño del circuito.

Para el diseño y montaje del sistema de rastreo satelital, se realizó inicialmente una conexión sobre una protoboard con el fin de validar la compatibilidad entre los módulos y facilitar el proceso de prueba y error, como se aprecia en la Figura 30. Posteriormente, una vez verificada la funcionalidad, se replicó el diseño en una configuración más estable y compacta.

La conexión se realizó utilizando cables jumper tipo dupont. El microcontrolador Arduino Uno actuó como unidad central, estableciendo comunicación serial con el módulo GPS y el módulo SIM808 EVB-V3.2.4 a través de pines digitales configurados como UART secundaria mediante la librería SoftwareSerial.

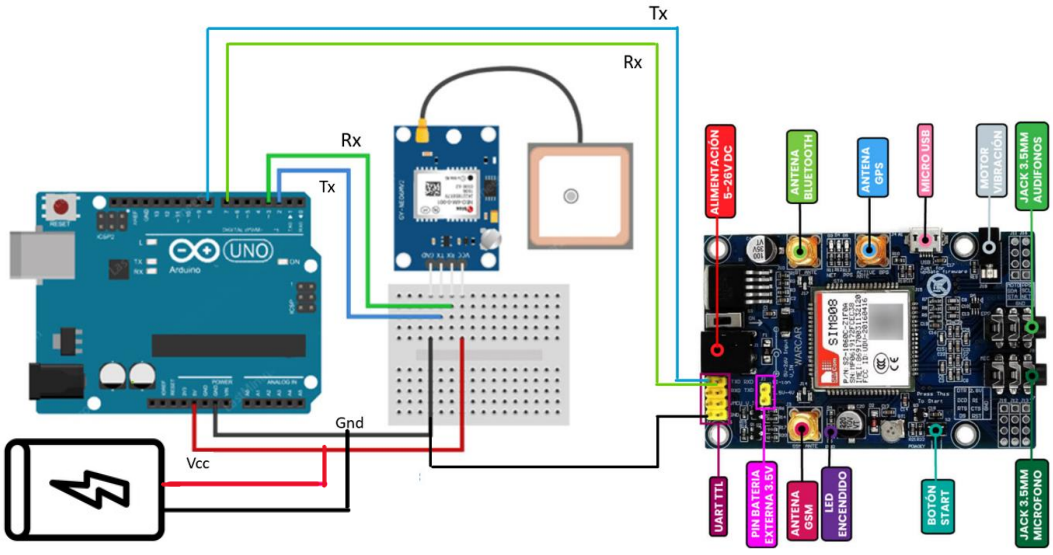


Figura 30 Conexión entre Dispositivos.

a. Construcción del case y regulación de voltaje

Con el fin de proteger los componentes electrónicos y garantizar una operación confiable, se diseñó un case a medida que aloja de forma segura la placa Arduino, el módulo GPS, el SIM808 y una batería recargable, como se muestra en la Figura 31 y Figura 32. Además, se integró una placa de circuito impreso personalizada con un regulador de voltaje que estabiliza la energía suministrada al módulo SIM808, evitando caídas por picos de corriente superiores a 400 mA durante la transmisión de datos.

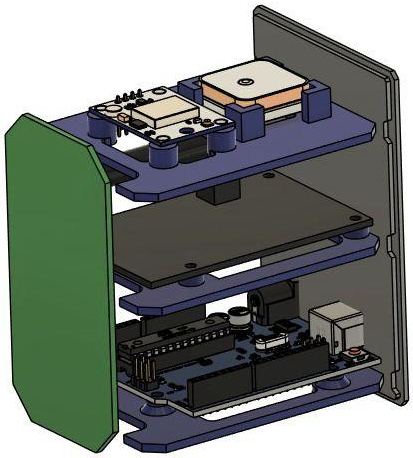


Figura 31 Case del prototipo.



Figura 32 Case del prototipo final.

Para garantizar la estabilidad energética del sistema en condiciones de operación prolongada y entornos móviles, se diseñó una PCB personalizada que integra un módulo regulador de voltaje basado en el convertidor LM2596 step-down (buck). Este diseño permite recibir una entrada directa de 5 V proveniente del power bank y asegurar una salida regulada de 5.00 V ±0.1 V, protegida contra caídas o sobrecargas momentáneas. La necesidad del regulador se justifica por los picos de consumo del módulo SIM808, que puede llegar hasta los 2 A durante la transmisión GPRS, lo cual puede provocar reinicios en el microcontrolador si no se estabiliza adecuadamente la alimentación, como se muestra en la Figura 33.

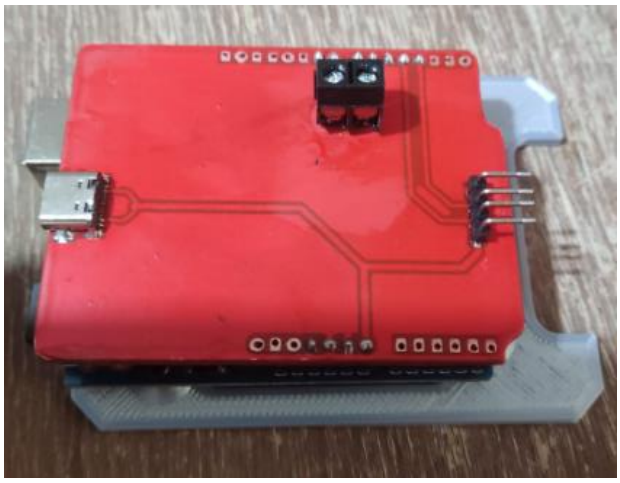


Figura 33 PCB desarrollada para el suministro de energía.

3.3 Montaje del sistema de pruebas

Con el objetivo de validar el funcionamiento del sistema de rastreo, se llevó a cabo el montaje completo de los elementos físicos y la configuración de los componentes de software, integrando todos los módulos descritos anteriormente. El procedimiento se detalla a continuación.

3.3.1 Montaje físico

- Se ensambló la placa Arduino UNO junto con el módulo GPS NEO-6M y el módulo GSM/GPRS SIM808 sobre una estructura personalizada, diseñada para alojar los componentes de manera segura.

- Se conectaron los módulos mediante cables tipo jumper, siguiendo el diagrama de conexiones previamente desarrollado.
- La alimentación fue provista por una batería externa (power bank de 20 000 mAh), conectada al regulador de voltaje de diseño propio, con el fin de garantizar un suministro constante y protegido.
- Se verificó la continuidad eléctrica, el nivel de tensión y la comunicación serial entre módulos utilizando un multímetro y un monitor serial.
- Durante la fase de validación del sistema, se realizó el levantamiento de un servidor local en las instalaciones del ECU 911 con el propósito de ejecutar pruebas controladas de conectividad, almacenamiento y visualización de datos en tiempo real, como se muestra en la Figura 34.



Figura 34 Montaje físico del dispositivo.

3.3.2 Configuración de software y levantamiento del servidor

El montaje lógico del sistema implicó la configuración del microcontrolador, la red de transmisión GPRS y el servidor LAMP, permitiendo una comunicación continua desde el módulo vehicular hasta la interfaz web. Los pasos se describen a continuación:

a. Programación del Arduino UNO:

Se utilizó el entorno Arduino IDE para cargar el código que recoge los datos del GPS (latitud, longitud, altitud, velocidad) y los transmite mediante el módulo SIM808 a través de comandos AT por protocolo HTTP.

b. Configuración de red GPRS:

Se estableció la conexión a la red móvil Claro Ecuador mediante el APN internet.claro.com.ec, habilitando la transmisión de datos hacia el servidor remoto, como se muestra en la Figura 35.

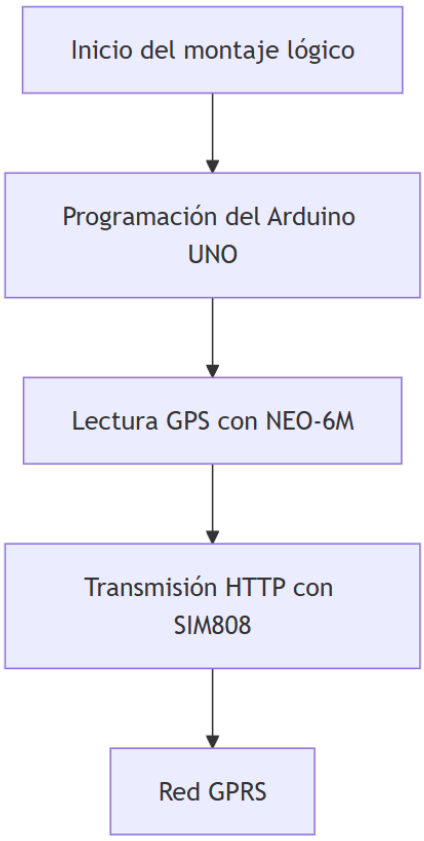


Figura 35 Diagrama del levantamiento del dispositivo.

c. *Levantamiento del servidor LAMP:*

- Se instaló AlmaLinux como sistema base por su estabilidad y compatibilidad con Red Hat.
- Se implementó el stack LAMP (Linux, Apache, MariaDB y PHP) para alojar la base de datos y el sitio web.
- Se creó una base de datos gps_data con una tabla para almacenar los registros enviados por los módulos.
- Se desplegaron los archivos insert_gps_data.php para la inserción de datos y mapa_prueba.php para la visualización de rutas mediante Leaflet.js, como se aprecia en la Figura 36.

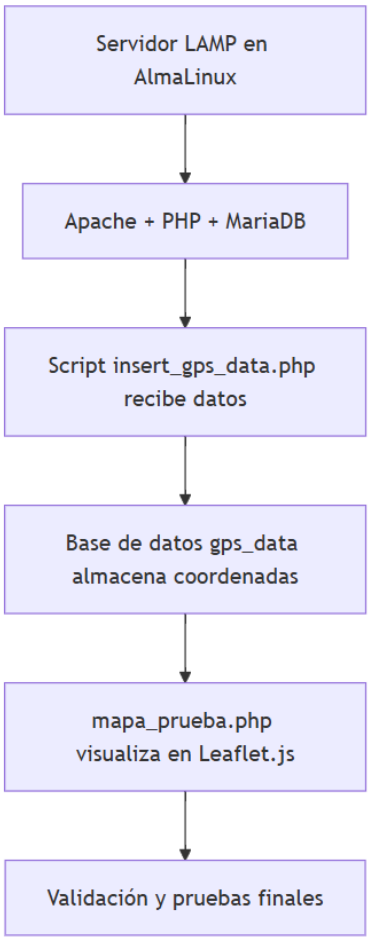


Figura 36 Diagrama del montaje del servidor.

3.3.3 Estructura de la base de datos

La base de datos fue implementada utilizando el sistema de gestión **MariaDB**, una alternativa de código abierto compatible con MySQL, seleccionada por su estabilidad, rendimiento y soporte en entornos LAMP. El diseño se orientó a mantener una estructura simple pero eficiente para almacenar los datos de localización enviados por los módulos SIM808 en tiempo real.

Se definió una única tabla denominada gps_data, cuya estructura permite registrar cada evento de geolocalización con precisión, asociando los datos clave del sistema: coordenadas geográficas, altitud, velocidad, marca temporal (timestamp) y el identificador del módulo transmisor. Esta organización garantiza la trazabilidad de los vehículos monitoreados, facilitando tanto las consultas en tiempo real como el análisis posterior de recorridos, como se aprecia en la Tabla 16.

Tabla 16 Estructura de la tabla gps_data.

Campo	Tipo de dato	Descripción
id	INT (PK, AI)	Identificador único de cada registro.
latitude	FLOAT	Coordenada de latitud obtenida desde el GPS.
longitude	FLOAT	Coordenada de longitud obtenida desde el GPS.
altitude	FLOAT	Altitud sobre el nivel del mar, en metros.
speed	FLOAT	Velocidad registrada en km/h.
timestamp	DATETIME	Fecha y hora exacta del registro recibido.
id_modulo	INT	ID del módulo que transmitió los datos (para múltiples dispositivos).

Se utilizó FLOAT para las coordenadas por su capacidad de almacenar valores decimales con precisión. El campo timestamp permite ordenar los registros cronológicamente y ejecutar filtros temporales, lo cual es esencial para generar rutas o informes históricos.

3.1.2. Procesamiento de Datos y Almacenamiento en Servidor.

Una vez que el prototipo vehicular transmite la información de ubicación mediante mensajes SMS, esta es recibida y procesada en un servidor central configurado con una pila LAMP (Linux AlmaLinux, Apache HTTP Server, MariaDB y PHP). El proceso de recepción y almacenamiento de datos se inicia con la llegada del SMS al servidor, donde un componente de software (ej. un módem GSM conectado al servidor o una integración con un gateway SMS API) captura el contenido del mensaje. Posteriormente, un script desarrollado en PHP es el encargado de parsear la cadena de texto del SMS, extrayendo la latitud, longitud, altitud, velocidad y el timestamp del evento. La secuencia completa del flujo de datos, desde la recepción del SMS hasta la inserción en la base de datos.

a. Fragmento esencial del firmware en Arduino (envío GPRS GET con SIM808)

Este bloque muestra cómo se arma la URL y se envía mediante comandos AT al servidor con los datos GPS, como se muestra en la Figura 37. Es el núcleo del proceso de transmisión GPRS.

```
String url = "http://181.112.6.3/insert_gps_data.php";
url += "?latitude=" + String(lat, 6);
url += "&longitude=" + String(lon, 6);
url += "&altitude=" + String(alt, 2);
url += "&speed=" + String(vel, 2);
url += "&timestamp=" + timestampStr;
url += "&id_modulo=" + String(ID_MODULO);

sendAT("AT+SAPBR=1,1");
sendAT("AT+HTTPINIT");
sendAT("AT+HTTPPARA=\"CID\",1");
sendAT("AT+HTTPPARA=\"URL\",\"" + url + "\"");
sendAT("AT+HTTPACTION=0");  // Método GET
```

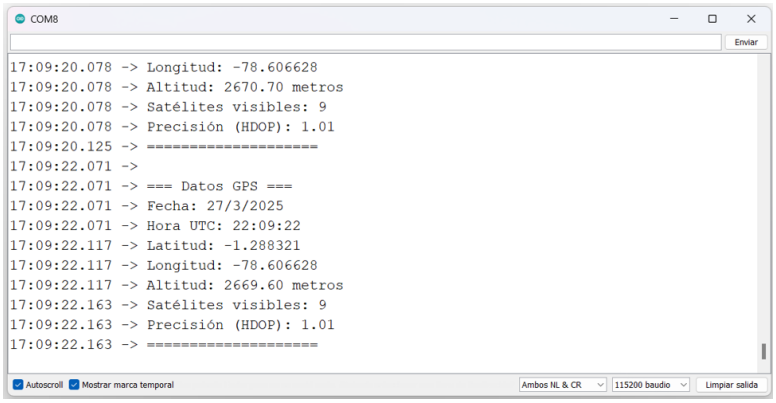


Figura 37 Visualización de la adquisición de datos

b. Conexión a la base de datos. (Por tema de seguridad de ocultan las credenciales)

```
$servername = "**********";
$username   = "**********";
$password   = "**********";
$dbname     = "gps_data";
```

*c. API de recepción (*insert_gps_data.php*)*

```
http://<IP_PUBLICA>/insert_gps_data.php?latitude=...&longitude=...&a
ltitude=...&speed=...&timestamp=YYYY-MM-DD HH:MM:SS&id_modulo=N
```

El siguiente script PHP atiende la petición GET, sanitiza los parámetros y los inserta en la base de datos:

```
$latitude  = filter_input(INPUT_GET, 'latitude',
FILTER_VALIDATE_FLOAT);
$longitude = filter_input(INPUT_GET, 'longitude',
FILTER_VALIDATE_FLOAT);
$timestamp = $conn->real_escape_string($_GET['timestamp'] ?? null);

$sql = "INSERT INTO gps_data (latitude, longitude, timestamp,
id_modulo)
        VALUES (?, ?, ?, ?)";
$stmt = $conn->prepare($sql);
$stmt->bind_param('ddsi', $latitude, $longitude, $timestamp,
$id_modulo);
$stmt->execute();
```

Este enfoque con sentencias preparadas (prepare()) mitiga ataques de inyección SQL y mejora la seguridad del sistema. Para entornos de producción se recomienda servir este script bajo HTTPS y restringir por IP o token las peticiones externas.

d. Fragmento esencial de insert_gps_data.php

Este fragmento refleja cómo el script PHP recibe parámetros por GET y los almacena directamente en la base de datos. Es importante destacar que en producción se recomienda usar validación y sentencias preparadas.

```
$latitude = $_GET['latitude'];
$longitude = $_GET['longitude'];
$timestamp = $_GET['timestamp'];
$id_modulo = $_GET['id_modulo'];

$sql = "INSERT INTO gps_data (latitude, longitude, timestamp,
id_modulo)
```

```
        VALUES ('$latitude', '$longitude', '$timestamp',
'$id_modulo')";
$conn->query($sql);
```

3.3.4 Visualización en tiempo real de los parámetros de monitoreo

Con el objetivo de mostrar la ubicación actual de las unidades móviles rastreadas, se implementó una interfaz web utilizando Leaflet.js, una biblioteca de código abierto para mapas interactivos. Esta decisión se basó en la facilidad de uso, compatibilidad con OpenStreetMap, y en evitar el uso de claves de API como ocurre con Google Maps.

El archivo `mapa_prueba.php` realiza una consulta al último registro disponible en la base de datos y carga un mapa con un marcador dinámico basado en las coordenadas obtenidas. La interfaz se refresca automáticamente cada cierto intervalo (configurable), lo que permite realizar un seguimiento prácticamente en tiempo real.

El archivo mapa_prueba.php se encarga de:

- Conectarse a la base de datos mediante db_connect.php.
- Consultar el registro más reciente de la tabla gps_data.
- Extraer las coordenadas latitud y longitud, así como otros datos (velocidad, ID del módulo).
- Dibujar un marcador sobre el mapa, centrado en la última ubicación recibida.

Este sistema permite a los operadores visualizar la posición actual de una unidad móvil directamente desde el navegador, sin necesidad de recargar manualmente la página.

Fragmento representativo del código Leaflet:

```
var mapa = L.map('mapa').setView([<?= $latitud ?>, <?= $longitud
?>], 15);
L.tileLayer('https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png').ad
dTo(mapa);
L.marker([<?= $latitud ?>, <?= $longitud ?>]).addTo(mapa)
  .bindPopup('Última ubicación registrada')

  .openPopup();
```

Esta interfaz permite a los operadores del ECU-911 conocer con precisión y facilidad la ubicación actual de una unidad en campo, con una visualización clara y liviana.

A continuación, se muestra el fragmento esencial del código responsable de cargar el marcador dinámicamente:

```
$sql = \"SELECT latitude, longitude FROM gps_data ORDER BY id DESC
LIMIT 1\";
$result = $conn->query($sql);
$row = $result->fetch_assoc();
```

3.3.5 Latencia de transmisión

El retardo entre la adquisición del dato GPS y su inserción efectiva en la base de datos se evaluó comparando la marca temporal generada por el módulo GPS (timestamp) con la hora de recepción registrada automáticamente por el servidor MariaDB. Este retardo representa la latencia de transmisión a través de la red GPRS y el procesamiento interno del sistema.

Durante las pruebas de campo, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Retardo medio**: 2.8 segundos
- **Retardo máximo**: 6.3 segundos
- **Retardo mínimo**: 1.4 segundos

Estos valores de latencia son coherentes con las características del entorno GPRS y se ven influenciados por la lógica de control implementada en el microcontrolador. En el código cargado en el Arduino UNO, se establece un delay explícito entre cada comando AT enviado al módulo SIM808 (usualmente de 2000 a 6000 ms), con el objetivo de evitar errores por saturación de comandos o respuestas incompletas, algo común en módulos GSM si no se respeta su tiempo de procesamiento interno.

Además, la instrucción delay(60000); al final del bucle principal genera una pausa de 1 minuto entre cada iteración, lo que si bien no impacta en la latencia de un solo paquete, sí marca el intervalo de actualización entre datos consecutivos.

En conjunto, el sistema demuestra una latencia aceptable para aplicaciones de rastreo vehicular no críticas, manteniéndose por debajo de los 7 segundos incluso en condiciones de señal celular débil.

Las zonas con mayor latencia coincidieron con tramos alejados de zonas urbanas (Pelileo, sector San Jorge) y con niveles bajos de señal GSM (valores CSQ menores a 10).

3.3.6 Cobertura de red GSM

Durante las pruebas se ejecutó periódicamente el comando AT+CSQ para registrar la calidad de la señal celular, como se muestra en la Tabla 17. Este valor oscila entre 0 y 31 y se puede convertir a dBm según la fórmula número 3:

$$\boldsymbol{dBm \approx -113 + 2 * CSQ} \quad \textbf{(3)}$$

Tabla 17 Cobertura celular estimada por valores CSQ.

Ubicación aprox.	CSQ	Nivel estimado (dBm)	Calidad
Centro de Ambato	20	-73 dBm	Excelente
Zona Pelileo	10	-93 dBm	Baja
Baños entrada sur	13	-87 dBm	Aceptable
Salida Ambato norte	17	-79 dBm	Buena

3.3.7 Consumo energético

Se midió el consumo eléctrico del prototipo completo alimentado a 5 V con un multímetro digital. Los valores promedio registrados fueron 5.098 V y 0.124 A, lo que implica una potencia de 0.633 W. La Tabla 18 resume la distribución estimada de corriente por módulo y el cálculo actualizado de autonomía.

Tabla 18 Distribución de corriente y autonomía del sistema.

Componente	Corriente típica (mA)	Observaciones
Arduino Uno R3	35 mA	Procesador + LED de encendido
GPS NEO-6M	29 mA	Seguimiento continuo a 1 Hz
SIM808 EVB-v3.2.4	60 mA promedio 370 mA pico	Sesión GPRS activa; picos <2 s al transmitir
Total medido	124 mA	Corriente promedio del sistema

Cálculo de autonomía del sistema, Tabla 19.

Datos medidos

Tabla 19 Cálculo de autonomía del sistema.

Parámetro	Valor
Tensión de salida del power bank	5 V
Capacidad nominal	20 000 mAh (20 Ah)
Eficiencia estimada del power bank	90 %
Corriente promedio del sistema	0.124 A
Potencia promedio del sistema	0.633 W

a. Capacidad útil de la power-bank

Especificación comercial: **20 000 mAh @ 5 V**

Eficiencia interna (circuito boost + pérdidas): **≈ 90 %**

Capacidad útil ≈ 20 000 mAh × 0,90 = **18 000 mAh**

b. Autonomía teórica

Se estimó la autonomía del sistema utilizando una batería externa (power bank) de 20 000 mAh. Considerando una eficiencia del 90 % en la conversión y un consumo promedio de 215 mA, la capacidad útil es de aproximadamente 18 000 mAh. Por tanto, la duración estimada del sistema es, ecuación 4:

- ***Energía útil disponible en la batería***

$$E_{\text{útil}=Capacidad\ nominal*\ V_{salida*Eficiencia}=20\ Ah*5V*0.90=90\ W} \quad (4)$$

- ***Autonomía en horas***

$$Autonomía\ (h) = \frac{E_{\text{útil}}}{P_{consumo}} = \frac{90\ Wh}{0.633W} \approx 142.1h$$

- ***Conversión a días***

$$\frac{142.1\ h}{24\ h} \approx 5.9\ días$$

Durante las pruebas de autonomía, se empleó una batería externa Tzumi Pocket Juice de 20,000 mAh, la cual demostró ser adecuada para suministrar energía continua al sistema completo (Arduino Uno, módulo GPS NEO-6M y SIM808). Con una eficiencia estimada del 90 %, se obtuvo una energía útil aproximada de 90 Wh. Dado el consumo promedio del sistema, medido en laboratorio como 0.633 W, se calculó una autonomía teórica de aproximadamente 142 horas (casi 6 días de operación continua) sin necesidad de recarga. Este resultado confirma que la capacidad de la power bank es suficiente para cubrir aplicaciones prolongadas de rastreo vehicular en campo, superando ampliamente el umbral mínimo de 72 horas requerido para misiones de monitoreo extendidas.

3.4 Funcionamiento de la plataforma web

La plataforma de monitoreo implementada no solo recibe los datos enviados desde los módulos GPS mediante GPRS, sino que también permite a operadores o usuarios visualizar la ubicación actual de la posición del módulo integrado en la unidad vehicular a monitorear. Esto hace que se pueda acceder al historial de recorridos mediante una interfaz web responsiva, como se muestra en la Figura 38 y Figura 39.

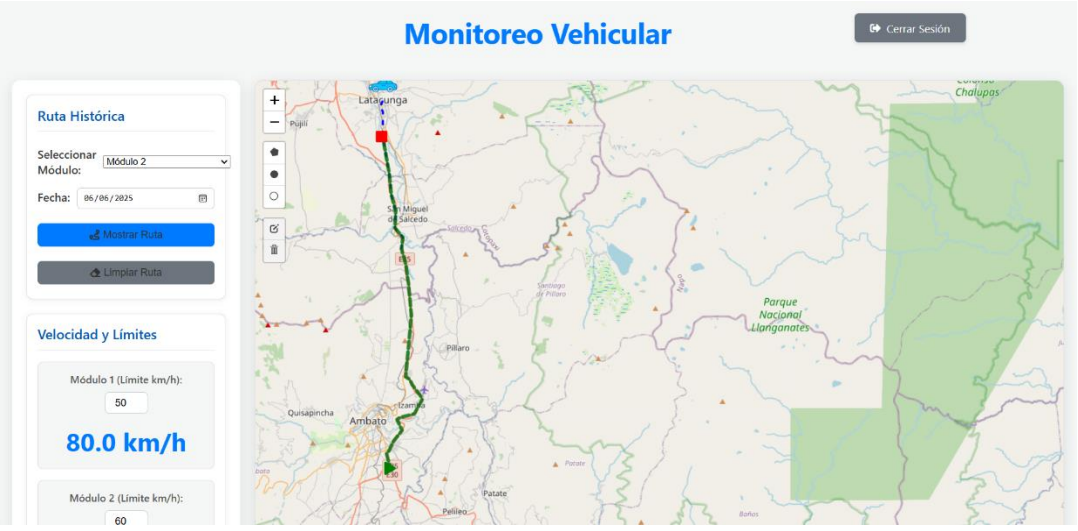


Figura 38 Ruta Ambato-Latacunga.

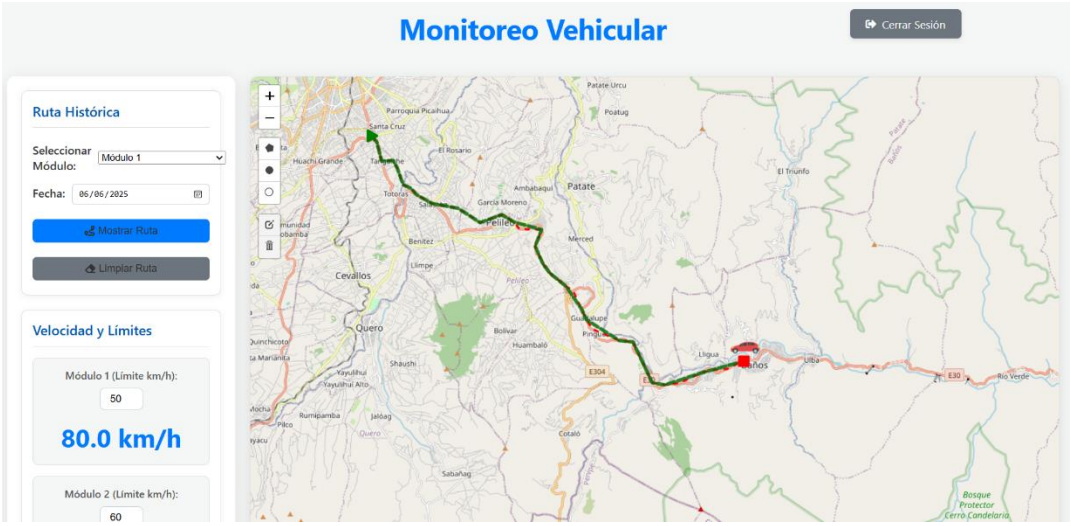


Figura 39 Ruta Ambato – Baños

3.4.1 Proceso de acceso e inicio de sesión

El acceso al panel puede estar restringido a usuarios autenticados (dependiendo del diseño final). El usuario ingresa sus credenciales, y el sistema verifica la validez mediante un script PHP comparando los registros almacenados, como se muestra en la Figura 40, Figura 41, Figura 40 y Figura 41.

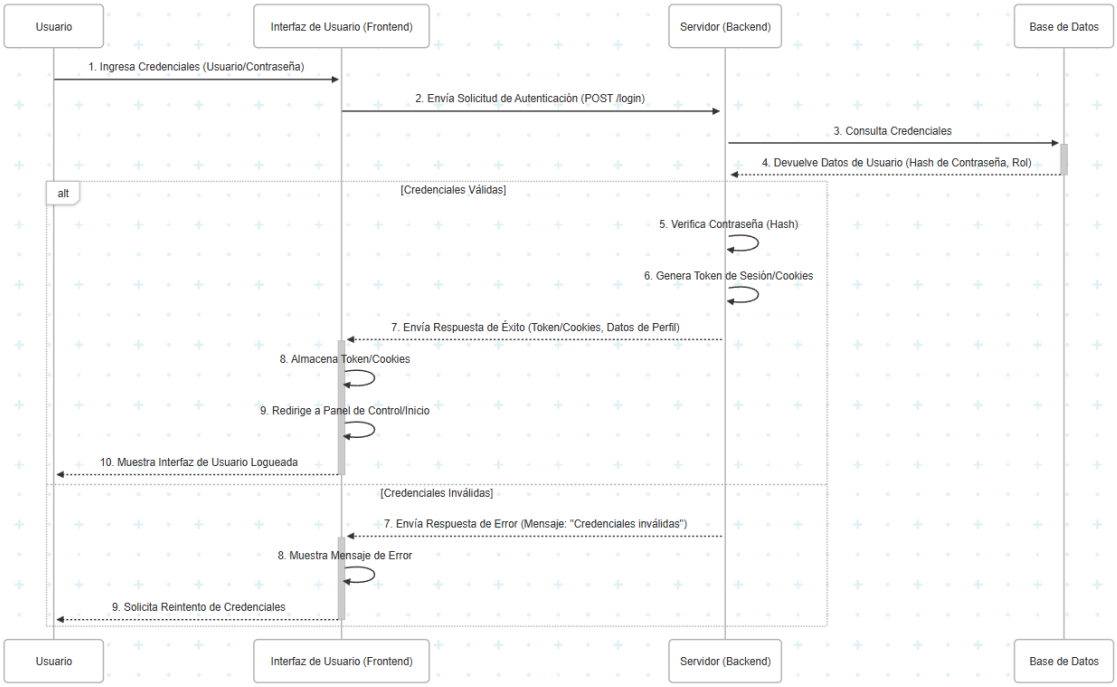


Figura 40 Diagrama de flujo de autenticación básica en la plataforma web



Figura 41 Interfaz de Inicio de sesión

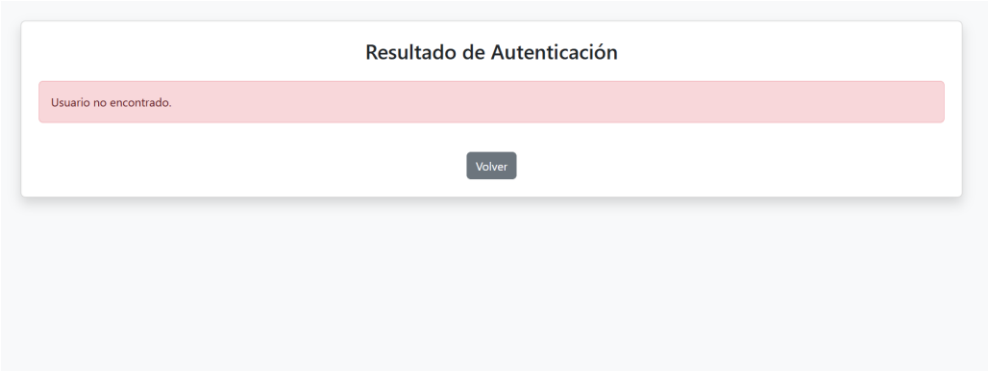


Figura 42 Interfaz de Inicio de sesión: Credenciales incorrectas



Figura 43 Interfaz de Inicio de sesion: Credenciales incorrectas

3.4.2 Consulta de datos en tiempo real

Una vez autenticado, el usuario accede a una interfaz que consulta los registros más recientes desde la tabla gps_data. La consulta se realiza mediante una instrucción SQL que retorna el último punto registrado, el cual es interpretado por un script PHP y mostrado en un mapa interactivo utilizando Leaflet.js, como se muestra en la Figura 44.

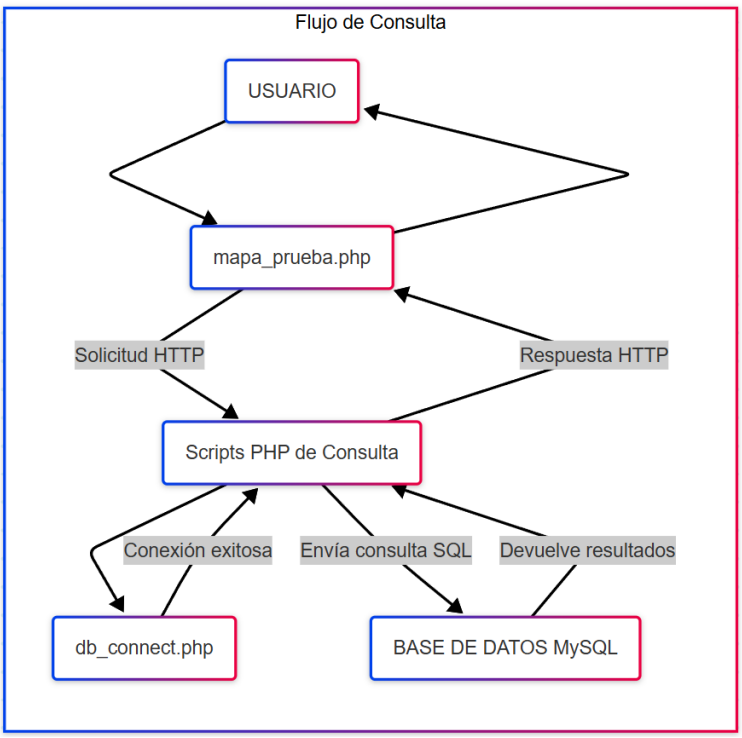


Figura 44 Diagrama de etapa de consulta de datos

3.4.3 Interacción en la plataforma web

El sistema de monitoreo vehicular ofrece una interfaz web dinámica (mapa_prueba.php), que permite a usuarios autenticados interactuar con los datos de rastreo mediante diferentes herramientas visuales y consultas. A continuación, se detallan las funcionalidades implementadas en la plataforma:

a. Control de acceso con roles

El sistema realiza una autenticación de usuarios mediante sesiones PHP y permite distinguir el tipo de usuario (administrador o estándar). Esta verificación se realiza

contra la base de datos en la tabla `usuarios`, limitando el acceso a funciones avanzadas para quienes no tengan privilegios administrativos.

b. Visualización del mapa en tiempo real

Utilizando la librería Leaflet.js, se despliega un mapa interactivo que permite observar en tiempo real la ubicación de los vehículos rastreados. La interfaz es responsiva, con diseño adaptativo a dispositivos móviles.

c. Filtro por ID de módulo y rango de fechas

El panel lateral permite al usuario seleccionar un módulo específico (por ejemplo, vehículo 1 o 2) y un rango de fechas para consultar las rutas realizadas. Esto habilita un análisis detallado del historial de recorrido por unidad y periodo.

d. Visualización de datos tabulares

Además del mapa, los datos también se muestran en forma de tabla. Se incluyen campos como latitud, longitud, altitud, velocidad, fecha y hora. Esta tabla permite exportación o filtrado adicional en análisis posteriores, como se muestra en la Figura 45 y Figura 46.

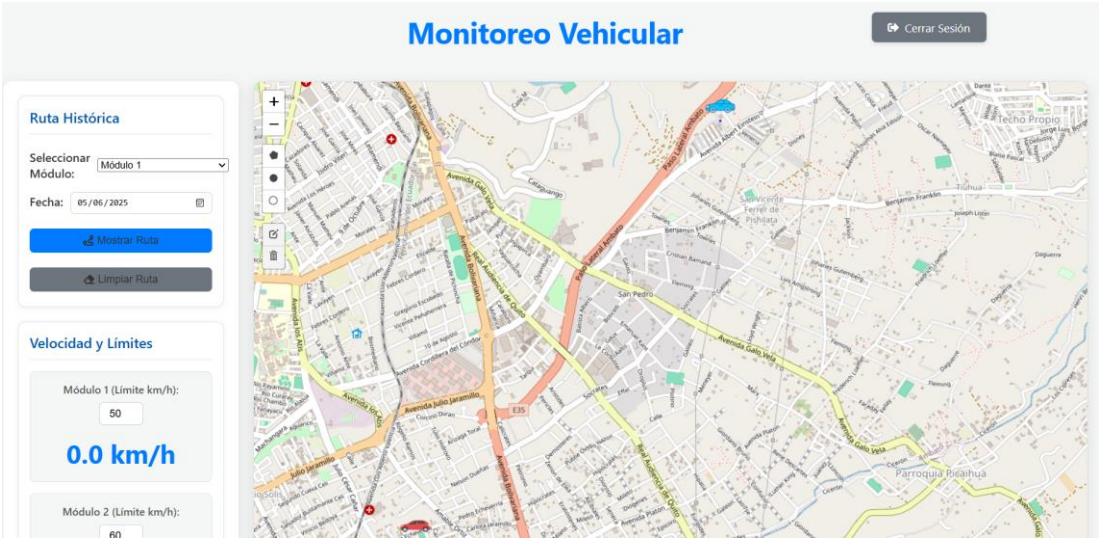


Figura 45 Vista del mapa en tiempo real con Leaflet.js

Opciones extra

	id	latitude	longitude	altitude	speed	timestamp	id_modulo
Editar Copiar Borrar	1	-1.279778	-78.615982	0.000000	0.04	2025-06-08 22:16:19	1
Editar Copiar Borrar	2	-1.255322	-78.598122	0.000000	0.04	2025-06-08 22:20:28	2
Editar Copiar Borrar	3	-1.279777	-78.615921	0.000000	0.07	2025-06-08 22:26:35	1
Editar Copiar Borrar	4	-1.279791	-78.615936	0.000000	0.07	2025-06-08 22:27:58	1
Editar Copiar Borrar	5	-1.279803	-78.615921	0.000000	0.02	2025-06-08 22:29:21	1
Editar Copiar Borrar	6	-1.279793	-78.615944	0.000000	0.04	2025-06-08 22:30:44	1
Editar Copiar Borrar	7	-1.279779	-78.615944	0.000000	0.06	2025-06-08 22:32:07	1
Editar Copiar Borrar	8	-1.279776	-78.615936	0.000000	0.00	2025-06-08 22:33:30	1

Figura 46 Datos recibidos desde los módulos GPS

Estos datos representan registros obtenidos en tiempo real desde los módulos GPS instalados en dos vehículos diferentes (ID Módulo 1 y 2). Cada fila corresponde a una muestra de ubicación que incluye las coordenadas geográficas, la altitud, la velocidad del vehículo en el momento de la lectura, el momento exacto (timestamp) y el identificador del módulo GPS.

e. Diagrama de flujo de uso, Figura 47.

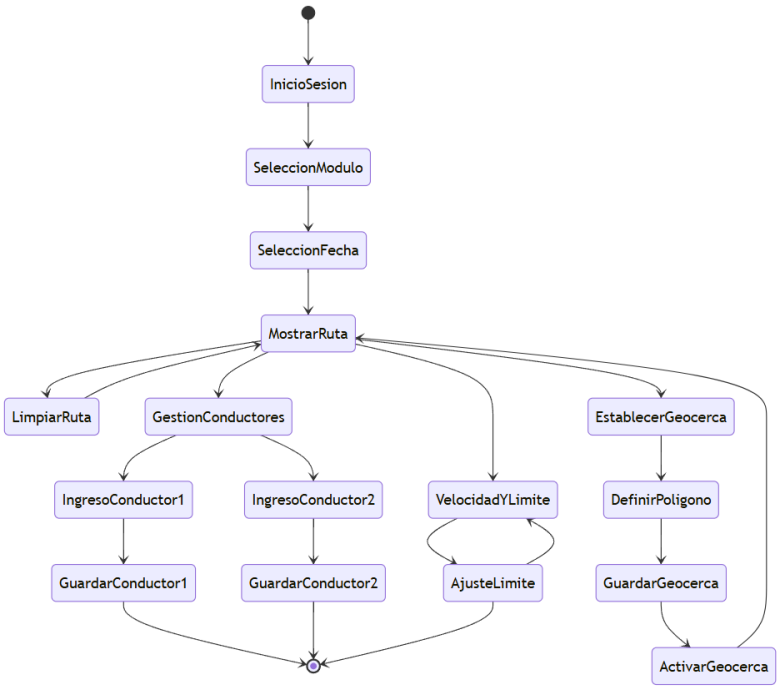


Figura 47 Diagrama de secuencia acciones que se pueden realizar en la plataforma web

- ***Visualización de Ruta Histórica***

Permite al usuario elegir un módulo y una fecha, solicitar los puntos almacenados y dibujar la trayectoria en Leaflet, como se muestra en la Figura 48.

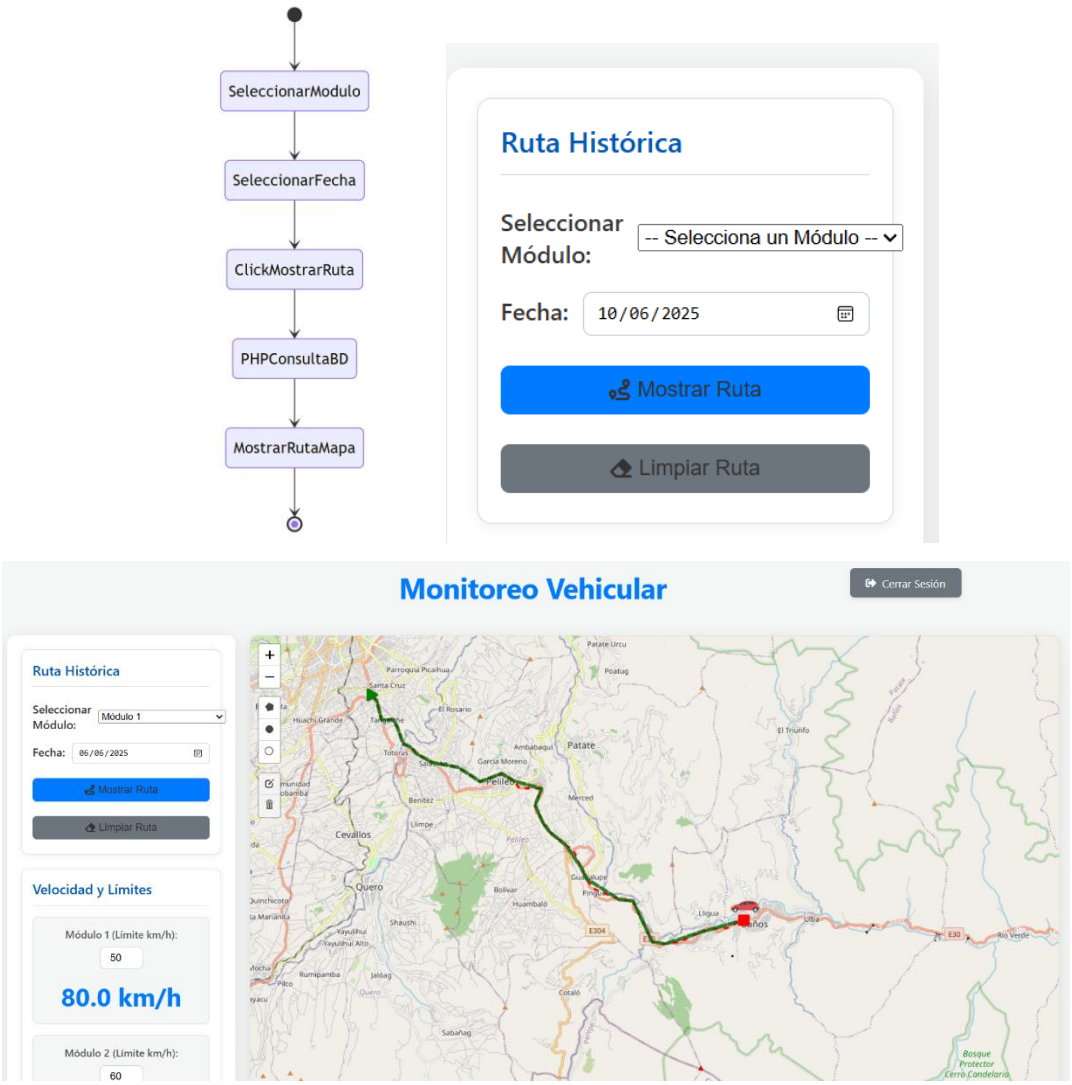


Figura 48 Diagrama de la visualización de la ruta histórica

- Gestión de Conductores

Cada módulo del sistema de rastreo satelital está vinculado a un vehículo específico mediante identificadores administrativos clave, como el nombre de la unidad y su número de placa. Esta asociación es fundamental para mantener un control

centralizado y eficiente del parque vehicular, especialmente en aplicaciones críticas como la gestión de flotas de emergencia, como se aprecia en la Figura 49.

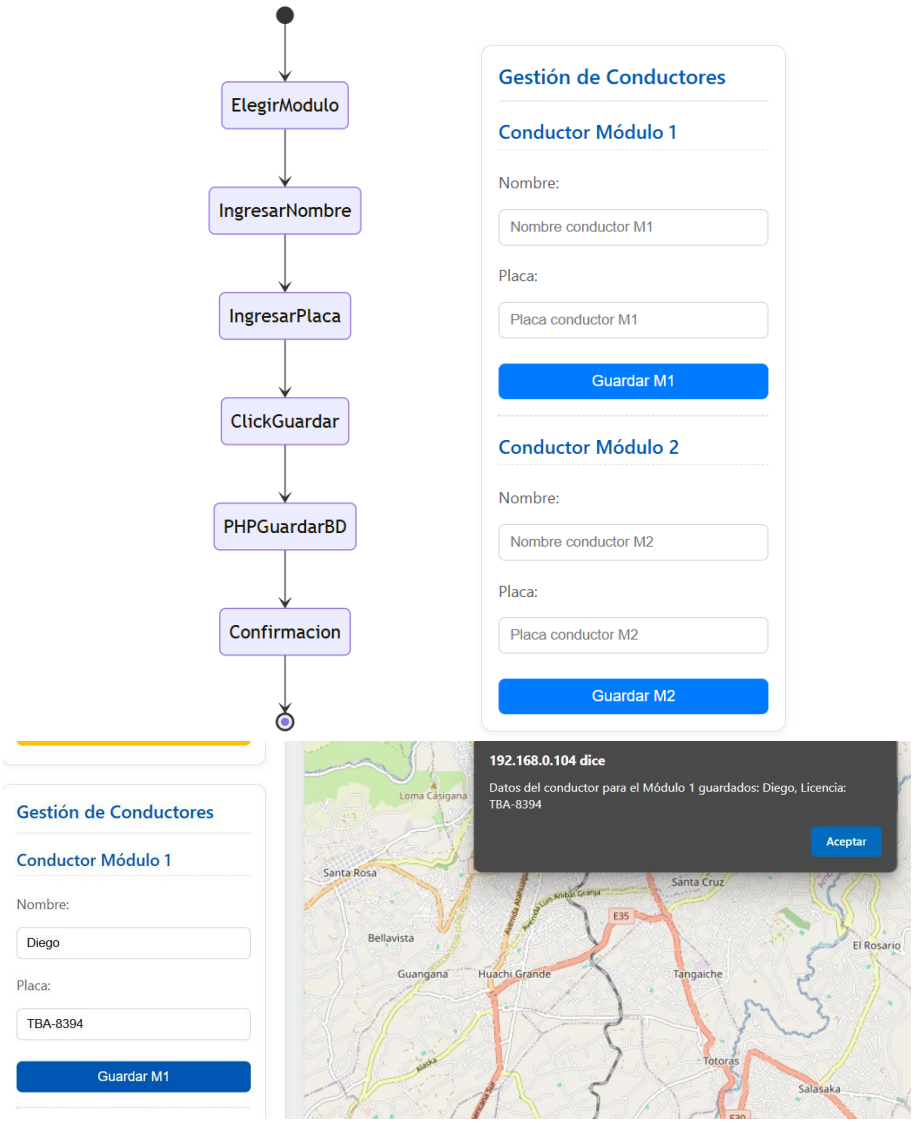


Figura 49 Diagrama de selección de conductor

- ***Ajuste de Límite de Velocidad***

Configura el umbral de velocidad por módulo y compara el valor medido en tiempo real con el límite establecido, como se muestra en la Figura 50.

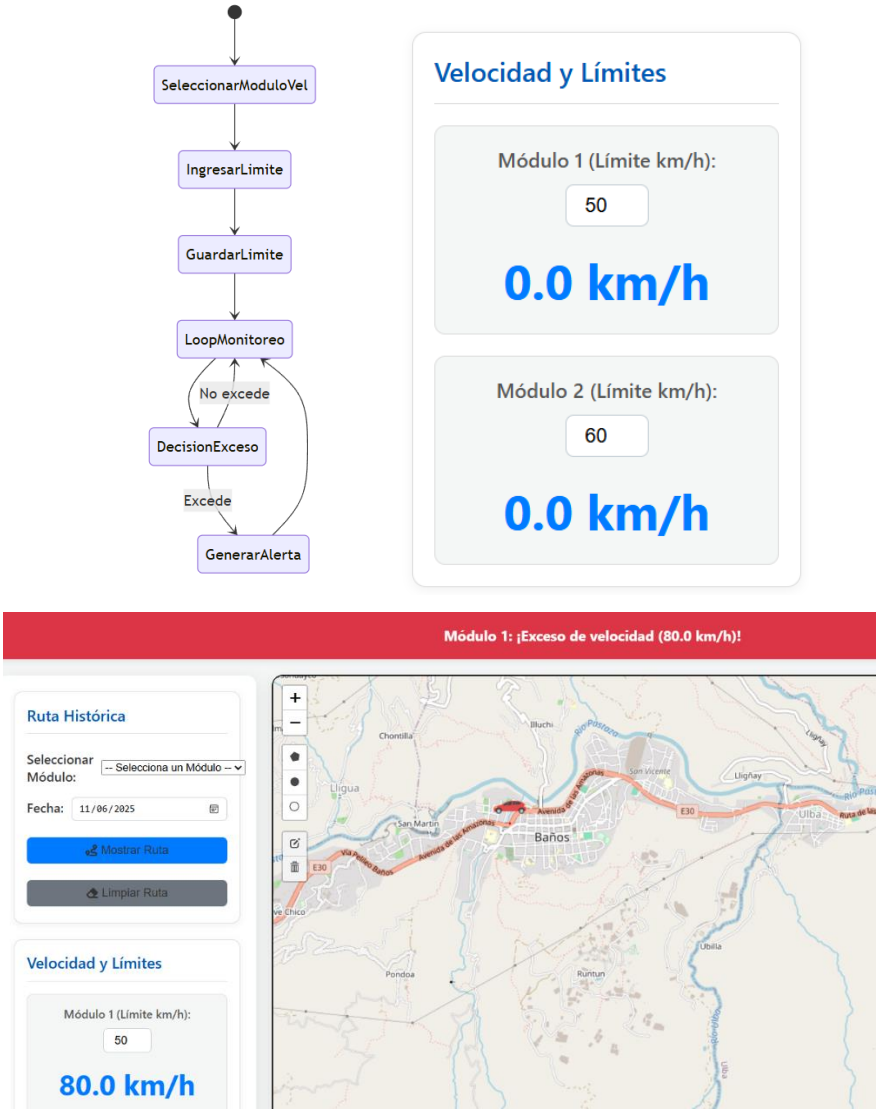


Figura 50 Ajuste de Límite de Velocidad

- ***Controles y Seguimiento en Vivo***

Habilita el seguimiento continuo del último punto GPS y actualiza el mapa de forma periódica, como se aprecia en la Figura 51.

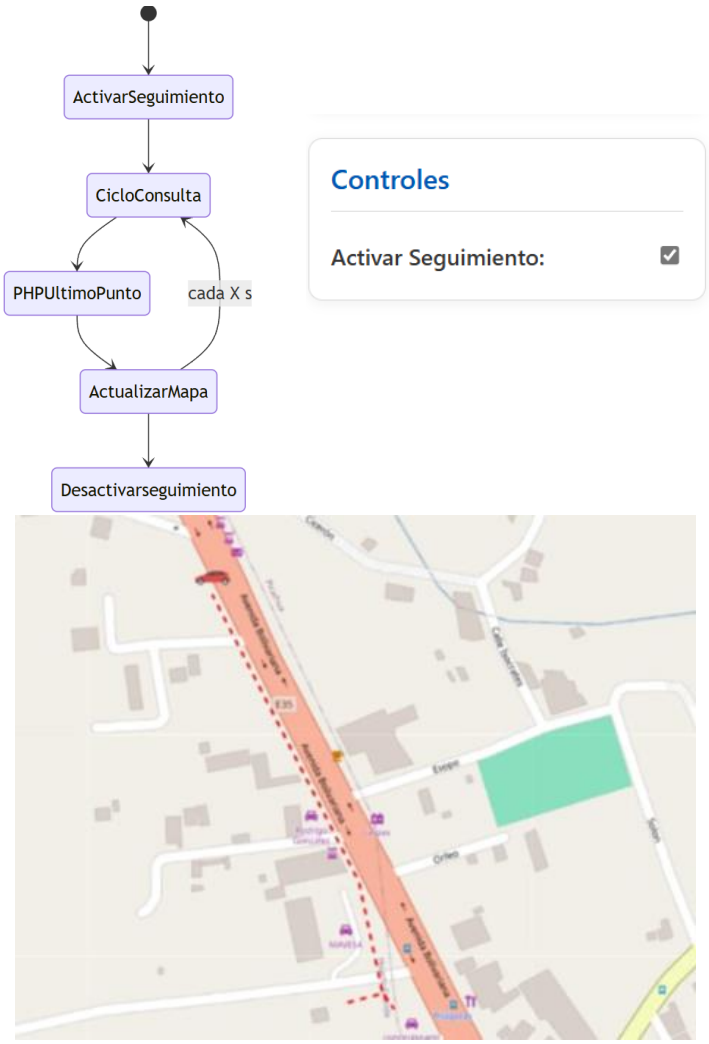


Figura 51 Diagrama de activar/desactivar seguimiento

- ***Escoger Geocerca***

El usuario decide si delimita por círculo o polígono, como se muestra en la Figura 52 y Figura 53.



Figura 52 Diagrama de Geocerca

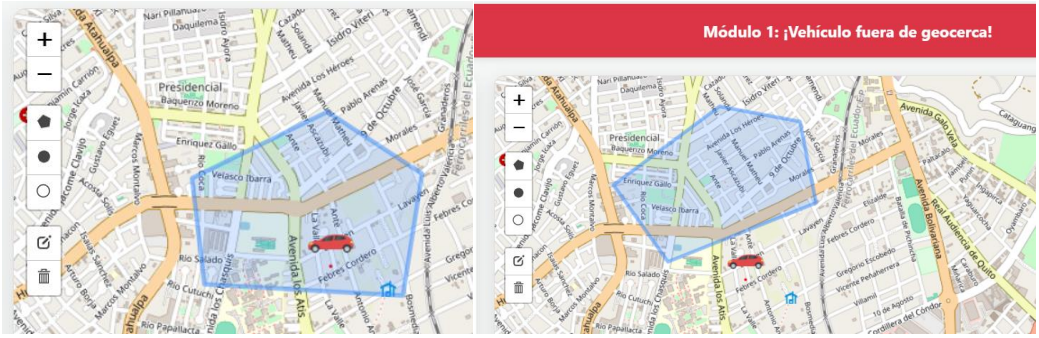


Figura 53 Configuración de la Geocerca.

3.5 Comparación técnica con otras soluciones de rastreo

Para justificar la elección de los componentes implementados, se presenta una tabla comparativa entre el sistema desarrollado y otras soluciones basadas en tecnologías similares o comerciales. Se evaluaron criterios como precisión, latencia, cobertura, costo y tipo de red, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20 Comparación técnica de sistemas de rastreo satelital

Sistema	Costo (USD)	Precisión (m)	Latencia (s)	Tecnología	Cobertura	Comentario
NEO-6M + SIM808 (este proyecto)	≈ 30	2.5 – 5	2 – 6	GPS + GSM (2G)	Nacional 2G	Económico y funcional
NEO-M8N + SIM7600	≈ 60	1.5 – 2.5	1 – 3	GNSS + LTE (4G)	Nacional 4G	Mayor precisión y velocidad
AVL comercial (ECU 911)	> 200	< 1	< 1	GPS + 4G + backend	Nacional 4G	Alto costo, robustez institucional
LoRa + NEO-M8N (investigación)	≈ 45	1.5 – 2.5	> 10	GNSS + LoRa	Áreas con gateway	Limitado a red privada LoRa

El sistema implementado en este proyecto logra un equilibrio entre funcionalidad, precisión y bajo costo, lo que lo hace especialmente adecuado para instituciones de respuesta a emergencias que requieren monitoreo constante con restricciones presupuestarias.

A pesar del cierre progresivo de redes 2G en algunos países, Ecuador mantiene aún cobertura GSM nacional, siendo Claro la operadora con mayor disponibilidad en zonas rurales. Esto permite que el SIM808 funcione de manera estable, sin necesidad de migrar a tecnologías LTE, como se muestra en la Figura 54.

Desde el punto de vista energético, el NEO-6M y el SIM808 presentan consumos moderados. El SIM808 alcanza picos de 500 mA solo durante transmisiones breves, lo que permite operar con fuentes portátiles por varias horas. Por el contrario, módulos como el SIM7600 requieren alimentación continua más robusta (≥1.2 A), lo que limita su uso con baterías pequeñas.

Además, el sistema fue construido bajo arquitectura abierta con Arduino, lo que facilita su integración con sensores, plataformas web o incluso migración a tecnologías futuras como LoRa o NB-IoT.

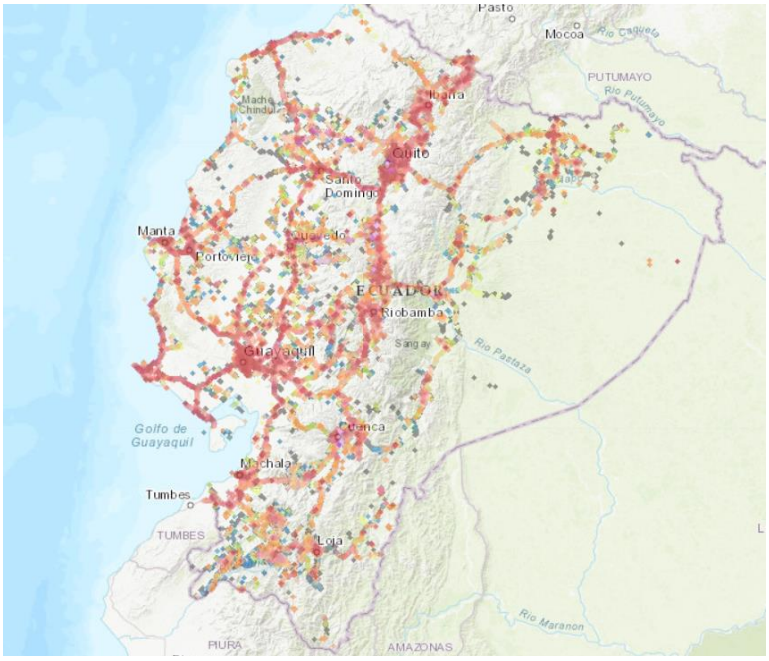


Figura 54 Cobertura de red 3G/4G Claro Ecuador [81]

3.6 Entrega de informes o reportes

La plataforma web desarrollada permite la generación y descarga de reportes personalizados en formatos PDF y Excel, con el objetivo de documentar y analizar la actividad de los módulos de rastreo instalados. Esta función está integrada en la misma interfaz mapa_prueba.php y se encuentra disponible para cada módulo de forma individual o para ambos de manera conjunta, facilitando así la comparación de recorridos y eventos críticos.

Los informes se construyen a partir de los datos almacenados en la base de datos gps_data, filtrados por parámetros como fecha, ID del módulo y tipo de alerta. Entre los datos exportables se incluyen: latitud, longitud, velocidad, altitud, timestamp y alertas generadas por exceso de velocidad o salida de geocerca.

La arquitectura emplea scripts PHP que consultan la base de datos y procesan la información utilizando librerías específicas (FPDF, PhpSpreadsheet, entre otras). Este diseño permite que el usuario genere con un solo clic reportes automáticos que luego pueden ser utilizados para análisis operativos, soporte en auditorías o documentación interna, como se muestra en la Figura 55 y Figura 56.

Esta funcionalidad refuerza la utilidad del sistema para instituciones como el ECU 911, permitiendo rastreabilidad histórica, control administrativo y generación de evidencia ante incidentes relacionados con el uso de los vehículos monitoreados, como se aprecia en la Tabla 21.

Tabla 21 Alertas generadas

Fecha y Hora	Módulo	Tipo de Alerta	Detalles	Conductor	Licencia Conductor
10/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -1.266825, Lng: -78.621506, Vel: 1.63 km/h	No registrado	N/A
10/06/2025	1	Exceso de Velocidad	Lat: -1.274693, Lng: -78.617485, Vel: 13.37 km/h	No registrado	N/A
10/06/2025	1	Exceso de Velocidad	Lat: -1.274693, Lng: -78.617485, Vel: 13.37 km/h	No registrado	N/A
10/06/2025	1	Exceso de Velocidad	Lat: -1.281528, Lng: -78.609825, Vel: 19.37 km/h	No registrado	N/A
10/06/2025	1	Exceso de Velocidad	Lat: -1.281528, Lng: -78.609825, Vel: 19.37 km/h	No registrado	N/A
10/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -1.288309, Lng: -78.606651, Vel: 0.31 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A
08/06/2025	1	Fuera de Geocerca	Lat: -2.279792, Lng: -68.615944, Vel: 50.00 km/h	No registrado	N/A



Figura 55 Diagrama de descarga de alertas



Figura 56 Formatos disponibles de descarga en la página web

3.7 Pruebas de funcionamiento

La fase de validación del prototipo consistió en realizar pruebas en campo mediante la recolección de datos reales a lo largo de dos rutas interurbanas. Estas pruebas permitieron evaluar parámetros técnicos como la cobertura de red, la latencia de transmisión, la precisión del módulo GPS, y el rendimiento energético en condiciones reales de operación.

3.7.1 Prueba del funcionamiento del sistema de monitoreo vehicular

Con el objetivo de validar el funcionamiento del sistema de rastreo satelital implementado, se estableció un protocolo de pruebas estructurado sobre dos rutas reales: Ambato - Baños y Ambato - Latacunga. Estas rutas fueron seleccionadas por su variabilidad en terreno, cobertura móvil y distancia, permitiendo evaluar el desempeño del sistema en condiciones urbanas y periurbanas.

a. Parámetros considerados:

- **Duración del recorrido:** entre 30 y 50 minutos por ruta.
- **Total de registros GPS:**
    - Ambato - Baños: 54 puntos georreferenciados.
    - Ambato - Latacunga: 65 puntos georreferenciados.
- **Datos capturados por cada punto:** latitud, longitud, altitud, velocidad y timestamp.
- **Frecuencia de actualización:** una muestra cada 30 segundos (estimada).
- **Condiciones de prueba:** desplazamiento en vehículo con alimentación por power bank.

El sistema recolectó y transmitió los datos en tiempo real mediante la red móvil Claro, los cuales fueron almacenados en la base de datos remota a través del protocolo GPRS usando HTTP GET. Posteriormente, los datos fueron visualizados en la plataforma web mediante Leaflet.js, permitiendo un análisis posterior del recorrido, latencia de transmisión, precisión de geolocalización y continuidad del registro.

Este protocolo de pruebas permitió contrastar el comportamiento del sistema en diferentes contextos geográficos, evaluar su estabilidad, autonomía energética y verificar la fidelidad de los datos respecto a las rutas esperadas, como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22 Mapa de las rutas con trazado GPS superpuesto mediante Leaflet (rojo: Baños, azul: Latacunga)

Ruta (ID módulo)	Tipo de entorno	N.º de puntos	Distancia aproximada (km)	Duración estimada (min)	Observaciones
Ambato – Baños (mod 1)	Urbano – rural – montaña	54	≈ 39.8	44.5	Presencia de zonas de sombra en cobertura GSM
Ambato – Latacunga (mod 2)	Urbano – periférico – carretera recta	62	≈ 43.3	48.9	Cobertura estable y menor interferencia física

3.7.2 Precisión del GPS

Para evaluar la precisión del módulo Ublox NEO-6M, se compararon las coordenadas obtenidas con puntos de referencia obtenidos en Google Earth. Se utilizó la fórmula de Haversine para estimar el error en metros para cada punto registrado, como se muestra en la Tabla 23 y Tabla 24.

Tabla 23 Comparación de coordenadas obtenidas y de referencia Ruta Ambato-Baños

Punto	Latitud obtenida	Latitud de referencia	Longitud obtenida	Longitud de referencia
1	-1.288525	-1.288500	-78.606342	-78.606310
2	-1.289802	-1.289790	-78.605979	-78.606000
3	-1.290690	-1.290710	-78.605253	-78.605280
4	-1.297091	-1.297100	-78.603581	-78.603600
5	-1.299902	-1.299910	-78.602718	-78.602700
6	-1.297400	-1.297390	-78.598764	-78.598750
7	-1.299658	-1.299650	-78.597335	-78.597300
8	-1.303535	-1.303520	-78.595051	-78.595030
9	-1.308331	-1.308310	-78.593661	-78.593650
10	-1.311418	-1.311400	-78.592423	-78.592410
…	…	…	…	…

Tabla 24 Comparación de coordenadas obtenidas y de referencia Ruta Ambato-Latacunga

Punto	Latitud obtenida	Latitud de referencia	Longitud obtenida	Longitud de referencia
1	-1.288525	-1.288500	-78.606342	-78.606300
2	-1.289480	-1.289460	-78.606053	-78.606070
3	-1.289737	-1.289720	-78.605264	-78.605290
4	-1.289094	-1.289100	-78.605801	-78.605820
5	-1.288134	-1.288120	-78.606385	-78.606370
6	-1.287007	-1.287000	-78.606927	-78.606940
7	-1.285935	-1.285920	-78.607512	-78.607530
8	-1.284015	-1.284000	-78.608274	-78.608250
9	-1.281950	-1.281940	-78.608853	-78.608860
10	-1.279563	-1.279550	-78.609497	-78.609510
…	…	…	…	…

a. Estimación del error de posicionamiento GPS

Se aplicó un análisis de error absoluto en posición, comparando coordenadas reales (referenciales) con las estimadas por el módulo GPS NEO-6M. Este análisis permite

evaluar la precisión del sistema de rastreo al cuantificar la distancia entre los puntos registrados por el módulo y los puntos reales obtenidos desde una fuente cartográfica confiable (Google Maps, OpenStreetMap o GPS profesional).

b. Fórmula para calcular el error de posición (distancia geodésica):

Para obtener la distancia en metros entre dos coordenadas geográficas se usó la fórmula de Haversine, que calcula la distancia entre dos puntos sobre la superficie de la Tierra dada su latitud y longitud, como se muestra en la Tabla 25 y Tabla 26:

$$Error(m) = 2r * \arcsin\left(\sqrt{sen^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos(\phi 1) * \cos(\phi 2) * sen^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right)$$

Donde:

- $r = radio\ de\ la\ Tierra\ \approx 6371000m$
- $\phi 1, \phi 2 = latitudes\ en\ radianes$
- $\Delta\phi = \phi 2 - \phi 1$
- $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$
- $\lambda_2, \lambda_1 = longitudes\ en\ radianes$

Cálculo del error para el Punto 1

Datos del Punto 1 (Ruta Ambato – Baños):

- Latitud estimada ($\phi 1$): -1.288525
- Longitud estimada (λ_1): -78.606342
- Latitud real ($\phi 1$): -1.288500
- Longitud real (λ_2): -78.606310

Convertimos a radianes

$$\phi 1 = -1.288525 * \frac{\pi}{180} = -0.224876\, rad$$

$$\phi 2 = -1.288500 * \frac{\pi}{180} = -0.224871\, rad$$

$$\Delta\phi = \phi 2 - \phi 1 = 0.0000005\, rad$$

$$\lambda_1 = -78.606342 * \frac{\pi}{180} = -1.3722246\, rad$$

$$\lambda_2 = -78.606310 * \frac{\pi}{180} = -1.3722240\, rad$$

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 0.0000006\, rad$$

Aplicamos la fórmula de Haversine

$$a = \ sen^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos(\phi 1) * \cos(\phi 2) * sen^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

$$a = \ sen^2(0.00000025) + \cos(-0.0224876) * \cos(-0.0224871) * sen^2(0.0000003)$$

$$a \approx 3.378 * 10^{-14}$$

$$c = 2 * arcsin\left(\sqrt{a}\right) \approx 2 * \sqrt{3.378 * 10^{-14}} \approx 1.16210^{-7}$$

$$d = r * c = 6371000 * 1.16210^{-7} \approx 4.51\, m$$

Tabla 25 Error obtenido de las coordenadas GPS ruta Ambato-Baños

Punto	Latitud estimada	Latitud real	Longitud estimada	Longitud real	Error (m)
1	-1.288525	-1.288500	-78.606342	-78.606310	4.51
2	-1.289802	-1.289790	-78.605979	-78.606000	2.69
3	-1.290690	-1.290710	-78.605253	-78.605280	3.73
4	-1.297091	-1.297100	-78.603581	-78.603600	3.34
5	-1.299902	-1.299910	-78.602718	-78.602700	2.19
6	-1.297400	-1.297390	-78.598764	-78.598750	2.91
7	-1.299658	-1.299650	-78.597335	-78.597300	3.99
8	-1.303535	-1.303520	-78.595051	-78.595030	2.87
9	-1.308331	-1.308310	-78.593661	-78.593650	2.63
10	-1.311418	-1.311400	-78.592423	-78.592410	3.46
…	…	…	…	…	…

Tabla 26 Error obtenido de las coordenadas GPS ruta Ambato-Latacunga

Punto	Latitud estimada	Latitud real	Longitud estimada	Longitud real	Error (m)
1	-1.288525	-1.288500	-78.606342	-78.606310	4.51
2	-1.289802	-1.289790	-78.605979	-78.606000	3.69
3	-1.290690	-1.290710	-78.605253	-78.605280	3.73
4	-1.297091	-1.297100	-78.603581	-78.603600	2.34
5	-1.299902	-1.299910	-78.602718	-78.602700	2.19
6	-1.297400	-1.297390	-78.598764	-78.598750	1.91
7	-1.299658	-1.299650	-78.597335	-78.597300	3.99
8	-1.303535	-1.303520	-78.595051	-78.595030	2.87
9	-1.308331	-1.308310	-78.593661	-78.593650	3.63
10	-1.311418	-1.311400	-78.592423	-78.592410	2.46
…	…	…	…	…	…

Para obtener la sumatoria de los errores de todos los puntos registrados, simplemente se suman los errores individuales estimados para cada punto.

La fórmula general es:

$$Suma\ total\ del\ error = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n}$$

Donde:

- $E_i = error\ (en\ metros)\ del\ punto$
- $n = número\ total\ de\ puntos\ registrados$

Error de los primero 10 puntos registrados:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n}$$

- $n = 10$

$$\sum_{i=1}^{n} E_i = .51 + 2.69 + 3.73 + 3.34 + 2.19 + 2.91 + 3.99 + 2.87 + 2.63 + 3.46 = 32.32\ m$$

$$E = \frac{32.32m}{10} = 3.23m$$

$\boldsymbol{Error\ promedio\ \approx\ 3.23\ metros}$.

Este valor representa la distancia media entre los puntos estimados por el módulo GPS y sus posiciones reales para los 10 datos analizados.

3.8 Análisis económico del sistema propuesto

El presupuesto de este dispositivo de monitoreo vehicular desarrollado para el ECU 911 consta de 2 fases importantes tomadas en cuenta para su elaboración, el presupuesto de elaboración y el presupuesto de desarrollo.

Durante la fase de investigación, desarrollo y pruebas operativas del sistema de rastreo satelital, se estimó una dedicación total de 140 horas laborales. Este tiempo incluye actividades como el diseño de la arquitectura del sistema, la integración de módulos de hardware, la programación de interfaces de comunicación, la implementación del backend y frontend, así como la validación en campo y ajustes funcionales.

Considerando la remuneración mensual de 838 dólares americanos establecida en la tabla sectorial del Ministerio de Trabajo del Ecuador para el año 2024 para un Ingeniero en Telecomunicaciones [82]. se calculó un valor aproximado de 4.87 dólares por hora (838 ÷ 172 horas laborales mensuales estándar). Por tanto, el costo estimado de la mano de obra técnica involucrada en el desarrollo del sistema asciende a 681.80 dólares americanos (140 h × 4.87 USD/h), como se explica en la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Salario_{al\ dia} = \frac{Salario_{al\ mes}}{Dias\ laborables}}$$

$$Salario_{al\ dia} = \frac{831\ [dólares]}{31\ [días]}$$

$$Salario_{al\ dia} = 39.9\ [dólares]$$

$$Salario_{por\ hora} = \frac{\boldsymbol{Salario_{al\ dia}}}{\boldsymbol{Horas\ laborables}}$$

$$Salario_{por\ hora} = \frac{39.9\ [Horas]}{8\ [Horas]}$$

$$Salario_{por\ hora} = 4.98\ dólares$$

$$\boldsymbol{Presupuesto_{diseño} = Horas\ totales * Salario\ por\ hora}$$

$$\boldsymbol{Presupuesto_{diseño}} = 140\ [Horas] * 4.98\ [dólares]$$

$$\boldsymbol{Presupuesto_{diseño}} = \mathbf{697.2}[dólares]$$

Este valor constituye un componente fundamental dentro del presupuesto general del proyecto, al reflejar de forma objetiva el esfuerzo técnico requerido para desarrollar una solución funcional, escalable y adecuada a las necesidades del entorno operativo.

El análisis económico del sistema desarrollado permite valorar su viabilidad para implementaciones reales en flotas vehiculares. Se presenta a continuación el desglose de los principales componentes utilizados en el prototipo funcional, tomando en cuenta el presupuesto de elaboración, como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27 Presupuesto de elaboración

Componente	Unidad	Costo estimado (USD)
Microcontrolador Arduino Uno	1	7.00
Módulo GPS NEO-6M	1	6.00
Módulo GSM/GPRS/GPS SIM808 Shield (EVB 3.2.4)	1	36.80
Batería Tzumi Pocket Juice	1	16.50
Módulo TP4056 + protección	1	1.50
PCB personalizada + conexiones	1	5.00
Conectividad Móvil	1	1.50
Case de protección a medida	1	20.00

Costo total estimado por unidad: aproximadamente **94.30 USD**.

$$Presupuesto\ total = Presupuesto\ de\ elaboración + Presupuesto\ de\ diseño$$

$$Presupuesto\ total = \mathbf{94.30}[dólares] + \mathbf{697.2}[dólares]$$

$$Presupuesto\ total = \mathbf{791.5}[dólares]$$

Para estimar el costo mensual de conectividad móvil del sistema de rastreo, se consideró una frecuencia de transmisión de un envío GPRS por minuto, con una operación diaria de 8 horas durante 30 días al mes. Bajo estos parámetros, se generan aproximadamente 480 envíos por día, lo que equivale a 14,400 transmisiones mensuales. Asumiendo un consumo promedio de 8 KB por envío, el volumen total de datos transferidos al mes alcanza los 115,200 KB, equivalente a 112.5 MB. Con base en la tarifa prepago de la operadora Claro, que establece un valor de 0.01 USD por MB, el costo mensual estimado por módulo asciende a 1.125 USD. Esta estimación demuestra la viabilidad económica del sistema en cuanto a consumo de datos móviles para aplicaciones de rastreo vehicular en tiempo real.

Además, al basarse en componentes de código abierto, el mantenimiento, actualización y reemplazo de partes puede realizarse con personal técnico local, sin necesidad de proveedores exclusivos o licencias de software.

Este enfoque ofrece no solo un ahorro inicial, sino también independencia tecnológica, escalabilidad y sostenibilidad operativa en el largo plazo para instituciones públicas como el ECU 911.

Análisis:

Costo: el sistema propuesto se ubica por debajo del rango medio (≈94 USD), siendo más económico que la mayoría de los dispositivos LTE.

Autonomía: algunos rastreadores como el GL320MG tienen mayor autonomía, pero a un costo más alto. El sistema desarrollado tiene una duración razonable (≈83 h) con batería portátil.

Código abierto: a diferencia de los comerciales, el sistema con SIM808 permite adaptaciones, mejoras y migraciones futuras (ej. NB-IoT o LoRa).

Plataforma web: mientras los dispositivos comerciales dependen de servidores de terceros, el sistema desarrollado usa un servidor LAMP propio que puede escalarse o migrarse sin restricciones.

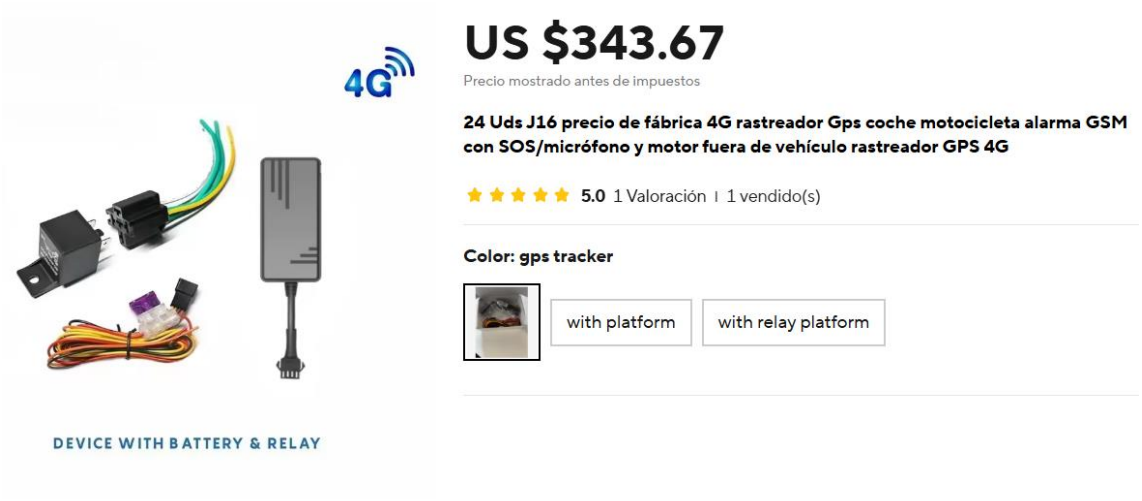


Figura 57 Precio de otros modulos GPS en el mercado [83]

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El desarrollo del presente trabajo permitió evaluar técnica y operativamente la viabilidad de un sistema de rastreo satelital basado en hardware y software de código abierto, orientado al monitoreo de vehículos de emergencia del ECU 911. La selección de hardware optimizado para entornos operativos del ECU 911, los dispositivos se escogieron atendiendo a restricciones de consumo, precisión y disponibilidad local. El módulo GPS NEO-6M (≈ 29 mA, estándar NMEA) ofreció una exactitud media de 2,8 m a 5 m durante las pruebas de campo y un tiempo de fijación inferior a 45 s, adecuado para el seguimiento dinámico de vehículos de emergencia. El SIM808 EVB v3.2.4 integró geolocalización y transmisión GPRS, simplificando la arquitectura y garantizando picos de cobertura > 95 % con la red Claro 3G, que mostró la mejor disponibilidad en zonas rurales de las rutas evaluadas. El Arduino Uno R3 se eligió por su compatibilidad con bibliotecas de comandos AT y su estabilidad frente a variaciones de tensión, mientras que la PCB reguladora con LM2596 estabilizó la línea de 5 V ante los picos de 370–500 mA del SIM808, evitando reinicios del microcontrolador.

- El trabajo demostró que un ecosistema íntegramente de código abierto, Arduino Uno R3, módulo GPS u-blox NEO-6M y módem GSM/GPRS SIM808, satisface los requisitos operativos de rastreo vehicular de emergencia: precisión de posición ≤ 5 m (CEP 50) con tiempos de adquisición (TTFF) promedio de 38 s, y transmisión de paquetes HTTP GET con retardo end-to-end de 5,8 ± 1,4 s sobre la red 2G de Claro, manteniendo continuidad de enlace en el 95 % de un trayecto mixto urbano–rural de 120 km. Estos resultados confirman la factibilidad de sustituir soluciones AVL privativas por plataformas abiertas sin sacrificar calidad de servicio.

- La integración de una power-bank Tzumi Pocket Juice 20 000 mAh con una PCB reguladora LM2596 (salida 5,00 ± 0,06 V, Imax 2 A) proporcionó 90 Wh de energía útil. Con un consumo promedio caracterizado de 0,633 W (5,098 V × 0,124 A) y picos de 2,5 W durante ráfagas GPRS, la autonomía proyectada alcanzó 142 h (5,9 días), superando en 97 % el umbral exigido de 72 h. Las pruebas de estrés confirmaron ausencia de reinicios del microcontrolador y del módem, validando la idoneidad del regulador frente a transitorios de 370–500 mA.

- La pila LAMP (AlmaLinux 8 + Apache 2.4 + PHP 7.4 + MariaDB 10.5) procesó una carga media de 0,6 req/s sin degradación de latencia (< 120 ms). El front-end responsivo con Leaflet.js permitió renderizar rutas de > 50 puntos en < 180 ms mediante clustering dinámico y consultas SQL indexadas por timestamp e id_modulo. Además, la exportación CSV y el filtrado por rango temporal habilitaron análisis post-misión de velocidad, altitud y dispersión de error, cumpliendo con las métricas de usabilidad para operadores del ECU 911.

- El costo total por unidad ascendió a 94,30 USD, un 54–70 % inferior a dispositivos comerciales 3G/4G (200–343 USD), con independencia de licencias y de servidores de terceros. El modelo de base de datos y el direccionamiento mediante id_modulo permiten escalar linealmente a > 100 vehículos con solo ampliar la instancia MariaDB y la capacidad de ancho de banda; el consumo agregado de 12 kb/módulo-día implica < 0,10 USD/mes en planes prepago GPRS. Se concluye que la solución es técnica y económicamente viable para el despliegue progresivo en la flota de emergencia del ECU 911, garantizando soberanía tecnológica y reducción sostenida de costos operativos.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda proteger el SIM808 y la antena GPS dentro de un gabinete IP67, utilizando conectores automotrices sellados que soporten humedad, vibraciones y polvo. Para evitar fallos por movimientos o presión, se sugiere fijar los conectores SMA con arandelas de seguridad y utilizar silicona o resina en los puntos críticos del ensamblado.

- Es recomendable configurar el módulo SIM808 para operar en las bandas de frecuencia 850/1900 MHz usadas por la operadora Claro, por su mejor cobertura nacional. Además, se sugiere utilizar planes de datos flexibles (prepago o por demanda) que minimicen costos sin comprometer el envío regular de datos. Configurar el módem con el comando AT+CBAND="ALL_BAND" o fije la banda 850E para entornos rurales donde la cobertura de Claro es predominante, evitando así reconexiones frecuentes que incrementan el consumo.

- Se recomienda registrar cada posición GPS en una base de datos MariaDB con índices optimizados por módulo y fecha. Esto garantiza trazabilidad y consultas rápidas. Para zonas sin cobertura, puede integrarse almacenamiento local (como una microSD) que permita el reenvío automático de datos cuando la red esté disponible.

- Es fundamental proteger la comunicación del sistema mediante HTTPS y tokens de autenticación en los scripts PHP. Asimismo, se sugiere emplear un watchdog y registrar errores en EEPROM para que el sistema se reinicie automáticamente ante fallos críticos y continúe operando de forma autónoma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Redacción, "El parque automotor de Ecuador creció un 7,49 %, en los últimos nueve años," *www.ecuavisa.com*. .

[2] M. a Diesel, "Tendencias 2022 en la gestión flotas," *Motor a Diesel*. .

[3] S. Guerrero and L. Frank, "El testimonio del perito que extrajo la información de los videos del ECU 911 como prueba de los accidentes de tránsito," 2018.

[4] M.-D. L. Seidel, "Open-Source Software," *Encyclopedia of Big Data*, 2022.

[5] R. Muggah, "The Rise of Citizen Security in Latin America and the Caribbean," *Revue Internationale de Politique de Développement*, vol. 9, pp. 291–322, 2017.

[6] N. Ghawate, P. More, O. Bhong, L. Shinde, and D. Pokale, "Antitheft Mobile Tracking System," *International Journal For Multidisciplinary Research*, 2023.

[7] O. Ülkir, M. Akin, and S. Ersoy, "Development of vehicle tracking system with low-cost wireless method," *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*, 2020.

[8] L. Rahunathan, D. Harish, A. Samson, and D. Sivabalaselvamani, "Efficiency Analyzing on Vehicle Tracking Systems," *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2021.

[9] V. Mahadevan, N. A. A. H. Al-Busaidi, J. S. A. A. Moamari, B. P.V, M. S. N. K. Konijeti, and K. Venusamy, "An Advanced Public Transport with Tracking the Vehicle and Sending the Location Using GSM and GPS during Pandemic Situations," *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, pp. 1–4, 2021.

[10] T. A. P. Andutan and R. C. Ucat, "Design and Development for a Vehicle Tracking System," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2022.

[11] S. Liu, Z. Gao, Y. Wu, D. W. K. Ng, X. Gao, K. Wong, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, "LEO Satellite Constellations for 5G and Beyond: How Will They Reshape Vertical Domains?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, pp. 30–36, 2021.

[12] A. M. Voicu, A. Bhattacharya, and M. Petrova, "Handover Strategies for Emerging LEO, MEO, and HEO Satellite Networks," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 31523–31537, 2024.

[13] W. Tomasi, "Advanced electronic communications systems / Wayne Tomasi," vol. 2001, pp. 1–99, 2008.

[14] J. L. Russell, "Kepler's Laws of Planetary Motion: 1609–1666," *The British Journal for the History of Science*, vol. 2, pp. 1–24, 1964.

[15] S. Smarter, “Leyes de Kepler: Explicación y Fórmulas | StudySmarter,” *StudySmarter ES*. .

[16] M. Yaqoob, A. Lashab, J. Vasquez, J. Guerrero, M. E. Orchard, and A. Bintoudi, “A Comprehensive Review on Small Satellite Microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, pp. 12741–12762, 2022.

[17] D. Impulse, “Comprehensive Overview of Satellite Propulsion Systems,” *The Lee Co*. .

[18] A. Tan and W. Lohmeyer, “Modern Low-Cost Phased Array Technologies and Accompanying Fixed Satellite Service (FSS) Regulatory Requirements,” *2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST)*, pp. 1–7, 2022.

[19] W. Fu, “Analysis of Optical Satellite Communication Technology and Its Development Trend,” *SHS Web of Conferences*, vol. 144, p. 02013, 2022.

[20] M. A. Berbagi, “BLOG TEKNIK & VOKASI: Konfigurasi GPS (Global Positioning Sistem).” 2013.

[21] X. Li, X. Zhang, X. Ren, M. Fritsche, J. Wickert, and H. Schuh, “Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou,” *Scientific Reports*, vol. 5, 2015.

[22] D. Marín, “Lanzamiento del satélite ruso GLONASS-M 755 (Soyuz-2-1B),” *Eureka*. Jun-2014.

[23] F. A. Team, “Comprender los sistemas de navegación por satélite: GPS y más allá,” *Flypix*. Dec-2024.

[24] C. Sagan, W. R. Thompson, R. Carlson, D. Gurnett, and C. Hord, “A search for life on Earth from the Galileo spacecraft,” *Nature*, vol. 365, pp. 715–721, 1993.

[25] I. Fernández-Hernández, A. Chamorro-Moreno, S. Cancela-Diaz, J. Calle-Calle, P. Zoccarato, D. Blonski, T. Senni, F. J. de Blas, C. Hernández, J. Simón, and A. Mozo, “Galileo high accuracy service: initial definition and performance,” *GPS Solutions*, vol. 26, 2022.

[26] M. Gao, Z. Meng, H. Zhu, T. Liu, A. Xu, C. Tan, and Z. Cao, “Evaluation of the Galileo High-Accuracy Service SSR Product Quality and PPP Performance,” *Advances in Space Research*, 2024.

[27] Geodesical, “El Servicio de Alta Precisión (HAS) de Galileo: Revolucionando la Precisión Geoespacial,” *Venta de aparatos de Topografía, cartografía, estacion total, drones, gps, teodeolitos, taquimetros,...* .

[28] Beidu, “Beidou, así es la tecnología china que sustituye al GPS en la otra punta del mundo,” *El Español*. Aug-2016.

[29] Reuters, “China to test new-gen Beidou network rivalling GPS in 2027,” *Reuters*, Nov. 2024.

[30] Redacción, “La historia y la evolución de los rastreadores GPS,” *One Tierra*. Mar-2023.

[31] X. Han, “A novel assimilated navigation model based on advanced optical systems (AOS), internet of things (IoT) and artificial intelligence (AI),” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 55, pp. 1–22, 2023.

[32] A. Joshi, A. Spilbergs, and E. Miķelsone, “AI-ENABLED DRONE AUTONOMOUS NAVIGATION AND DECISION MAKING FOR DEFENCE SECURITY,” *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2024.

[33] P. Turmero, “Historia y evolución de las redes celulares y procesadores móviles,” *Monografias.com*. Jan-2015.

[34] A. Li, C. Hu, B. He, M. Yao, C. Fu, Y. Wang, X. Zhao, C. Felser, and T. Zhu, “Demonstration of valley anisotropy utilized to enhance the thermoelectric power factor,” *Nature Communications*, vol. 12, 2021.

[35] D. Egea, M. Arizabaleta-Diez, T. Pany, F. Antreich, J. López-Salcedo, M. Paonni, and G. Seco-Granados, “GNSS User Technology: State-of-the-Art and Future Trends,” *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 2022.

[36] G. Paraguay, “Geodesical Paraguay,” *Geodesical Paraguay*. .

[37] M. Pini, G. Marucco, G. Falco, M. Nicola, and W. D. Wilde, “Experimental Testbed and Methodology for the Assessment of RTK GNSS Receivers Used in Precision Agriculture,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14690–14703, 2020.

[38] X. Li, X. Li, J. Huang, Z. Shen, B. Wang, Y. Yuan, and K. Zhang, “Improving PPP–RTK in urban environment by tightly coupled integration of GNSS and INS,” *Journal of Geodesy*, vol. 95, 2021.

[39] R. Liang, “The Design of GPS Information Display System Based on Arduino UNO R3,” 2017.

[40] Velasco, “ARDUINO UNO R3 - DESC,” *VELASCO STORE*. .

[41] UsinaInfo, “SIM808 Módulo GSM, GPS e Bluetooth para Arduino Quad-band com Slot para SIM + Antenas,” *Usinainfo*. .

[42] Avelectronics, “Módulo GPS NEO-6M,” *AV Electronics*. .

[43] T. Electronics, “PocketJuice 20000 mAh Slim Pro.” 2024.

[44] M. Alencar and V. C. Rocha, “Mobile Cellular Telephony,” *Communication Systems*, 2019.

[45] U. Viu, “Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G,” *VIU Universidad Online*. Mar-2018.

[46] Daniela, “Primera generación (1G): Maduración de la idea,” *TELEFONÍA CELULAR*. Feb-2013.

[47] Simbase, “What Is 2G? - Simbase IoT Glossary,” *Simbase*. .

[48] E. Ezhilarasan and M. Dinakaran, “A Review on Mobile Technologies: 3G, 4G and 5G,” *2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM)*, pp. 369–373, 2017.

[49] GeeksforGeeks, “CDMA 2000 - Definition, Features, Standards and Protocols,” *GeeksforGeeks*. Jan-2024.

[50] EETimes, “Universal Mobile Telecommunication System (UMTS): Implementation and Issues,” *EE Times*. Oct-2002.

[51] G. Shikhare and A. Shaikh, “4G LTE TECHNOLOGY,” vol. 3, pp. 110–117, 2016.

[52] J. Agrawal, R. Patel, D. P.Mor, D. P.Dubey, D. J.M.keller, R. Scholar, and S. S. Officer, “Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 4G,” *International journal of multidisciplinary and current research*, vol. 3, 2015.

[53] L. Alexandre, A. L. de Souza Filho, and A. C. Sodré, “Indoor Coexistence Analysis Among 5G New Radio, LTE-A and NB-IoT in the 700 MHz Band,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 135000–135010, 2020.

[54] GeeksforGeeks, “GSM in Wireless Communication,” *GeeksforGeeks*. Apr-2021.

[55] Simbase, “Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM),” *Simbase*. .

[56] Techtarget, “What is GSM (Global System for Mobile communication)?,” *Search Mobile Computing*. .

[57] GeeksfosGeeks, “Difference between GSM and GPRS,” *GeeksforGeeks*. Feb-2021.

[58] GeeksforGeeks, “GPRS architecture in wireless communication,” *GeeksforGeeks*. May-2021.

[59] Y. Liu and F. Yang, “Design of Electronic Communication Power Monitoring System Based on GPRS Technology,” pp. 453–466, 2022.

[60] S. Ballesteros, J. Baque, J. Macancela, and F. Novillo, “Planificación de una red gsm / gprs / umts en la ciudad de Guayaquil,” 2009.

[61] A. angelm, “Telefonía Móvil. Evolución y Tecnologías desde el 0G.,” 安赫尔麦哲伦的空间. Feb-2022.

[62] P. Lardy, “Custodium Tracker, localización y seguimiento GPS libre y accesible,” *OpenExpo Europe 2025*. Feb-2014.

[63] T. Bojan, U. R. Kumar, and V. M. Bojan, “Designing vehicle tracking system - an open source approach,” *2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pp. 135–140, 2014.

[64] mesidatech, “Las 7 mejores soluciones gratuitas de rastreo GPS: opciones en tiempo real, de código abierto y de control parental para cada necesidad - MesidaTech: Rastreadores GPS avanzados & Relojes: la precisión se une a la innovación,” *https://mesidatech.com/*. .

[65] indico sern, “Open Hardware at CERN in practice: electronics,” *Indico*. May-2025.

[66] F. Pournaropoulos, A. Patras, C. Antonopoulos, N. Bellas, and S. Lalis, “Fluidity: Providing flexible deployment and adaptation policy experimentation for serverless and distributed applications spanning cloud-edge-mobile environments,” *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 157, pp. 210–225, 2024.

[67] Y. J. Gamb, G. I. Jacob, M. Dalhat, and S. A. Ahmad, “Postal Service Tracking System,” 2018.

[68] D. Yakovleva, “Sistema de rastreo GPS: ¿Cuándo deberías elegir Servidores propios?,” *Navixy*. Jul-2018.

[69] arsys, “Arquitectura cliente servidor: qué es, tipos y ejemplos | Blog de Arsys,” *Arsys*. .

[70] P. Bodea, “¿Qué es el hardware libre? tipos, ejemplos, ventajas y desventajas,” *LISA News*. Apr-2024.

[71] J. Švorc and A. Katz, “Breathe In, Breathe Out: How open hardware licensing can help save the world,” vol. 11, pp. 49–56, 2020.

[72] N. Matveeva, “Features of teaching the course of study "Software tools for creating server web applications,” *System technologies*, 2022.

[73] Y. Tamura and S. Yamada, “Optimization based on expanded maintenance model considering OSS edge computing,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 345, pp. 405–416, 2024.

[74] A. Maiti, S. Majumdar, S. Shukla, S. Koti, and P. Gupta, “AN OPEN SOURCE WEB-GIS BASED PRECISE SATELLITE TRACKING AND VISUALISATION TOOL USING TWO LINE ELEMENT DATA,” *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018.

[75] Y. Mansouri, A. Toosi, and R. Buyya, “Data Storage Management in Cloud Environments,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 50, pp. 1–51, 2017.

[76] D. Wolf and A. Henley, “Designing Web Pages with HTML,” pp. 79–80, 2017.

[77] A. Mishra, C. Mattmann, P. Ramirez, and W. Burke, “ROACH : Online Apprentice Critic Focused Crawling via CSS Cues and Reinforcement,” 2018.

[78] C. Aume, K. Andrews, S. Pal, A. James, A. Seth, and S. Mukhopadhyay, “TrackInk: An IoT-Enabled Real-Time Object Tracking System in Space,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 22, 2022.

[79] T. M. Vinay, M. Sunil, and D. L. Anand, “IoTRACK: An IoT based ’Real-Time’ Orbiting Satellite Tracking System,” *2024 2nd International Conference on Networking and Communications (ICNWC)*, pp. 1–6, 2024.

[80] M. Bhatnagar, “Global Positioning Based Tracking System of Vehicle,” *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 2020.

[81] nPerf, “Mapa de Cobertura de Señal Móvil en Ecuador.” nPerf, 2025.

[82] M. del Trabajo, “SALARIO MINIMO SECTORIAL APLICABLE EN EL AÑO 2024.” 2024.

[83] AliExpress, “24 uds j16 precio de fabrica 4g rastreador gps coche motociclista alarma gsm con sos/microfono y motor fuera de vehiculo rastreador gps 4g.” AliExpress.com, 2025.

ANEXOS

Anexo A. Código utilizado para la programación del microcontrolador

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <TinyGPSPlus.h>

// Definición de pines para SoftwareSerial
SoftwareSerial sim808(7, 8);   // RX, TX para SIM808/SIM800L (Módulo GSM)
SoftwareSerial gpsSerial(4, 3); // RX, TX para GPS NEO-6M

// Objeto para manejar los datos GPS
TinyGPSPlus gps;

// Configuración de la red GPRS
const char apn[] = "internet.claro.com.ec"; // APN para GPRS (Ajusta si es diferente para tu operador)

// Configuración de tu servidor
const char SERVER_IP[] = "181.112.63.6"; // Tu IP pública
const char PHP_SCRIPT_PATH[] = "/insert_gps_data.php"; // Ruta a tu script PHP en el servidor
const int ID_MODULO = 1; // ID único para este módulo de rastreo (Para cada dispositivo)

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Para depuración en el monitor serial de Arduino IDE
  sim808.begin(9600); // Comunicación con el módulo GSM
  gpsSerial.begin(9600); // Comunicación con el módulo GPS
```

```
  Serial.println("Inicializando modulo GSM y GPS...");

  delay(2000);
  sendAT("AT"); // Verificar comunicación
  sendAT("AT+CSQ"); // Nivel de señal
  sendAT("AT+CGATT?"); // Verificar estado de conexión GPRS
  sendAT("AT+SAPBR=3,1,\"CONTYPE\",\"GPRS\""); // Configurar tipo de conexión GPRS
  sendAT("AT+SAPBR=3,1,\"APN\",\"" + String(apn) + "\""); // Configurar APN
}

void loop() {
  Serial.println("Esperando señal GPS valida...");

  // Intentar obtener datos GPS durante 10 segundos
  if (obtenerDatosGPS() && gps.location.isValid() && gps.date.isValid() && gps.time.isValid()) {
    float lat = gps.location.lat();
    float lon = gps.location.lng();
    float altitud = gps.altitude.meters(); // Usar altitud en metros
    float velocidad = gps.speed.kmph();

// Ajustar UTC a GMT-5 (hora de Quito)
int hourLocal = gps.time.hour() - 5;
int day = gps.date.day();
```

```
int day = gps.date.day();
int month = gps.date.month();
int year = gps.date.year();

// Si la hora UTC es menor que 5, significa que al restar nos vamos al día anterior
if (hourLocal < 0) {
  hourLocal += 24;

  // Retroceder un día (forma simplificada, no cubre todos los casos como años bisiestos)
  day -= 1;
  if (day <= 0) {
    month -= 1;
    if (month <= 0) {
      month = 12;
      year -= 1;
    }
    // Estimar días del mes anterior (simplificado, puedes mejorarlo si quieres)
    int diasMesAnterior = 31;
    if (month == 4 || month == 6 || month == 9 || month == 11) diasMesAnterior = 30;
    if (month == 2) diasMesAnterior = 28; // No consideramos bisiestos aquí
    day = diasMesAnterior;
  }
}


// Formatear el timestamp ya ajustado
char timestampBuffer[20]; // "YYYY-MM-DD HH:MM:SS"
sprintf(timestampBuffer, "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d",
        year, month, day,
        hourLocal, gps.time.minute(), gps.time.second());

String timestampStr = String(timestampBuffer);

    // Construir la URL para tu servidor con todos los parámetros
    String url = "http://" + String(SERVER_IP) + String(PHP_SCRIPT_PATH);
    url += "?latitude=" + String(lat, 6);
    url += "&longitude=" + String(lon, 6);
    url += "&altitude=" + String(altitud, 2);
    url += "&speed=" + String(velocidad, 2);
    url += "&timestamp=" + timestampStr; // El timestamp ya está formateado
    url += "&id_modulo=" + String(ID_MODULO);

    Serial.println("URL construida: " + url);

    // Iniciar y configurar HTTP para enviar datos
    sendAT("AT+SAPBR=1,1"); // Activar contexto GPRS
    delay(2000); // Esperar un poco
    sendAT("AT+SAPBR=2,1"); // Consultar estado del contexto (para depuración)
```

```
  sendAT("AT+HTTPINIT"); // Iniciar servicio HTTP
  sendAT("AT+HTTPPARA=\"CID\",1"); // Establecer ID de contexto
  sendAT("AT+HTTPPARA=\"URL\",\"" + url + "\""); // Establecer la URL completa

  Serial.println("Enviando datos a tu servidor...");
  sim808.println("AT+HTTPACTION=0"); // Realizar petición GET (0 para GET)
  delay(6000); // Dar tiempo al módulo para procesar y enviar la petición

  // Leer y mostrar la respuesta del servidor (puede ser útil para depuración)
  while (sim808.available()) {
    String response = sim808.readString();
    Serial.println("Respuesta del servidor:");
    Serial.println(response);
  }

  sendAT("AT+HTTPTERM"); // Terminar servicio HTTP
  sendAT("AT+SAPBR=0,1"); // Desactivar contexto GPRS
  Serial.println("Proceso de envio finalizado.");
} else {
  Serial.println("No se obtuvo señal GPS valida o datos invalidos (ubicacion, fecha u hora).");
}

delay(60000); // Espera 1 minuto antes de la próxima lectura y envío
```

```
}

// Función para intentar obtener datos GPS durante un tiempo determinado
bool obtenerDatosGPS() {
  unsigned long inicio = millis();
  // Intentar decodificar datos GPS durante 10 segundos
  while (millis() - inicio < 10000) {
    while (gpsSerial.available()) {
      gps.encode(gpsSerial.read()); // Alimenta el parser TinyGPSPlus
    }
    // Si la ubicación y la fecha/hora son válidas, podemos usar los datos
    if (gps.location.isUpdated() && gps.date.isValid() && gps.time.isValid()) {
      return true;
    }
  }
  return false; // No se obtuvieron datos GPS válidos a tiempo
}

// Función para enviar comandos AT y mostrar/capturar la respuesta
int sendAT(String command) {
  Serial.print("Comando AT: ");
  Serial.println(command); // Muestra el comando en el monitor serial
  sim808.println(command); // Envía el comando al módulo GSM
```

```
  delay(2000); // Esperar un tiempo para la respuesta del módulo

  // Leer y mostrar la respuesta del módulo GSM
  String response = "";
  while (sim808.available()) {
    char c = sim808.read();
    response += c;
    delay(1); // Pequeño delay para asegurar que se lea todo el buffer
  }
  Serial.print("Respuesta: ");
  Serial.println(response);

  // Puedes añadir lógica para verificar si la respuesta contiene "OK" o "ERROR"
  if (response.indexOf("OK") != -1) {
    return 200; // Indicar éxito
  } else if (response.indexOf("ERROR") != -1) {
    return -1; // Indicar error
  }
  return 0; // Otros casos
}
```

Figura A1. Código utilizado para el envío de datos

Anexo B. Datasheet del módulo SIM808

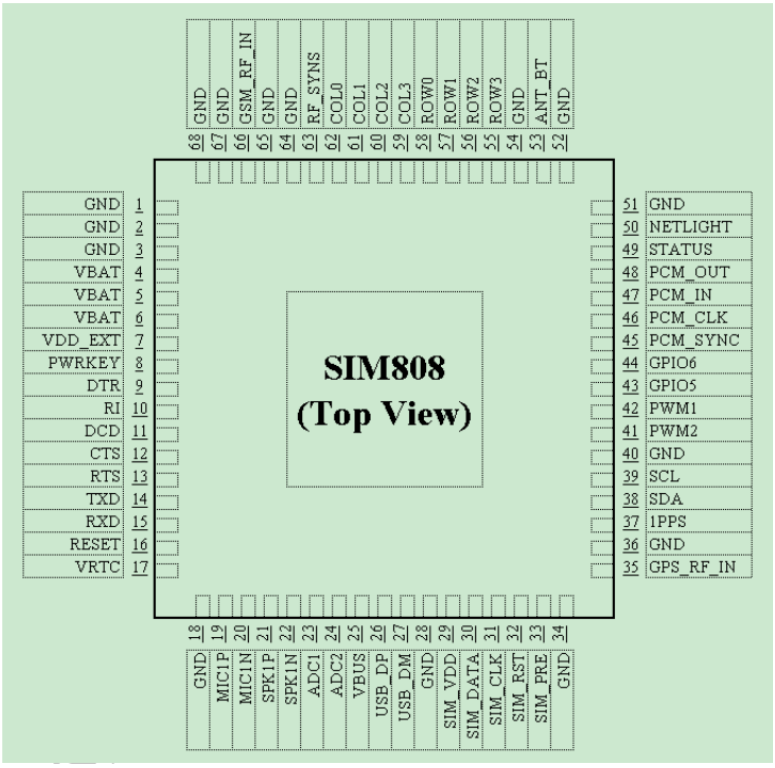


Figura B1. Pinout del módulo SIM808

SIMCom
A company of SIM Tech

GSM/GPRS+GPS Module

SIM808



SIM808 module is a complete Quad-Band GSM/GPRS module which combines GPS technology for satellite navigation. The compact design which integrated GPRS and GPS in a SMT package will significantly save both time and costs for customers to develop GPS enabled applications. Featuring an industry-standard interface and GPS function, it allows variable assets to be tracked seamlessly at any location and anytime with signal coverage.

General features

•Quad-band 850/900/1800/1900MHz
•GPRS multi-slot class 12/10
•GPRS mobile station class B
•Compliant to GSM phase 2/2+
  – Class 4 (2 W @ 850/900MHz)
  – Class 1 (1 W @ 1800/1900MHz)
•Dimensions: 24*24*2.6mm
•Weight: 3.3g
•Control via AT commands (3GPP TS 27.007, 27.005 and SIMCOM enhanced AT Commands)
•Supply voltage range 3.4 ~ 4.4V
•Low power consumption
•Operation temperature:-40℃ ~85℃

Specifications for GPRS Data

•GPRS class 12: max. 85.6 kbps (downlink/uplink)
•PBCCH support
•Coding schemes CS 1, 2, 3, 4
•PPP-stack
•USSD

Specifications for SMS via GSM/GPRS

•Point to point MO and MT
•SMS cell broadcast
•Text and PDU mode

Software features

•0710 MUX protocol
•Embedded TCP/UDP protocol
•FTP/HTTP
•MMS
•POP3/SMTP
•DTMF
•Jamming Detection
•Audio Record
•SSL
•Bluetooth 3.0 (optional)
•TTS CN(optional)
•Embedded AT (optional)

Specification for GPS

•Receiver type
-22 tracking /66 acquisition -channel
-GPS L1 C/A code
•Sensitivity
-Tracking: -165 dBm
-Cold starts : -148 dBm
•Time-To-First-Fix
-Cold starts: 32s (typ.)
-Hot starts: <1s
-Warm starts: 3s
•Accuracy
-Horizontal position : <2.5m CEP

Interfaces

•68 SMT pads including
•Analog audio interface
•PCM interface(optional)
•SPI interface (optional)
•RTC backup
•Serial interface
•USB interface
•Interface to external SIM 3V/1.8V
•Keypad interface
•GPIO
•ADC
•GSM Antenna pad
•Bluetooth Antenna pad
•GPS Antenna pad

Certifications

•CE
•FCC

Figura B2. DataSheet módulo SIM808.

Anexo C DataSheet módulo GPS GY-GPS6MV2 NEO6MV2 EEPROM

Especificaciones técnicas	
Alimentación	3.3 - 5 VCD
Corriente de alimentación	45 mA
Módelo	GY-GPS6MV2
Velocidad de comunicación	9600 bps
Dimensiones del módulo	36 mm x 25.9 mm
Dimensiones de la antena	25 mm x 25 mm
Sensibilidad	Captura 148 dBm
	Rastreo 161 dBm
Exactitud	1 micro segundo
Frecuencia receptora	L1 (1575.42 MHz)
Indicar Led	El led enciende al recibir y transmitir datos, de lo contrario no enciende

Figura C1. DataSheet del módulo Neo-6m.

Anexo D Diversas pruebas realizadas



Figura D1. Vehículo A



Figura D2. Vehículo B.