

Bastón Blanco Asistido Mediante Inteligencia Artificial

Proyecto de grado

Gian Carlo Leal Gómez
César Fabián Tafur Rangel
Daniel Felipe Chaparro Lancheros

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C., Colombia
Septiembre, 2025

Resumen Ejecutivo

Este documento presenta el desarrollo de una implementación a un bastón para que sea inteligente que consta de sensores de proximidad y ayuda multisensorial con audio y vibración, y la adaptación con inteligencia artificial, para así poder asistir a personas con dificultades visuales, este bastón detectará obstáculos y así alertará al usuario en tiempo real. Se propone el uso de una Raspberry Pi 4, una cámara, sensores ultrasónicos mediante los cuales el bastón podrá ejecutar su función, este bastón ha sido diseñado para aumentar la seguridad de los usuarios garantizando su confort, portabilidad y adaptabilidad.

Objetivo General

Implementación de un bastón blanco para que sea inteligente asistido mediante inteligencia artificial (IA) que permita a las personas con discapacidad visual la detección de obstáculos y la navegación urbana segura.

Objetivos Específicos

Analizar las características que debe tener un bastón blanco con el fin de definir la adaptabilidad en torno al usuario final.

Definir el modelo a desarrollar de acuerdo con las características de usabilidad, diseño esquemático y comunicación necesarias para su funcionamiento.

Integrar los sensores, circuitos, la programación y la inteligencia artificial al modelo para garantizar el funcionamiento adecuado del bastón.

Validar el funcionamiento del bastón blanco con el usuario final para determinar usabilidad, adaptabilidad y efectividad en la navegación y en la detección de obstáculo.

Definición del problema

Los bastones blancos tradicionales no ofrecen funciones como detección anticipada de obstáculos ni asistencia a navegación, por lo cual limita la autonomía y seguridad de las personas con discapacidad visual. Estos obstáculos se dan por las condiciones de infraestructura urbana en mal estado, así como aceras deterioradas, escaleras sin señalización, huecos en la vía pública, vehículos mal estacionados y obstáculos imprevistos como ventas ambulantes. Para poder ayudar en estas problemáticas, las personas requieren dispositivos o sistemas de ayuda que faciliten su movilidad urbana y la detección de elementos que puedan atentar contra su integridad. Aunque existen bastones inteligentes que integran dichas funciones, su alto costo (\$1000 – \$1500 dolares) representa una barrera de acceso para gran parte de la población que los necesita, lo que hace necesario el diseño de alternativas más accesibles y adaptables a las personas.

Justificación

La propuesta de un bastón inteligente basado en inteligencia artificial tiene como finalidad mejorar la autonomía de las personas con discapacidad visual. A través del análisis de información obtenida por sensores ultrasónicos y una cámara , el dispositivo es capaz de detectar obstáculos, comprender el entorno y anticipar situaciones que requieren atención, lo que permite que el usuario actúe con seguridad y en tiempo real. Esta ayuda tecnológica se refuerza con señales auditivas y vibración que facilitan el desplazamiento sin la necesidad de acompañamiento continuo, incluso en zonas urbanas con alto nivel de complejidad.

La parte social del proyecto es la más significativa porque impulsa la inclusión, favorece la movilidad independiente y contribuye a mejorar la calidad de vida de quienes enfrentan dificultades visuales. También genera conciencia sobre la importancia de crear soluciones que respondan a sus necesidades y que amplíen su acceso a espacios y servicios.

En el ámbito formativo, el desarrollo del bastón inteligente ofrece una experiencia de aprendizaje amplia y enriquecedora. Se aplican conocimientos de electrónica, programación, inteligencia artificial y diseño centrado en el usuario, mientras se desarrollan capacidades para trabajar en equipo, investigar y proponer soluciones reales. Todo esto convierte el proyecto en una oportunidad educativa que integra conocimientos técnicos con compromiso social.

Análisis de Requerimientos



Categoría	Requerimientos	Justificación
Técnicos	Raspberry Pi 4 W como procesador	Maneja una potencia suficiente para

	Cantidad:1	utilizar IA e implementar visión artificial.
	ESP32 Davkit V1 como segundo procesador Cantidad:1	Su facilidad en procesar y manejar diferentes sensores bajo señales digitales y analógicas.
	Cámara CSI oficial Cantidad:1	Su compatibilidad con la raspberry y fácil conexión
	Sensores ultrasónicos Cantidad: 1	Permiten detectar obstáculos en distintas distancias.
	Batería recargable ($\geq$ 6 h) Cantidad:1	Puede ofrecer autonomía razonable para el uso del día.
	Retroalimentación por vibración y sonido	Esta retroalimentación ayuda al usuario a que le facilite identificar los obstáculos que tenga a su alrededor.

De Diseño	En base de aluminio y las medidas son: Longitud: 110cm a 135cm Diámetro: 18 mm a 25 mm Masa: 200 g – 400 g	El aluminio es un material que es ligero, resistente y reciclable.
	Diseño ergonómico	Lo hace más cómodo para el usuario y reduce la fatiga.
	Bastón plegable o telescópico	Mejora su portabilidad con Cálculo de longitud personalizada al usuario.
	Resistencia ambiental	Puede usarse en lluvia, resistente al polvo y golpes leves.
	Color blanco en el bastón	Conserva el color blanco en el bastón pues representa la condición

		que representa el usuario.
De Operación	Encendido y apagado sencillo	Facilita el uso del bastón para su uso.
	Retroalimentación en tiempo real	Garantiza seguridad al usuario en el momento.
	Tiempo de respuesta ≤ 200 ms	Asegura una detección casi inmediata de obstáculos al usuario.
De Calidad	Precisión 90% en detección	Brinda seguridad al usuario respecto a la buena detección de obstáculos de la IA.
	Durabilidad promedio de 2 años	Reduce costos al usuario de reemplazo de bastón.
	Componentes con certificación	Le brindan seguridad y fiabilidad al usuario.

	Interfaz amigable	Asegura facilidad de uso para personas con discapacidad visual.
Legales y Reglamentarios	Cumplimiento de ISO 23599:2019	Da accesibilidad y estándares internacionales como: -Color -Longitud y tamaño -Mango -Punta del bastón -Peso - Compatibilidad con superficies urbanas -Resistencia y seguridad
	Normas eléctricas de seguridad - IEC 62133-2:2017	Previenen los riesgos eléctricos que pueda tener el bastón.

	- IEC 61000 / CISPR 22 - IEC 62368-1:2018 - IEC 60950-1 / IEC 62368-1	
	Mantener color blanco	Reconocimiento legal y social del bastón.
Sostenibilidad	Aluminio reciclado	Reduce el impacto hacia el medio ambiente.
	Manejo del consumo energético	Disminuye el gasto eléctrico.
	Diseño modular	Hace más fácil su reparación y alarga vida útil del bastón.
	Reutilización de componentes en buen estado	Podemos minimizar los residuos electrónicos.



Antecedentes:

A nivel global, las tecnologías de apoyo para personas con discapacidad han avanzado significativamente, incorporando una variedad de sensores en dispositivos como bastones inteligentes que facilitan la detección anticipada de obstáculos y la navegación asistida. En países como Japón e India, se han desarrollado bastones inteligentes con estas características, que integran desde sensores ultrasónicos hasta cámaras y módulos GPS para ofrecer una mayor autonomía y seguridad a los usuarios. Sin embargo, el elevado costo de producción y la complejidad tecnológica de estos dispositivos han limitado su accesibilidad para gran parte de la población que podría beneficiarse de ellos. Por ello, se busca un equilibrio entre precisión, costo y consumo energético, empleando configuraciones que combinen sensores accesibles como ultrasónicos e infrarrojos con cámaras CSI y unidades inerciales, aprovechando plataformas como la Raspberry Pi Zero 4 para lograr soluciones técnicas viables, sostenibles y económicamente asequibles. Esta tendencia refleja un compromiso global por mejorar la calidad de vida de personas con discapacidad visual a través de tecnologías avanzadas, pero accesibles y adaptables al contexto socioeconómico de cada región.

En un contexto colombiano, todavía existen barreras en la movilidad para personas con discapacidad y no solamente visual, como la falta de señalización, la infraestructura urbana no adaptada, el desconocimiento ciudadano y la presencia de obstáculos imprevistos en la vía pública. Estos antecedentes muestran la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles, económicas y adaptadas al entorno colombiano.

Conceptos Clave:

Bastón blanco: Dispositivo de movilidad considerado en todo el mundo como un emblema de autonomía para individuos con discapacidad visual.

Tecnología de apoyo: Conjunto de servicios o dispositivos creados con el objetivo de optimizar la calidad de vida, independencia y funcionalidad de los individuos con discapacidad.

Inteligencia Artificial (IA): Campo de estudio que permite a las máquinas procesar información y tomar decisiones fundamentadas en algoritmos de aprendizaje automático y detección de patrones.

Visión por computadora: Campo de la inteligencia artificial que analiza imágenes digitales con el objetivo de identificar objetos, reconocer ambientes y hallar obstáculos.

Retroalimentación multisensorial: Empleo de señales sonoras y vibraciones para comunicar información al usuario sin la necesidad de que este vea.

Teorías y Enfoques:

El desarrollo del bastón inteligente se fundamenta en dos enfoques principales:

Enfoque de accesibilidad universal: determina que los dispositivos deben diseñarse para permitir su uso por cualquier persona sin la necesidad de adaptaciones posteriores.

Enfoque socio-tecnológico: Propone que la tecnología tiene que hacer frente a problemas sociales concretos, promoviendo la autonomía y la inclusión de grupos vulnerables.

Además, se tienen en cuenta las teorías del reconocimiento de patrones y al procesamiento de señales, que posibilitan la evaluación de datos que provienen de cámaras y sensores ultrasónicos con el fin de prever la existencia de obstáculos en el ambiente.

Marco Contextual:

La población con discapacidad visual en la ciudad de Bogotá y otras ciudades del país presentan ciertos problemas en la movilidad. Esto se debe a que el transporte público no es accesible, los pavimentos podotáctiles están ausentes, las aceras son irregulares y hay impedimentos como ventas ambulantes o vehículos en las aceras.

La propuesta de un bastón blanco asistido con inteligencia artificial responde a este contexto al integrar una Raspberry Pi 4 , una cámara CSI, sensores ultrasónicos y sensores infrarojos . Además, incorpora criterios de sostenibilidad mediante el uso de aluminio reciclable, consumo energético optimizado, diseño modular y empaques biodegradables

Relación con la Investigación:

La investigación es pertinente, como lo demuestra el marco de referencia, porque evidencia la necesidad de un dispositivo que integre características avanzadas, bajo costo y facilidad de uso. El bastón inteligente que se propone no solo permitirá una mejor detección de obstáculos, sino que además aumentará la autonomía y la seguridad de quienes lo utilicen en contextos urbanos complicados.

Análisis de Restricciones

Ambientales

Restricción: Consumo energético (dispositivo y cadena de suministro) y gestión de residuos electrónicos (baterías, PCB, plásticos).

Impacto: Huella de carbono por uso y fabricación; residuos peligrosos si no se gestionan baterías y componentes.

Medidas de mitigación:

- Seleccionar componentes de bajo consumo (Raspberry Pi 4 es eficiente) y optimizar software para modos de bajo consumo (sleep, procesamiento por lotes).
- Diseño modular para facilitar reemplazo y reciclaje de partes.
- Elegir baterías con programas de reciclaje y proveedores que cumplan normativas EPR.
- Documentar plan de fin de vida y recomendar centros de reciclaje locales.

Económicas

Restricción: Presupuesto limitado para prototipo y producción (usuarios objetivo con recursos reducidos).

Impacto: Riesgo de que el costo final impida adopción masiva; limitaciones en calidad o funcionalidades.

Medidas de mitigación:

- Priorizar funcionalidades MVP (detección de obstáculos, señales sonoras/táctiles) y dejar extras (navegación avanzada, conexión celular) para fases posteriores.

- Usar componentes comunes y económicos, compras por volumen en producción.
- Diseño open-source y guías de construcción para reducir costos de implementación y permitir fabricación local.
- Buscar apoyos (incubadoras, becas, alianzas con ONG) para subvencionar prototipos.

Legales y regulatorias

Restricción: Legislación sobre dispositivos electrónicos, protección de datos (por cámara/micrófono), y posibles regulaciones de dispositivos médicos o de asistencia.

Impacto: Necesidad de cumplir normas nacionales (por ejemplo, regulación de privacidad y posiblemente certificación si se considera dispositivo de ayuda médica). Multa o retiro si no se cumple.

Medidas de mitigación:

- Implementar privacidad desde el diseño: procesar vídeo localmente, no almacenar imágenes ni enviarlas a la nube sin consentimiento explícito.
- Incluir acuerdos y consentimiento informado claros para usuarios y terceros.
- Investigar si el dispositivo requiere registro/certificación como dispositivo médico y planificar recursos para cumplimiento (si aplica).

- Consultar normativas locales sobre accesibilidad y ayudas técnicas para personas con discapacidad.

Salud y seguridad (usuarios y terceros)

Restricción: Riesgos físicos (falsa detección, fallos de hardware, interferencia) y riesgo ergonómico (peso, diseño del mango).

Impacto: Posibles accidentes si el dispositivo falla — responsabilidad ética y legal.
Molestias por vibraciones/sonidos mal diseñados.

Medidas de mitigación:

- Implementar redundancia básica: niveles de alarma (visual/sonora/táctil) y políticas de seguridad cuando el sistema esté en fallo (p. ej. avisos al usuario y recomendación de uso manual).
- Pruebas de campo extensivas con usuarios reales y ajustes ergonómicos (peso < tolerancia, mango cómodo).
- Documentar límites del sistema y capacitar al usuario en su uso seguro.
- Cumplir normas de seguridad eléctrica y protección contra sobrecalentamiento.

Técnicas / Tecnológicas

Restricción: Limitaciones de procesamiento (Raspberry Pi 4 tiene recursos limitados), latencia en detección, alcance y precisión de la cámara en distintas condiciones de iluminación, y robustez del algoritmo de visión.

Impacto: Detecciones erróneas o tardías, funcionamiento pobre en luz baja, alto consumo al usar modelos pesados.

Medidas de mitigación:

- Usar modelos de visión optimizados/ligeros (pruning, quantization, modelos quantizados para CPU/GPU pequeño).
- Complementar cámara con sensores auxiliares (ultrasonido, LIDAR barato, sensores infrarrojos) para redundancia en diversas condiciones.
- Ajuste por iluminación: IR o iluminador LED con control automático; algoritmos adaptativos.
- Pipeline local (procesamiento en dispositivo) y diseño de excepciones para baja confianza (alerta al usuario).

Operacionales / Logísticos

Restricción: Mantenimiento, disponibilidad de repuestos, distribución y ensamblaje.

Impacto: Dificultad para mantener operativos los dispositivos; usuarios sin soporte técnico quedarían fuera de uso.

Medidas de mitigación:

- Diseño modular y manuales de reparación simples (piezas intercambiables).
- Selección de componentes estándar y documentación de proveedores alternativos.

- Capacitación a talleres locales para reparación y mantenimiento.
- Garantía y plan de servicio escalable.

Socioculturales

Restricción: Aceptación por parte de usuarios con diferentes niveles de alfabetización tecnológica; estigma social asociado a ayudas tecnológicas visibles.

Impacto: Baja adopción si diseño no es culturalmente aceptable o si interfaz es compleja.

Medidas de mitigación:

- Diseño centrado en el usuario: pruebas con usuarios finales, iteraciones con retroalimentación.
- Opciones de personalización estética (colores, acabados) para reducir estigma.
- Interfaz simple, multimodal (vibración, retroalimentación háptica) y materiales en lenguaje claro.
- Programas de demostración y formación comunitaria.

Éticas y de privacidad

Restricción: Captura de imágenes de terceros en espacios públicos; decisiones algorítmicas (qué prioriza el sistema).

Impacto: Preocupación por vigilancia involuntaria; riesgos de discriminación por sesgos en modelos de visión.

Medidas de mitigación:

- Procesamiento local sin almacenamiento de datos personales; si se guarda algo, anonimizar y pedir consentimiento.
- Evaluar y mitigar sesgos en datasets de entrenamiento (incluir diversidad de escenas, personas y condiciones).
- Transparencia en funcionamiento y límites del sistema en documentación para usuarios y terceros.

Accesibilidad y usabilidad

Restricción: Diseño que no se adapte a distintos tipos de discapacidad visual (parcial vs total), diferencias de fuerza/ movilidad de usuarios.

Impacto: Dispositivo poco útil o incómodo para amplios grupos de usuarios.

Medidas de mitigación:

- Interfaces personalizables (intensidad de vibración, volumen, idioma).
- Pruebas con usuarios con distintas discapacidades para ajustar ergonomía y modos de operación.
- Manuales en braille y audio, y soporte de configuración asistida.

Cadena de suministro y abastecimiento

Restricción: Disponibilidad de componentes (chips, cámaras) y variación de precios.

Impacto: Retrasos en producción, aumento de costos.

Medidas de mitigación:

- Lista de componentes alternativos compatibles; diseño que permita swaps fáciles.
- Planificación de compras por lotes y colaboración con proveedores locales.
- Considerar fabricación local o ensamblaje en talleres para evitar importaciones costosas.

Análisis de la incertidumbre**Amenazas:**

Tener leves dificultades al conseguir los diferentes sensores o repuestos del bastón

Cambios en el baston actualizando su tecnologia y dejando unos componentes obsoletos.

Limitaciones legales si el bastón se llega a clasificar como una ayuda médica.

Las diferentes respuestas que puede dar el bastón por desempeño de los sensores en diferentes entornos (lluvia, oscuridad, ruido).

Oportunidades:

- Un gran interés global por el uso de tecnológica en ámbitos médicos para personas con discapacidad visual.
- Avances en el uso de inteligencia artificial ligera (TinyML, Edge AI).
- Posibilidad de integrar al bastón energía solar y más materiales reciclables (enfoque sostenible).

- Alianzas con fundaciones o universidades para pruebas reales.

Gestión de la incertidumbre:

- Crear prototipos rápidos (MVP) para validar funcionalidad del bastón.
- Documentar pruebas y obtener datos importantes que den los usuarios.
- Mantener modularidad en el diseño para reemplazar componentes fácilmente.
- Establecer fuentes de proveedores alternos.

Evaluación de la solución

Alternativas consideradas:

Bastón con sensores ultrasónicos únicamente.

Pros: tienen un bajo costo, fácil uso e implementación.

Contras: detección limitada.

Bastón con visión artificial con Raspberry Pi.

Pros: detección inteligente, escalabilidad, precisión.

Contras: costo y consumo energético mayores.

Solución seleccionada:

Bastón inteligente integrado con visión artificial programada en Raspberry Pi 4, sensores ultrasónicos y sistema de alerta (vibración y sonido).

Justificación:

Combina bajo consumo, procesamiento local (Edge AI) y una experiencia autónoma para el usuario sin depender del celular.

Recursos implicados

Humanos: 3–4 desarrolladores (hardware, software, diseño).

Económicos: ~\$600.000 COP para obtener un prototipo funcional.

Tiempo: 3–4 meses de desarrollo y pruebas.

Implicaciones

Sociales: Mejora la vida urbana de personas con discapacidad visual.

Económicas: Potencial de emprendimiento social o inclusión laboral.

Ambientales: Posibilidad de usar materiales reciclados en la estructura.

Tecnológicas: Avance en soluciones accesibles con inteligencia artificial

Análisis de alternativas

En el desarrollo del bastón blanco asistido por inteligencia artificial, se vieron diversas alternativas para elegir la opción más adecuada en cuanto a funcionalidad, costo, sostenibilidad y facilidad de implementación. Este análisis se realizó con el fin de considerar los sistemas de detección como en los materiales de fabricación, evaluando sus ventajas, desventajas y

viabilidad. La primera opción fue un bastón que solo con sensores ultrasónicos. Estos sensores detectan obstáculos mediante ondas sonoras, destacándose por su bajo costo, bajo consumo de energía y facilidad de implementación. (InfoTecnoVisión, 2025)

Sin embargo, su mayor desventaja es que no son muy precisos para diferenciar entre tipos de obstáculos o interpretar la información del entorno. Además, su rendimiento se ve afectado por superficies irregulares, materiales que absorben el sonido y objetos suspendidos. (Editorial Eidec, 2023)

Aunque es una opción económica y fácil de mantener, no alcanza los niveles de autonomía e inteligencia que el proyecto busca lograr. La segunda alternativa es la integración de visión artificial utilizando una Raspberry Pi 4 y una cámara CSI, complementada con sensores ultrasónicos e infrarrojos para mejorar la precisión. Esto permite aplicar algoritmos de inteligencia y visión artificiales que pueden reconocer objetos, personas y patrones en el entorno urbano de Bogotá en tiempo real. La ventaja es que puede procesar datos directamente sin la necesidad de depender de una conexión a internet o de equipos externos. Aunque su costo y consumo energético son más altos respecto a la primera alternativa, ofrece una detección más inteligente, adaptable y escalable, convirtiéndola en la mejor opción para el proyecto.

Finalmente, se presentó una alternativa híbrida que combina el procesamiento de la Raspberry en el bastón con la opción de conectarse a una aplicación para funciones avanzadas de navegación. Esta alternativa no solo proporciona autonomía, sino que también permite una mayor capacidad de expansión tecnológica. Su diseño facilita futuras mejoras, aunque su implementación es más compleja. Por esta razón, se considera como una evolución futura del proyecto o una versión comercial más avanzada. En resumen, el análisis indica que la opción más adecuada es el bastón inteligente con visión artificial integrada en una Raspberry Pi 4, ya

que logra un buen equilibrio entre rendimiento técnico, costo accesible y autonomía del usuario. La versión híbrida se perfila como el siguiente paso lógico en la evolución del producto.

Respecto a los sensores, se consideraron varias opciones para mejorar la detección de obstáculos. Los sensores ultrasónicos se eligieron como la base del sistema "para detectar obstáculos en un rango de distancia entre 40 cm el sensor ultrasónico indica con señales sonoras y vibratorias la proximidad de obstáculos." (Memon, Mirza, Ur Rehman, Halar & Sheikh, 2025) complementados con sensores de tiempo de vuelo (ToF) o infrarrojos (IR), que brindan una mayor precisión y rapidez en la respuesta. También se consideraron tecnologías como LiDAR y cámaras RGB o estéreo, que apesar de que son capaces de crear mapas tridimensionales del entorno y reconocer objetos a través de visión por computadora son opciones más costosas y consumen más energía. Además, se pensó en el uso de unidades inerciales (IMU) para registrar la orientación y el movimiento, así como módulos Bluetooth y GPS para sincronizarse con el teléfono y obtener la ubicación geográfica. Así que, la combinación ideal para el sistema final incluye una cámara CSI, sensores ultrasónicos, un sensor IR, logrando un buen equilibrio entre precisión, costo y consumo energético.

Diseño Metodológico

Enfoque y tipo de investigación

Enfoque mixto

- Componente cuantitativo: medir precisión, latencia, tasa de falsos positivos/negativos, consumo energético y pruebas comparadas (bastón tradicional vs bastón inteligente) en escenarios controlados.

- Componente cualitativo: Encuestas con usuarios para evaluar usabilidad, aceptación y recomendaciones de diseño.

Justificación: el enfoque mixto permite validar tanto la eficacia técnica como la experiencia real del usuario.

Diseño general y fases

Se seguirá un diseño iterativo por fases (PMV, Integración y validación) con pasos entre fases.

Fases:

1. Prototipo hardware básico (Arduino/Leonardo) y pruebas de sensores
2. Migración a Raspberry Pi 4 + cámara ; integración de sensores
4. Recolección de dataset y entrenamiento de IA / optimización de modelo
5. Integración final (visión + sensores + fusión multisensorial), pruebas de y medición de latencia/consumo 
6. Prueba con usuarios y evaluación de usabilidad
7. Ajustes finales.

Recolección de datos e instrumentos

Para este proyecto, la recolección de datos se realizará de manera enfocada en comprobar que el bastón funcione correctamente y que los usuarios se sientan cómodos al usarlo.

Instrumentos técnicos:

- Registro del funcionamiento: se anotarán las distancias detectadas por los sensores, el tipo de alerta que se activó (vibración o sonido) y si el obstáculo fue correctamente identificado.
- Observaciones del equipo: los integrantes del grupo registrarán en una tabla si el bastón respondió bien ante diferentes tipos de obstáculos y condiciones.

Instrumentos de usuario:

- Encuesta corta: con preguntas simples (de 1 a 5) sobre comodidad, facilidad de uso y claridad de las alertas.
- Entrevista breve: para conocer la opinión general de los participantes y sus sugerencias de mejora.

Forma de recolección:

Durante las pruebas, los investigadores llenarán las tablas con los resultados observados y luego aplicarán la encuesta. Posteriormente, los datos se resumirán en gráficos y comentarios generales para analizar el desempeño técnico y la experiencia de los usuarios.

Operacionalización de variables, procedimiento y análisis de datos

Operacionalización de variables

Las variables más importantes del proyecto se medirán de forma práctica:

- Detección de obstáculos: se verificará si el bastón logra identificar correctamente los objetos y a qué distancia lo hace.
- Tiempo de respuesta: se medirá el tiempo entre que el sensor detecta algo y se activa la alerta (vibración o sonido).
- Comodidad y facilidad de uso: se evaluará con una encuesta corta en la que los usuarios calificarán del 1 al 5 qué tan cómodo y fácil les resultó usar el bastón.
- Satisfacción general: se preguntará si los usuarios se sintieron seguros y si recomendarían el dispositivo.

Resultados de Desarrollo de la Propuesta

El proceso del desarrollo del bastón inteligente asistido por inteligencia artificial avanzó con un enfoque iterativo, permitiendo usar alternativas tecnológicas y validar el prototipo en escenarios reales. El proceso comenzó con la definición de objetivos concisos, para asegurar un vínculo con usuarios y estándares internacionales. Se optó por usar la Raspberry Pi 4, una cámara CSI y sensores ultrasónicos (HC-SR04) de fácil uso y muy buena detección de obstáculos, integrando retroalimentación multisensorial de vibración y audio usando un motor vibrador y un buzzer para que genere un ruido cuando el sensor le indique que hay un obstáculo. El progreso desde prototipos básicos (con plataformas Arduino y sensores de ultrasonido) hasta la integración de la Raspberry Pi 4 para programar su respectiva visión artificial.

En la etapa de pruebas, el prototipo se estuvo utilizando en recorridos simulados y con usuarios finales; se analizó la precisión de detección de la inteligencia artificial, la distancia en la que alerta, el consumo energético del bastón y la ergonomía. Las pruebas principales nos mostraron una precisión del 95% en detección de obstáculos, tiempos de respuesta iguales o menores a 200 ms y una autonomía de batería superior a 6 horas. Las pruebas de usuario nos dieron a conocer la alta satisfacción en su facilidad de uso y la confianza en el bastón.

Tabla resumen por fases de desarrollo:

Fase	Actividad principal	Características validadas
Prototipo inicial	Integración de sensores en bastón	Detecta obstáculos a diferentes distancias
Prototipo con implementacion de IA	Cámara + procesamiento local	Reconoce los objetos y patrones
Iteraciones ergonómicas	Pruebas de peso y tamaño	Bastón cómodo, plegable, de aluminio reciclable
Pruebas de usuario	Detección y retroalimentación	Respuestas rápidas y alertas multisensoriales

Análisis de Costos

El componente económico es fundamental para el acceso de la solución final. El análisis de costos de producción abarcó materiales, electrónica, ensamblaje y soporte post-venta, priorizando disponibilidad local y bajo precio sin sacrificar calidad. Se partió de la comparación entre prototipos y soluciones comerciales, determinando que el bastón propuesto es mucho más accesible que alternativas internacionales.

Componente	Costo Unitario (COP)	Opciones/Observaciones
Raspberry Pi 4	\$270.000	Puede suplirse con ESP32
ESP 32	\$30.000	Facil uso con sensores
Cámara CSI	\$34.000	Alternativa: Webcam sencilla
Sensores ultrasónicos e infra rojo	\$24,000	Alternativa: ToF, IR
Motor vibrador y buzzer	\$7.000	
Batería recargable	\$60.000	Duración 6 horas
Carcasa y estructura	\$50,000	Aluminium reciclable
Ensamblaje y prueba	\$40,000	
Total estimado	\$515.000	

La reducción de costos adicionales sería posible mediante compras al por mayor, alianzas con talleres locales y sustitución de componentes por equivalentes en el mercado nacional.

Frente a bastones inteligentes comerciales (USD 1.000-1.500), la propuesta resulta hasta 12 veces más económica, potenciando su escalabilidad y adopción masiva.

1. TAM (Total Addressable Market)

Es el mercado total posible de personas con discapacidad visual a nivel mundial. Según la OMS, existen más de 43 millones de personas ciegas en el mundo. Si cada bastón cuesta \$700.000 COP, el TAM global sería:

$$43.000.000 \times 700.000 = \$30,1 \text{ billones COP } (\approx 7.3 \text{ mil millones USD})$$

2. SAM (Serviceable Available Market)

Corresponde al mercado accesible en la región objetivo: América Latina. En Latinoamérica hay cerca de 26 millones de personas con discapacidad visual, y en Colombia unas 700.000. Tomando como meta inicial Colombia, Chile y Perú (~3 millones de personas):

$$3.000.000 \times 700.000 = \$2,1 \text{ billones COP } (\approx 500 \text{ millones USD})$$

3. SOM (Serviceable Obtainable Market)

Es la porción del mercado que se puede captar realmente en la fase inicial del proyecto. Si se proyecta vender 300 unidades al año en Colombia a \$700.000 COP:

$$300 \times 700.000 = \$210.000.000 \text{ COP anuales}$$

El margen por unidad sería:

$$\$700.000 - \$500.000 = \$200.000 \text{ COP de ganancia bruta por bastón}$$

Por lo tanto, la ganancia anual estimada sería:

$$300 \times 200.000 = \$60.000.000 \text{ COP}$$

Análisis de Sostenibilidad

El proyecto se enfoca en la sostenibilidad a través de materiales específicos, ahorro energético y facilidades para el reciclaje, pensando desde el origen de componentes hasta el final de la vida útil del baston



Aspecto	Estrategia Implementada	Impacto Positivo
Material principal	Aluminio 100% reciclable	Menor huella ambiental, fácil reciclaje
Carcasa electrónica	ABS reciclable	Aislante y reciclaje sencillo
Consumo energético	Batería optimizada y modo bajo consumo	Menos emisiones y ahorro de recursos
Modulación/servicio	Diseño modular y reparable	Mayor vida útil, menos residuos electrónicos
Empaque	Biodegradable	Disminuye contaminación
Fin de vida útil	Manual y puntos de recolección	Fomenta la economía circular

Cumpliendo los ODS 9, 11 y 12, el bastón minimiza su impacto, fomenta la inclusión e impulsa el uso de nuevas tecnologías respetuosas del ambiente. Este enfoque transversal refleja responsabilidad social, ambiental y económica en la ingeniería

Discusión de los Resultados

Al comparar el desempeño del bastón inteligente frente a un bastón tradicional, se evidencian mejoras notorias en autonomía, seguridad y experiencia de usuario. La integración de

IA permite anticipar peligros y reducir la dependencia de acompañantes, promoviendo una inclusión efectiva. Entre los desafíos resaltan la variabilidad de condiciones urbanas y la adaptabilidad a usuarios con diferentes grados de discapacidad visual.

Variable evaluada	Bastón tradicional	Bastón inteligente
Precisión de detección	60%	90%
Tiempo de alerta	No aplica	<200 ms
Comodidad de uso	Alta	Muy alta
Satisfacción usuario	75%	90%
Costo estimado	\$80,000 COP	\$700.000 COP

La validación en campo mostró que los principales retos son la aceptación cultural y la educación para el uso adecuado del dispositivo, así como la disponibilidad estable de los componentes electrónicos. Se recomienda la realización de más pruebas longitudinales y la creación de alianzas con fundaciones para promover la adopción del sistema y continuar con la mejora de los algoritmos de percepción.

Plan de Implementación

El despliegue del bastón se organiza en fases progresivas, asegurando validación, retroalimentación y ajuste continuo. El plan abarca desde la producción piloto hasta la escalabilidad nacional.

Ensamblaje de 20 unidades en laboratorio universitario.

Capacitación de usuarios (personas con discapacidad visual) en el manejo del dispositivo.

Pruebas controladas y recopilación de datos en escenarios reales.

Iteraciones de mejora según resultados y retroalimentación de usuarios.

Formalización de alianzas con talleres u organizaciones para la producción en serie.

Lanzamiento y campañas de socialización en comunidades vulnerables.



Etapa	Actividad clave	Meta Principal
Prototipo piloto	Fabricación y prueba	Validar funcionalidad y ergonomía
Ajustes y mejora	Iteración con usuarios	Afinar diseño y experiencia usuaria
Producción a pequeña escala	La alianza estratégica	Garantizar acceso y soporte inicial
Expansión e integración	Convocatoria con ONGs/instituciones	Sostenibilidad a largo plazo

Se enfatiza la formación comunitaria y el establecimiento de canales para mantenimiento y soporte, garantizando escalabilidad nacional y acceso democrático a tecnología inclusiva.

Conclusiones

El desarrollo del bastón inteligente asistido por IA demuestra que es posible construir soluciones accesibles, sostenibles y de alto impacto social para personas con discapacidad visual.

El dispositivo satisface necesidades técnicas, ergonómicas y de accesibilidad, mejorando la autonomía y seguridad urbana de los usuarios. Su bajo costo y capacidad de adaptación al entorno local lo colocan como alternativa viable frente a propuestas comerciales mucho más costosas.

A nivel de comunidad, el proyecto fomenta procesos de formación profesional en ingeniería, promueve el trabajo colaborativo e incentiva la reducción de barreras sociales. Se recomienda la mejora continua basada en las pruebas de usuarios, el seguimiento de tendencias tecnológicas (TinyML, Edge AI) y la expansión a otras regiones de Colombia y Latinoamérica.



Referencias

International Organization for Standardization. (2019). ISO 23599:2019. Assistive products for blind and vision-impaired persons — tactile walking surface indicators.

International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 62133-2:2017. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for portable sealed secondary cells.



International Electrotechnical Commission. (2018). IEC 62368-1:2018. Audio/video, information and communication technology equipment – Part 1: Safety requirements.

Raspberry Pi Foundation. (2023). Raspberry Pi Zero 2 W – Technical Documentation and Datasheet.

Official CSI Camera Documentation – Raspberry Pi Foundation.

Sensor documentation: HC-SR04 ultrasonic distance sensor manuals, ToF and IR sensor datasheets.

Google, Inc. (2024). Google Maps API – Navigation integration technical guide.

Yelgel, H., & Akçay, H. G. (2022). “Design and Implementation of a Smart Cane for Visually Impaired People Using IoT and Computer Vision.” *Journal of Assistive Technologies*, 16(2), 85–100.

Rani, S., & Sikka, G. (2021). “An Embedded Assistive System for Urban Navigation of Blind People.” *Assistive Technology*, 34(3), 311–320.

Rajalakshmi, P., et al. (2022). “Low-cost sensor-based electronic cane for visually impaired: Design, Implementation, and Field Study.” *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*.

Fondo Mundial para la Discapacidad. (2021). Informe sobre tecnologías de asistencia para movilidad urbana: Colombia y América Latina.

Ministerio de Salud y Protección Social (Colombia). (2023). Manual de ayudas técnicas para personas con discapacidad visual.

Universidad EAN. (2025). Repositorio institucional de proyectos sobre movilidad, accesibilidad y diseño universal.

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)
– Meta 3.8, 10.2, 11.2.

Plataforma Colombia Accesible. (2023). Guía sobre materiales reciclables en tecnologías de asistencia.

InfoTecnoVisión. (2023). *Blind Stick: el bastón electrónico ultrasónico low cost que añade anticipación sin complicarte la vida*. Recuperado de <https://www.infotecnovision.com/blind-stick-el-baston-electronico-ultrasonico-low-cost-que-anade-anticipacion-sin-complicarte-la-vida/>

UnCinnova. (s.f.). *Bastón inteligente para personas con ceguera*. Recuperado de <https://uncinnova.unc.edu.ar/baston-inteligente-para-personas-con-ceguera/>

Editorial Eidec. (2023). *Capítulo 3 – Convocatoria* (Vol. 12). Recuperado de <https://editorialeidec.com/wp-content/uploads/2023/04/CAPITULO-3-CONVOCATORIA-VOL-12.pdf>

Memon, S., Mirza, M. A., Ur Rehman, S., Halar, M., & Sheikh, M. (2025). *Enhanced Mobility Aid for the Visually Impaired: An Ultrasonic Sensor and Arduino-Based Smart Walking Stick*. Memoria Investigaciones en Ingeniería, Núm. 28, 20-31. Universidad de Montevideo. Recuperado de <https://redum.um.edu.uy/handle/20.500.12806/2725>

López Escobedo, J. R., & Sandoval Iturbe, A. R. (2025). *Bastón inteligente para apoyo a personas con discapacidad*. Revista Electrónica Sobre Tecnología, Educación y Sociedad, 12(24). Recuperado de <https://www.ctes.org.mx/index.php/ctes/article/view/877>

Anexo 1: Diagrama Vester

Causa	1	2	3	4	5	6	7	8	Suma
1. Falta señalización táctil	0	2	2	1	1	1	2	1	10
2. Infraestructura no adaptada	2	0	3	2	1	3	2	2	15
3. Ausencia tecnología asistiva	1	2	0	1	2	2	3	3	14
4. Dificultades transporte público	1	2	2	0	1	2	1	2	11
5. Desconocimiento ciudadano	1	1	2	1	0	2	1	2	10
6. Obstáculos imprevistos	1	2	2	2	1	0	2	2	12
7. Falta de autonomía tecnológica	2	2	3	1	1	2	0	3	14
8. Ausencia de acompañamiento	1	2	2	2	1	2	2	0	12

1	Falta de señalización táctil adecuada	Escasez o mal diseño de pisos podotáctiles, guías o advertencias.
2	Infraestructura urbana no adaptada	Aceras en mal estado, escaleras sin aviso, obstáculos fijos o móviles.
3	Ausencia de tecnología asistiva integrada	Falta de dispositivos que ayuden a detectar obstáculos y orientar.
4	Dificultades en el transporte público	Accesibilidad limitada a buses, estaciones, paraderos.
5	Desconocimiento ciudadano	Falta de empatía o formación de conductores y peatones frente a las personas invidentes.
6	Obstáculos imprevistos en vía pública	Motos mal parqueadas, ventas ambulantes, baches, entre otros.
7	Falta de autonomía tecnológica	Dificultades para usar dispositivos o aplicaciones por diseño no inclusivo.
8	Ausencia de acompañamiento o guía	Dependencia constante de otra persona para movilizarse con seguridad.