

# INTERACCIÓN

Revista Digital de **AIPO**

Asociación Interacción Persona-Ordenador

Vol. 7, No 2 (2026)

## Comité editorial

### **Editado y publicado por:**

Asociación Interacción Persona-Ordenador (AIPO)

Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, E.T.S. de Ingeniería Informática y de Telecomunicación, C/ Periodista Daniel Saucedo Aranda s/n, 18071, Granada, España

[aipo@aipo.es](mailto:aipo@aipo.es)

### **Editores:**

Jesús Gallardo, Universidad de Zaragoza (España)

Daniel Guasch, Universitat Politècnica de Catalunya (España)

Raquel Hervás, Universidad Complutense de Madrid (España)

### **Editores invitados:**

Maria Amelia Eliseo, Universidade Presbiteriana Mackenzie (Brasil)

Juan Enrique Garrido, Universidad de Castilla-La Mancha (España)

María Dolores Lozano, Universidad de Castilla-La Mancha (España)

### **Equipo editorial:**

Diana Arellano, ACM SIGGRAPH Diversity and Inclusion Committee y Mackevision (Alemania)

Sandra Baldassarri, Universidad de Zaragoza (España)

Federico Botella, Universidad Miguel Hernández de Elche (España)

César Collazos, Universidad del Cauca (Colombia)

Rosa Gil, Universitat de Lleida (España)

Toni Granollers, Universitat de Lleida (España)

Francisco Gutiérrez, Universidad de Granada (España)

Luis Leiva, University of Luxembourg (Luxemburgo)

José Antonio Macías, Universidad Autónoma de Madrid (España)

Diego Martínez Plasencia, University College London (Reino Unido)

Gonzalo Méndez, Universidad Complutense de Madrid (España)

Fernando Moreira, Universidade Portucalense (Portugal)

José Ignacio Panach, Universitat de València (España)

Pere Ponsa, Universitat Politècnica de Catalunya (España)

Arcadio Reyes-Lecuona, Universidad de Málaga (España)

**Revisores adicionales en este número:**

Ana Morales, Universidad Central de Venezuela (Venezuela)

Bruno Rodrigues, Universidade Presbiteriana Mackenzie (Brasil)

## Preámbulo

Los sistemas interactivos influyen en todos los aspectos de la vida de las personas, y asistimos a una continua evolución de los paradigmas clásicos de interacción a nuevas formas de interactuar, por lo que es esencial investigar y compartir el conocimiento de estos paradigmas emergentes. Con este espíritu trabaja la Asociación Interacción Persona-Ordenador (AIPO) desde hace más de 20 años.

La revista *Interacción, Revista Digital de AIPO* (Asociación Interacción Persona-Ordenador), nació con su número 1 con el objetivo de difundir el conocimiento de la Interacción Persona-Ordenador (IPO) y servir de vínculo entre los científicos y profesionales que desarrollen actividades en este ámbito, y con la finalidad de potenciar la transferencia de sus resultados a la sociedad.

La IPO es un campo de investigación multidisciplinario, por ello, la revista presenta contribuciones del ámbito de la Informática como: usabilidad, el diseño centrado en el usuario, accesibilidad, experiencia de usuario, juegos serios, computación ubicua, realidad aumentada, realidad virtual, computación móvil y desarrollo de interfaces de usuario, pero además, se quiere fortalecer la publicación de trabajos de investigación en áreas de diseño industrial, robótica, psicología, etc. relacionadas con la IPO.

Esta revista se distribuye a todos los socios, y se defiende que su publicación sea de acceso abierto que fomente el avance del conocimiento científico a disposición de todos, por ello su contenido es libremente accesible por Internet.

La revista selecciona los artículos para publicar en un sistema de revisión por pares, doble ciego, siguiendo las buenas prácticas de las revistas académicas. Es una revista enfocada a la comunidad en España e Iberoamérica y publica artículos en español. *Interacción* se publica en formato exclusivamente digital, con una periodicidad semestral, publicándose dos números al año. La llamada de artículos está abierta todo el año.

### Resumen del Volumen 7, Número 2:

El presente número acoge 10 artículos de investigación original en IPO, proviniendo 9 de ellos del congreso *Interacción 2026*, celebrado en Albacete en septiembre de 2026. Se trata de la 26ª edición del congreso auspiciado por AIPO que pone en contacto a la comunidad hispanohablante de investigación en IPO.

El primer artículo, el único no proveniente del congreso, consiste en una revisión sistemática para el desarrollo de una herramienta digital en un contexto rural. En cuanto a los artículos que sí que provienen del congreso, aparecen un artículo sobre agentes de inteligencia artificial que trabajan con datos, otro sobre el análisis de características de usuario mediante aprendizaje automático, uno sobre el desarrollo y evaluación de un sistema de interfaz cerebro-ordenador, hasta tres artículos sobre diferentes propuestas y experiencias con robots sociales, aplicándose a adultos mayores y

también a jóvenes universitarios, un artículo sobre estímulos en interfaces hápticas, otro sobre accesibilidad web y finalmente uno sobre un sistema de posicionamiento Bluetooth en interiores. Un amplio espectro de temas que dan una idea sobre los caminos que está tomando en la actualidad la investigación de la comunidad hispanohablante que trabaja en IPO.

Jesús Gallardo, Daniel Guasch y Raquel Hervás

Editores de Interacción, Revista digital de AIPO

## Tabla de contenidos

Saberes ancestrales, tecnologías emergentes y gestión sostenible del agua: revisión sistemática de la literatura para orientar una herramienta digital en la comunidad indígena Kisgó

*Vanessa Agredo-Delgado, César A. Collazos y Diana Mendoza* ..... 8

Reimaginando la agencia de datos en sistemas agénticos: Un modelo triádico HAD para la interacción humano-datos en arquitecturas de agentes IA

*Iván Durango, José A. Gallud, Víctor M.R. Penichet* ..... 18

Análisis de características de usuario con *Machine Learning*

*Alberto Gaspar, José Ignacio Panach, Miriam Gil, Verónica Romero, Damiano Distante* ..... 29

Desarrollo y evaluación de un sistema BCI basado en imaginación motora: comparativa de FBCSP y geometría Riemanniana

*Cristina Herrero Martínez, Álvaro Fernández Guirao, Enrique Navarro Camba, José Vicente Riera López* ..... 40

Accesibilidad en robots sociales para adultos mayores: Propiedades relacionadas con la comunicación no verbal

*Alberto Hitos-García, Sergio Albiol-Pérez, Nuria Medina-Medina, Patricia Paderewski-Rodríguez, Susana Bautista-Blasco, Francisco Luis Gutiérrez-Vela, Raquel Lacuesta-Gilaberte* ..... 51

Aplicación de una metodología de co-diseño de robots sociales para la gestión emocional en entornos universitarios

*Raquel Lacuesta Gilaberte, Eva Hervás Puchalt, Carlos Marín Lora, Luis Manuel Muñoz Pérez* ..... 62

Una experiencia de co-diseño de robots sociales para el bienestar de las personas mayores en entornos comunitarios

*Liany Mendoza, Eva Cerezo, Loreto Matinero, Sandra Baldassarri* ..... 70

*Affective touch*: Estudio preliminar de estímulos vibrotáctiles en interfaces hápticas

*Noelia González-Sánchez, Arturo S. García, Antonio Fernández-Caballero, José P. Molina* ..... 80

Aprender accesibilidad web a través de la creación de ejemplos. Un estudio sobre percepción, dificultad y estrategias en la aplicación de las WCAG

*Afra Pascual Almenara, Alberto Pedrero Esteban, Susana Bautista* ..... 94

Posicionamiento en interiores utilizando Bluetooth para la detección y el análisis de interacciones sociales

*José J. González-García, Luis Zhinin-Vera, Víctor López-Jaquero, Francisco Montero, Pascual González*  
..... 109

## Saberes ancestrales, tecnologías emergentes y gestión sostenible del agua: revisión sistemática de la literatura para orientar una herramienta digital en la comunidad indígena Kisgó

*Ancestral knowledge, emerging technologies, and sustainable water management: A systematic literature review to guide a digital tool for the Kisgó indigenous community*

(1) Vanessa Agredo-Delgado [0000-0003-0870-6895], (2) Cesar A. Collazos [0000-0002-7099-8131], (3) Diana Mendoza [0009-0001-3904-7477]

(1) Universidad del Cauca, [vanessaagredo@unicauca.edu.co](mailto:vanessaagredo@unicauca.edu.co)

(2) Universidad del Cauca, [ccolazo@unicauca.edu.co](mailto:ccolazo@unicauca.edu.co)

(3) ESRI Colombia, [dmendozaco@gmail.com](mailto:dmendozaco@gmail.com)

**Resumen.** La gestión sostenible del agua en comunidades indígenas constituye un desafío ambiental, social y cultural que requiere enfoques capaces de articular conocimiento local, participación comunitaria y tecnologías digitales. En la comunidad indígena Kisgó, ubicada en Silvia, Cauca, Colombia, el agua cumple un papel central en las prácticas territoriales, productivas y culturales; sin embargo, la variabilidad climática, la transformación territorial y el debilitamiento de la transmisión intergeneracional de saberes plantean retos para su gestión. Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura orientada a fundamentar el diseño futuro de una herramienta digital intercultural para apoyar la gestión sostenible del agua en dicha comunidad. La revisión siguió la guía PRISMA 2020 e identificó enfoques metodológicos, tecnologías emergentes y principios de Interacción Humano-Computador aplicados en contextos rurales, comunitarios e indígenas. Los hallazgos evidencian la relevancia de metodologías participativas, co-diseño, monitoreo comunitario, tecnologías IoT de bajo costo, apropiación tecnológica y gobernanza ética de datos y saberes. Como resultado, se propone un modelo conceptual preliminar que organiza dimensiones sociotécnicas para orientar etapas posteriores de co-diseño, implementación y evaluación participativa.

**Palabras clave:** Gestión del agua, Comunidad indígena, Internet de las Cosas (IoT), Diseño participativo, Interacción Humano-Computador, Saberes ancestrales.

**Abstract.** Sustainable water management in Indigenous communities is an environmental, social, and cultural challenge that requires approaches capable of articulating local knowledge, community participation, and digital technologies. In the Kisgó Indigenous community, located in Silvia, Cauca, Colombia, water plays a central role in territorial, productive, and cultural practices; however, climate variability, territorial transformation, and the weakening of intergenerational knowledge transmission pose challenges for its management. This article presents a systematic literature review aimed at informing the future design of an intercultural digital tool to support sustainable water management in this community. The review followed the PRISMA 2020 guidelines and identified methodological approaches, emerging technologies, and Human-Computer Interaction principles applied in rural, community-based, and Indigenous contexts. The findings highlight the relevance of participatory methodologies, co-design, community-based monitoring, low-cost IoT technologies, technological appropriation, and ethical governance of data and knowledge. As a result, a preliminary conceptual model is proposed to organize sociotechnical dimensions that may guide subsequent stages of participatory co-design, implementation, and evaluation.

**Keywords:** Water management, Indigenous communities, Internet of Things (IoT), Participatory design, Human-computer interaction, Ancestral knowledge.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión sostenible del agua en comunidades indígenas constituye un desafío ambiental, social, cultural y tecnológico que requiere enfoques capaces de reconocer la relación profunda entre territorio, conocimiento local, prácticas comunitarias y transformación climática (Berkes, 2018). Los pueblos indígenas han desarrollado sistemas de conocimiento basados en la observación prolongada de los ecosistemas, la transmisión intergeneracional y la gestión colectiva de los recursos naturales, los cuales resultan relevantes para la adaptación climática y la sostenibilidad territorial (Dorji et al., 2024). Sin embargo, estos conocimientos continúan siendo insuficientemente integrados en los enfoques técnico-científicos convencionales, especialmente cuando las soluciones para la gestión del agua se diseñan desde perspectivas externas o únicamente técnicas (Whyte, 2013).

En estos contextos, el agua no puede comprenderse únicamente como un recurso físico, sino como un elemento articulador de la vida comunitaria, la identidad territorial, la espiritualidad, la producción agrícola y la gobernanza local. La literatura sobre gobernanza indígena del agua destaca que las formas de relación con este recurso están asociadas con derechos colectivos, responsabilidades territoriales, prácticas culturales y mecanismos propios de toma de decisiones (Arsenault et al., 2018; Diver et al., 2022). Por ello, cualquier iniciativa orientada a la gestión sostenible del agua en comunidades indígenas debe considerar no solo variables ambientales o técnicas, sino también dimensiones culturales, sociales, éticas y participativas (Wilson et al., 2018).

De manera paralela, las tecnologías emergentes han abierto nuevas posibilidades para apoyar la gestión del agua mediante sistemas de monitoreo, análisis de datos y apoyo a la toma de decisiones. Por su parte, el Internet de las Cosas permite capturar variables relacionadas con calidad,

disponibilidad, nivel o caudal del agua mediante sensores conectados, mientras que la Inteligencia Artificial puede apoyar procesos de predicción, clasificación y análisis de patrones en sistemas hídricos (Amanatidis et al., 2026; Krishnan et al., 2022; Singh & Ahmed, 2021). Sin embargo, su incorporación en contextos rurales e indígenas no garantiza por sí misma una mejora en la gestión del recurso, especialmente cuando existen barreras de infraestructura, conectividad, alfabetización digital, apropiación tecnológica y pertinencia cultural.

Desde la Interacción Humano-Computador, esta problemática exige superar una visión centrada exclusivamente en la eficiencia técnica de las herramientas digitales. El diseño de tecnologías para contextos comunitarios e interculturales requiere comprender quiénes son los usuarios, cuáles son sus prácticas, cómo se organiza el conocimiento, qué formas de representación resultan significativas y bajo qué condiciones una tecnología puede ser apropiada por la comunidad (Norman, 2013). En este sentido, el Diseño Centrado en el Usuario y el co-diseño han mostrado la importancia de involucrar activamente a los usuarios en la definición de necesidades, requerimientos, prototipos y criterios de evaluación (Sanders & Stappers, 2008). Asimismo, las aproximaciones de diseño culturalmente sensible destacan que las tecnologías deben ser no solo usables, sino también respetuosas de los contextos culturales en los que serán incorporadas (Anderson-Coto et al., 2024).

A pesar de estos avances, persiste una brecha relevante, los estudios sobre tecnologías digitales para la gestión del agua suelen concentrarse en el monitoreo y análisis de datos, mientras que los trabajos sobre saberes indígenas y gobernanza del agua enfatizan dimensiones socioculturales, territoriales o políticas. En consecuencia, aún son limitadas las investigaciones que articulan de manera sistemática conocimiento ancestral, tecnologías emergentes e Interacción Humano-Computador para orientar el diseño de herramientas digitales culturalmente pertinentes. En este contexto, el presente artículo se enfoca en la comunidad indígena Kisgó, ubicada en Silvia, Cauca, Colombia, y desarrolla una revisión sistemática basada en PRISMA 2020 para identificar enfoques metodológicos, tecnologías emergentes y principios de diseño que fundamenten etapas posteriores de co-diseño, implementación y evaluación participativa. A partir de esta revisión, se propone un modelo conceptual preliminar que organiza las dimensiones necesarias para orientar el desarrollo futuro de soluciones digitales más participativas, éticas y culturalmente pertinentes.

## **2. METODOLOGÍA**

El estudio se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura orientada a identificar enfoques metodológicos, tecnologías emergentes y principios de Interacción Humano-Computador aplicables al diseño futuro de una herramienta digital intercultural para la gestión sostenible del agua en comunidades indígenas. La revisión siguió las recomendaciones de la guía PRISMA 2020, con el propósito de garantizar transparencia en la identificación, selección y síntesis de los estudios incluidos (Page et al., 2021).

### **2.1. Diseño de la revisión**

La revisión se estructuró a partir de cuatro preguntas de investigación orientadas a identificar: i) enfoques metodológicos para integrar saberes ancestrales y tecnologías digitales en contextos comunitarios; ii) tecnologías emergentes aplicadas a la gestión del agua en entornos rurales, indígenas o comunitarios; iii) principios de Interacción Humano-Computador que favorezcan la

apropiación tecnológica; y iv) limitaciones técnicas, metodológicas, culturales y éticas reportadas en la literatura. Estas preguntas permitieron organizar el análisis en torno a conocimiento ancestral, gestión sostenible del agua, tecnologías digitales y diseño participativo.

## 2.2. Estrategia de búsqueda y fuentes de información

La búsqueda se realizó en Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y Google Scholar. Las tres primeras bases fueron seleccionadas por su cobertura de literatura científica indexada en ingeniería, tecnologías digitales, ciencias ambientales, sostenibilidad e Interacción Humano-Computador. Google Scholar se utilizó como fuente complementaria para identificar literatura académica adicional, verificar referencias relevantes y apoyar procesos de búsqueda hacia atrás y hacia adelante; sin embargo, la inclusión final priorizó documentos académicos revisados por pares y fuentes institucionales de alta pertinencia.

La cadena general de búsqueda se construyó mediante la combinación de términos asociados con conocimiento ancestral, gestión del agua y tecnologías digitales. La cadena base fue la siguiente:

***("indigenous knowledge" OR "ancestral knowledge" OR "traditional ecological knowledge" OR "local knowledge") AND ("water management" OR "water governance" OR "water conservation" OR "water resource management") AND ("Internet of Things" OR IoT OR "artificial intelligence" OR "machine learning" OR "human-computer interaction" OR HCI OR "participatory design" OR "co-design" OR "user-centered design")***

Esta cadena fue adaptada de acuerdo con la sintaxis de cada base de datos, manteniendo la equivalencia semántica entre los términos de búsqueda. Para ampliar la recuperación de estudios relevantes, también se realizaron búsquedas complementarias combinando pares de dimensiones, especialmente cuando la cadena completa resultaba demasiado restrictiva. Por ejemplo, se emplearon combinaciones entre conocimiento ancestral y gobernanza del agua, tecnologías digitales y gestión hídrica, o diseño participativo y comunidades indígenas.

La búsqueda se realizó durante el primer semestre de 2025 y se limitó a publicaciones comprendidas entre 2015 y 2025.

## 2.3. Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron publicaciones entre 2015 y 2025, escritas en inglés o español, que abordaran al menos una de las relaciones centrales del estudio: saberes ancestrales y gestión del agua, tecnologías digitales aplicadas a la gestión hídrica, diseño participativo en comunidades rurales o indígenas, o apropiación tecnológica en contextos comunitarios. También se incluyeron estudios relacionados con Interacción Humano-Computador, co-diseño, diseño centrado en el usuario o diseño culturalmente sensible, siempre que aportaran elementos aplicables al futuro diseño de herramientas digitales interculturales.

Se excluyeron estudios exclusivamente técnicos sin relación con usuarios, comunidades o contexto sociocultural; documentos sin acceso a texto completo; trabajos sin claridad metodológica; publicaciones duplicadas; textos de divulgación, prensa, blogs o fuentes no académicas; y estudios que no presentaran relación directa con gestión del agua, conocimiento local, tecnologías digitales o

diseño participativo. Esta decisión respondió a la necesidad de fortalecer la calidad académica de la revisión y reducir la dependencia de fuentes grises o no verificables.

## **2.4. Selección de estudios y extracción de información**

El proceso de selección siguió cuatro etapas: identificación, eliminación de duplicados, cribado y elegibilidad. En la fase de identificación se recuperaron 312 registros iniciales. Luego de eliminar duplicados, se conservaron 268 documentos únicos. Posteriormente, se revisaron títulos y resúmenes, aplicando los criterios de inclusión y exclusión, lo que permitió seleccionar 124 estudios potencialmente relevantes. En la etapa de elegibilidad se realizó la lectura completa de los documentos, reduciendo el conjunto a 52 estudios. Finalmente, se incluyeron 28 estudios para la síntesis cualitativa.

Para cada estudio incluido se registró información bibliográfica, objetivo, contexto de aplicación, enfoque metodológico, tecnología utilizada, tipo de participación comunitaria, principios de diseño, principales resultados y limitaciones reportadas. La extracción de información permitió construir una síntesis cualitativa orientada a identificar patrones, relaciones y vacíos en la literatura. Específicamente, el análisis buscó establecer cómo se relacionan las dimensiones de conocimiento ancestral, gestión del agua, tecnologías emergentes, apropiación tecnológica y diseño participativo.

## **2.5. Síntesis y análisis**

La síntesis se realizó mediante análisis temático. Los hallazgos se agruparon en cuatro categorías: enfoques participativos, tecnologías emergentes aplicadas a la gestión del agua, principios de Interacción Humano-Computador para la apropiación tecnológica y limitaciones de implementación en contextos indígenas o comunitarios. Esta organización permitió conectar los resultados de la revisión con el propósito del artículo y sirvió como base para proponer un modelo conceptual preliminar, entendido como una organización inicial de dimensiones para orientar etapas posteriores de co-diseño, implementación y evaluación.

## **3. RESULTADOS DE LA REVISIÓN**

La revisión permitió identificar que la integración entre saberes ancestrales, tecnologías emergentes y gestión sostenible del agua no se configura como una relación lineal, sino como un proceso sociotécnico en el que intervienen dimensiones metodológicas, tecnológicas, culturales, éticas y de interacción. A partir del análisis de los estudios incluidos, los hallazgos se organizaron en cuatro categorías: enfoques participativos, tecnologías emergentes para la gestión del agua, principios de Interacción Humano-Computador y limitaciones para la implementación en contextos indígenas o comunitarios.

### **3.1. Enfoques participativos para articular conocimiento local y gestión del agua**

Los estudios revisados muestran que las iniciativas más pertinentes en contextos indígenas y comunitarios son aquellas que reconocen a la comunidad como actor activo en la producción de conocimiento, y no únicamente como usuaria final de una tecnología. En este sentido, el monitoreo

comunitario, la investigación participativa y el co-diseño se presentan como enfoques relevantes para integrar conocimiento local, observación territorial y toma de decisiones sobre el agua.

Wilson et al. (2018) evidencian que el monitoreo comunitario de la calidad del agua puede funcionar como una práctica de gobernanza indígena, en la medida en que fortalece la capacidad local para generar datos, interpretar cambios ambientales y participar en decisiones relacionadas con el territorio. De manera complementaria, Arsenault et al. (2018) sostienen que las metodologías de investigación indígena permiten replantear los marcos convencionales de gobernanza del agua, al reconocer epistemologías propias, relaciones territoriales y formas colectivas de responsabilidad sobre el recurso hídrico. Estas aproximaciones sugieren que la participación comunitaria no debe limitarse a la validación final de una solución, sino incorporarse desde la definición del problema, la selección de variables, la interpretación de datos y la toma de decisiones.

### **3.2. Tecnologías emergentes para la gestión sostenible del agua**

En relación con las tecnologías emergentes, los estudios analizados muestran un interés creciente por el uso de Internet de las Cosas, Inteligencia Artificial, computación en el borde y analítica de datos para apoyar la gestión del agua. Estas tecnologías permiten capturar, procesar y analizar información relacionada con variables como calidad del agua, disponibilidad, caudal, nivel, consumo o condiciones ambientales.

Amanatidis et al. (2026) destacan que la combinación de sensores IoT, redes de comunicación de bajo consumo, inteligencia artificial y análisis de datos puede contribuir a sistemas de gestión hídrica más eficientes, resilientes y sostenibles. Sin embargo, los estudios revisados advierten que la efectividad de estas tecnologías depende de su adecuación al contexto de uso. En comunidades rurales o indígenas, los criterios de bajo costo, mantenimiento local, conectividad limitada, facilidad de interpretación y apropiación comunitaria son tan importantes como la precisión técnica del sistema.

### **3.3. Principios de Interacción Humano-Computador y apropiación tecnológica**

Los hallazgos de la revisión evidencian que la apropiación tecnológica en contextos indígenas no depende únicamente de la disponibilidad de dispositivos o conectividad, sino de la relación entre la tecnología, las prácticas culturales, los modelos mentales de los usuarios y las formas locales de organización del conocimiento. Desde esta perspectiva, la Interacción Humano-Computador aporta elementos clave para orientar el diseño de herramientas digitales culturalmente pertinentes.

El Diseño Centrado en el Usuario permite comprender necesidades, capacidades, limitaciones y expectativas de los usuarios antes de definir funcionalidades o interfaces (Norman, 2013). No obstante, en contextos indígenas este enfoque debe ampliarse hacia perspectivas participativas y culturalmente sensibles, donde la comunidad no solo evalúe la usabilidad de una herramienta, sino que participe en la construcción de sus contenidos, representaciones y criterios de uso. Anderson-Coto et al. (2024) resaltan la importancia de centrar las voces de la comunidad en procesos de diseño participativo, especialmente cuando se busca que las tecnologías sean culturalmente sostenibles y no reproduzcan enfoques externos.

### 3.4. Limitaciones técnicas, culturales y éticas identificadas

Los estudios revisados evidencian limitaciones recurrentes en la implementación de soluciones digitales en contextos comunitarios. Estas se relacionan principalmente con barreras técnicas (infraestructura, conectividad, disponibilidad de dispositivos y mantenimiento), limitaciones metodológicas asociadas con diseños externos poco participativos, y desafíos éticos vinculados con la protección del conocimiento ancestral y los datos generados por la comunidad. En este último aspecto, los principios CARE para la gobernanza de datos indígenas resaltan la importancia del beneficio colectivo, la autoridad para controlar los datos, la responsabilidad y la ética en el manejo de información vinculada con pueblos indígenas (Carroll et al., 2020; Carroll et al., 2021). Por tanto, una futura herramienta digital debe contemplar mecanismos de consentimiento, autorización comunitaria, control de acceso, resguardo de saberes sensibles y devolución de resultados. La Tabla 1 sintetiza las dimensiones derivadas de la revisión y sus implicaciones para orientar el diseño futuro de una herramienta digital intercultural.

**Tabla 1.** Dimensiones derivadas de la revisión para orientar el diseño futuro de una herramienta digital intercultural

| Dimensión                             | Base identificada en la revisión                                                                                                                                                                 | Implicación para el diseño futuro                                                                                       |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conocimiento ancestral y territorio   | El conocimiento indígena aporta formas situadas de observar, interpretar y gestionar el territorio y el agua (Berkes, 2018; Whyte, 2013; Dorji et al., 2024).                                    | Definir con la comunidad qué saberes pueden representarse digitalmente y cuáles deben mantenerse restringidos.          |
| Participación comunitaria             | La gobernanza del agua involucra responsabilidades territoriales, roles comunitarios y toma de decisiones colectivas (Arsenault et al., 2018; Wilson et al., 2018).                              | Incorporar a la comunidad en definición del problema, variables, contenidos, roles y criterios de evaluación.           |
| Tecnologías emergentes                | IoT e IA pueden apoyar monitoreo y análisis, pero requieren adaptación contextual (Amanatidis et al., 2026; Krishnan et al., 2022).                                                              | Priorizar tecnologías de bajo costo, mantenibles, comprensibles y viables en condiciones rurales.                       |
| Interacción y apropiación tecnológica | El co-diseño y el diseño centrado en el usuario favorecen la apropiación al integrar necesidades y prácticas reales de uso (Norman, 2013; Sanders & Stappers, 2008; Anderson-Coto et al., 2024). | Diseñar interfaces con lenguaje claro, representaciones culturalmente significativas y mecanismos de retroalimentación. |
| Gobernanza ética de datos y saberes   | Los principios CARE enfatizan beneficio colectivo, autoridad para controlar datos, responsabilidad y ética (Carroll et al., 2020; Carroll et al., 2021).                                         | Establecer consentimiento, control de acceso, resguardo de saberes sensibles y devolución de resultados.                |

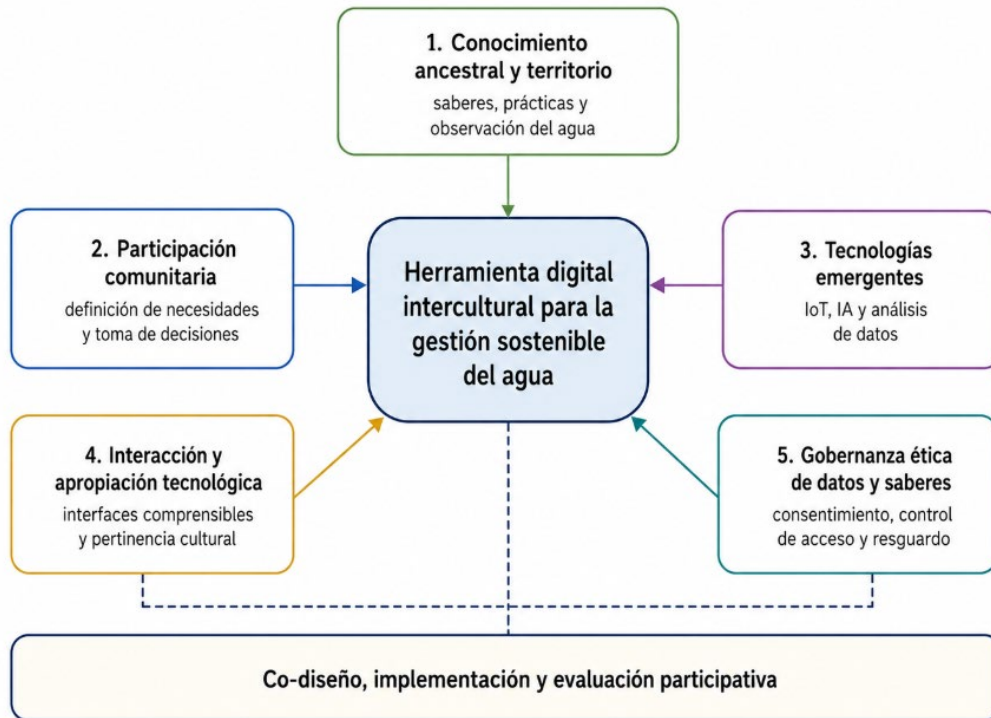
Considerando los resultados, se evidencia que el diseño futuro de una herramienta digital para la gestión sostenible del agua en la comunidad Kísgó no debería partir únicamente de la selección de tecnologías, sino de la articulación entre conocimiento ancestral, participación comunitaria, diseño centrado en las personas, gobernanza de datos y sostenibilidad técnica. Esta síntesis constituye la base para el modelo conceptual preliminar que se presenta en la siguiente sección.

## 4. MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR DERIVADO DE LA REVISIÓN

A partir de los hallazgos sintetizados en la Tabla 1, se propone un modelo conceptual preliminar para orientar el diseño futuro de una herramienta digital intercultural de apoyo a la gestión sostenible del agua en la comunidad indígena Kísgó. Este modelo no constituye una arquitectura tecnológica implementada ni una solución validada con usuarios; corresponde a una síntesis analítica derivada de la revisión, cuyo propósito es organizar las dimensiones que deberían considerarse en fases posteriores de co-diseño, implementación y evaluación participativa.

El modelo se estructura en cinco dimensiones interrelacionadas: conocimiento ancestral y territorio, participación comunitaria, tecnologías emergentes, interacción y apropiación tecnológica, y

gobernanza ética de datos y saberes. Como se muestra en la Figura 1, estas dimensiones no operan de forma aislada, sino como componentes de un sistema sociotécnico orientado a que las decisiones sobre contenidos, variables de monitoreo, visualización, roles de usuario, acceso a la información y criterios de evaluación sean construidas progresivamente con la comunidad.



**Figura 1.** Modelo conceptual preliminar para orientar el diseño futuro de una herramienta digital intercultural para la gestión sostenible del agua.

Desde la perspectiva de Interacción Humano-Computador, el modelo sitúa la apropiación tecnológica y la pertinencia cultural como condiciones centrales del diseño. Por ello, la tecnología se concibe como un medio de apoyo para fortalecer la gestión local del agua y no como un sustituto del conocimiento ancestral. Considerando esto, la futura herramienta deberá definirse mediante procesos iterativos de co-diseño que permitan establecer qué saberes pueden ser representados digitalmente, qué información debe mantenerse restringida, qué variables hídricas son relevantes para la comunidad y bajo qué mecanismos se garantizará la gobernanza ética de los datos y saberes.

## 5. DISCUSIÓN, LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados de la revisión evidencian que el diseño de herramientas digitales para la gestión sostenible del agua en comunidades indígenas no puede abordarse únicamente desde la incorporación de tecnologías emergentes. La contribución principal al campo de la Interacción Persona Ordenador se sitúa en la formulación de un modelo conceptual preliminar que orienta procesos de diseño capaces de articular conocimiento ancestral, participación comunitaria, apropiación tecnológica y pertinencia cultural. En este sentido, el modelo conceptual preliminar propuesto permite organizar las dimensiones que deberían considerarse antes de avanzar hacia el desarrollo de una herramienta digital, evitando enfoques tecnocéntricos y promoviendo una aproximación situada, participativa y ética.

Asimismo, la revisión muestra que IoT e IA pueden aportar al monitoreo y análisis del recurso hídrico, pero su uso debe depender de decisiones construidas con la comunidad. Esto implica definir colectivamente qué variables son relevantes, cómo se interpretarán los datos, quién tendrá acceso a la información y qué tipo de saberes pueden ser registrados o digitalizados. Por tanto, la operacionalización del modelo requiere futuras actividades de co-diseño, caracterización comunitaria, definición de requerimientos, prototipado progresivo y evaluación de usabilidad, utilidad y pertinencia cultural.

El estudio presenta limitaciones. En la dimensión metodológica, la revisión se restringió a las bases de datos seleccionadas y a publicaciones entre 2015 y 2025, por lo que podrían existir estudios relevantes fuera del corpus analizado. En la dimensión empírica, el modelo conceptual aún no ha sido validado con la comunidad Kisgó ni con usuarios finales. En la dimensión tecnológica, no se presenta una arquitectura implementada ni pruebas con sensores, modelos de IA o prototipos funcionales. En la dimensión ética y cultural, se requiere definir con las autoridades y participantes comunitarios los mecanismos de consentimiento, gobernanza de datos, protección de saberes sensibles y devolución de resultados. Como trabajo futuro, se plantea desarrollar procesos participativos con la comunidad para validar y ajustar el modelo, definir requerimientos de la herramienta, construir prototipos y evaluar su apropiación en el contexto territorial.

## 6. CONCLUSIONES

Este artículo presentó una revisión sistemática de la literatura orientada a fundamentar el diseño futuro de una herramienta digital intercultural para apoyar la gestión sostenible del agua en la comunidad indígena Kisgó. Los hallazgos muestran que las iniciativas más pertinentes combinan metodologías participativas, reconocimiento del conocimiento ancestral, tecnologías emergentes adaptadas al contexto y principios de Interacción Humano-Computador centrados en apropiación, usabilidad y pertinencia cultural.

Como resultado de la revisión, se propuso un modelo conceptual preliminar que organiza cinco dimensiones clave: conocimiento ancestral y territorio, participación comunitaria, tecnologías emergentes, interacción y apropiación tecnológica, y gobernanza ética de datos y saberes. Este modelo no constituye una solución implementada ni validada, sino una base analítica para orientar fases posteriores de co-diseño, implementación y evaluación participativa.

En síntesis, el trabajo aporta una aproximación inicial para evitar desarrollos tecnocéntricos y promover soluciones digitales más respetuosas de los contextos indígenas. Su principal valor radica en articular evidencia científica, principios de IHC y consideraciones éticas para orientar el diseño futuro de tecnologías que fortalezcan, y no sustituyan, los saberes ancestrales en la gestión sostenible del agua.

## 7. REFERENCIAS

Amanatidis, P., Lyratzis, E., Angelopoulos, V., Kouloumpris, E., Skaperdas, E., Bassiliades, N., Vlahavas, I., Maris, F., Emmanouloudis, D., & Karampatzakis, D. (2026). Intelligent water management through edge-enabled IoT, AI, and big data technologies. *IoT*, 7(1), 5. <https://doi.org/10.3390/iot7010005>

- Anderson-Coto, M. J., Salazar, J., Lopez, J. L.-S., Sedas, R. M., Campos, F., Bustamante, A. S., & Ahn, J. (2024). Towards culturally sustaining design: Centering community's voices for learning through participatory design. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 39, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2023.100621>
- Arsenault, R., Diver, S., McGregor, D., Witham, A., & Bourassa, C. (2018). Shifting the framework of Canadian water governance through Indigenous research methods: Acknowledging the past with an eye on the future. *Water*, 10(1), 49. <https://doi.org/10.3390/w10010049>
- Berkes, F. (2018). *Sacred ecology* (4th ed.). Routledge.
- Carroll, S. R., Garba, I., Figueroa-Rodríguez, O. L., Holbrook, J., Lovett, R., Materechera, S., Parsons, M., Raseroka, K., Rodriguez-Lonebear, D., Rowe, R., Sara, R., Walker, J. D., Anderson, J., & Hudson, M. (2020). The CARE Principles for Indigenous Data Governance. *Data Science Journal*, 19, 43. <https://doi.org/10.5334/dsj-2020-043>
- Carroll, S. R., Herczog, E., Hudson, M., Russell, K., & Stall, S. (2021). Operationalizing the CARE and FAIR Principles for Indigenous data futures. *Scientific Data*, 8, 108. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00892-0>
- Diver, S., Eitzel, M. V., Brown, M., Hazel, A., Reed, R., & Fricke, S. (2022). Indigenous nations at the confluence: Water governance networks and system transformation in the Klamath Basin. *Ecology and Society*, 27(4), 4. <https://doi.org/10.5751/ES-12942-270404>
- Dorji, T., Brozović, N., & Zilberman, D. (2024). Understanding how Indigenous Knowledge contributes to climate change adaptation and resilience: A systematic literature review. *Environmental Management*, 74, 891–913. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02032-x>
- Krishnan, S. R., Nallakaruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasivam, J., Sethuraman, S., & Ramu, S. P. (2022). Smart water resource management using artificial intelligence—A review. *Sustainability*, 14(20), 13384. <https://doi.org/10.3390/su142013384>
- Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things* (Revised and expanded ed.). Basic Books.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. *CoDesign*, 4(1), 5–18. <https://doi.org/10.1080/15710880701875068>
- Singh, M., & Ahmed, S. (2021). IoT based smart water management systems: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5211–5218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.588>
- Whyte, K. P. (2013). On the role of traditional ecological knowledge as a collaborative concept: A philosophical study. *Ecological Processes*, 2, 7. <https://doi.org/10.1186/2192-1709-2-7>
- Wilson, N. J., Mutter, E., Inkster, J., & Satterfield, T. (2018). Community-Based Monitoring as the practice of Indigenous governance: A case study of Indigenous-led water quality monitoring in the Yukon River Basin. *Journal of Environmental Management*, 210, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.020>

## Reimaginando la agencia de datos en sistemas agénticos: Un modelo triádico HAD para la interacción humano-datos en arquitecturas de agentes IA

*Reimagining data agency in agent-based systems: A triadic HAD model for human-data interaction in AI agent architectures*

(1) Iván Durango [0009-0004-2041-7732], (1) José A. Gallud [0000-0002-6616-8055], (1) Víctor M. R. Penichet [0000-0003-1125-9344]

(1) Universidad de Castilla-La Mancha, Grupo de investigación ISE, Albacete, España.  
{ivan.durango@uclm.es} / {jose.gallud@uclm.es} / {victor.penichet@uclm.es}

**Resumen.** Los agentes autónomos de IA están transformando la relación de las personas con sus datos, actuando como intermediarios que perciben, razonan y operan sobre la información con supervisión humana limitada. Este artículo investiga la convergencia de los principios de Interacción Humano-Datos (HDI) y las arquitecturas modernas de agentes IA, tomando como referencia el Agent Development Kit (ADK) de Google. A partir de los fundamentos de HDI —legibilidad, agencia y negociabilidad— introducimos un modelo triádico Humano-Agente-Datos (HAD) que captura los desafíos de las experiencias de datos mediadas por agentes. El análisis expone tensiones entre autonomía y control, transparencia y eficiencia de delegación, y gobernanza individual frente a colectiva. Traducimos estas ideas en siete principios de diseño centrados en el usuario y un conjunto de extensiones arquitectónicas para ADK (delegación graduada, responsabilidad epistémica y permisos negociables), y discutimos sus implicaciones para el RGPD, el AI Act y la ENIA 2.0. Se incluye un escenario ilustrativo, una comparativa de plataformas y un protocolo de evaluación piloto con usuarios que operacionaliza las métricas de legibilidad y preservación del control.

**Palabras clave:** Interacción Humano-Datos, Agentes IA, Autonomía de Agentes, Agencia de Datos, Transparencia, Sistemas Multi-Agente, Diseño Centrado en el Usuario.

**Abstract.** Autonomous AI agents are transforming how people relate to their data, acting as intermediaries that perceive, reason about, and operate on information with limited human oversight. This article investigates the convergence of Human-Data Interaction (HDI) principles and modern AI agent architectures, using Google's

Agent Development Kit (ADK) as a reference. Building on the HDI foundations — legibility, agency, and negotiability— we introduce a triadic Human-Agent-Data (HAD) model that captures the challenges of agent-mediated data experiences. The analysis exposes tensions between autonomy and control, transparency and delegation efficiency, and individual versus collective governance. We translate these insights into seven user-centred design principles and a set of architectural extensions for ADK (graduated delegation, epistemic accountability, and negotiable permissions), and discuss their implications for the GDPR, the AI Act, and ENIA 2.0. We include an illustrative scenario, an agent-platform comparison, and a pilot user-evaluation protocol that operationalises the legibility and control-preservation metrics.

**Keywords:** Human-Data Interaction, AI Agents, Agent Autonomy, Data Agency, Transparency, Multi-Agent Systems, User-Centred Design.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Una revolución silenciosa está en marcha en la relación entre las personas y sus datos. Donde los usuarios antes manipulaban la información mediante comandos explícitos, una nueva clase de entidades computacionales actúa ahora en su nombre: agentes de IA que perciben entornos, razonan sobre objetivos y ejecutan acciones con creciente independencia (Wang et al., 2023; Xi et al., 2023). El cambio de la manipulación directa a la autonomía delegada no es meramente técnico; reescribe el contrato entre los humanos y sus sistemas de datos, planteando preguntas urgentes sobre control, transparencia y responsabilidad.

La Interacción Humano-Datos (HDI), introducida por Mortier et al. (2014) y ampliada por Durango et al. (2024a), aporta tres principios rectores: legibilidad (hacer comprensibles los procesos de datos), agencia (empoderar el control del usuario) y negociabilidad (permitir la renegociación continua de permisos). Estos principios fueron concebidos para un mundo en el que el humano sigue siendo el principal tomador de decisiones. Cuando un agente autónomo decide qué API invocar, qué datos recuperar y cómo resumir los resultados —antes de que el usuario vea una sola salida— el modelo HDI tradicional necesita repensarse. El Agent Development Kit (ADK) de Google (Google Developers, 2025) ilustra el estado del arte con composición jerárquica de agentes y un rico ecosistema de herramientas, pero, como la mayoría de los marcos, carece de mecanismos explícitos para preservar la agencia del usuario sobre los datos. Esta brecha motiva nuestro trabajo.

Realizamos cuatro contribuciones: (i) un modelo triádico Humano-Agente-Datos (HAD) que extiende la teoría HDI para dar cuenta de intermediarios autónomos, con su representación gráfica; (ii) un análisis de cómo legibilidad, agencia y negociabilidad deben evolucionar en contextos multi-agente; (iii) un modelo de diseño de interacción concreto para integrar principios HDI en ADK, con patrones centrados en el usuario, extensiones arquitectónicas y un protocolo de evaluación piloto; y (iv) la conexión del modelo HAD con el marco regulatorio europeo (RGPD, AI Act y ENIA 2.0). En conjunto, ofrecen una base para construir sistemas de agentes simultáneamente autónomos y responsables.

## 2. TRABAJO RELACIONADO

### 2.1. Interacción Humano-Datos

La HDI surgió del reconocimiento de que los paradigmas clásicos de HCI resultan insuficientes ante la recolección ubicua de datos y la toma de decisiones algorítmica (Mortier et al., 2014). Sus tres pilares

abordan, respectivamente, la opacidad de las cadenas de procesamiento, el desequilibrio de poder entre individuos y controladores, y la rigidez del consentimiento único (Crabtree & Mortier, 2015; Mortier et al., 2015). Estudios recientes examinan la HDI en sus distintos contextos (Durango et al., 2024b) y amplían su alcance hacia la IA generativa (Durango et al., 2025); el marco integral de Durango et al. (2024a) la extiende con seis componentes adicionales —equidad, responsabilidad, privacidad, participación, centrado en el humano y consentimiento informado—. Sin embargo, el desafío específico de la interacción con datos mediada por agentes permanece en gran medida inexplorado.

## **2.2. Arquitecturas de Agentes IA**

Los agentes modernos marcan una transición de herramientas reactivas a entidades capaces de percepción, razonamiento y acción (Wang et al., 2023). Entre los patrones clave figuran el bucle ReAct (Yao et al., 2023) y la coordinación multi-agente mediante topologías jerárquicas, entre pares o híbridas (Guo et al., 2024). La autonomía abarca un amplio espectro, desde la supervisión total hasta la operación completamente autónoma (Luo et al., 2025), generando una tensión documentada entre eficacia y control humano (Wang et al., 2020).

## **2.3. Google ADK y Plataformas de Agentes**

ADK proporciona infraestructura para sistemas multi-agente con composición jerárquica, agentes de flujo de trabajo deterministas (secuencial, paralelo, bucle), agentes LLM no deterministas, estado de sesión compartido e integraciones de herramientas (Google Developers, 2025; Google, 2025). Sus herramientas de evaluación se centran en el rendimiento de tareas y su documentación enfatiza la experiencia del desarrollador. Ninguna aborda sistemáticamente el control del usuario, la transparencia o la gobernanza de datos, las preocupaciones centrales de HDI.

## **2.4. Transparencia y Explicabilidad de Agentes**

Chakraborti et al. (2018) distinguen explicabilidad, legibilidad, predecibilidad y transparencia en agentes autónomos. El marco HAI de Sundar (2020) examina la psicología de la agencia mecánica percibida, y South et al. (2025) proponen delegación autenticada mediante extensiones de OAuth 2.0, pero sin fundamentación en HDI. La investigación reciente sobre dashboards de transparencia algorítmica muestra que los usuarios con acceso a explicaciones interactivas exhiben mayor confianza calibrada y menores tasas de delegación excesiva (Wang et al., 2020), evidencia que fundamenta nuestras propuestas de Capa de Legibilidad y Gestor de Delegación.

## **2.5. Interfaces de Usuario para Agentes IA**

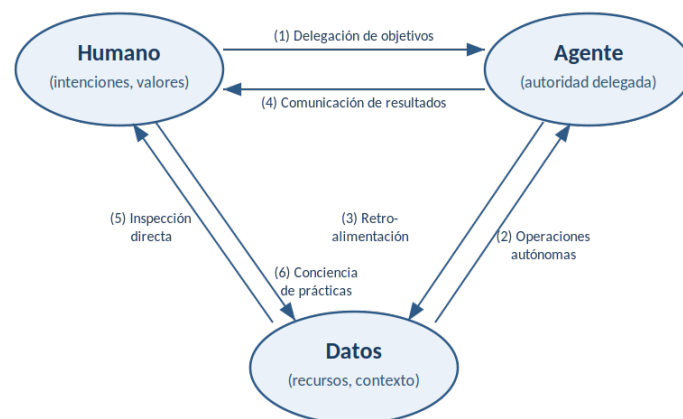
El diseño de interfaces para sistemas agénticos es un área emergente en HCI. Las directrices de Amershi et al. (2019) establecieron dieciocho principios para la interacción humano-IA; en particular, los de "iniciativa mixta" —donde tanto el usuario como el sistema pueden tomar la iniciativa— resultan directamente aplicables al modelo de delegación graduada que proponemos. Los estudios de confianza en delegación automatizada (Sundar, 2020) subrayan además que la confianza no es estática, sino que se construye, erosiona y reconstruye según la consistencia entre las acciones del agente y las expectativas del usuario, un fenómeno que el modelo HAD aborda mediante sus propiedades de opacidad de mediación y difusión de responsabilidad.

### 3. EL MODELO HUMANO-AGENTE-DATOS (HAD)

#### 3.1. De Díadas a Tríadas

La HDI clásica trata la interacción humano-datos como diádica: una persona interactúa con datos a través de una interfaz. Este esquema se rompe cuando un agente autónomo se interpone entre ambos. Proponemos un modelo triádico Humano-Agente-Datos (HAD) compuesto por tres entidades: actores humanos con intenciones, valores y derechos sobre datos; agentes intermediarios con autoridad delegada y razonamiento autónomo; y recursos de datos percibidos, procesados y sobre los que se actúa.

Como muestra la Figura 1, seis vías de interacción conectan estas entidades: delegación de objetivos (Humano → Agente), operaciones autónomas (Agente → Datos), retroalimentación ambiental (Datos → Agente), comunicación de resultados (Agente → Humano), inspección directa (Humano → Datos) y conciencia de prácticas (Datos → Humano). La estructura triádica genera propiedades emergentes ausentes en modelos diádicos: opacidad de mediación (razonamiento del agente oculto al usuario), difusión de responsabilidad (dificultad para atribuir resultados a intenciones humanas frente a decisiones del agente) y emergencia colectiva (prácticas de datos que surgen de interacciones entre agentes en lugar de un diseño explícito).



**Figura 1.** Modelo triádico HAD: seis vías de interacción entre Humano, Agente y Datos. Las flechas indican la dirección del flujo de información o control.

#### 3.2. Escenario Ilustrativo

Considérese una investigadora que pide a su agente ADK: "Prepara un resumen de mis correos sobre el proyecto X de los últimos 6 meses y propón reuniones con los colaboradores más activos." El agente accede al buzón, invoca un sub-agente de resumen LLM, llama a la API de calendario y prepara invitaciones. En el modelo diádico HDI clásico, la investigadora tendría que controlar cada acción manualmente. En el modelo HAD, el agente opera con autonomía acotada (nivel 3), genera una traza de legibilidad operativa ("He accedido a 47 correos, seleccionado 12 remitentes únicos, propuesto 3 reuniones") y presenta las invitaciones para aprobación prospectiva antes de enviarlas; cada acción queda registrada con su justificación. Sin el modelo HAD, estas propiedades no existen por defecto en los marcos actuales.

#### 3.3. Tres Formas de Agencia

El principio de agencia de HDI debe descomponerse en tres formas dentro de HAD. La agencia humana sobre datos engloba la capacidad del usuario para comprender, controlar y negociar

prácticas de datos pese a la intermediación del agente (derechos de decisión, anulación, revocabilidad de la delegación y visibilidad de las acciones). La agencia operativa del agente captura su capacidad para razonar y actuar autónomamente dentro de un ámbito delegado (límites de autonomía, rango de capacidades, criterios de decisión y adaptación). La agencia colectiva distribuida se refiere a las prácticas emergentes de la coordinación multi-agente, donde ningún actor individual determina por completo los resultados (Duan et al., 2025).

Equilibrar estas formas crea tensiones inherentes: maximizar la agencia humana restringe la autonomía del agente y limita la eficacia; maximizar la autonomía erosiona el control humano; y habilitar la agencia colectiva introduce imprevisibilidad que puede chocar con los derechos individuales. Resolver estas tensiones exige modelos de gobernanza que preserven los valores humanos mientras aprovechan las capacidades de los agentes.

### **3.4. Configuraciones Epistemológicas**

Sobre el marco de Coeckelbergh (2025) acerca de la agencia epistémica, identificamos tres desafíos. La opacidad epistémica genera una brecha entre la intención del usuario y el procesamiento de datos: el sujeto conoce el resultado (what) pero no el proceso lógico-causal subyacente (how/why). La gobernanza de la formación de creencias surge porque los agentes moldean la arquitectura cognitiva del usuario al preseleccionar y jerarquizar la información, erosionando su control sobre los propios procesos deliberativos. Y la dilución de la responsabilidad epistémica aparece cuando la producción colectiva de conocimiento mediante agentes distribuidos fragmenta la autoría intelectual y dificulta la trazabilidad ética y epistemológica.

### **3.5. Fenomenología de la Experiencia**

La mediación por agentes transforma la experiencia vivida de la interacción con datos (Limerick et al., 2014). La intencionalidad se vuelve delegada: los usuarios pretenden que algo se haga en lugar de cómo hacerlo, creando una distancia entre intención y acción que reduce el sentido de propiedad. La mediación efectiva puede requerir una opacidad productiva —ocultar detalles para permitir la concentración en objetivos—, lo que tensiona con la exigencia de legibilidad; el diseño debe ofrecer la información relevante bajo demanda sin interrumpir el flujo de trabajo. Delegar el control crea vulnerabilidad, pues el agente podría actuar contra los intereses del usuario (Hancock et al., 2020); la confianza se convierte en el eje y se construye, erosiona y reconstruye a través de cada interacción.

## **4. INTERSECCIONES HDI–AGENTE**

### **4.1. Legibilidad en Arquitecturas Multi-Agente**

Proponemos cuatro dimensiones para evaluar la legibilidad de los sistemas agénticos. La legibilidad intencional refiere a la capacidad de discernir los objetivos de cada agente; la legibilidad del comportamiento, a la predictibilidad de las acciones mediante señales observables, armonizando flujos deterministas con agentes LLM estocásticos; la legibilidad operativa, a la comprensión de los procedimientos de ejecución, incluida la selección de herramientas; y la legibilidad de coordinación, a la inteligibilidad de las interacciones inter-agenciales mediante delegación, estados compartidos o invocaciones explícitas.

### **4.2. Agencia y Autonomía Delegada**

La delegación plantea una tensión fundamental: el beneficio de la autonomía requiere ceder control, mientras que HDI exige preservarlo. Proponemos cinco estadios de delegación graduada, adaptados de Luck y d’Inverno (1995): (1) ejecución supervisada, con intervención humana directa y persistente;

(2) autonomía supervisada, condicionada a validación humana en operaciones críticas; (3) autonomía acotada, restringida a marcos predefinidos de acceso; (4) autonomía condicional, sujeta a revocación dinámica de permisos; y (5) delegación completa, con mínimas restricciones.

#### **4.3. Dimensiones Temporales de la Transparencia**

Distinguimos tres modalidades temporales de transparencia: retrospectiva, que reconstruye la causalidad de acciones pretéritas mediante registros de procedencia; prospectiva, que comunica acciones proyectadas, riesgos y alternativas antes de su ejecución; y continua, que ofrece conciencia situacional persistente mediante indicadores de progreso. Para ser efectiva, la transparencia debe ser multimodal: narrativas en lenguaje natural para perfiles no técnicos, trazas de ejecución para desarrolladores y modelos causales para auditoría.

#### **4.4. Gobernanza Colectiva y Responsabilidad Distribuida**

Los sistemas multi-agente introducen desafíos de gobernanza que trascienden la escala individual (Dastani et al., 2005). La emergencia de comportamientos colectivos puede generar beneficios sistémicos, pero suele involucrar datos individuales sin consentimiento granular, y la fragmentación del proceso entre múltiples agentes diluye la cadena de mando. Por ello la gobernanza debe fundamentarse en la trazabilidad de los flujos de información y en la capacidad de propagar restricciones de permisos de forma holística por toda la red agencial.

### **5. IMPLEMENTACIÓN DE HDI EN ADK**

#### **5.1. Siete Principios de Diseño Centrados en el Usuario**

En sintonía con Amershi et al. (2019), destilamos siete principios de diseño de interacción alineados con HDI:

- P1 — Legibilidad por Diseño.** descripciones estandarizadas de agentes, registro automático de operaciones, captura obligatoria de justificaciones para decisiones no deterministas y explicaciones jerárquicas.
- P2 — Delegación Graduada.** niveles de autonomía configurables con flujos de aprobación, restricciones de alcance y límites temporales.
- P3 — Uso Transparente de Herramientas.** notificaciones previas para operaciones sensibles, explicaciones de justificación y resúmenes de resultados.
- P4 — Permisos Negociables.** permisos dinámicos, modificables en tiempo de ejecución, propagados por las jerarquías y sujetos a negociación bidireccional.
- P5 — Coordinación Auditable.** registros completos de eventos, visualización de cadenas de delegación y detección de patrones emergentes.
- P6 — Responsabilidad Epistémica.** procedencia del conocimiento rastreable mediante atribución de fuentes, documentación de razonamiento e indicadores de confianza.
- P7 — Interfaces de Gobernanza Colectiva.** configuración de políticas a nivel de sistema, descubrimiento de agentes y controles de emergencia.

#### **5.2. Extensiones Arquitectónicas**

Proponemos cuatro extensiones a ADK: el Objeto de Contexto HDI, que extiende InvocationContext con el nivel de delegación, dominios de datos sensibles y límites de permisos propagados por las jerarquías; la Capa de Legibilidad, con capacidades de explicar acción, visualizar jerarquía, trazar decisión y predecir comportamiento; el Gestor de Delegación, que verifica si se necesita aprobación y

gestiona la negociación bidireccional ante solicitudes de acceso ampliado; y el Sistema de Auditoría, que registra acciones con justificaciones e invocaciones de herramientas con sus parámetros y resultados.

### 5.3. Marco de Evaluación y Métricas

Proponemos cuatro categorías de métricas: de legibilidad (cobertura de explicaciones, comprensión del usuario, precisión de predecibilidad); de agencia (preservación del control, granularidad de la delegación, tasa de éxito en negociaciones); de responsabilidad (completitud de auditoría, trazabilidad de procedencia); y a nivel de sistema (detección de comportamiento emergente, transparencia multi-agente, indicadores de confianza).

### 5.4. Protocolo de Evaluación Piloto con Usuarios

Para operacionalizar las métricas, diseñamos un protocolo piloto con un diseño entre sujetos y tres condiciones: (C1) agente con comportamiento por defecto de ADK; (C2) sistema con P1–P3 (legibilidad, delegación graduada, herramientas transparentes); y (C3) sistema con P1–P7 completos. La tarea ecológica —"gestiona mis documentos de proyecto usando el agente"— se aplica a  $n = 20$  participantes por condición ( $N = 60$ ), profesionales del conocimiento con experiencia variable en IA. Las medidas primarias son la comprensión de las acciones del agente (test post-tarea, umbral  $\geq 70\%$ ), la tasa de control preservado (anulaciones o modificaciones exitosas) y la conciencia situacional (SART adaptado a HDI); como medidas secundarias se incluyen la confianza calibrada (HCTS), el tiempo hasta recuperar el control y el número de errores de delegación no detectados.

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. Comparación entre Plataformas de Agentes

La elección de ADK como marco de referencia requiere justificación. La Tabla 1 compara ADK, LangChain y AutoGen en las dimensiones más relevantes para el modelo HAD.

**Tabla 1.** Comparativa de plataformas de agentes respecto a dimensiones HAD.

| Dimensión                     | ADK (Google)                 | LangChain                    | AutoGen (MS)                |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Transparencia nativa          | Trazas básicas de ejecución  | LangSmith (externo)          | Sin mecanismo nativo        |
| Delegación graduada           | No explícita                 | No explícita                 | Parcial (human-in-the-loop) |
| Gobernanza multi-agente       | Jerárquica (AgentTeam)       | Parcial (LCEL)               | Convencional (GroupChat)    |
| Documentación de herramientas | Alta (tool schemas)          | Alta                         | Media                       |
| Adopción en producción        | Alta (Agentspace, Vertex AI) | Muy alta (ecosistema amplio) | Alta (Microsoft 365 Agents) |
| Alineación HDI explícita      | Ninguna                      | Ninguna                      | Ninguna                     |

Los tres frameworks presentan brechas equivalentes en alineación HDI explícita, lo que refuerza la generalizabilidad del modelo HAD más allá de ADK. La elección de ADK se justifica por su composición jerárquica explícita —que facilita el Objeto de Contexto HDI—, su documentación de herramientas de alta calidad (compatible con P3) y su creciente adopción en producción empresarial.

### 6.2. Implicaciones para el Diseño de Sistemas

Las tensiones identificadas tienen consecuencias prácticas. La tensión entre autonomía y control implica que no se puede maximizar la eficiencia del agente sin considerar la agencia del usuario: un

agente que opera como caja negra viola los principios de HDI y erosiona la confianza. La delegación graduada ofrece una vía intermedia, adaptándose al contexto. Además, los siete principios forman un sistema interrelacionado: la legibilidad por diseño (P1) habilita la delegación graduada (P2), que requiere herramientas transparentes (P3) y permisos negociables (P4), mientras que la coordinación auditable (P5) y la responsabilidad epistémica (P6) sustentan las interfaces de gobernanza colectiva (P7).

### **6.3. Implicaciones Regulatorias y Contexto Europeo**

El RGPD se fundamenta en un consentimiento informado que asume interacción directa entre el sujeto y el controlador; la introducción de agentes autónomos exige transformarlo en un proceso continuo y negociado, precisamente lo que habilita nuestro principio de permisos negociables (P4). El AI Act converge con nuestro análisis: su enfoque basado en riesgo se alinea con la delegación graduada, donde mayor riesgo implica mayor supervisión. En España, la ENIA 2.0 sitúa como eje una IA centrada en las personas, alineada con la protección de datos y la transparencia; los principios de legibilidad operativa y permisos negociables operacionalizan ese compromiso con la IA explicable y la soberanía digital. El contexto iberoamericano, con estructuras colectivistas y robustas regulaciones de datos, hace especialmente relevante la "negociabilidad", donde el control puede extenderse a comunidades de usuarios.

### **6.4. Limitaciones**

Reconocemos varias limitaciones. La propuesta carece todavía de validación empírica, aunque el protocolo de la Sección 5.4 constituye la hoja de ruta inmediata. El análisis arquitectónico se centra en ADK, si bien los principios HAD son transferibles a cualquier framework, pues las brechas HDI son equivalentes. Las métricas requieren operacionalización detallada, que abordará el estudio piloto. Por último, la captura exhaustiva de justificaciones puede introducir sobrecargas de rendimiento que comprometan la usabilidad.

## **7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

La prioridad inmediata es ejecutar el protocolo de evaluación para validar empíricamente los principios HAD, complementado con el prototipado de baja fidelidad de la Capa de Legibilidad y el Gestor de Delegación (wireframes o mockups) para evaluar la comprensibilidad del modelo con usuarios reales. En paralelo, estudios fenomenológicos (entrevistas experienciales y diario), pueden iluminar cómo la delegación afecta al sentido de propiedad sobre las prácticas de datos.

A más largo plazo, conviene examinar las dinámicas de poder que la autonomía de los agentes redistribuye (Mahroof et al., 2025); la gobernanza colectiva mediante cooperativas de datos y bienes comunes digitales (Duncan, 2023); las perspectivas transculturales, dado que los marcos actuales de HDI reflejan suposiciones predominantemente occidentales; la HDI temporal en agentes de larga ejecución (legibilidad sostenida, permisos evolutivos, retención de memoria); y la integración con la seguridad de IA, mediante verificación formal de restricciones HDI y monitorización de violaciones.

## **8. CONCLUSIONES**

Este artículo ha desarrollado fundamentos teóricos y un modelo de diseño de interacción para integrar los principios de Interacción Humano-Datos en arquitecturas de agentes IA, tomando ADK como referencia. Nuestro argumento central es que los sistemas agénticos introducen un cambio cualitativo en las relaciones humano-datos que exige más que ajustes incrementales a los marcos existentes. Hemos contribuido con un modelo triádico HAD (Figura 1) con sus tres formas de agencia

y seis vías de interacción; un escenario ilustrativo; siete principios de diseño con extensiones arquitectónicas concretas para ADK; una comparativa de plataformas que demuestra la transferibilidad del modelo; un protocolo de evaluación piloto que operacionaliza las métricas; y un análisis del encuadre regulatorio europeo (RGPD, AI Act y ENIA 2.0).

El análisis revela tensiones que no pueden eliminarse, sino navegarse: entre autonomía y control, transparencia y abstracción eficiente, derechos individuales e inteligencia colectiva. Sin una integración deliberada de los principios HDI, los marcos de agentes en producción corren el riesgo de reproducir los problemas que HDI fue creada para resolver. Al fundamentar el diseño de agentes en la teoría HDI y en la experiencia de usuario, podemos realizar la promesa de los agentes autónomos preservando la agencia humana, la dignidad y un control significativo sobre nuestro futuro con los datos.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del Grupo de investigación ISE de la Universidad de Castilla-La Mancha.

## REFERENCIAS

- Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fourney, A., Nushi, B., Collisson, P., Suh, J., Iqbal, S., Bennett, P. N., Inkpen, K., Teevan, J., Kikin-Gil, R., & Horvitz, E. (2019). Guidelines for human-AI interaction. En *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)* (pp. 1–13). Association for Computing Machinery.
- Chaffer, T. J., Goldston, J., & Sebastian, G. (2024). On the ethos of AI agents: An ethical technology and holistic oversight system. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.17114>
- Chakraborti, T., Kulkarni, A., Sreedharan, S., Smith, D. E., & Kambhampati, S. (2018). Explicability? Legibility? Predictability? Transparency? Privacy? Security? The emerging landscape of interpretable agent behavior. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.09722>
- Coeckelbergh, M. (2025). AI and epistemic agency: How AI influences belief revision and its normative implications. *Social Epistemology*. Advance online publication.
- Crabtree, A., & Mortier, R. (2015). Human data interaction: Historical lessons from social studies and CSCW. En *Proceedings of the European Conference on Computer Supported Cooperative Work (ECSCW)*.
- Dastani, M., Arbab, F., & de Boer, F. (2005). Coordination and composition in multiagent systems. En *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS '05)* (pp. 439–446). Association for Computing Machinery.
- Duan, W., Lu, J., & Xuan, J. (2025). Multi-agent coordination across diverse applications: A survey. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.14743>
- Duncan, J. (2023). Data protection beyond data rights: Governing data production through collective intermediaries. *Internet Policy Review*, 12(3).
- Durango, I., Gallud, J. A., & Penichet, V. M. R. (2024a). Human-data interaction framework: A comprehensive model for a future driven by data and humans. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.21010>
- Durango, I., Gallud, J. A., & Penichet, V. M. R. (2025). The data dance: Choreographing seamless partnerships between humans, data, and GenAI. *International Journal of Data Science and Analytics*, 20(4), 3613–3640.
- Durango, I., Penichet, V., & Gallud, J. A. (2024b). Exploring human-data interaction: An AI-enhanced systematic mapping. *Universal Access in the Information Society*, 24, 1059–1076.
- Google. (2025). *Agent Development Kit documentation*. <https://google.github.io/adk-docs/>

- Google Developers. (2025). Agent Development Kit: Easy to build multi-agent applications. *Google Developers Blog*. <https://developers.googleblog.com/en/agent-development-kit-easy-to-build-multi-agent-applications/>
- Guo, T., Chen, X., Wang, Y., Chang, R., Pei, S., Chawla, N. V., Wiest, O., & Zhang, X. (2024). Large language model based multi-agents: A survey of progress and challenges. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.01680>
- Hancock, J. T., Naaman, M., & Levy, K. (2020). AI-mediated communication: Definition, research agenda, and ethical considerations. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 25(1), 89–100.
- Jackson, R. B., & Williams, T. (2021). A theory of social agency for human-robot interaction. *Frontiers in Robotics and AI*, 8.
- Limerick, H., Coyle, D., & Moore, J. W. (2014). The experience of agency in human-computer interactions: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 643.
- Luck, M., & d’Inverno, M. (1995). A formal framework for agency and autonomy. En *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems (ICMAS ’95)* (pp. 254–260). AAAI Press.
- Luo, J., Zhang, W., Yuan, Y., Zhao, Y., Yang, J., Gu, Y., Wu, B., Chen, B., Qiao, Z., Long, Q., Tu, R., Luo, X., Ju, W., Xiao, Z., Wang, Y., Xiao, M., Liu, C., Yuan, J., Zhang, S., ... Zhang, M. (2025). Large language model agent: A survey on methodology, applications and challenges. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.21460>
- Mahroof, K., Weerakkody, V., & Hussain, Z. (2025). Navigating power dynamics in the public sector through AI-driven algorithmic decision-making. *Government Information Quarterly*. Advance online publication.
- Mortier, R., Haddadi, H., Henderson, T., McAuley, D., & Crowcroft, J. (2014). Human-data interaction: The human face of the data-driven society. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2508051>
- Mortier, R., Haddadi, H., Henderson, T., McAuley, D., & Crowcroft, J. (2015). Human-data interaction. En M. Soegaard & R. F. Dam (Eds.), *The encyclopedia of human-computer interaction* (2.<sup>a</sup> ed.). Interaction Design Foundation.
- Onyeukaziri, J. N. (2023). Action and agency in artificial intelligence: A philosophical critique. *Philosophia: International Journal of Philosophy*, 24(1), 74–90.
- South, T., Marro, S., Hardjono, T., Mahari, R., Deslandes Whitney, C., Greenwood, D., Chan, A., & Pentland, A. (2025). Authenticated delegation and authorized AI agents. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.09674>
- Sundar, S. S. (2020). Rise of machine agency: A framework for studying the psychology of human–AI interaction (HAI). *Journal of Computer-Mediated Communication*, 25(1), 74–88.
- Wang, D., Churchill, E., Maes, P., Fan, X., Shneiderman, B., Shi, Y., & Wang, Q. (2020). From human-human collaboration to human-AI collaboration: Designing AI systems that can work together with people. En *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA ’20)* (pp. 1–6). Association for Computing Machinery.
- Wang, L., Ma, C., Feng, X., Zhang, Z., Yang, H., Zhang, J., Chen, Z., Tang, J., Chen, X., Lin, Y., Zhao, W. X., Wei, Z., & Wen, J.-R. (2023). A survey on large language model based autonomous agents. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.11432>
- Xi, Z., Chen, W., Guo, X., He, W., Ding, Y., Hong, B., Zhang, M., Wang, J., Jin, S., Zhou, E., Zheng, R., Fan, X., Wang, X., Xiong, L., Zhou, Y., Wang, W., Jiang, C., Zou, Y., Liu, X., ... Gui, T. (2023). The rise and potential of large language model based agents: A survey. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.07864>

Yao, S., Zhao, J., Yu, D., Du, N., Shafran, I., Narasimhan, K., & Cao, Y. (2023). ReAct: Synergizing reasoning and acting in language models. En *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

## Análisis de características de usuario con *Machine Learning*

### *Analysis of user characteristics using Machine Learning*

<sup>(1)</sup> Alberto Gaspar <sup>[0000-0002-9236-4391]</sup>, <sup>(1)</sup> José Ignacio Panach <sup>[0000-0002-7043-6227]</sup>, <sup>(1)</sup> Miriam Gil <sup>[0000-0002-2987-1825]</sup>, <sup>(1)</sup> Verónica Romero <sup>[0000-0002-1721-5732]</sup> y <sup>(2)</sup> Damiano Distante <sup>[0000-0002-8467-535X]</sup>

<sup>(1)</sup> Departament d'informàtica, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria, Universitat de València, Avenida de la universidad s/n, 46100 Burjasot, España, [algasvi@alumni.uv.es](mailto:algasvi@alumni.uv.es), [joigpana@uv.es](mailto:joigpana@uv.es), [miriam.gil@uv.es](mailto:miriam.gil@uv.es), [veronica.romero@uv.es](mailto:veronica.romero@uv.es)

<sup>(2)</sup> UnitelmaSapienza University of Rome, Piazza Sassari, 4, Rome, 00161, Italy, [damiano.distante@unitelmasapienza.it](mailto:damiano.distante@unitelmasapienza.it)

**Resumen.** El diseño de interfaces inteligentes que se adaptan a las características del usuario es un factor clave para mejorar la experiencia de uso. Sin embargo, existe una carencia de estudios empíricos que comparen la extracción automática de características de usuario con la percepción que los propios usuarios tienen de dichas características. En este trabajo se evalúan cuatro algoritmos de aprendizaje automático para clasificar a los usuarios en función de su nivel de habilidad y conocimiento: Perceptrón Multicapa (MLP), Naive Bayes (NB), Máquina de Soporte Vectorial (SVM) y Random Forest (RF). Estos algoritmos son adecuados para modelar relaciones complejas entre los datos de interacción y los perfiles de usuario. Los resultados muestran que MLP y SVM ofrecen el rendimiento más consistente en términos de precisión. No obstante, todos los modelos presentan dificultades para clasificar correctamente las clases minoritarias, especialmente en los usuarios con bajos niveles de habilidad y conocimiento.

**Palabras clave:** Interfaces Inteligentes de Usuario, Clasificación de Usuarios, Machine Learning, Interfaz gráfica de Usuario.

**Abstract.** The design of intelligent interfaces that adapt to user characteristics is a key factor in improving the user experience. However, there is a lack of empirical studies comparing the automatic extraction of user characteristics with users' own perceptions of those characteristics. This study evaluates four machine learning algorithms for classifying users based on their skill and knowledge levels: Multilayer Perceptron (MLP), Naive Bayes (NB), Support Vector Machine (SVM), and Random Forest (RF). These algorithms are well-suited for modeling complex relationships between interaction data and user profiles. The results show that MLP and SVM offer

the most consistent performance in terms of accuracy. However, all models have difficulty correctly classifying minority classes, especially among users with low levels of skill and knowledge.

**Keywords:** Intelligent User Interfaces, User Classification, Machine Learning, Graphical User Interface.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las interfaces inteligentes de usuario integran un conjunto de métodos y reglas orientados a personalizar el contenido de la interfaz gráfica de usuario según las características de la persona que interactúa con el sistema, para mejorar la usabilidad y la experiencia de usuario. No obstante, la mayoría de los enfoques existentes se centran en soluciones específicas de cada dominio y no en perfiles de usuario genéricos y reutilizables, lo que limita su capacidad de adaptación a entornos dinámicos y a usuarios con comportamientos heterogéneos. Asimismo, trabajos de revisión sistemática sobre interfaces adaptativas (Krstić et al., 2025) muestran que los enfoques basados en el aprendizaje automático permiten a los sistemas inferir patrones de interacción y adaptar dinámicamente la interfaz en función del estado, del comportamiento y de las necesidades del usuario. Esto implica la realización de procesos de clasificación o de modelado de usuarios para personalizar la interacción.

En este contexto, diversos trabajos han abordado la clasificación de usuarios a partir de la información contextual de la aplicación. Por ejemplo, Duan et al. (2024) proponen un enfoque multimodal basado en transformadores y en técnicas de aprendizaje profundo para clasificar a los usuarios según su estado emocional a partir de señales visuales, acústicas y textuales. Sin embargo, este tipo de aproximaciones se centra en estados afectivos transitorios y no en características persistentes del usuario, como habilidades, conocimientos u objetivos. Zahoor et al. (2024) analizan comentarios de una aplicación móvil para identificar tendencias y preferencias de los usuarios, con el fin de ofrecer recomendaciones de contenido. A pesar de sus contribuciones, estos trabajos no definen perfiles de usuario estructurados que permitan una clasificación sistemática y reutilizable, un aspecto clave para avanzar hacia soluciones de personalización más generales y escalables.

Actualmente, la clasificación de usuarios suele basarse en algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning, ML). Estos algoritmos han sido ampliamente utilizados para tareas de clasificación en diversos dominios, incluyendo sistemas de recomendación, modelado de usuario y adaptación de interfaces (Schaible et al., 2024). A pesar de su uso extendido, existe una escasez de estudios comparativos que analicen empíricamente el grado de concordancia entre la clasificación obtenida mediante estos algoritmos y la realizada por los propios usuarios. En este contexto, la principal contribución de este artículo es la comparación entre la clasificación de los atributos del usuario obtenida mediante algoritmos de ML y la realizada por los propios usuarios según su percepción. Se ha estudiado el rendimiento de diferentes algoritmos de ML, en concreto: Perceptrón Multicapa (MLP), Naive Bayes (NB), Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y Random Forest (RF).

Las características utilizadas en este trabajo se basan en las presentadas en (Gaspar et al., 2024), donde se define un modelo de usuario con las características que afectan a la personalización de la interfaz. De entre todas las características del modelo, este trabajo se centra en el **conocimiento** y la

**habilidad.** Esta selección se justifica porque son las características que presentan mayores implicaciones en el proceso de adaptación de las interfaces. Para cada una de estas características, el algoritmo de ML realiza una estimación automática del valor asociado a un usuario a partir de un conjunto de variables observadas durante la interacción con el sistema, como los clics en la interfaz y el tiempo invertido en las distintas tareas. A partir de esta información, el algoritmo asigna un valor de Bajo, Medio o Alto a cada característica del usuario. Paralelamente, cada usuario proporciona una autoevaluación del valor que considera que posee para esas mismas características, lo que permite comprobar si hay correlación entre ambos valores.

El artículo se estructura de la siguiente manera. La Sección 2 revisa el estado del arte. La Sección 3 describe la metodología empleada, incluyendo los participantes, el conjunto de datos y el algoritmo de clasificación. La Sección 4 presenta y analiza los resultados. Finalmente, la Sección 5 recoge las conclusiones y las líneas futuras de trabajo.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La clasificación de los usuarios ha sido ampliamente analizada en la literatura. Estos trabajos han utilizado algoritmos de ML para establecer grupos de usuarios y clasificarlos. Algunos trabajos emplean el algoritmo BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) para clasificar a los usuarios a partir de sus patrones de interacción y comportamiento en sistemas digitales. Siguiendo esta línea, Saranya et al. (2025) proponen una variante mejorada, denominada IBERT, para clasificar a los usuarios de redes cognitivas 5G como malintencionados o legítimos en función de sus características de actividad. Los autores concluyen que la propuesta alcanza una precisión cercana al 99,74 %. Siguiendo esta línea, Siino et al. (2022) emplean modelos Transformer como BERT, RoBERTa y DistilBERT para clasificar usuarios que difunden noticias falsas en Twitter y concluyen que el rendimiento depende del contexto del problema.

Otros trabajos emplean el algoritmo SVM para clasificar a los usuarios según su comportamiento en sistemas digitales. Siguiendo esta idea, Yuvapriya et al. (2025) utilizan SVM para clasificar a profesionales de tecnologías de la información en un entorno de e-learning adaptativo según su rendimiento, considerando patrones de navegación, participación y resultados en evaluaciones. Concluyen que la combinación de técnicas de agrupamiento y SVM permite separar eficazmente a los usuarios en distintos niveles de desempeño. De forma similar, Alwafi y Fakieh (2024) aplican el SVM para clasificar a usuarios de redes sociales en función de su nivel de fatiga de privacidad, utilizando rasgos de personalidad y de conciencia sobre la privacidad como variables predictoras. Los autores concluyen que el SVM alcanza una precisión cercana al 78 %, lo que demuestra una alta capacidad para identificar correctamente a usuarios con niveles elevados de fatiga.

Otros trabajos usan el algoritmo RF para clasificar a los usuarios en sistemas inteligentes en función de patrones de comportamiento y variables contextuales. Siguiendo esta línea, Jaber y Csonka(2023) analizan distintos grupos de usuarios de sistemas de bike-sharing mediante modelos de minería de datos, incluidos los modelos de RF, considerando variables temporales y meteorológicas, como la temperatura, la radiación solar o el tipo de día. Los autores concluyen que RF permite identificar diferencias significativas entre perfiles de usuario y mejorar la predicción del uso del sistema. De forma similar, Abourobea et al.(2025) aplican RF para la clasificación de usuarios de la vía pública a partir de datos de radar obtenidos de infraestructuras inteligentes, empleando características

geométricas y cinemáticas extraídas de nubes de puntos. Los resultados muestran que los modelos basados en RF alcanzan valores cercanos al 97 %, lo que destaca su robustez frente a la variabilidad del entorno y su capacidad para clasificar usuarios en tiempo real.

Algunos trabajos emplean árboles de decisión (DT) para clasificar usuarios a partir de características demográficas, conductuales o de patrones de interacción en sistemas inteligentes. Basuni y Siregar (2023) comparan diferentes modelos de aprendizaje automático para clasificar individuos como usuarios o no usuarios de sustancias a partir de variables psicológicas, demográficas y de consumo. Concluyeron que, aunque los DT ofrecen una interpretación clara del proceso de toma de decisiones y facilitan el análisis de atributos relevantes, su rendimiento es inferior al de los modelos de ensemble. De forma similar, Shannaq (2024) emplea DT en un sistema de ciberseguridad para clasificar a los usuarios según patrones de sus contraseñas mediante TF-IDF, para diferenciar entre usuarios legítimos e intrusos potenciales. Los resultados muestran que DT permite modelar reglas interpretables basadas en características textuales del comportamiento del usuario, aunque con menor precisión que otros modelos probabilísticos y basados en márgenes.

Los trabajos descritos en esta sección emplean diversas metodologías de ML para la clasificación de usuarios. Estos trabajos presentan varias limitaciones. En primer lugar, muchas propuestas se centran en dominios muy específicos, como redes 5G o la detección de noticias falsas, lo que limita su generalización a otros contextos. En segundo lugar, la mayoría de los enfoques prioriza patrones de comportamiento o datos contextuales sin considerar características persistentes del usuario, como conocimientos o habilidades. Además, algunos modelos avanzados, como los basados en Transformers, presentan alta complejidad computacional y dependencia del conjunto de datos, lo que puede afectar su rendimiento en distintos escenarios. Por otra parte, varios trabajos se centran únicamente en evaluar la precisión del algoritmo, sin contrastar los resultados con la percepción o la autoevaluación de los usuarios. Además, muchos enfoques no emplean modelos de usuario estructurados y reutilizables, lo que dificulta su integración en sistemas adaptativos más generales. En este contexto, nuestra propuesta consiste en comparar la clasificación realizada por un algoritmo de aprendizaje automático con la percepción que cada usuario tiene de sus propias características.

### 3. CLASIFICACIÓN DE USUARIOS POR MACHINE LEARNING

En esta sección se analizarán las características de usuario utilizadas en la clasificación de usuarios, indicando los diferentes valores que pueden adoptar, el conjunto de datos utilizado para clasificar a los usuarios y los algoritmos de clasificación empleados.

#### 3.1. Características de usuario evaluadas

Esta subsección describe las características de usuario utilizadas para definir los perfiles de usuario: habilidad y conocimiento. De todas las características del modelo de usuario (Gaspar et al., 2024), este artículo se centra en estas dos porque son las que más influyen en la adaptación de las interfaces (Brusilovsky, 1996).

La característica **conocimiento** permite identificar los conceptos que el usuario comprende en el contexto de la aplicación (Abri et al., 2020). No obstante, su principal dificultad para estimarla radica en su carácter dinámico, ya que evoluciona de forma continua: el usuario adquiere y olvida

conceptos en cada interacción con el sistema. Para su estimación, el sistema clasifica esta característica en tres niveles: (1) conocimiento bajo, (2) conocimiento medio y (3) conocimiento alto.

La característica **habilidad** permite identificar las competencias técnicas que posee el usuario, como el uso de la búsqueda avanzada para acceder a un género específico dentro de una biblioteca digital (Tachie-Donkor & Ezema, 2023). Para su estimación, el sistema clasifica esta característica en tres niveles: (1) habilidad baja (novato), (2) habilidad media y (3) habilidad alta (experto).

### 3.2. Conjuntos de datos

El conjunto de datos se generó mediante un proceso de recopilación manual de variables observadas a partir de la interacción de los usuarios, con el objetivo de entrenar un modelo de aprendizaje automático capaz de clasificar sus características (habilidad y conocimiento). Para ello, se desarrollaron varios prototipos en *QuantUX* para dar soporte a 2 aplicaciones (coche inteligente y sistema domótico) y 16 tareas. El conjunto de tareas puede ser accedido en (Gaspar et al., 2026).

La recogida de datos se basó en las interacciones de los usuarios con los prototipos. Para estimar la característica de conocimiento, se analizaron las siguientes variables: la duración total de la interacción, el número de clics, las pausas sensibles (> 5 segundos), los clics erróneos y el tiempo promedio por página. Por otro lado, para estimar la característica de habilidad, se consideraron las siguientes variables observadas: el tiempo total de interacción (en segundos), el número de clics, los clics erróneos, el número de páginas visitadas y el porcentaje de acciones especiales realizadas, como usar el comando Ctrl+C en lugar de hacer clic con el ratón para copiar un elemento. Asimismo, se diseñó un cuestionario estructurado donde cada participante indicaba el valor que consideraba poseer en conocimiento y habilidad. El valor proporcionado por este cuestionario se considera el Ground Truth (GT) del experimento, es decir, el valor de referencia que se asume como correcto y frente al cual se comparan las predicciones del modelo de aprendizaje automático. Se reclutaron 60 estudiantes de Ingeniería Informática (20–24 años). Para cada participante se recopilaban las variables descritas previamente y la valoración de preferencia utilizada como GT, empleándose la media de las respuestas como estimación de cada característica. Aunque los participantes reportaron un conocimiento previo moderado de los sistemas evaluados (3,0/5 y 2,8/5), el perfil técnico de la muestra podría introducir un sesgo de selección.

### 3.3. Algoritmo de clasificación

En esta sección se describen los algoritmos de ML empleados para clasificar las características del usuario: habilidad y conocimiento. Para analizar el rendimiento desde distintos enfoques, se han evaluado cuatro algoritmos de clasificación supervisada ampliamente utilizados en la literatura: Perceptrón Multicapa (MLP), Naive Bayes (NB), Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y Random Forest (RF) (Kadhim, 2019; Murphy, 2012). Estos algoritmos han sido seleccionados por su diversidad en cuanto a principios de funcionamiento y capacidad para modelar relaciones lineales y no lineales en los datos.

El MLP es un modelo basado en redes neuronales artificiales capaz de capturar relaciones complejas mediante la composición de múltiples capas de neuronas. Por su parte, NB es un clasificador probabilístico basado en el teorema de Bayes que asume la independencia condicional entre las

variables de entrada. Las SVM permiten encontrar un hiperplano óptimo que maximiza la separación entre clases, siendo especialmente eficaces en espacios de alta dimensión. Finalmente, RF es un método de tipo ensemble basado en la construcción de múltiples árboles de decisión, cuya combinación permite mejorar la capacidad de generalización y reducir el sobreajuste.

Para cada una de las características analizadas, los modelos fueron entrenados utilizando las variables observadas descritas en la sección anterior y evaluados comparando sus predicciones con el Ground Truth proporcionado por los usuarios. Así, se analizó el rendimiento de cada algoritmo en términos de su capacidad para estimar correctamente el conocimiento y la habilidad de los usuarios.

### 3.4. Resultados

Los resultados de los modelos de clasificación para las características de habilidad y conocimiento se evaluaron mediante validación cruzada Leave-One-Out, dejando a un usuario fuera en cada iteración y entrenando el modelo con el resto. Este protocolo permite evaluar a cada usuario de forma independiente y aprovechar al máximo el conjunto de datos disponible. Por otro lado, en el caso del MLP, se probaron varias configuraciones de número de neuronas en la capa oculta. Finalmente, se seleccionó una capa con 10 neuronas para la habilidad y otra con 9 neuronas para el conocimiento, ya que estas configuraciones ofrecieron el mejor desempeño global según las métricas evaluadas.

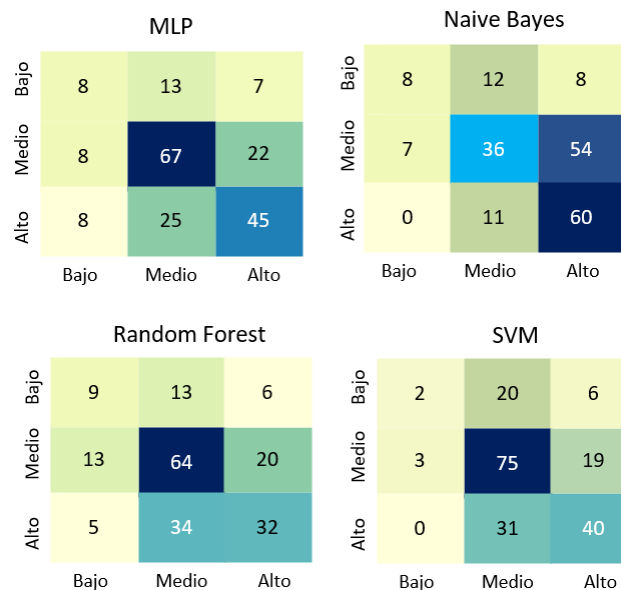
Para medir el rendimiento de los modelos se utilizó el *accuracy* (Geraci et al., 1991), que indica la proporción de predicciones correctas respecto al total, así como las puntuaciones F1 (una métrica que combina precisión y exhaustividad en una única medida) en dos variantes: *macro F1*, que calcula el promedio de la F1 de cada clase sin ponderar por el tamaño de la clase, reflejando un desempeño equilibrado entre todas las categorías; y *weighted F1*, que pondera la F1 de cada clase según su número de instancias, reflejando el desempeño global considerando la distribución de clases (Manning et al., 2008). Estas métricas permiten evaluar no solo la capacidad del modelo para predecir correctamente la mayoría de los usuarios, sino también su desempeño en clases menos representadas, como los usuarios con conocimiento bajo. La Tabla 1 resume las métricas globales de *accuracy*, *macro F1* y *weighted F1* para todas las combinaciones de modelo y característica.

**Tabla 1:** Resultados comparativos de los modelos de clasificación

| Característica | Modelo            | Accuracy | Macro F1 | Weighted F1 |
|----------------|-------------------|----------|----------|-------------|
| Habilidad      | MLP (10 neuronas) | 0,61     | 0,55     | 0,60        |
|                | Naive Bayes       | 0,53     | 0,49     | 0,51        |
|                | Random Forest     | 0,54     | 0,48     | 0,53        |
|                | SVM               | 0,60     | 0,46     | 0,56        |
| Conocimiento   | MLP (9 neuronas)  | 0,65     | 0,57     | 0,64        |
|                | Naive Bayes       | 0,60     | 0,47     | 0,57        |
|                | Random Forest     | 0,58     | 0,48     | 0,57        |
|                | SVM               | 0,67     | 0,54     | 0,64        |

En la clasificación de la habilidad, el MLP con 10 neuronas logró un *accuracy* de 0,61 y un *weighted F1* de 0,60. La matriz de confusión (Figura 1) evidencia que MLP clasifica bien a usuarios con habilidad media y alta (expertos), pero tiene dificultades con habilidad baja (novatos),

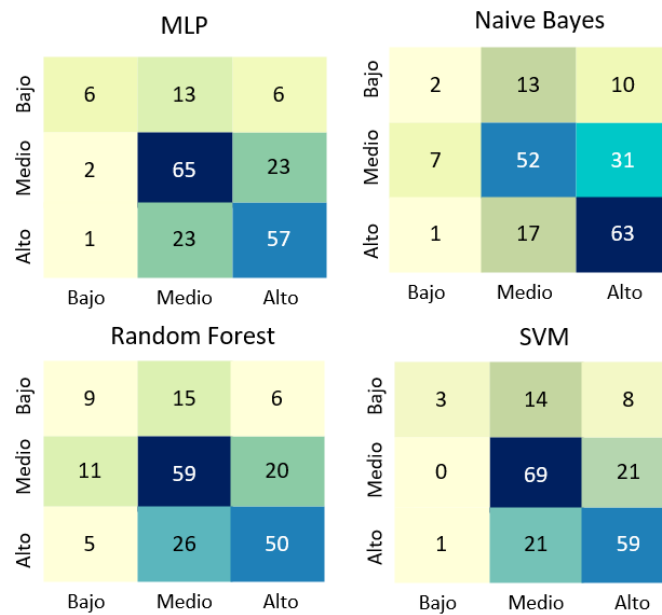
probablemente por su menor representación y la similitud en los patrones de interacción. El NB alcanzó un accuracy de 0,53 y weighted F1 de 0,51. Su matriz de confusión refleja que favorece patrones más claros, como los usuarios expertos, pero sacrifica precisión en clases minoritarias. RF mostró un accuracy de 0,54 y un weighted F1 de 0,53. La matriz de confusión revela que 9 de 28 novatos fueron correctamente clasificados, 13 se confundieron con habilidad media y 6 con expertos. El SVM alcanzó un accuracy de 0,60 y un weighted F1 de 0,56. La matriz muestra que solo 2 de 28 novatos fueron correctamente identificados.



**Figura 1:** Matrices de confusión de la característica habilidad

Para la característica conocimiento, el MLP con nueve neuronas alcanzó un accuracy de 0,65 y weighted F1 de 0,64. NB obtuvo un accuracy de 0,60 y weighted F1 de 0,57. La matriz de confusión muestra que solo 2 de 25 usuarios con bajo conocimiento fueron correctamente identificados. El SVM alcanzó el mejor desempeño para conocimiento, con un accuracy de 0,67 y weighted F1 de 0,64. La matriz de confusión (Figura 2) muestra que 3 de 25 usuarios con bajo conocimiento fueron correctamente clasificados, 14 se confundieron con usuarios intermedios y 8 con usuarios expertos. Finalmente, RF mostró un accuracy de 0,58 y un weighted F1 de 0,57.

En conjunto, los resultados muestran que MLP y SVM son los modelos más consistentes, logrando buen desempeño en las clases medias y altas, mientras que NB y RF presentan mayor dificultad en las clases minoritarias, especialmente en las de novatos y usuarios con bajo conocimiento. En cuanto a la habilidad, MLP y SVM alcanzan el mejor desempeño en términos de accuracy y weighted F1, mientras que NB y RF presentan un rendimiento ligeramente inferior. Todos los modelos presentan dificultades para clasificar correctamente a los usuarios novatos, probablemente debido a la menor representación de esta clase y a la complejidad de las variables observadas. Para la característica de conocimiento, SVM y MLP con nueve neuronas logran el mejor desempeño global, con accuracy cercano a 0,65–0,67 y weighted F1 de 0,64, mientras que RF y NB presentan resultados ligeramente inferiores, especialmente en la clase de usuarios con conocimiento bajo.

**Figura 2:** Matrices de confusión de la característica conocimiento

Como conclusión de los resultados, para la habilidad, el MLP (10 neuronas) y el SVM alcanzan los mejores resultados, con accuracy de 0,61 y 0,60, respectivamente, y weighted F1 de hasta 0,60. Sin embargo, todos los modelos presentan dificultades para clasificar correctamente a los usuarios novatos, debido principalmente a su menor representación y a la similitud de sus patrones con los de otras clases. En la clasificación del conocimiento, se obtienen resultados ligeramente superiores. El SVM logra el mejor rendimiento (accuracy de 0,67), seguido del MLP (9 neuronas), ambos con un weighted F1 de 0,64. A pesar de ello, los modelos presentan limitaciones para identificar a usuarios con bajo nivel de conocimiento, que tienden a confundirse con usuarios intermedios.

#### 4. DISCUSIÓN

En esta sección se comparan los resultados obtenidos en la fase anterior con los de experimentos previos y con las expectativas de los investigadores. Respecto a la característica habilidad, nuestros resultados indican que los modelos basados en MLP y SVM lograron mayor accuracy en la clasificación de esta característica (0,61 y 0,60 de accuracy). En contraste, RF y NB mostraron un desempeño inferior. Esta jerarquía es consistente con estudios recientes. Por ejemplo, Çetinkaya et al. (2023) observaron que SVM alcanzó el mejor rendimiento (94,8%), superando a otros modelos. De forma similar, en nuestro estudio SVM presenta un rendimiento competitivo, aunque, a diferencia de dicho trabajo, MLP obtiene los mejores resultados, lo que podría explicarse por diferencias en los datos o en la formulación del problema.

Respecto a la característica conocimiento, nuestros resultados muestran valores de accuracy más moderados (entre 0,58 y 0,67). En contraste, Alruwais y Zakariah (2023) reportan precisiones de hasta el 98% utilizando distintos modelos de machine learning. Esta diferencia puede deberse al uso de variables más directamente relacionadas con el rendimiento académico en su estudio, lo que facilita la separabilidad entre clases, así como a posibles diferencias en la distribución de los datos. No obstante, se mantiene una tendencia similar: modelos más complejos, como MLP y SVM, ofrecen mejores resultados que enfoques más simples como NB.

Los resultados obtenidos, en términos de accuracy, estos no se ajustan por completo a lo esperado, aunque sí esperábamos que los algoritmos MLP y NB obtuviesen los mejores resultados. Esto se debe a la baja variabilidad de la muestra, compuesta exclusivamente por estudiantes de un grado de ingeniería, lo que implica un nivel relativamente homogéneo y medio-alto de conocimientos y habilidades. Esta característica conlleva una infrarrepresentación de la clase *novato* y de *bajos conocimientos*, lo que genera un desequilibrio entre las clases. Esta distribución no permite al algoritmo de ML identificar correctamente esa clase, lo que provoca que se clasifiquen erróneamente. Las clases habilidad intermedia y experto, al estar más representadas, obtienen un mayor accuracy, lo cual sí corresponde a lo esperado.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo presenta como principal contribución la comparación entre la clasificación de las características del usuario obtenida mediante algoritmos de aprendizaje automático y la realizada directamente por los propios usuarios. Para ello, se han empleado los algoritmos MLP, NB, SVN y RF, entrenados con una clasificación previamente definida. La evaluación se realiza mediante el cálculo de la correlación entre los resultados de los algoritmos de ML y los valores asignados por los propios usuarios. De este modo, se pretende determinar la fiabilidad de los modelos automáticos para representar las características del usuario en relación con sus propias expectativas. Como discusión, cabe destacar que, dado que este experimento se ha llevado a cabo con estudiantes de la Universidad de Valencia, los niveles de conocimiento y habilidades son elevados, lo que ha dificultado la correcta clasificación de los usuarios con menores competencias.

Como trabajo futuro, se plantea ampliar la muestra de sujetos en los tres conjuntos de datos para obtener resultados más robustos. Por último, se propone implementar y validar los algoritmos de clasificación en un entorno de pruebas como OpenTelemetry.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido desarrollado con la ayuda de la Generalitat Valenciana, mediante el proyecto TENTACLE (CIAICO/2023/089), y con el soporte del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, a través de los proyectos PHYLOVAR (PID2024-162114OB-I00) y EU4IRI (PID2024-161104OB-C22) financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER.

## 6. REFERENCIAS

- Abourobea, M., Atia, M., & Ismail, K. (2025). Comparative Study of Machine Learning Approaches for Fixed Radar-Based Road User Classification. *2025 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)*, 1-6. <https://doi.org/https://www.doi.org/10.1109/ACDSA65407.2025.11165993>
- Abri, S., Abri, R., & Çetin, S. (2020). A Classification on Different Aspects of User Modelling in Personalized Web Search. *NLPIR 2020: 4th International Conference on Natural Language Processing and Information Retrieval, Seoul, Republic of Korea, December 18-20, 2020*, 194-199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3443279.3443291>
- Alruwais, N., & Zakariah, M. (2023). Evaluating Student Knowledge Assessment Using Machine Learning Techniques. *Sustainability*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/su15076229>

- Alwafi, G., & Fakieh, B. (2024). A machine learning model to predict privacy fatigued users from social media personalized advertisements. *Scientific Reports*, 14(1), 3685. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-54078-w>
- Basuni, N. S., & Siregar, A. M. (2023). Comparison of the Accuracy of Drug User Classification Models Using Machine Learning Methods. *Journal RESTI*, 7(6), 1348-1358. <https://doi.org/https://www.doi.org/10.29207/resti.v7i6.5401>
- Brusilovsky, P. (1996). Methods and techniques of adaptive hypermedia. En *User Modeling and User-Adapted Interaction* (Vol. 6, Número 2, pp. 87-129). <https://doi.org/10.1007/BF00143964>
- Çetinkaya, A., Baykan, Ö. K., & Kirgiz, H. (2023). Analysis of Machine Learning Classification Approaches for Predicting Students' Programming Aptitude. *Sustainability*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151712917>
- Duan, S., Wang, Z., Wang, S., Chen, M., & Zhang, R. (2024). Emotion-Aware Interaction Design in Intelligent User Interface Using Multi-Modal Deep Learning. *CoRR*, abs/2411.06326. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2411.06326>
- Gaspar, A., Gil, M., Panach, J. I., & Romero, V. (2024). Towards a general user model to develop intelligent user interfaces. *Multim. Tools Appl.*, 83(26), 67501-67534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11042-024-18240-w>
- Gaspar, A., Panach Navarrete, J. I., Gil, M., Romero Gómez, V., & Distant, D. (2026). *Análisis de Características de Usuario con Machine Learning: Material suplementario*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.20848896>
- Geraci, A., Katki, F., McMonegal, L., Meyer, B., Lane, J., Wilson, P., Radatz, J., Yee, M., Porteous, H., & Springsteel, F. (1991). *IEEE Standard Computer Dictionary: Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*. IEEE Press. <https://doi.org/https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/574566>
- Jaber, A., & Csonka, B. (2023). Investigating the temporal differences among bike-sharing users through comparative analysis based on count, time series, and data mining models. *Alexandria Engineering Journal*, 77, 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.087>
- Kadhim, A. I. (2019). Survey on supervised machine learning techniques for automatic text classification. *Artificial Intelligence Review*, 52(1), 273-292. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-09677-1>
- Kristić, M., Zakarija, I., Škopljanač-Maćina, F., & Car, Ž. (2025). Machine Learning for Adaptive Accessible User Interfaces: Overview and Applications. *Applied Sciences*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/app152312538>
- Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809071>
- Murphy, K. P. (2012). *Machine learning—A probabilistic perspective*. MIT Press.
- Saranya, S., Malligeswari, N., Graf, F. T., & Murugan, V. (2025). Malicious user classification in cognitive 5G networks using novel improved bidirectional encoder representations from transformers model. *Scientific Reports*, 15(1), 43415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-19156-7>
- Schaible, M., Unger, H., Besier, A., & Mur, E. (2024). Adaptive Learning of User's Interests. *Proceedings of the 2023 7th International Conference on Natural Language Processing and Information Retrieval, NLPPIR '23*, 261-265. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3639233.3639336>

- Shannaq, B. (2024). IMPROVING SECURITY IN INTELLIGENT SYSTEMS: HOW EFFECTIVE ARE MACHINE LEARNING MODELS WITH TF-IDF VECTORIZATION FOR PASSWORD-BASED USER CLASSIFICATION. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 102(22), 8340-8355.
- Siino, M., Di Nuovo, E., Tinnirello, I., & La Cascia, M. (2022). Fake News Spreaders Detection: Sometimes Attention Is Not All You Need. *Information*, 13(9). <https://doi.org/https://www.doi.org/10.3390/info13090426>
- Tachie-Donkor, G., & Ezema, I. J. (2023). Effect of information literacy skills on university students' information seeking behaviour and lifelong learning. *Heliyon*, 9(8), e18427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18427>
- Yuvapriya, P., Subramanian, P., & Surendran, R. (2025). Performance Analysis of Information Technology Professionals Using Optimal User Clustering and Machine Learning Model for Adaptive e-learning. *2025 8th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 1159-1165. <https://doi.org/https://www.doi.org/10.1109/ICOEI65986.2025.11013491>
- Zahoor, K., & Bawany, N. Z. (2024). Explainable artificial intelligence approach towards classifying educational android app reviews using deep learning. *Interact. Learn. Environ.*, 32(9), 5227-5252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2212708>

## Desarrollo y evaluación de un sistema BCI basado en imaginación motora: comparativa de FBCSP y geometría Riemanniana

### *Development and evaluation of a motor imagery BCI system: comparison of FBCSP and Riemannian geometry*

<sup>(1)</sup> Cristina Herrero Martínez, <sup>(2)</sup> Álvaro Fernández Guirao <sup>[0009-0007-4022-1288]</sup>, <sup>(3)</sup> Enrique Navarro Camba <sup>[0000-0001-8365-0233]</sup>, <sup>(4)</sup> José Vicente Riera López <sup>[0000-0002-2754-9592]</sup>

<sup>(1)</sup> IRTIC – Universidad de Valencia, [herreromartinezcristina@gmail.com](mailto:herreromartinezcristina@gmail.com)

<sup>(2)</sup> IRTIC – Universidad de Valencia, [alvaro.fernandez-guirao@uv.es](mailto:alvaro.fernandez-guirao@uv.es)

<sup>(3)</sup> IRTIC – Universidad de Valencia, [enrique.navarro@uv.es](mailto:enrique.navarro@uv.es)

<sup>(4)</sup> IRTIC – Universidad de Valencia, [j.vicente.riera@uv.es](mailto:j.vicente.riera@uv.es)

**Resumen.** Este trabajo presenta el desarrollo y evaluación de un sistema de interfaz cerebro-computador (BCI) basado en señales EEG para clasificación de imaginación motora bilateral. Se diseñó un protocolo experimental con hardware de bajo coste (OpenBCI Cyton+Daisy, 16 canales, 125 Hz) e implementación en Python. Se compararon Filter Bank Common Spatial Patterns (FBCSP) y geometría Riemanniana con proyección al espacio tangente y alineamiento euclidiano (EA), evaluados mediante validación cruzada leave-one-subject-out (LOSO) con 10 participantes novatos. El FBCSP obtuvo una exactitud balanceada media de  $0,569 \pm 0,081$  en el esquema cross-subject; el método Riemannian alcanzó  $0,647 \pm 0,086$  ( $N=9$ ). Ambos son significativamente superiores al azar (FBCSP:  $t(9)=2,69$ ,  $p=0,025$ ,  $d=0,85$ ; Riemannian:  $t(8)=5,10$ ,  $p<0,001$ ,  $d=1,70$ ). El EA aportó +5,3 puntos porcentuales al rendimiento Riemannian cross-subject. La latencia de inferencia fue inferior a 7 ms ( $p99$ ), confirmando la viabilidad para retroalimentación en tiempo real.

**Palabras clave:** interfaz cerebro-computador, imaginación motora, EEG, FBCSP, geometría Riemanniana.

**Abstract.** This paper presents the development and evaluation of a brain-computer interface (BCI) system based on EEG signals for bilateral motor imagery classification.

A complete experimental protocol was designed with low-cost hardware (OpenBCI Cyton+Daisy, 16 channels, 125 Hz) and implemented in Python. Filter Bank Common Spatial Patterns (FBCSP) and Riemannian geometry with tangent space projection and Euclidean Alignment (EA) were compared using leave-one-subject-out (LOSO) cross-validation with 10 naive participants. FBCSP achieved a mean balanced accuracy of  $0.569 \pm 0.081$  (cross-subject); the Riemannian method reached  $0.647 \pm 0.086$  ( $N=9$ ). Both are significantly above chance (FBCSP:  $t(9)=2.69$ ,  $p=0.025$ ,  $d=0.85$ ; Riemannian:  $t(8)=5.10$ ,  $p<0.001$ ,  $d=1.70$ ). EA contributed +5.3 percentage points to Riemannian cross-subject performance. Inference latency was below 7 ms ( $p99$ ), confirming suitability for real-time neurofeedback.

**Keywords:** brain-computer interface, motor imagery, EEG, FBCSP, Riemannian geometry.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las interfaces cerebro-computador (BCI) establecen un canal de comunicación directo entre la actividad cerebral y un dispositivo externo sin utilizar el sistema nervioso periférico (Clerc et al., 2016). La electroencefalografía (EEG) es la tecnología de registro más empleada por su carácter no invasivo, portabilidad y bajo coste. La imaginación motora (MI) es el paradigma de elección en BCI basados en EEG: los usuarios imaginan movimientos sin ejecutarlos, generando fenómenos de desincronización y sincronización relacionados con eventos (ERD/ERS) en las bandas  $\mu$  (8–13 Hz) y  $\beta$  (13–30 Hz) detectables en el EEG (Wolpaw et al., 2002). Estos patrones permiten discriminar entre tareas de MI y controlar dispositivos externos, con aplicaciones documentadas en rehabilitación neurológica, asistencia a personas con discapacidad motora y sistemas de interacción humano-máquina.

La mayor parte de estudios BCI emplea hardware EEG clínico de alto coste (>5.000 €), lo que limita su accesibilidad y reproducibilidad en entornos no especializados. El hardware consumer-grade, como el OpenBCI Cyton+Daisy (~500 €), ofrece una alternativa viable pero introduce mayor variabilidad en la señal y requiere pipelines de preprocesamiento más robustos. Este trabajo aborda esta brecha, desarrollando y evaluando un sistema BCI completo con hardware de bajo coste en condiciones ecológicas: sujetos novatos, pocas sesiones de calibración y sin infraestructura de laboratorio.

Los objetivos son: (i) implementar un pipeline de adquisición y procesamiento completo con hardware accesible; (ii) comparar FBCSP y geometría Riemanniana bajo esquemas cross-subject y within-subject; (iii) cuantificar la contribución del Euclidean Alignment (EA) mediante un experimento de ablación; (iv) verificar la viabilidad para retroalimentación en tiempo real mediante medición de latencia.

## 2. TRABAJO RELACIONADO

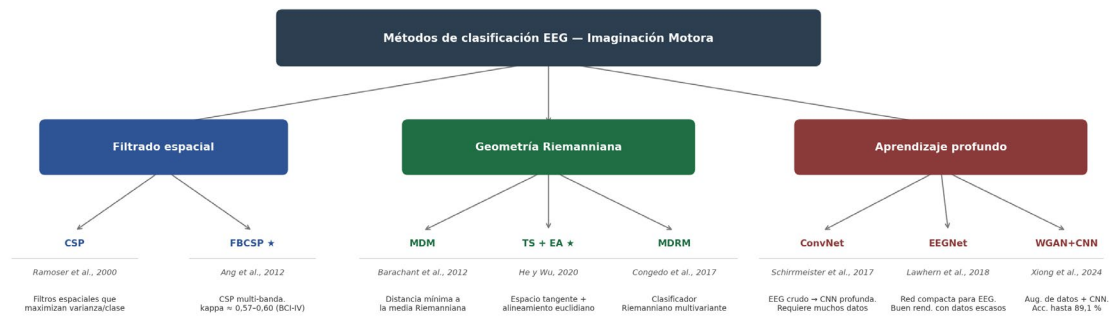
Los métodos de clasificación para BCI de MI pueden agruparse en tres grandes familias según el tipo de representación de la señal y el paradigma de aprendizaje utilizado (Lotte et al., 2018). La Figura 1 recoge esta taxonomía y la Figura 2 ofrece una síntesis cualitativa orientativa de sus propiedades.

**Métodos de filtrado espacial.** Common Spatial Patterns (CSP) es la técnica de referencia desde el trabajo seminal de Ramoser et al. (2000): calcula filtros lineales que maximizan la varianza de una clase mientras minimizan la de la otra, permitiendo discriminar ensayos de MI con pocas épocas. Su principal limitación es la sensibilidad al ruido y la dependencia de una única banda de frecuencia. Filter Bank Common Spatial Patterns (FBCSP), propuesto por Ang et al. (2012), extiende CSP aplicándolo sobre múltiples subbandas espectrales y seleccionando automáticamente las más informativas mediante criterios de información mutua. Evaluado sobre los conjuntos BCI Competition IV 2a y 2b, FBCSP obtuvo valores de kappa de 0,569 y 0,600, respectivamente, consolidándose como uno de los métodos de referencia en la comunidad.

**Métodos basados en geometría Riemanniana.** Barachant et al. (2012) propusieron representar cada época EEG mediante su matriz de covarianza, perteneciente al espacio de matrices simétricas definidas positivas (SPD), que forma una variedad Riemanniana de estructura geométrica no euclídea. Operar sobre ella respetando su geometría mejora la robustez frente a ruido y variabilidad inter-sujeto respecto a los métodos euclídeos clásicos. Los clasificadores basados en Distancia Mínima a la Media Riemanniana (MDM) y la proyección al espacio tangente (TS) demostraron rendimiento comparable o superior a CSP+LDA con menor coste computacional. Congedo et al. (2017) destacaron su eficacia con conjuntos de datos pequeños, condición habitual en estudios con hardware consumer-grade. Un problema crítico en sistemas BCI independientes del sujeto es el *dominio shift* inter-sujeto: la distribución de covarianzas varía considerablemente entre personas. He y Wu (2020) propusieron Euclidean Alignment (EA) para corregirlo: normalizar cada sesión por la raíz cuadrada inversa de su covarianza media antes del entrenamiento, alineando los dominios sin requerir datos del sujeto de test. En su evaluación, el EA aportó mejoras de entre 3 y 8 puntos porcentuales en exactitud cross-subject.

**Métodos de aprendizaje profundo.** Schirrmeister et al. (2017) demostraron que redes neuronales convolucionales (ConvNets) pueden decodificar EEG crudo con rendimiento competitivo, aunque requieren grandes volúmenes de datos. Lawhern et al. (2018) propusieron EEGNet, una arquitectura compacta diseñada para EEG con buen rendimiento incluso con datos reducidos. Xiong et al. (2024) combinaron transformadas wavelet, generación de datos sintéticos mediante redes generativas adversariales de Wasserstein con penalización de gradiente (WGAN-GP) y clasificación CNN, obteniendo exactitudes de hasta el 89,1 % en datasets de MI. Pese a estos avances, los métodos de aprendizaje profundo presentan baja interpretabilidad y requieren infraestructura GPU, lo que limita su aplicabilidad en sistemas BCI de bajo coste.

**Posicionamiento de este trabajo.** La revisión de Lotte et al. (2018) concluye que no existe un método dominante. Este trabajo evalúa FBCSP y Riemannian TS+EA bajo condiciones realistas de bajo coste, escenario en el que la literatura aporta menos evidencia comparativa que en entornos de laboratorio controlado.



**Figura 1.** Taxonomía de los principales enfoques de clasificación EEG para imaginación motora. Los métodos marcados con ★ son los implementados en este trabajo.

| Característica                    | Filtrado espacial (FBCSP)         | Geometría Riemanniana (TS + EA) | Aprendizaje profundo (EEGNet, ConvNet) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
| Datos necesarios                  | ~30-50 épocas                     | ~30-50 épocas                   | >500 épocas                            |
| Generaliz. cross-subject          | Media (sin adaptación de dominio) | Alta (con Euclidean Alignment)  | Variable (requiere fine-tuning)        |
| Latencia de inferencia            | ~3,5 ms                           | ~1,7 ms                         | Alta (reducible con GPU)               |
| Interpretabilidad                 | Alta (filtros espaciales)         | Media (espacio de covarianzas)  | Baja (caja negra)                      |
| Robustez al ruido                 | Media (sensible a artefactos)     | Alta (geometría SPD estable)    | Media-Alta (depende de arquitectura)   |
| Coste computacional               | Bajo                              | Bajo                            | Alto (GPU recomendada)                 |
| Idoneidad hardware consumer-grade | Buena                             | Muy buena                       | Limitada                               |

**Figura 2.** Síntesis cualitativa orientativa de las propiedades de los principales enfoques para clasificación EEG-MI. Los valores de latencia corresponden a los medidos experimentalmente en este trabajo; el resto de propiedades son de carácter comparativo.

### 3. MÉTODO

#### 3.1. Sistema de adquisición y participantes

Las señales EEG se registraron con OpenBCI Cyton+Daisy (16 canales, 125 Hz, ADC 24 bits, transmisión inalámbrica 2,4 GHz). Los datos se adquirieron mediante BrainFlow, que realiza automáticamente la conversión de cuentas ADC a microvoltios ( $\mu\text{V}$ ) y los almacena en CSV con marcas temporales de alta precisión. El software de adquisición y presentación de estímulos fue implementado íntegramente en Python. Participaron 10 sujetos (s01–s010). En dos sujetos (s02 y s03) se adquirieron bloques de menor tamaño (20 ensayos por bloque) debido a incidencias durante la recogida de datos. Cada sujeto completó 3 sesiones en el mismo día, con descansos entre bloques según necesidad. Cada sesión constó de ~40 ensayos brutos (9 s/ensayo + 0,5–1,0 s de intervalo inter-ensayo), lo que supone ~6,5 minutos de ensayos activos y ~11–14 minutos incluyendo preparación y colocación del casco EEG. Tras el control de calidad automático, el número de épocas válidas osciló entre 17 y 103 (media:  $71,2 \pm 32,1$ ; total: 712 épocas). Los 16 electrodos se distribuyeron según el sistema internacional 10–20, con énfasis en regiones sensorimotoras: C3/C4

(corteza motora primaria), FC3/FC4 y CP3/CP4 (áreas premotoras y parietales somatosensoriales), completados con cobertura frontal y parieto-occipital.

### 3.2. Paradigma experimental

Los participantes realizaron imaginación motora bilateral (mano izquierda/derecha) en respuesta a estímulos visuales implementados en *Pygame* (Shinners, 2011). Cada ensayo siguió una secuencia fija de 9 s: línea base (2 s, punto de fijación), *cue* visual (1 s, flecha izquierda o derecha), imaginación motora (4 s) y descanso (2 s). Un intervalo inter-ensayo aleatorio de 0,5–1,0 s separaba cada ensayo del siguiente. Se instruyó a los participantes a imaginar el movimiento de la mano indicada sin realizar movimiento físico alguno. Los *triggers* de eventos se registraron simultáneamente en el stream EEG y en un fichero de log independiente para verificación de sincronización. El desfase EEG–estímulo presentó una media  $< 5$  ms y un  $p99 < 24$  ms en todas las sesiones válidas. Los *triggers* generados por el sistema de estímulos se alinearon con el stream EEG de BrainFlow mediante un offset dinámico entre el tiempo de sistema y el timestamp de BrainFlow, permitiendo una sincronización precisa en el dominio temporal del EEG.

### 3.3. Preprocesamiento y control de calidad

El pipeline de preprocesamiento incluyó cuatro etapas: (i) detección y enmascarado a cero de canales defectuosos: ruidosos ( $\text{std} > 5$  MAD [Median Absolute Deviation] de la mediana del conjunto de canales), planos (desviación típica anómalamente baja), o saturados ( $>5$  % de muestras en valor extremo del rango ADC); (ii) referencia promedio común (CAR) sobre los canales válidos; (iii) filtro notch a 49,8 Hz para eliminación de interferencia de red eléctrica; (iv) resampling a 125 Hz exactos mediante interpolación polyphase.

El control de calidad por sesión empleó umbrales adaptativos basados en los percentiles de la propia sesión, con límites superiores fijos (Tabla 1). El umbral de desfase EEG–estímulo se fijó en  $p99 < 20$  ms para el esquema cross-subject y en  $p99 < 25$  ms para el esquema within-subject, siendo este último ligeramente más permisivo para compensar la mayor escasez de datos por sujeto. Esta diferencia explica que el sujeto s02, con una única sesión válida bajo el criterio cross-subject, disponga de dos sesiones válidas bajo el criterio within-subject y pueda por tanto incluirse en ese análisis. La tasa media de rechazo de épocas fue del  $14,3 \pm 11,8$  % (FBCSP) y del  $16,1 \pm 12,4$  % (Riemannian).

### 3.4. Extracción de características

**FBCSP (Ang et al., 2012).** Aplica CSP (Ramoser et al., 2000) sobre 4 subbandas espectrales (8–12, 13–18, 18–26, 26–35 Hz), calculando 6 componentes por banda (24 características totales). La covarianza se estimó con el estimador de Ledoit-Wolf para mayor estabilidad con muestras pequeñas. Las 8 características más informativas se seleccionaron por información mutua y se normalizaron por z-score robusto (mediana/IQR) por sesión para reducir el sesgo de offset DC inter-sesión.

**Geometría Riemanniana (Barachant et al., 2012).** Cada época EEG se representa por su matriz de covarianza en el espacio SPD. En el esquema cross-subject se aplicó Euclidean Alignment (He y Wu, 2020): cada sesión se normaliza como  $\tilde{C} = R^{-1/2} C R^{-1/2}$ , donde  $R$  es la covarianza media de la sesión y

$R^{-1/2}$  denota su raíz cuadrada matricial inversa, corrigiendo el sesgo de dominio inter-sujeto sin necesidad de datos del sujeto de test. Las covarianzas alineadas se proyectan al espacio tangente usando la métrica Bures–Wasserstein, obteniéndose 136 características por época. En el esquema within-subject se desactivó el EA: con un número reducido de sesiones por sujeto, la variabilidad intra-sujeto es insuficiente para que el alineamiento resulte beneficioso, como confirma el experimento de ablación descrito en la sección 4.2.

**Tabla 1.** Parámetros del pipeline de preprocesamiento y control de calidad por método.

| Parámetro                 | FBCSP                                     | Riemannian TS                             |
|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ventana de análisis       | 0,5–2,65 s post-cue (269 muestras)        | 0,65–2,65 s post-cue (250 muestras)       |
| Filtrado espectral        | 4 subbandas: 8–12, 13–18, 18–26, 26–35 Hz | 8–28 Hz (banda única, Butterworth ord. 3) |
| Corrección de línea base  | Sí (–0,5 a 0 s)                           | No                                        |
| Umbral pico artefacto     | 150 $\mu$ V adaptativo (cap 300 $\mu$ V)  | 300 $\mu$ V adaptativo (cap 400 $\mu$ V)  |
| Umbral varianza artefacto | 2000 $\mu$ V <sup>2</sup> adaptativo      | 3000 $\mu$ V <sup>2</sup> adaptativo      |
| Tasa máx. de rechazo      | 50 %                                      | 40 %                                      |
| Euclidean Alignment       | No aplicable                              | Cross-subj: activo; Within-subj: inactivo |

### 3.5. Clasificadores y protocolo de evaluación

Para FBCSP, el clasificador se seleccionó por búsqueda en rejilla (LDA, Regresión Logística, SVM lineal y SVM RBF) con validación cruzada interna de 3 particiones sobre los datos de entrenamiento del fold externo, evitando filtración de información al conjunto de test. Para Riemannian, se empleó Regresión Logística con regularización L2 (C optimizado por búsqueda en rejilla). Se definieron dos esquemas LOSO complementarios:

- Cross-subject: en cada fold, un sujeto completo queda reservado para test y el modelo se entrena con los N–1 sujetos restantes (FBCSP: N=10; Riemannian: N=9, excluido s02). Evalúa la generalización a un usuario nuevo sin calibración previa.
- Within-subject: para cada sujeto con  $\geq 2$  sesiones válidas bajo el criterio within-subject, una sesión queda para test y el modelo se entrena con las sesiones restantes del mismo sujeto. Evalúa la personalización con datos del propio usuario.

La métrica principal es la exactitud balanceada (media aritmética del recall por clase), estándar en evaluación BCI por su insensibilidad al desbalance de clases (Lotte et al., 2018). Se reportan además el recall por clase (izquierda y derecha) para el esquema cross-subject Riemannian. La significación estadística se evaluó con t-test de una muestra contra 0,500 (nivel de azar) y prueba de permutación con 10.000 permutaciones. El tamaño del efecto se calculó con la d de Cohen (1988).

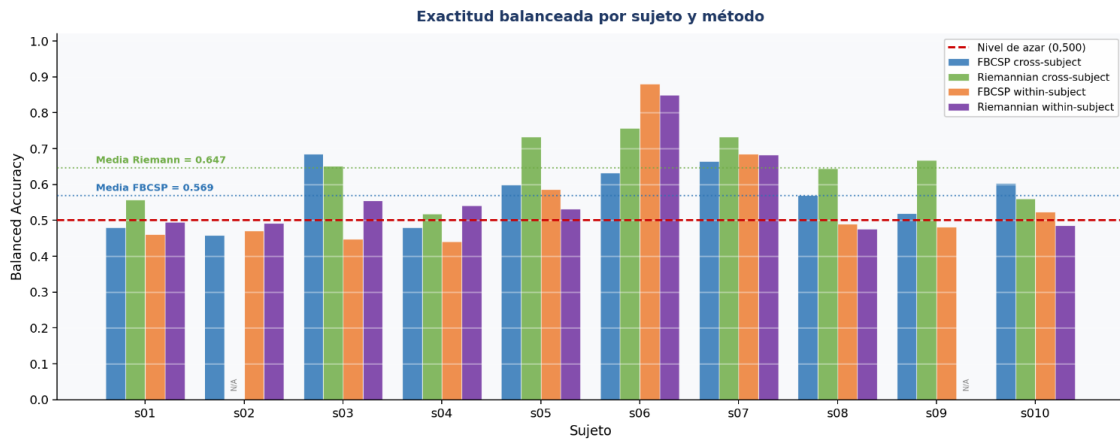
## 4. RESULTADOS

### 4.1. Exactitud balanceada por sujeto y método

La Tabla 2 recoge los resultados completos por sujeto. En el esquema cross-subject, el método Riemannian ( $0,647 \pm 0,086$ ,  $N=9$ ) supera al FBCSP ( $0,569 \pm 0,081$ ,  $N=10$ ) en +7,8 puntos porcentuales. De forma agregada, se obtuvieron 474 de 836 clasificaciones correctas para FBCSP (recall izq. 0,569, recall der. 0,565) y 438 de 695 para Riemannian (recall izq. 0,640, recall der. 0,620). Destacan dos perfiles bien diferenciados: s06 es el único sujeto con respuesta robusta ( $>0,75$  en todos los métodos y esquemas), mientras que los sujetos s01, s02 y s04 presentan exactitudes sistemáticamente próximas al nivel de azar, compatible con un perfil de baja respuesta BCI descrito en la literatura (Lotte et al., 2013). El caso s03 ( $0,685$  en FBCSP cross-subject pero  $0,448$  en FBCSP within-subject) ilustra el patrón de mayor variabilidad inter-sesión intra-sujeto que inter-sujeto característico de participantes novatos. La Figura 3 muestra la distribución completa de resultados.

**Tabla 2.** Exactitud balanceada por sujeto y método. † s02 excluido de Riemannian cross-subject por criterio de control de calidad (QC) estricto (desfase EEG–estímulo  $p99 < 20$  ms), pero incluido en within-subject bajo criterio permisivo (desfase  $p99 < 25$  ms). ‡ s09 excluido de Riemannian within-subject (solo 1 sesión válida).

| Sujeto         | N épocas | FBCSP Cross                         | Riemann Cross                       | FBCSP Within                        | Riemann Within                      | Recall Izq. (Riemann) | Recall Der. (Riemann) |
|----------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| s01            | 99       | 0,480                               | 0,557                               | 0,461                               | 0,495                               | 0,519                 | 0,596                 |
| s02 †          | 17       | 0,458                               | N/A                                 | 0,470                               | 0,492                               | —                     | —                     |
| s03            | 49       | 0,685                               | 0,651                               | 0,448                               | 0,554                               | 0,692                 | 0,609                 |
| s04            | 103      | 0,480                               | 0,518                               | 0,440                               | 0,541                               | 0,620                 | 0,415                 |
| s05            | 60       | 0,600                               | 0,733                               | 0,586                               | 0,531                               | 0,742                 | 0,724                 |
| s06            | 70       | 0,632                               | 0,757                               | 0,880                               | 0,850                               | 0,763                 | 0,750                 |
| s07            | 84       | 0,664                               | 0,732                               | 0,685                               | 0,682                               | 0,681                 | 0,784                 |
| s08            | 101      | 0,569                               | 0,644                               | 0,489                               | 0,476                               | 0,680                 | 0,608                 |
| s09 ‡          | 27       | 0,519                               | 0,668                               | 0,482                               | N/A                                 | 0,643                 | 0,692                 |
| s010           | 102      | 0,604                               | 0,560                               | 0,524                               | 0,485                               | 0,528                 | 0,592                 |
| Media $\pm$ SD | —        | <b><math>0,569 \pm 0,081</math></b> | <b><math>0,647 \pm 0,086</math></b> | <b><math>0,546 \pm 0,139</math></b> | <b><math>0,567 \pm 0,123</math></b> | <b>0,652</b>          | <b>0,641</b>          |



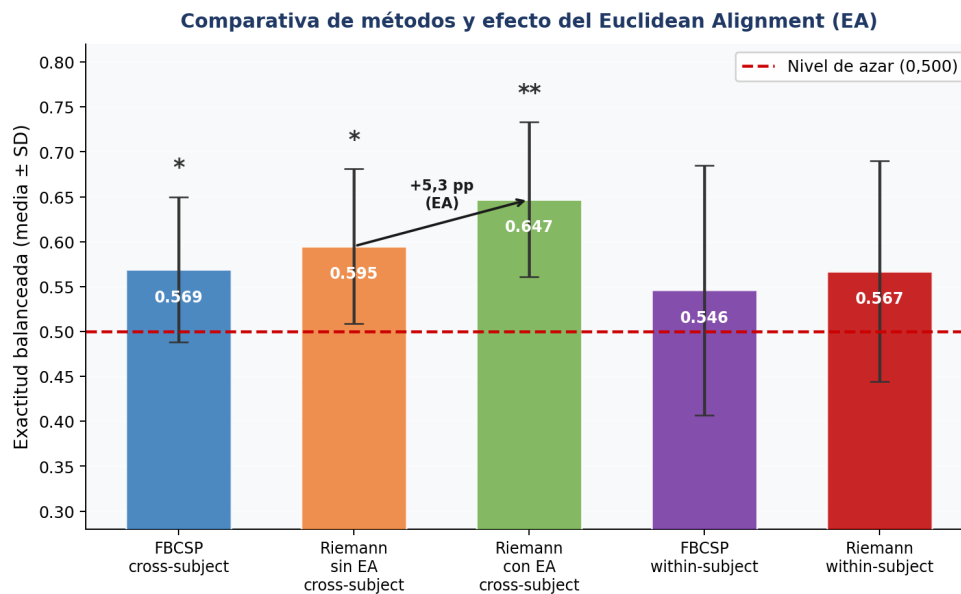
**Figura 3.** Exactitud balanceada por sujeto y método. La línea discontinua roja marca el nivel de azar (0,500). Las barras ausentes (N/A) corresponden a sujetos excluidos del análisis específico.

#### 4.2. Significación estadística y ablación del EA

Ambos métodos superan el nivel de azar de forma estadísticamente significativa en el esquema cross-subject con tamaño del efecto grande (Tabla 3). La prueba de permutación confirmó los resultados del t-test en ambos casos. El experimento de ablación aísla la contribución del EA: sin alineamiento, el Riemannian cross-subject obtiene  $0,595 \pm 0,086$ , frente a  $0,647 \pm 0,086$  con EA activo (+5,3 pp, la diferencia se calcula sobre las medias no redondeadas). En el esquema within-subject se compararon ambas condiciones numéricamente: EA activo produce  $0,572 \pm 0,135$  y EA inactivo  $0,567 \pm 0,123$ , diferencia no significativa que valida la decisión de desactivarlo en ese esquema. La Figura 4 visualiza los cinco escenarios del experimento de ablación cross-subject y los esquemas within-subject con EA inactivo.

**Tabla 3.** Tests estadísticos sobre la exactitud balanceada cross-subject y experimento de ablación del EA. \*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ .

| Método / Condición                | Bal. acc. media   | p (t-test) | p (permutación) | d de Cohen |
|-----------------------------------|-------------------|------------|-----------------|------------|
| FBCSP cross-subject (N=10)        | $0,569 \pm 0,081$ | 0,025 *    | 0,033 *         | 0,851      |
| Riemannian cross-subject (N=9)    | $0,647 \pm 0,086$ | <0,001 **  | 0,005 **        | 1,701      |
| Riemannian sin EA (ablación, N=9) | $0,595 \pm 0,086$ | 0,038 *    | 0,045 *         | 0,921      |
| FBCSP within-subject (N=10)       | $0,546 \pm 0,139$ | 0,187      | —               | —          |
| Riemannian within-subject (N=9)   | $0,567 \pm 0,123$ | 0,130      | —               | —          |



**Figura 4.** Exactitud balanceada media ( $\pm$ SD) por método. Los asteriscos indican significación estadística respecto al nivel de azar (\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ). La flecha muestra la ganancia atribuible al Euclidean Alignment (+5,3 pp). Las dos barras de la derecha corresponden a los esquemas within-subject con EA inactivo.

### 4.3. Latencia de inferencia

Las latencias del pipeline de inferencia, medidas sobre 200 repeticiones con época sintética de dimensiones reales, fueron: FBCSP, media 3,52 ms, p95 6,01 ms, p99 6,53 ms; Riemannian TS, media 1,74 ms, p95 2,60 ms, p99 4,55 ms. Ambos métodos están muy por debajo del umbral de 500 ms habitualmente establecido para retroalimentación en tiempo real en sistemas BCI (Shenoy et al., 2006). El método Riemannian resulta más rápido al no requerir filtrado multi-banda durante la inferencia. El cuello de botella temporal real en un sistema online es la ventana de análisis ( $\sim 2$  s), no el procesamiento computacional.

## 5. DISCUSIÓN

**Rendimiento general y comparativa de métodos.** Los resultados obtenidos son consistentes con los valores reportados para BCI con hardware consumer-grade y sujetos novatos, situados típicamente en el rango 0,55–0,65 con alta variabilidad inter-sujeto (Lotte et al., 2018). La superioridad del método Riemannian (+7,8 pp) se explica por dos factores: (i) las representaciones de covarianza en el espacio SPD capturan la estructura espacial del EEG de forma más completa que las características log-varianza del FBCSP con pocos datos de entrenamiento; (ii) el EA aporta +5,3 pp corrigiendo el sesgo de dominio inter-sujeto, explicando aproximadamente el 68 % de la diferencia observada.

**Cross-subject vs. within-subject.** Un hallazgo metodológicamente relevante es que el esquema *cross-subject* supera al *within-subject* en la mayoría de sujetos para ambos métodos (medias cross: 0,569 y 0,647 vs. within: 0,546 y 0,567). La explicación reside en la alta variabilidad inter-sesión de sujetos novatos con hardware consumer-grade: con solo 2 sesiones ( $\sim 60$ – $65$  épocas) de calibración, el modelo within-subject ve una muestra insuficiente de la variabilidad individual; el modelo cross-subject, entrenado con 8–9 sujetos distintos, generaliza mejor. El caso s03 (0,685 en FBCSP cross-subject pero 0,448 en within-subject) es el ejemplo más claro de este efecto. Para usuarios novatos

sin historial de calibración, un modelo cross-subject pre-entrenado puede ser más útil que uno personalizado con pocas sesiones. Las técnicas de transfer learning y adaptación online (He y Wu, 2020) son la vía prioritaria para mejorar el rendimiento within-subject en trabajo futuro.

**Variabilidad inter-sujeto.** La variabilidad inter-sujeto es el factor limitante dominante (rango 0,458–0,685 para FBCSP; 0,518–0,757 para Riemannian). S06 es el único sujeto con respuesta robusta y consistente. Los sujetos con exactitudes próximas al azar presentan un patrón compatible con el perfil de baja respuesta BCI descrito en la literatura (Lotte et al., 2013), si bien con el tamaño muestral disponible no es posible atribuirlo con certeza a características del sujeto frente a factores de calidad de señal. El entrenamiento del usuario y el neurofeedback continuo son estrategias documentadas para mejorar el rendimiento individual.

**Limitaciones.** El tamaño muestral (N=10) es moderado y la ausencia de datos demográficos formales impide analizar la influencia de variables como la edad o lateralidad. La evaluación es completamente offline; la retroalimentación visual en tiempo real podría modificar el rendimiento por efecto neurofeedback. Los resultados son específicos para el hardware OpenBCI Cyton+Daisy (electrodos secos, 125 Hz) y podrían diferir con otros dispositivos consumer-grade.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado el desarrollo y evaluación de un sistema BCI completo para imaginación motora bilateral con hardware consumer-grade (OpenBCI Cyton+Daisy, 16 canales, 125 Hz) e implementación íntegra en Python. Las principales conclusiones son:

- Ambos métodos superan el nivel de azar con significación estadística en el esquema cross-subject y tamaño del efecto grande (FBCSP:  $d=0,85$ ; Riemannian:  $d=1,70$ ), validando el hardware OpenBCI Cyton+Daisy para decodificación de MI.
- El método Riemannian supera al FBCSP en +7,8 pp cross-subject, con el Euclidean Alignment como componente más crítico, explicando aproximadamente el 68 % de la diferencia observada (+5,3 pp según el experimento de ablación).
- El esquema cross-subject supera al within-subject en la mayoría de sujetos, resultado atribuible a la alta variabilidad inter-sesión de usuarios novatos con pocas épocas de calibración.
- Las latencias de inferencia ( $p99 < 7$  ms) confirman la viabilidad para retroalimentación en tiempo real, siendo el cuello de botella la ventana de análisis y no el procesamiento computacional.

Como trabajo futuro se identifican: (i) implementación de transfer learning y adaptación online para mejorar el rendimiento within-subject; (ii) evaluación con mayor número de sujetos para caracterizar la prevalencia de baja respuesta BCI con hardware consumer-grade; (iii) desarrollo de retroalimentación visual en tiempo real para evaluar el efecto neurofeedback.

## 7. REFERENCIAS

Ang, K. K., Chin, Z. Y., Zhang, H., y Guan, C. (2012). Filter Bank Common Spatial Pattern algorithm on BCI Competition IV datasets 2a and 2b. *Frontiers in Neuroscience*, 6, 39. <https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00039>

- Barachant, A., Bonnet, S., Congedo, M., y Jutten, C. (2012). Multiclass brain-computer interface classification by Riemannian geometry. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(4), 920–928. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2172210>
- Clerc, M., Bougrain, L., y Lotte, F. (Eds.). (2016). *Brain-Computer Interfaces: Foundations and Methods*. Wiley.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2.<sup>a</sup> ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Congedo, M., Barachant, A., y Andreev, A. (2017). A primer on Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces. *Brain-Computer Interfaces*, 4(3), 162–174. <https://doi.org/10.1080/2326263X.2017.1297192>
- He, H., y Wu, D. (2020). Transfer learning for brain-computer interfaces: a Euclidean space data alignment approach. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(2), 399–410. <https://doi.org/10.1109/TBME.2019.2913914>
- Lawhern, V. J., Solon, A. J., Waytowich, N. R., Gordon, S. M., Hung, C. P., y Lance, B. J. (2018). EEGNet: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*, 15(5), 056013. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aace8c>
- Lotte, F., Larrue, F., y Mühl, C. (2013). Flaws in current human training protocols for spontaneous brain-computer interfaces: lessons learned from instructional design. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 568. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00568>
- Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., y Yger, F. (2018). A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: a 10+year update. *Journal of Neural Engineering*, 15(3), 031005. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aab2f2>
- Ramoser, H., Müller-Gerking, J., y Pfurtscheller, G. (2000). Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand movement. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(4), 441–446. <https://doi.org/10.1109/86.895946>
- Schirrmeister, R. T., Springenberg, J. T., Fiederer, L. D. J., Glasstetter, M., Eggensperger, K., Tangermann, M., Hutter, F., Burgard, W., y Ball, T. (2017). Deep learning with convolutional neural networks for EEG decoding and visualization. *Human Brain Mapping*, 38(11), 5391–5420. <https://doi.org/10.1002/hbm.23730>
- Shenoy, P., Krauledat, M., Blankertz, B., Rao, R. P. N., y Müller, K.-R. (2006). Towards adaptive classification for BCI. *Journal of Neural Engineering*, 3(1), R13–R23. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/3/1/R02>
- Shinners, P., y Pygame Community. (2011). *Pygame* (versión 2.x) [Software]. Recuperado de <https://www.pygame.org>
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., y Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)
- Xiong, H., Wang, M., y Xiao, M. (2024). Wasserstein generative adversarial network with gradient penalty and convolutional neural network based motor imagery EEG classification. *Journal of Neural Engineering*, 21, 016032. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ad6cf5>

## Accesibilidad en robots sociales para adultos mayores: Propiedades relacionadas con la comunicación no verbal

### *Accessibility in social robots for older adults: Properties related to nonverbal communication*

(1) Alberto Hitos-García [0009-0009-3136-5022], (2) Sergio Albiol-Pérez [0000-0002-6280-1474], (1) Nuria Medina-Medina [0000-0002-6013-732X], (1) Patricia Paderewski-Rodríguez [0000-0001-6626-9633], (3) Susana Bautista-Blasco [0000-0003-1648-0208], (1) Francisco Luís Gutiérrez-Vela [0000-0001-6629-7597], (2) Raquel Lacuesta-Gilaberte [0000-0002-4773-4904]

(1) Universidad de Granada, España, {albertohitos, nmedina, patricia, fgutierr}@ugr.es

(2) Universidad de Zaragoza, España, {salbiol, lacuesta}@unizar.es

(3) Universidad Francisco de Vitoria, España, susana.bautista@ufv.es

**Resumen.** El uso de robots sociales mejora la calidad de vida de los adultos mayores, pero su comunicación no verbal (CNV) plantea importantes retos de accesibilidad asociados al posible deterioro sensorial o cognitivo de los usuarios. Este artículo identifica y analiza las pautas de accesibilidad para la CNV en la interacción humano-robot. Mediante una revisión de la literatura, se categorizaron las barreras de interacción y sus posibles soluciones. Los resultados muestran dificultades en dimensiones como la expresión facial, gestos, proxémica y morfología. Se concluye que el diseño de robots inclusivos debe evitar la dependencia exclusiva de canales visuales, adoptando un enfoque multimodal y simplificando la expresividad para prevenir la sobrecarga cognitiva.

**Palabras clave:** accesibilidad, robots sociales, adultos mayores, comunicación no verbal.

**Abstract.** The use of social robots improves the quality of life for older adults, but their non-verbal communication (NVC) poses significant accessibility challenges associated with potential sensory or cognitive decline in users. This article identifies and analyzes accessibility guidelines for NVC in human-robot interaction. Through a literature review, interaction barriers and their possible solutions were categorized. The results reveal difficulties across dimensions such as facial expressions, gestures, proxemics, and morphology. It is concluded that the design of inclusive robots must

avoid exclusive reliance on visual channels, adopting a multimodal approach and simplifying expressiveness to prevent cognitive overload.

**Keywords:** accessibility, social robots, older adults, non-verbal communication.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El cuidado de las personas mayores se ha consolidado como uno de los ámbitos de mayor relevancia para la robótica (Cavallo et al., 2018), ofreciendo desde apoyo domótico hasta asistencia clínica y cognitiva (Hung et al., 2021). Además, los robots sociales son cada vez más populares por su capacidad para mitigar la soledad mediante interacciones significativas (Satake et al., 2026), las cuales deben ser efectivas, accesibles y éticamente transparentes (Hung et al., 2022).

Desde la perspectiva de la interacción persona-ordenador, este proceso comunicativo puede entenderse como un intercambio de información donde el robot y el adulto mayor asumen alternativamente los roles de emisor y receptor. Para ello, el robot emplea tanto la comunicación verbal (CV) (Bevilacqua et al., 2021) como la no verbal (CNV) (Strutz et al., 2024).

Mientras que la CV se basa en el uso de mensajes lingüísticos, la CNV es una característica paralingüística que permite transmitir información a través del contacto visual, las expresiones faciales o la postura corporal. Esta comunicación se apoya en múltiples canales, como la kinésica (Werner et al., 2020), la proxémica (McCall, 2016) el paralenguaje y la háptica (Fitter, et al., 2020) para transmitir actitudes, reflejar rasgos de personalidad o modular el mensaje verbal (De Paulo, 1992). Diseñar adecuadamente ambas modalidades resulta clave para que el usuario interprete correctamente las intenciones del robot y logre una interacción natural, segura y comprensible.

La accesibilidad desempeña un papel fundamental en la comunicación entre robots sociales y personas mayores (Abhari et al., 2024). En el caso de la CV, existen ya diversas pautas y recomendaciones orientadas a mejorar la comprensión, como el uso de un lenguaje claro y sin ambigüedades o la adaptación del contenido al contexto cognitivo del usuario.

Por otro lado, la CNV plantea retos significativamente mayores desde el punto de vista de la accesibilidad, ya que se apoya en múltiples canales (visuales, auditivos y, en algunos casos, táctiles) que requieren una correcta interpretación simultánea por parte del usuario. Esto resulta especialmente crítico en personas mayores, que pueden presentar deterioro en capacidades sensoriales como la visión o la audición, así como en el procesamiento cognitivo necesario para interpretar gestos, expresiones o señales implícitas.

La CNV suele ser más ambigua y dependiente del contexto que la CV, lo que dificulta su estandarización y evaluación. Además, su accesibilidad ha recibido menor atención en la interacción humano-robot. Por ello, este trabajo identifica y analiza pautas de accesibilidad aplicables a los distintos tipos de CNV entre robots sociales y adultos mayores, con el objetivo de contribuir al diseño de interacciones más inclusivas y comprensibles.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología seguida en este estudio consiste en una revisión de alcance (*scoping review*) cuyo objetivo principal es explorar y sintetizar la literatura científica existente sobre los problemas de

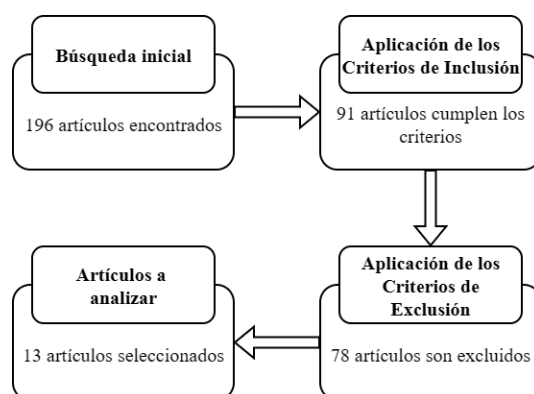
accesibilidad relacionados con la CNV que experimentan los adultos mayores durante su interacción con robots sociales. Este enfoque permite identificar, clasificar y mapear las principales barreras descritas en la literatura, así como las soluciones y recomendaciones propuestas por distintos autores. A partir de este análisis, se plantea un conjunto de guías de diseño orientadas a mejorar la inclusión, accesibilidad y satisfacción en la interacción humano-robot.

Para llevar a cabo esta revisión de alcance, se realizó una búsqueda en la base de datos SCOPUS, con el fin de identificar los trabajos más relevantes sobre accesibilidad en la interacción entre adultos mayores y robots sociales. La estrategia de búsqueda se diseñó para abarcar los principales conceptos relacionados con el ámbito de estudio, empleando comodines (\*) para incluir variaciones terminológicas y operadores booleanos (AND y OR) para optimizar y acotar los resultados. La cadena de búsqueda utilizada fue la siguiente:

*"social robot\*" AND accessib\* AND (elder\* OR "older adult\*") AND ("facial expression\*" OR gesture\* OR morphology OR "body language" OR prosody OR gaze OR "non verbal communication") AND "guidelines"*

La búsqueda inicial arrojó un total de 196 trabajos. En la primera fase de evaluación, se aplicaron los criterios de inclusión, limitando los resultados estrictamente a artículos de revistas y comunicaciones de congresos (*conference papers*) redactados en inglés y publicados en el periodo comprendido entre 2020 y 2026. Tras aplicar estos filtros, 91 artículos cumplieron con los requisitos y avanzaron a la siguiente etapa del análisis.

Posteriormente, se realizó una revisión en profundidad aplicando los criterios de exclusión. Durante esta fase, se descartaron aquellos estudios que no abordan explícitamente la accesibilidad en robots sociales, los que no se centran en la población de adultos mayores y aquellos que no tratan problemas de accesibilidad vinculados de forma directa a la CNV. Tras descartar 78 trabajos que no se alineaban con los objetivos de la investigación, la muestra final quedó constituida por 13 artículos, los cuales fueron seleccionados definitivamente para su análisis en profundidad. Este proceso se resume mediante un diagrama de flujo inspirado en las directrices PRISMA en la Figura 1.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso de selección de estudios para la revisión de alcance, adaptado de las directrices PRISMA.

Aunque la búsqueda en SCOPUS identificó los estudios más relevantes, se observó que parte de la evidencia quedaba dispersa en trabajos no recuperados por la estrategia inicial. Para obtener una visión más completa, la búsqueda inicial se complementó mediante revisión de referencias cruzadas (*backward snowballing*) y búsqueda manual, incorporando 39 estudios adicionales sobre

accesibilidad en la interacción humano-robot (HRI), enriqueciendo el análisis y facilitando la identificación de barreras, soluciones y recomendaciones de diseño descritas en la literatura.

Por último, el conjunto de trabajos seleccionados fue sometido a un análisis en profundidad que permitió categorizar las dificultades en la CNV e identificar las soluciones propuestas, con el objetivo de formular una serie de directrices de diseño que promuevan una interacción inclusiva entre adultos mayores y robots sociales.

### 3. RESULTADOS

Este estudio ha permitido detectar patrones comunes en las dificultades experimentadas por este colectivo al interpretar señales no verbales, así como el análisis de las soluciones propuestas por distintos autores para mejorar la accesibilidad en la interacción con los robots. Estos resultados se organizan de forma estructurada para facilitar su interpretación y servir como base para la definición de futuras recomendaciones de accesibilidad y diseño inclusivo.

Del estudio de la literatura analizada, se propone una clasificación con los distintos tipos de CNV atendiendo a diversas dimensiones de análisis: expresión facial (capacidad del robot para transmitir emociones mediante el rostro), gestos (uso de movimientos corporales y de las extremidades para comunicar intenciones), morfología (apariencia física, forma y diseño del robot), posición del robot o proxémica (gestión de la distancia interpersonal y ubicación en el espacio), movimiento (dinámica, velocidad y naturalidad de los desplazamientos), prosodia (características no verbales del habla, como entonación, ritmo, acento, pausas e intensidad), manipulación de objetos o personas (interacciones físicas del robot con el entorno o el usuario), uso de luces (empleo de señales luminosas como mecanismo comunicativo), interacción táctil o háptica (*touch events* entre el robot y el usuario), información por pantalla (interfaces visuales y de navegación) y proyección audiovisual (uso de elementos visuales y auditivos proyectados como apoyo a la comunicación).

La Tabla 1 sintetiza los problemas de accesibilidad identificados en la CNV en la interacción con robots sociales.

#### 3.1. Soluciones de accesibilidad en la comunicación no verbal en robots sociales

En el análisis de la bibliografía se ha realizado un esfuerzo importante para relacionar los problemas detectados, las soluciones que se han utilizado y los efectos que han producido. A continuación, se describen dichas soluciones, clasificadas por los tipos de comunicación propuestos.

##### 3.1.1. Expresión facial

Las expresiones faciales generadas por robots pueden resultar difíciles de interpretar para usuarios con baja visión, deterioro cognitivo o limitaciones atencionales, especialmente cuando presentan animaciones complejas o rápidas que incrementan la carga cognitiva. Para mitigar estos problemas, se recomienda simplificar las expresiones faciales, evitando ambigüedades y transiciones rápidas, así como complementar esta información con canales auditivos claros. Asimismo, el uso de lenguajes de programación visual asociados a plataformas robóticas y renderizadores adecuados permite diseñar expresiones más accesibles y controladas (Cruz-Sandoval et al., 2024; Damn et al., 2013; Lütkebohle et al., 2010).

Por otro lado, un exceso de antropomorfismo puede provocar interpretaciones erróneas del estado emocional del robot. En este sentido, se propone limitar la expresividad a señales funcionales y predecibles, así como incorporar mecanismos de adaptación que permitan al robot analizar las expresiones del usuario y generar respuestas adecuadas, ya sean verbales o mediante acciones específicas (Salichs et al., 2020).

**Tabla 1.** Problemas de accesibilidad identificados en la comunicación no verbal (CNV) en la interacción con robots sociales

| Tipo de CNV            | Problema de accesibilidad (adaptado a robots)                                                              |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Expresión facial       | Dificultad para interpretar expresiones faciales por baja visión, deterioro cognitivo o atención reducida. |
|                        | Sobrecarga cognitiva debido a animaciones faciales complejas o rápidas.                                    |
|                        | Interpretación errónea del estado emocional por exceso de antropomorfismo.                                 |
| Mirada ( <i>gaze</i> ) | Dificultad para percibir hacia dónde dirige la atención el robot.                                          |
|                        | Incomodidad por contacto visual prolongado.                                                                |
| Gestos                 | Dificultad para percibir o interpretar gestos por velocidad o complejidad.                                 |
|                        | Gestos fuera del campo visual o no perceptibles.                                                           |
|                        | Falta de estandarización en el significado de los gestos.                                                  |
|                        | Gestos que requieren esfuerzo físico o son difíciles de seguir.                                            |
|                        | Dificultad para aprender o recordar el significado de los gestos.                                          |
|                        | Inconsistencia de gestos entre robots o sistemas.                                                          |
|                        | Interferencia entre señales verbales y backchanneling del robot.                                           |
| Morfología             | Expectativas irreales por apariencia humanoide.                                                            |
|                        | Dificultad de percepción o incomodidad por tamaño, forma o velocidad.                                      |
| Posición (proxémica)   | Incertidumbre sobre la ubicación del robot.                                                                |
|                        | Incomodidad por distancia interpersonal inadecuada.                                                        |
| Movimiento             | Movimientos innecesarios que generan distracción o ansiedad.                                               |
|                        | Dificultad para interpretar el significado del movimiento.                                                 |
|                        | Reacciones negativas ante movimientos bruscos o impredecibles.                                             |
| Prosodia (voz)         | Dificultad para comprender el habla del robot.                                                             |
|                        | Influencia no deseada por entonación emocional.                                                            |
| Manipulación física    | Inseguridad en la interacción física con el robot.                                                         |
| Luces                  | Señales luminosas poco perceptibles o distractoras.                                                        |
|                        | Dependencia exclusiva de señales visuales.                                                                 |
|                        | Confusión por patrones de parpadeo no naturales.                                                           |
| Interacción táctil     | Falta de feedback háptico claro.                                                                           |
| Pantalla / Interfaz    | Problemas de legibilidad de la información.                                                                |
|                        | Dificultad para comprender textos o instrucciones.                                                         |
|                        | Falta de accesibilidad para usuarios con discapacidad auditiva.                                            |
|                        | Ausencia de alternativas para elementos no textuales.                                                      |
| Proyección audiovisual | Dificultad para percibir información visual o auditiva.                                                    |

### 3.1.2. *Mirada (gaze)*

La percepción de la mirada (*gaze*) en robots presenta limitaciones que dificultan identificar hacia dónde dirige su atención o con quién interactúa. Para abordar este problema, se recomienda evitar la dependencia exclusiva de la mirada como canal comunicativo, reforzándola mediante señales explícitas, como indicaciones verbales o el uso de lenguaje natural (Tzafestas, 2016).

Además, el contacto visual directo y prolongado puede generar incomodidad o sensación de invasión en algunos usuarios. Por ello, se propone diseñar patrones de mirada intermitentes y no sostenidos que resulten más naturales y socialmente aceptables (Abhari et al., 2024; Al Moubayed et al., 2013).

### 3.1.3. *Gestos*

Los gestos robóticos pueden ser difíciles de percibir debido a su velocidad, complejidad o a limitaciones del usuario. Por ello, se recomienda utilizar gestos lentos, amplios y con un propósito claro, ofreciendo la posibilidad de desactivarlos cuando sea necesario (Law et al., 2019). Además, si estos quedan fuera del campo visual por la posición o distancia del usuario, deben ser visibles desde múltiples perspectivas o reforzarse mediante canales auditivos.

Dado que la falta de estandarización dificulta su interpretación, se propone utilizar metáforas naturales (por ejemplo, arrastrar o empujar). Estas deben validarse mediante pruebas con usuarios de distintos contextos culturales para seleccionar aquellas opciones con mayor grado de aceptación (Apraiz et al., 2023; Xia et al., 2022).

La dificultad para aprender o recordar los gestos se puede abordar priorizando movimientos simples y autoexplicativos, complementados con ayudas visuales o auditivas (Xia et al., 2022; Valencia et al., 2021). Asimismo, la inconsistencia entre sistemas puede mitigarse mediante el diseño de vocabularios gestuales transferibles o adaptables (Xia et al., 2022).

Por último, la interferencia entre las señales verbales del usuario y las respuestas de backchanneling del robot puede reducirse sustituyendo estas últimas por señales no verbales, como asentimientos o movimientos de cabeza (Irfan et al., 2025).

### 3.1.4. *Morfología*

La apariencia humanoide de los robots puede generar expectativas irreales sobre sus capacidades sociales o cognitivas. Para evitarlo, se recomienda el uso de morfologías simples o claramente artificiales en contextos asistivos, junto con la comunicación explícita de su naturaleza artificial y el diseño de una personalidad coherente y creíble. Además, es recomendable incorporar servicios de accesibilidad, como la captura de interacciones táctiles (Zuckerman, et al., 2020; Alhouli et al., 2025; Kittman et al., 2015).

Por otro lado, el tamaño, forma o velocidad del robot pueden afectar a su percepción y comodidad de uso. En este sentido, se sugiere ajustar la distancia de interacción, evitar diseños excesivamente bajos y considerar el espacio de actuación del robot para garantizar una interacción cómoda (Han et al., 2024).

### 3.1.5. Posición del robot (proxémica)

La incertidumbre sobre la ubicación del robot o el origen de la interacción puede abordarse mediante la incorporación de señalización sonora direccional y confirmaciones verbales de posición (Rollová et al., 2023; Han et al., 2024).

Asimismo, una distancia interpersonal inadecuada puede generar incomodidad o pérdida de confianza. Por ello, es necesario ajustar dinámicamente la distancia en función del contexto y del perfil del usuario, manteniendo siempre una separación segura y confortable (Manca et al., 2021; Fujita et al., 2001; Tamura et al., 2004).

### 3.1.6. Movimiento

Los movimientos excesivos o innecesarios pueden provocar distracción, confusión o ansiedad. Para evitarlo, se recomienda reducirlos al mínimo imprescindible, priorizando la estabilidad postural y acompañándolos de comunicación verbal cuando sea necesario (Camilleri et al., 2022).

La dificultad para interpretar el significado del movimiento puede mitigarse alineando el comportamiento corporal con mensajes verbales explícitos. Además, para prevenir reacciones negativas, los robots deben ejecutar trayectorias suaves, mantener velocidades constantes y anticipar sus acciones mediante avisos previos.

### 3.1.7. Prosodia (voz)

Las variaciones en tono, velocidad o énfasis pueden dificultar la comprensión del habla del robot. En este sentido, se recomienda utilizar una prosodia estable, con ritmo lento y buena articulación, así como permitir ajustes personalizados según las necesidades del usuario (Irfan et al., 2025).

Asimismo, la entonación emocional puede influir de forma no deseada en el usuario, por lo que se aconseja neutralizar la carga emocional del habla en contextos sensibles.

### 3.1.8. Manipulación de objetos y personas

La interacción física con robots puede generar incertidumbre o inseguridad, especialmente en tareas como la entrega de objetos o la asistencia. Para mejorar la accesibilidad, se deben diseñar manipulaciones predecibles y seguras, incorporando además feedback multimodal (visual, auditivo o háptico) que informe al usuario sobre el estado de la acción (Langer et al., 2024; Abayasiri et al., 2024; Billard et al., 2019; Garrosa et al., 2025).

### 3.1.9. Luces

Las señales luminosas pueden resultar poco perceptibles o incluso distractoras, especialmente en condiciones de baja visibilidad o con patrones de parpadeo inadecuados. Para ello, se recomienda el uso de LEDs con un propósito claro, bajo nivel de parpadeo y siempre acompañados de señales redundantes (Law et al., 2019).

Además, se debe evitar la dependencia exclusiva de señales visuales, garantizando la multimodalidad mediante la combinación de canales auditivos y visuales (Law et al., 2019). Por último, los patrones de parpadeo deben ajustarse a frecuencias naturalistas y coherentes con el estado comunicativo del robot (Liberman-Pincu y Oron-Gilad, 2023; Baraka et al., 2018).

### *3.1.10. Interacción táctil (háptica)*

La ausencia de feedback táctil claro puede dificultar la interacción con el robot. Para solucionarlo, se recomienda proporcionar retroalimentación háptica inmediata y consistente, complementada con señales auditivas o visuales. Asimismo, es aconsejable el uso de indicadores multimodales redundantes (por ejemplo, luz, voz y vibración) (Apariz et al., 2023; Qbilat et al., 2021).

### *3.1.11. Pantalla / Interfaz del robot*

Los problemas de legibilidad y comprensión de la información pueden abordarse mediante el uso de alto contraste, tipografías de gran tamaño y estructuras de navegación simplificadas, adaptadas al usuario y al contexto (Qbilat et al., 2021, 2022).

Asimismo, para facilitar la comprensión de textos e instrucciones, se recomienda evitar abreviaturas, limitar la longitud de las líneas y proporcionar ayudas para términos complejos, garantizando en todo momento la legibilidad (Qbilat et al., 2021, 2022).

En el caso de usuarios con discapacidad auditiva, es fundamental proporcionar alternativas textuales a toda la información hablada, incluyendo subtítulos y representaciones visuales (Gouaillier, et al., 2009). Además, todos los elementos no textuales deben contar con equivalentes accesibles, como descripciones textuales o sincronizadas (Kittman et al., 2015; McColl et al., 2013).

### *3.1.12. Proyección audiovisual*

Finalmente, la información proyectada por el robot puede no ser percibida correctamente por usuarios con discapacidad sensorial. Para mejorar su accesibilidad, se recomienda el uso de subtítulos, alto contraste y redundancia audiovisual, así como la posibilidad de ajustar parámetros como el volumen (Lozada et al., 2025; Sone et al., 2025).

## **4. DISCUSIÓN**

Tras los resultados presentados en la sección anterior, se observa que los problemas de accesibilidad en la CNV de los robots sociales afectan a múltiples dimensiones de forma simultánea, siendo especialmente relevantes aquellas relacionadas con la percepción visual (expresión facial, gestos, mirada) y la interpretación cognitiva de las señales. Asimismo, se identifican limitaciones derivadas del diseño físico del robot, como su morfología, tamaño o posición en el espacio, que influyen directamente en la comprensión, confianza y comodidad del usuario.

Por otro lado, los resultados evidencian que la complejidad, velocidad o falta de claridad en las señales no verbales puede generar sobrecarga cognitiva o dificultades de interpretación en personas mayores. En este sentido, se pone de manifiesto la importancia de diseñar interacciones basadas en la simplicidad, la redundancia multimodal y la adaptación a las capacidades sensoriales y motoras del usuario.

En el marco del presente estudio, diversos estudios analizan sensores y actuadores presentes en robots sociales, como cámaras, micrófonos, sensores táctiles, pantallas, LEDs o plataformas móviles. Aunque estos componentes permiten interacciones multimodales, también introducen barreras de accesibilidad específicas. La dependencia de elementos visuales dificulta la interacción de personas con discapacidad visual, mientras que los sistemas basados en voz pueden resultar problemáticos

para usuarios sordos o con alteraciones del habla. Del mismo modo, determinados requisitos de interacción física pueden limitar el uso por personas con discapacidad motora. Estas limitaciones refuerzan la necesidad de diseñar sistemas multimodales y redundantes, donde las restricciones de un canal puedan compensarse mediante otros.

Esta heterogeneidad tecnológica evidencia que el hardware actual de los robots sociales aún presenta limitaciones significativas. Para lograr una tecnología verdaderamente inclusiva, es necesario adaptar sus componentes a las necesidades de accesibilidad de cada perfil de usuario. Por consiguiente, este análisis pone de manifiesto la necesidad de definir criterios de diseño claros y estructurarlos en guías prácticas dirigidas a los diseñadores de los robots, con el objetivo de promover robots sociales que sean accesibles desde las fases iniciales de su concepción.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El principal objetivo de este trabajo ha sido identificar y analizar las pautas de accesibilidad aplicables a los distintos tipos de CNV en la interacción entre robots sociales y adultos mayores, mediante una metodología que combina revisión bibliográfica, análisis de problemas y soluciones existentes y una propuesta de categorización de las principales dificultades detectadas.

Como principal aportación, se plantea un conjunto de directivas de diseño orientadas a promover una interacción inclusiva, vinculadas a una clasificación detallada de los tipos de CNV, evidenciando que, aunque los robots sociales actuales cuentan con numerosos sensores y actuadores, estos no han sido evaluados de forma sistemática desde una perspectiva de accesibilidad para personas con déficits sensoriales o cognitivos.

Se ha constatado que la CNV es un factor crítico que afecta directamente a la comprensión, la confianza y la comodidad del usuario, especialmente cuando señales como la mirada, los gestos o las expresiones faciales presentan una complejidad o velocidad que genera sobrecarga cognitiva. Por ello, se concluye que el diseño de robots sociales debe alejarse de la dependencia exclusiva de canales visuales y adoptar un enfoque multimodal y redundante, donde las limitaciones de un componente de hardware puedan ser compensadas eficazmente por otros.

Asimismo, es fundamental simplificar la expresividad del robot hacia señales funcionales y predecibles, evitando un exceso de antropomorfismo que pueda generar expectativas irreales sobre sus capacidades sociales.

Como trabajo futuro, es imprescindible avanzar hacia un análisis de accesibilidad pormenorizado por componentes, evaluando de forma individual cómo el diseño de cámaras, pantallas, actuadores y sensores pueden suponer una barrera para los distintos tipos de discapacidades. Esta línea de investigación permitirá desarrollar estrategias específicas de adaptación que aseguren una interacción inclusiva segura y satisfactoria para todo el colectivo de adultos mayores.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo está cofinanciado por el proyecto PLEISAR, Ref. PID2022-136779OB, con fondos del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033, UE); por el proyecto C-ING-179-UGR23 financiado por la Consejería de Universidades, Investigación e Innovación y por el Programa FEDER Andalucía 2021-2027; y por el Gobierno de Aragón,

Departamento de Industria e Innovación, y Fondo Social Europeo "Construyendo Europa desde Aragón".

## 7. REFERENCIAS

- Abhari, S., McMurray, J., Randhawa, T., Bin Noon, G., Hanjahanja-Phiri, T., McNeil, H., ... & Pelegrini Morita, P. (2024). Exploring the landscape of standards and guidelines in AgeTech design and development: Scoping review and thematic analysis. *JMIR aging*, 7, e58196.
- Bevilacqua, R., Felici, E., Cavallo, F., Amabili, G., & Maranesi, E. (2021). Designing acceptable robots for assisting older adults: a pilot study on the willingness to interact. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10686.
- Cavallo, F., Esposito, R., Limosani, R., Manzi, A., Bevilacqua, R., Felici, E., ... & Dario, P. (2018). Robotic services acceptance in smart environments with older adults: user satisfaction and acceptability study. *Journal of medical Internet research*, 20(9), e9460.
- DePaulo, B. M. (1992). Nonverbal behavior and self-presentation. *Psychological bulletin*, 111(2), 203.
- Fitter, N. T., Mohan, M., Kuchenbecker, K. J., & Johnson, M. J. (2020). Exercising with Baxter: preliminary support for assistive social-physical human-robot interaction. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 17(1), 19.
- Hung, L., Gregorio, M., Mann, J., Wallsworth, C., Horne, N., Berndt, A., ... & Chaudhury, H. (2021). Exploring the perceptions of people with dementia about the social robot PARO in a hospital setting. *Dementia*, 20(2), 485-504.
- Hung, L., Mann, J., Perry, J., Berndt, A., & Wong, J. (2022). Technological risks and ethical implications of using robots in long-term care. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, 9, 20556683221106917.
- McCall, C. (2016). Mapping social interactions: the science of proxemics. *Social Behavior from Rodents to Humans: Neural Foundations and Clinical Implications*, 295-308.
- Satake, Y., Costello, H., Naran, N., Ishimaru, D., Ikeda, M., & Howard, R. (2026). Autonomous conversational agents for loneliness, social isolation, depression, and anxiety in older people without cognitive impairment: Systematic review and meta-analysis. *Psychological Medicine*, 56, e27.
- Strutz, N., Perotti, L., Heimann-Steinert, A., & Klebbe, R. (2024). Older adults' communication with an interactive humanoid robot: Expectations and experiences of older adults in verbal and nonverbal communication with a socially interactive humanoid robot: a mixed methods design in germany. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 57(5), 371-375.
- Werner, C., Kardaris, N., Koutras, P., Zlatintsi, A., Maragos, P., Bauer, J. M., & Hauer, K. (2020). Improving gesture-based interaction between an assistive bathing robot and older adults via user training on the gestural commands. *Archives of gerontology and geriatrics*, 87, 103996.

## **ANEXO**

### **Referencias de los estudios incluidos en la revisión sistemática**

Debido a restricciones de espacio, la lista exhaustiva de las referencias bibliográficas correspondientes a los estudios analizados en esta revisión de la literatura no se incluye en el apartado de Referencias. El documento completo con todas las referencias está disponible como material complementario en el siguiente enlace:

[Lista completa de referencias](#)

## Aplicación de una metodología de co-diseño de robots sociales para la gestión emocional en entornos universitarios

### *Application of a co-design methodology for social robots for emotional management in University settings*

(1) Raquel Lacuesta Gilaberte <sup>[0000-0002-4773-4904]</sup>, (1) Eva Hervás Puchalt <sup>[0009-0005-4810-0195]</sup>, (2) Carlos Marín Lora <sup>[0000-0003-1055-7657]</sup>, (1) Luis Manuel Muñoz Pérez <sup>[0000-0002-0956-5302]</sup>

(1) Universidad de Zaragoza, [lacuesta@unizar.es](mailto:lacuesta@unizar.es), [ehervas@unizar.es](mailto:ehervas@unizar.es), [l.munoz@unizar.es](mailto:l.munoz@unizar.es)

(2) Universitat Jaume I, [cmarin@uji.es](mailto:cmarin@uji.es)

**Resumen.** Este estudio presenta una metodología de co-diseño participativo para definir los requisitos de diseño de robots sociales orientados al bienestar emocional de estudiantes universitarios, así como los resultados de sus dos primeras fases aplicadas con 28 estudiantes de segundo curso de Ingeniería Informática. Los participantes identificaron estresores académicos y exploraron el rol de los robots en la regulación emocional. Los resultados muestran que el estrés se concentra en evaluaciones, sobrecarga académica, relación con el profesorado y trabajo en grupo, y que los estudiantes conciben el bienestar emocional como optimización del entorno académico, posicionando a los robots como mediadores contextuales más que como agentes terapéuticos.

**Palabras clave:** Robótica social, Co-diseño participativo, Bienestar estudiantil, Estrés académico, Espacio de diseño.

**Abstract.** This study presents a participatory co-design methodology for defining the design requirements of social robots aimed at supporting the emotional well-being of university students, along with the results of its first two phases applied with 28 second-year Computer Science students. Participants identified academic stressors and explored the role of robots in emotional regulation. Results show that stress concentrates around exams, academic overload, faculty relationships, and group work, and that students conceive emotional well-being as the optimization of the academic environment, positioning robots as contextual mediators rather than therapeutic agents.

**Keywords:** Social robotics, Participatory design, Student well-being, Academic stress, Design space.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En la era actual, los robots sociales han trascendido su rol como herramientas industriales para integrarse en la vida cotidiana como compañeros sintéticos (Ahmed et al., 2026), siendo especialmente relevantes en el contexto del bienestar emocional. Uno de estos entornos críticos es el campus universitario, donde los estudiantes de primeros cursos enfrentan niveles significativos de estrés académico, desorientación organizativa y desafíos en la gestión emocional (Lazarus & Folkman, 1984). El diseño de robots para estos contextos suele estar limitado por un sesgo tecnológico que prioriza las capacidades técnicas sobre las necesidades humanas reales (Ramírez, 2023). Para superar esta barrera, este estudio emplea una metodología de codiseño participativo estructurada en la lógica de los "Átomos" de diseño (Entorno, Apariencia y Comportamiento), que permite descomponer la interacción robótica en partes manejables ancladas en la experiencia vivida de los estudiantes. Un aspecto fundamental es la delimitación ética: el robot social no se concibe como un terapeuta o sustituto de personas, sino como un agente de acompañamiento y validación emocional. A través de fases de activación emocional, *bodystorming*<sup>1</sup> y narrativas de micro-interacción<sup>2</sup>, los participantes exploran cómo el robot puede detectar situaciones de estrés e intervenir de manera no invasiva. El objetivo principal es diseñar una metodología de co-diseño que permita definir los requisitos de robots sociales aplicados a la gestión emocional universitaria, presentando además los resultados de las dos primeras fases, orientadas a detectar necesidades y revelar oportunidades y limitaciones del robot social.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La integración de la Robótica Social de Asistencia (SAR) en la educación superior ha evolucionado significativamente, pasando de ser herramientas meramente instruccionales a convertirse en agentes de mediación emocional capaces de ofrecer intervenciones escalables y no estigmatizantes para el bienestar estudiantil. Investigaciones previas han validado la eficacia de robots zoomórficos en espacios universitarios, como el uso de animales robóticos en bibliotecas académicas para mitigar el estrés agudo durante las semanas de exámenes finales (Edwards et al., 2022). Asimismo, se han explorado roles más proactivos mediante "entrenadores" robóticos de psicología positiva orientados a mejorar el bienestar psicológico a largo plazo de los estudiantes (Jeong et al., 2023). A pesar de estos avances, el diseño de estos sistemas suele enfrentarse a un sesgo tecnológico persistente que prioriza las capacidades técnicas del robot sobre las necesidades humanas situadas. Los robots sociales generativos (GSR) actuales, aunque permiten una tutoría adaptativa, a menudo carecen de los prerrequisitos de conocimiento necesarios para alinear su comportamiento con las expectativas pedagógicas y éticas de los usuarios (Vonschallen et al., 2026). Para abordar estas carencias, han surgido marcos de co-diseño participativo, como los Social Robot Co-Design Canvases (Axelsson et al., 2022) o las metodologías de diseño centrado en el usuario propuestas por Cagiltay et al. (2020),

---

<sup>1</sup> Técnica de diseño participativo en la que los participantes representan físicamente escenarios de uso para explorar y evaluar interacciones antes de su desarrollo tecnológico.

<sup>2</sup> Descripciones detalladas de intercambios concretos entre el robot y el usuario, que especifican el contexto, el estímulo detectado y la respuesta del sistema.

que buscan cerrar la brecha entre las capacidades de los robots y las percepciones de los usuarios en su vida cotidiana. Estos enfoques buscan estructurar la colaboración multidisciplinar en el desarrollo de estos agentes, asegurando que sus roles —ya sean como asistentes o compañeros— se ajusten a las dinámicas sociales y preocupaciones éticas reales de las personas. La particularidad y novedad de este estudio reside en el despliegue de una metodología híbrida que trasciende la simple consulta al usuario. Mientras que trabajos contemporáneos se limitan a la fase temprana de desarrollo (Winkle et al., 2021), este estudio integra la lógica de los "Átomos" de diseño (Entorno, Apariencia y Comportamiento) propuestos por Ahmed et al. (2026) con una fase crítica de Activación Emocional Situada y un Semáforo Ético.

### 3. METODOLOGÍA

Se presenta en este apartado la metodología diseñada para definir los requisitos de diseño asociados a robots sociales orientados al bienestar emocional de los estudiantes en campus universitarios. Adicionalmente, se presentan los resultados de la aplicación de las dos primeras fases de co-diseño, llevadas a cabo con una muestra de 28 estudiantes de segundo curso de Ingeniería Informática. Con el objetivo de presentar los estresores académicos detectados y revelar las oportunidades y limitaciones éticas que los usuarios identifican para el robot social, este trabajo estructura un proceso sistemático de participación ciudadana. El presente estudio se basa en un taller de codiseño en el ámbito de la Interacción Persona-Computador (HCI), cuyo objetivo es explorar cómo debería comportarse un robot social orientado al apoyo emocional de estudiantes universitarios en contextos de estrés académico, gestión emocional y resolución de conflictos dentro del campus. La metodología se divide en seis fases secuenciales que combinan técnicas de diseño participativo, reflexión ética y validación experiencial. Para el diseño de esta metodología se han tenido en cuenta las propuestas presentadas por el diseño de "Átomos" (Ahmed et al., 2026), que descompone el diseño en tres dimensiones fundamentales: entorno (ENV), comportamiento (BHVR) y apariencia (APPR).

La primera fase tiene como objetivo evitar el sesgo tecnológico, centrando la atención exclusivamente en la experiencia humana. De manera individual, los participantes reflexionan sobre situaciones reales de estrés en el contexto universitario. Las aportaciones se recogen mediante post-its amarillos, donde cada participante identifica una situación de estrés, la emoción asociada y una necesidad no cubierta. En la segunda fase se introducen las capacidades y limitaciones de los robots sociales, enfatizando que no sustituyen a profesionales humanos ni realizan funciones clínicas. Se emplea una dinámica de "semáforo ético" con codificación por colores para delimitar el rol ético del sistema: los post-its verdes representan situaciones en las que el robot podría ayudar (oportunidades), mientras que los rojos señalan situaciones en las que su intervención sería inapropiada o incómoda (límites).

La tercera fase constituye el núcleo del taller y se centra en el diseño del comportamiento del robot a partir de las necesidades identificadas. El proceso incluye la creación de narrativas de micro-interacción y su representación mediante storyboards<sup>3</sup> (Truong et al., 2006). Posteriormente, se utiliza un lienzo de diseño basado en la metodología "Átomos" (Ahmed et al., 2026) con codificación cromática: post-its amarillos para el entorno (situaciones detectadas y datos contextuales), rosas

---

<sup>3</sup> Secuencias de viñetas que ilustran una interacción.

para el comportamiento (personalidad, roles y respuestas) y azules para la apariencia (forma física, canales de interacción y feedback), tal como se sintetiza en la Figura 1. En la cuarta fase los participantes desarrollan escenarios narrativos que representan la interacción entre el estudiante y el robot, materializados mediante técnicas de bodystorming (Oulasvirta et al., 2003). En la práctica, un participante interpreta el rol del estudiante en situación de estrés mientras otro encarna al robot —o se emplea una maqueta física—, actuando la secuencia de interacción diseñada en la fase anterior. No se introducen nuevos colores de post-its, sino que se reutilizan los materiales generados anteriormente para validar aspectos como la temporalidad, la intrusividad y la naturalidad de la interacción. En la quinta fase, todos los post-its generados se organizan en un mural colectivo donde, mediante un proceso de agrupación por afinidad, se identifican patrones y temas emergentes. Los colores permiten rastrear el origen de cada idea —ética, entorno, comportamiento o apariencia—, facilitando el análisis cruzado entre dimensiones. Finalmente, la sexta fase sintetiza la información previamente generada posicionando las propuestas en un espacio de diseño multidimensional que define la filosofía del robot en cuatro dimensiones: interactividad, co-rendimiento, comunicación y forma, consolidando así principios de diseño transferibles. La Figura 1 muestra visualmente todas las fases del taller de codiseño y sus características.

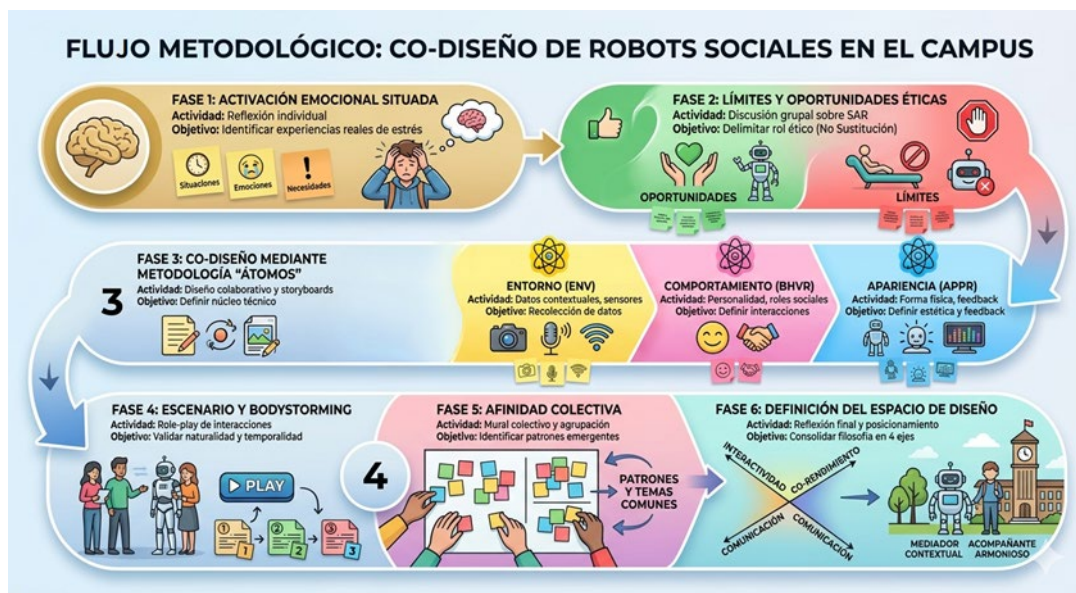


Figura 1. Flujo Metodológico. Fases del taller de Co-Diseño.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras el procesamiento de los datos obtenidos se realizó un análisis de la clasificación cualitativa de temáticas del contenido de los post-its por diferentes temáticas. A través de dinámicas participativas, los estudiantes actuaron como coinvestigadores para identificar cómo un robot social puede actuar como agente de acompañamiento y validación emocional.

### 4.1. Identificación de situaciones de estrés y necesidades

En la Figura 2 a) se muestra a los y las estudiantes participando y en la Figura 2 b) los post-its agrupados. Durante la fase inicial de activación emocional, se recolectaron un total de 85 menciones

sobre vivencias de estrés, las cuales permitieron identificar siete temáticas de preocupación fundamentales para el alumnado. Como se detalla en la Figura 2 c), la “Evaluación y Exámenes” destaca como el estresor predominante con 30 menciones, seguida por la “Relación con el Profesorado” (15 menciones), las “Habilidades Sociales y Trabajo en Equipo” (12 menciones) y la “Sobrecarga Académica” (11 menciones). El mapa de necesidades se completa con preocupaciones relativas a la “Salud Mental y Bienestar” (7 menciones), la “Gestión Administrativa” (6 menciones) y la “Orientación Vocacional” (4 menciones), estableciendo una base empírica crítica para orientar las funciones de apoyo del robot. En la evaluación académica, destacada como el factor predominante, se pueden encontrar situaciones como “terror” ante un “examen de Arquitectura el día siguiente” o el “agobio” de enfrentarse a un “examen que no sabes resolver”. Tras recibir malas notas, los alumnos manifestaron sentimientos de “decepción” y pensamientos de autocrítica como “no valgo para esto” o llegar a sentirse “inútiles” al no cumplir los criterios de permanencia. En cuanto a la relación con el profesorado, los estudiantes denunciaron sentir “impotencia” cuando los docentes “dan por hecho que sabemos cosas que no”. Respecto a la sobrecarga y las habilidades sociales, se describió una “presión constante” por afrontar “varias entregas en la misma semana” y el “bloqueo” ante la realización de “prácticas extensas”. En el ámbito social, la acción de “exponer en público” genera de forma recurrente “nervios y bloqueo”, mientras que la convivencia con “compañeros holgazanes” o “poco solidarios” produce una profunda “impotencia”. Finalmente, se evidencian estresores ligados a la Gestión Administrativa y Trámites (como la “larga burocracia” en la gestión de becas), a la Salud Mental, Bienestar y Autogestión (dificultad para conciliar el descanso, “no poder dormir”, ansiedad acumulada) y a la Orientación Vocacional y Futuro (dudas sobre la elección de carrera y el proyecto profesional).

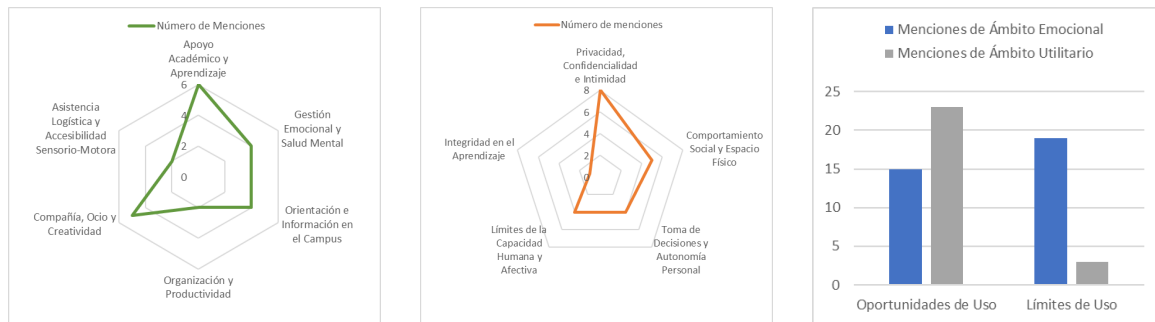


**Figura 2.** a) Estudiantes colocando los post-its; b) Post-its recogidos en la actividad; c) Necesidades extraídas de los post-it.

#### 4.2. Oportunidades y límites detectados por los estudiantes

En lo que respecta a las oportunidades de uso propuestas por los estudiantes, se ha encontrado que el 65% de estas sería la resolución de problemas emocionales a través de acciones de carácter utilitario, y un 35% a través de acciones de apoyo emocional. Esto también se ve reflejado en los límites de uso que los estudiantes impondrían a los asistentes, donde el 86% de estos son limitaciones emocionales mientras que solo el 14% son límites utilitarios. Todo esto puede verse en la Figura 3 c), donde se muestra esta comparativa. Atendiendo a la categorización de Oportunidades en la Figura 3 a) y de Limitaciones en la Figura 3 b), encontramos las principales oportunidades de apoyo emocional en los ámbitos de Apoyo Académico (6 menciones), Compañía y Ocio (5

menciones), Gestión Emocional (4 menciones), Orientación e Información (4 menciones), Organización y Productividad (2 menciones) y Asistencia Logística (2 menciones). Por otro lado, encontramos las mayores limitaciones esperadas para el robot en ámbitos como la privacidad, confidencialidad e intimidad (8 menciones), comportamiento social y espacio físico (5 menciones), toma de decisiones y autonomía personal (4 menciones) y limitación afectiva (4 menciones), también ha habido 1 mención en las limitaciones a la integridad del aprendizaje, "Hacer tareas cuyo propósito sea el aprendizaje del usuario ej: deberes".



**Figura 3.** a) Oportunidades detectadas por los estudiantes; b) Límites esperados en el asistente; c) Ámbito utilitario o emocional de las oportunidades y límites.

### 4.3. Oportunidades como solución a las necesidades y sus limitaciones

Las oportunidades de uso dentro del ámbito "Apoyo Académico y Aprendizaje" (26%) son el desencadenante natural de las necesidades "Evaluación y Exámenes" y "Sobrecarga Académica y Gestión de Plazos" (48%), de carácter tanto utilitario como emocional. Es relevante que estas oportunidades se presentan como soluciones a conflictos emocionales a través de acciones utilitarias, aunque muchos estudiantes conciben al robot únicamente como una herramienta para "tareas repetitivas como lavar los platos" o "leer datos en pantalla". Por otro lado, las oportunidades de carácter prominentemente emocional —"Gestión Emocional y Salud Mental" y "Compañía, Ocio y Creatividad" (39%)— no cubren todas las necesidades que requieren exclusivamente apoyo emocional o cuya resolución no depende de los estudiantes (45%), si bien estas quedan atendidas indirectamente a través de un uso utilitario del robot, "respondiendo a dudas académicas" o "ayudando a organizar el estudio".

## 5. DISCUSIÓN

Los resultados del taller revelan una clara preferencia por la ayuda utilitaria como vía para gestionar las emociones, con un 65% de las menciones orientadas a este nexo. Los estudiantes no buscan una intervención afectiva directa, sino un agente que mitigue los estresores mediante la facilitación de tareas, coherente con el marco de Vonschallen et al. (2026), que sostiene que el comportamiento responsable de un robot social debe fundamentarse en el conocimiento del contexto y del usuario. Al responder a dudas académicas u organizar el estudio, el robot reduce la carga cognitiva, actuando como mediador que previene el estrés agudo identificado por Edwards et al. (2022) como factor crítico en entornos de bibliotecas universitarias. El análisis de los estresores muestra que, además de los exámenes (30 menciones), los estudiantes se ven afectados por la "Gestión Administrativa" y la "Relación con el Profesorado", indicando la necesidad de un robot que actúe como puente

comunicativo en el campus. Respecto a la sobrecarga académica (11 menciones), los participantes plantean la necesidad de recordatorios y organización proactiva del estudio, aunque esta asistencia encuentra un límite ético en la toma de decisiones (4 menciones): el sistema debe configurarse como un compañero de estudio que asesora sin decidir, preservando la soberanía del usuario. La dinámica del semáforo ético reveló que la privacidad y la confidencialidad representan la preocupación dominante (8 menciones), estableciendo una "luz roja" que exige transparencia absoluta sobre los datos procesados para evitar la desconfianza en entornos íntimos de estudio. Finalmente, el interés por la compañía y el ocio (5 menciones) sugiere que el robot no debe percibirse como una herramienta fría, sino como un agente capaz de validar las emociones del alumno mientras resuelve problemas logísticos, asegurando que la utilidad técnica actúe como precursor de la aceptación emocional.

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se presenta una metodología para definir los requisitos de diseño asociados a robots sociales orientados al bienestar emocional de los estudiantes en campus universitarios. El proceso de co-diseño participativo ha permitido trascender el sesgo tecnológico convencional, uniendo el desarrollo de la robótica social con las experiencias vividas de los estudiantes. El análisis de las dos primeras fases ha revelado que el estrés del alumnado se concentra principalmente en evaluaciones, sobrecarga académica y relaciones con el profesorado, posicionando a los robots como mediadores contextuales más que como agentes terapéuticos. Se ha consolidado la visión de un asistente híbrido utilitario-afectivo donde 2 de cada 3 estudiantes (65%) prefieren el nexo utilitario para gestionar estresores críticos, validando un modelo donde la utilidad técnica es el precursor necesario para la aceptación emocional, ya que interviene directamente sobre los desencadenantes del estrés en lugar de actuar como paliativo momentáneo (Lazarus y Folkman, 1984). Asimismo, se ha delimitado un marco ético basado en el "Principio de No Sustitución", donde la privacidad y la confidencialidad emergen como límites críticos que exigen un diseño que garantice un entorno seguro sin riesgo de vigilancia percibida (Pareto, 2022). En definitiva, el taller ha transformado necesidades afectivas abstractas en parámetros de diseño realistas en cuatro dimensiones: interactividad, co-rendimiento, comunicación y forma.

Como trabajo futuro, la investigación se orientará hacia la materialización técnica mediante la metodología de "Átomos", definiendo los parámetros de Entorno (ENV), Comportamiento (BHVR) y Apariencia (APPR) a partir de las narrativas de micro-interacción obtenidas. La validación de las fases siguientes se realizará mediante su despliegue en robots físicos como SANBOT o UNITREE en entornos universitarios reales, evaluando con instrumentos estandarizados de bienestar psicológico si los requisitos obtenidos se traducen efectivamente en una reducción del estrés percibido, siguiendo un enfoque LEADOR (Winkle et al., 2021) que integre a expertos en la fase de automatización in situ. Finalmente, estudios longitudinales permitirán valorar si las mejoras se mantienen en el tiempo y si el escepticismo emocional inicial disminuye tras una interacción prolongada, garantizando que el sistema mejora el bienestar sin generar dependencia emocional ni vulnerar la intimidad del alumnado.

**Agradecimientos:** El trabajo está parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y la UE (FEDER) a través del contrato PID2022 136779OB-C31 y por el Gobierno de Aragón (Grupo T60\_23R).

## 7. REFERENCIAS

- Ahmed, E., Cosio, L. D., Genç, Ç., Hamari, J., & Buruk, O. 'Oz.' (2026). Co-Designing Companion Robots for the Wild: Ideating Towards a Design Space. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 42(3), 1523–1548.
- Axelsson, M., Oliveira, R., Racca, M., & Kyrki, V. (2022). Social Robot Co-Design Canvases: A Participatory Design Framework. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 11(1), 1–39.
- Cagiltay, B., Ho, H.-R., Michaelis, J. E., & Mutlu, B. (2020). Investigating family perceptions and design preferences for an in-home robot. *Proceedings of the Interaction Design and Children Conference (IDC '20)* (pp. 229–242). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3392063.3394411>
- Edwards, A., Edwards, C., Abendschein, B., Espinosa, J., Scherger, J., & Patricia, V. M. (2022). Using robot animal companions in the academic library to mitigate student stress. *Library Hi Tech*, 40(4), 878–893.
- Jeong, S., Aymerich-Franch, L., Arias, K., Alghowinem, S., Lapedriza, A., Picard, R., Park, H. W., & Breazeal, C. (2023). Deploying a robotic positive psychology coach to improve college students' psychological well-being. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 33, 571–615.
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer.
- Oulasvirta, A., Kurvinen, E. & Kankainen, T. Understanding contexts by being there: case studies in bodystorming. *Pers Ubiquit Comput* 7, 125–134 (2003).
- Pareto Boada, J. (2022). Robótica social asistencial. Implicaciones y desafíos éticos. *Business, Research, Ageing, Innovation, Neurosciences & Social Journal*, 2, 39-43.
- Ramírez Autrán, R. (2023). Sesgos y discriminaciones sociales de los algoritmos en Inteligencia Artificial: Una revisión documental. *Entretextos*, 15(39), 1–17.
- Truong, K. N., Hayes, G. R., y Abowd, G. D. (2006). Storyboarding: An empirical determination of best practices and effective guidelines. *Proceedings of the 6th conference on Designing Interactive systems* (pp. 12-21). ACM.
- Vonschallen, S., Oberle, D., Schmiedel, T., & Eyssel, F. (2026). Knowledge-Based Design Requirements for Generative Social Robots in Higher Education. *arXiv preprint arXiv:2602.12873*.
- Winkle, K., Senft, E., & Lemaignan, S. (2021). LEADOR: A Method for End-To-End Participatory Design of Autonomous Social Robots. *Frontiers in robotics and AI*, 8, 704119.

## Una experiencia de co-diseño de robots sociales para el bienestar de las personas mayores en entornos comunitarios

<sup>(1)</sup> Liany Mendoza <sup>[0009-0008-5391-6270]</sup>, <sup>(1)</sup> Eva Cerezo <sup>[0000-0003-4424-0770]</sup>, <sup>(1)</sup> Loreto Matinero <sup>[0009-0004-8101-1023]</sup>, <sup>(1)</sup> Sandra Baldassarri <sup>[0000-0002-9315-6391]</sup>

<sup>(1)</sup> Department of Computer Science and Systems Engineering, University of Zaragoza, Zaragoza, España, {lmendoza, ecerezo, lmatinero, sandra}@unizar.es

**Resumen.** En el contexto del envejecimiento poblacional y el creciente interés por las tecnologías asistenciales, el objetivo principal de esta investigación es explorar las expectativas en cuanto al uso de robots sociales en contextos asistenciales o comunitarios para personas mayores, identificar sus características físicas y sociales, y abordar aspectos éticos. Para ello, se llevó a cabo un taller de co-diseño, donde se aplicaron diferentes técnicas de diseño participativo. Los resultados permitieron definir un conjunto de funcionalidades y roles atribuidos a los robots sociales. Asimismo, se identificaron características de diseño, relacionadas con el comportamiento social, la personalidad, los aspectos físicos y de movilidad, la seguridad física, así como la voz y el sonido. En el ámbito ético, se identificaron preocupaciones sobre la transparencia, la seguridad de los datos y consideraciones emocionales, lo que pone de manifiesto la importancia de incorporar estos aspectos desde las etapas iniciales del proceso de diseño. El taller llevado a cabo representa un primer paso hacia el desarrollo de soluciones basadas en robots sociales para personas mayores que sean útiles, viables y responsables desde el punto de vista ético.

**Palabras clave:** robot social, personas mayores, co-diseño, expectativas.

**Abstract.** In the context of an aging population and growing interest in assistive technologies, the main objective of this research is to explore expectations regarding the use of social robots in care or community settings for older adults, identify their physical and social characteristics, and address ethical considerations. To this end, a co-design workshop was conducted, in which various participatory design techniques were applied. The results enabled the definition of a set of functionalities and roles attributed to social robots. Additionally, design characteristics were identified, related to social behavior, personality, physical and mobility aspects, physical safety,

as well as voice and sound. In the ethical field, concerns were identified regarding transparency, data security, and emotional considerations, highlighting the importance of incorporating these aspects from the initial stages of the design process. The workshop represents a first step toward developing solutions based on social robots for older adults that are useful, viable, and ethically responsible.

**Keywords:** social robot, older adults, co-design, expectations.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Según las Naciones Unidas (DE, 2024), el envejecimiento constituye una de las principales tendencias demográficas a nivel mundial, con especial incidencia en Europa, donde se proyecta un incremento significativo del número de personas mayores de 60 años hacia el año 2050. Esta problemática se reconoce como uno de los grandes retos sociales del siglo XXI, por su impacto en los sistemas sanitarios, especialmente ante la escasez de profesionales del cuidado (Khaksar et al., 2025).

En este marco, diferentes investigaciones plantean la integración de robots en las infraestructuras públicas de cuidado como una vía para promover la salud y el bienestar de la población (Cho et al., 2024; Khaksar et al., 2025). Los robots sociales, concebidos para interactuar de forma autónoma y empática con las personas (Dawe et al., 2019), son herramientas potencialmente eficaces para afrontar estos desafíos, proponiéndose su uso para favorecer la vida independiente y compensar el deterioro progresivo de las capacidades asociadas al envejecimiento poblacional (de Graaf et al., 2015).

El presente artículo describe una experiencia de co-diseño llevada a cabo en el contexto del SeniorLab<sup>1</sup>, un laboratorio ciudadano creado por el Gobierno de Aragón que busca reunir a ciudadanos, profesionales, asociaciones e instituciones para co-crear soluciones innovadoras que mejoren la calidad de vida de las personas mayores, promoviendo el envejecimiento activo, la convivencia intergeneracional y el cuidado en comunidad. El SeniorLab llevó a cabo una convocatoria de talleres a las que se presentó el proyecto “PLEISAR<sup>2</sup>: Robots sociales para el bienestar de los mayores en entornos comunitarios” que fue seleccionado entre más de 30 proyectos. El objetivo de la experiencia propuesta era explorar de forma participativa las expectativas en cuanto al uso de robots sociales en contextos asistenciales o comunitarios para personas mayores, sus características y las cuestiones éticas subyacentes. El artículo se organiza de la siguiente manera: en primer lugar, se presentan los trabajos relacionados con el tema de estudio, a continuación, se describe la metodología empleada en el taller, por último, se exponen los resultados obtenidos y las conclusiones.

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

El Diseño Participativo (DP) o co-diseño se define formalmente como una práctica de diseño centrado en la persona donde múltiples actores, incluidos los usuarios finales y diversas partes interesadas, contribuyen al proceso como co-diseñadores activos y socios estratégicos (Ostrowski et al., 2021; Rogers et al., 2022). Aplicando esta metodología, los desarrolladores incorporan las

---

<sup>1</sup><https://www.laaab.es/2025/06/seniorlab/>

<sup>2</sup><https://pleisar.uib.es/>

experiencias vividas y las realidades de los participantes, en el proceso de creación, permitiendo que estos expresen sus necesidades, deseos y temores para asegurar que la tecnología sea efectiva y respetuosa con su autonomía (Boch and Thomas, 2025). El co-diseño ayuda a superar las brechas de comunicación entre diseñadores, desarrolladores y usuarios finales, facilitando la comprensión de las necesidades y requisitos subjetivos que son difíciles de transmitir por los usuarios (Rasouli et al., 2024).

Diversas investigaciones han utilizado el DP en el ámbito de los robots sociales. Un ejemplo de ello es el estudio de Axelsson et al. (2024), que empleó dicha metodología con el fin de diseñar robots como entrenadores robóticos para el bienestar mental, donde se realizaron entrevistas y talleres con usuarios y profesionales de la salud para definir capacidades críticas de empatía y personalización. También Potter et al. (2026) diseñó robots asistenciales para el envejecimiento saludable utilizando diseños especulativos para capturar las experiencias vividas de las personas mayores y sus cuidadores. Otro ejemplo notable es el diseño de robots sociales interactivos para la vida independiente, donde se aplicó un enfoque de dos fases que incluyó un kit de herramientas de co-diseño asincrónico y talleres presenciales con prototipos (Macalupu et al., 2024).

En la lucha contra la soledad de los adultos mayores, Tunc et al. (2023) utilizó un enfoque de co-diseño basado en escenarios, implementándolo en cuatro fases, en cada fase, un escenario servía como entrada y se generaba un escenario más detallado como salida, creando una narrativa continua a través del proceso. Asimismo, De Schutter et al. (2016) utilizó el DP para la creación de juegos intergeneracionales mediante talleres donde adultos mayores y estudiantes colaboraron en un proceso creativo de cuatro fases para desarrollar prototipos en papel que reflejaran sus intereses compartidos. Para el desarrollo de robots domésticos, Ostrowski et al. (2021) realizó un estudio por doce meses donde integraron la creación de imágenes artísticas con una fase de alojamiento del robot en el hogar para así implementar un diseño basado en la convivencia diaria. Por último, en el ámbito de la salud cognitiva, Gasteiger et al., (2022) empleó DP a lo largo de seis fases para crear un robot de cuidado diario para el hogar, diseñado para ayudar a los adultos mayores con deterioro cognitivo leve mediante la estabilización del estado de ánimo y la mejora cognitiva.

La metodología llevada a cabo en el taller se basó en la literatura previamente analizada, sin embargo, a diferencia de estudios como los de Gasteiger et al., (2022), Macalupu et al. (2024) y Potter et al. (2026), el taller de co-diseño realizado, integra a ciudadanos y profesionales de diversas edades y campos profesionales, permitiendo una combinación variada de conocimientos. Para enriquecer la dinámica participativa, se valoró la experiencia real con robots en el taller al igual que en el estudio de Ostrowski et al. (2021) donde se recomienda que los participantes vivan experiencias reales con estos dispositivos, lo que permitió reducir expectativas poco realistas que estudios como el de Macalupu et al. (2024) señala como un fallo común en el co-diseño. El objetivo era obtener ideas funcionalmente útiles, viables y éticamente responsables, reduciendo la brecha entre la imaginación del usuario y las capacidades reales de la tecnología.

### 3. METODOLOGÍA DEL TALLER PARTICIPATIVO

#### 3.1. Objetivos, participantes e instrumentos

El objetivo del taller fue explorar el potencial de uso de los robots sociales en entornos comunitarios de personas mayores, en concreto, en tres tipos de contextos: residencias, centros (centro de mayores, centros cívicos y espacios públicos) y comunidades de convivencia. En particular, se quería explorar las expectativas en cuanto a su uso, las posibles funcionalidades y roles de los robots, las características deseables de los mismos y, por último, las implicaciones éticas de su introducción en dichos contextos.

El taller contó con la participación de 7 personas, dos hombres y cinco mujeres, (un participante de 36 años, 3 de 50 a 58 años y tres de 69 a 75 años). Los participantes procedían de ámbitos vinculados mayoritariamente al sector sanitario: un cuidador, dos sanitarias, una terapeuta ocupacional, dos mediadoras en competencias digitales para adultos mayores y un directivo de una residencia de mayores.

Como medios de apoyo a la dinámica participativa, se emplearon plantillas basadas en el trabajo de Axelsson et al. (2021). En primer lugar, se utilizó la plantilla “Características del Robot”, cuyo objetivo fue identificar las características físicas y sociales del robot relacionadas con el comportamiento social, la personalidad, los aspectos físicos y de movilidad, la seguridad física, así como la voz y el sonido. En segundo lugar, se utilizó la plantilla “Consideraciones Éticas” para analizar aspectos éticos sobre la transparencia, la seguridad de los datos y las consideraciones emocionales. En ambos casos, las plantillas se complementaron con cartas del *Microsoft Inclusive Design Toolkit*<sup>3</sup>, para incentivar el debate inclusivo.

#### 3.2. Estructura de las sesiones

El taller se llevó a cabo en instalaciones del Gobierno de Aragón durante el mes de noviembre de 2025 y tuvo una duración de tres días consecutivos: una tarde, un día completo y una mañana.

**Primer día (tarde):** La jornada comenzó con la presentación global del SeniorLab y de los diferentes talleres a llevar a cabo. A continuación, se dividió a los participantes entre los diferentes talleres (5 en total). En el nuestro se llevó a cabo la presentación de los participantes y la del equipo investigador, junto con la demostración de los robots Lolo y Lola, dos robots sociales (Sanbot Elf) del proyecto PLEISAR. A continuación, se les explicó a los participantes el propósito del proceso participativo y la relevancia de su implicación.

**Segundo día (mañana y tarde):** El segundo día se comenzó con la **interacción** directa de los participantes con los robots sociales. Los participantes se dividieron en dos grupos y utilizaron simultáneamente los dos robots disponibles, interactuando con aplicaciones implementadas previamente en el contexto del proyecto de investigación. A continuación, se llevó a cabo una **entrevista grupal**, en la que se plantearon preguntas abiertas sobre las posibles aplicaciones de los robots sociales para personas mayores. Para esta actividad, se empleó la técnica de tormenta de ideas apoyada en el uso de post-it. Después, cada participante elaboró, de forma individual, una

---

<sup>3</sup> <https://inclusive.microsoft.design>

**narrativa** en la que debía aparecer un robot social y al terminirlas, debían ser leídas al grupo (ver figura 1).



**Figura 1.** De izquierda a derecha: Interacción directa, Entrevista grupal, Tormenta de ideas.

**Tercer día (mañana):** Tras una recapitulación de lo hecho anteriormente, se pasó a trabajar en las características del robot y las consideraciones éticas. Para ello se emplearon dos plantillas de Axelsson et al. (2021): la primera fue “Características del Robot” (plantilla adaptada), donde todos los participantes compartieron sus ideas de cómo debería ser el robot en aspectos sociales y físicos, posteriormente a esto, se pasó a trabajar con la plantilla “Consideraciones Éticas” (plantilla original traducida), donde se abordaron temas éticos asociados al diseño de soluciones con estos dispositivos. De manera paralela, parte del equipo investigador implementó una aplicación básica en el robot, con el objetivo de mostrar algunas de las funcionalidades mencionadas, simulando una interacción entre un mayor y el robot. Dicha aplicación fue mostrada en la presentación final conjunta con los participantes del resto de los talleres llevados a cabo (ver figura 2).



**Figura 2.** Trabajo con plantillas y presentación final.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Expectativas en cuanto a usos y funcionalidades de los robots sociales

A continuación, se presentan agrupadas las expectativas en cuanto a las funcionalidades que se obtuvieron durante la tormenta de ideas en cada uno de los contextos previamente mencionados (ver tabla 1).

En todos los casos, los participantes pusieron de manifiesto la importancia de identificar a los usuarios y de que las características del robot sean adaptables al usuario, como: la identificación facial, el uso de voces familiares, la adaptación del lenguaje para mejorar la interacción y la incorporación de las preferencias individuales, asimismo, el conocimiento de historia personal, el nivel cognitivo y la formación de los usuarios permitirá una atención mas personalizada.

**Tabla 1:** Funcionalidades agrupadas por contextos.

| Funcionalidades                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Convivir en comunidad</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Recordatorios de citas, tareas, normas de convivencia.</li> <li>2. Reconocimientos por tareas cumplidas.</li> <li>3. Gestión de banco de tiempo.</li> <li>4. Resolución de dudas.</li> <li>5. Fomento de interacción grupal, recopilación y compartición de experiencias.</li> <li>6. Promoción de hábitos saludables.</li> <li>7. Detección de deterioro cognitivo o físico.</li> <li>8. Detección de caídas.</li> <li>9. Apoyo o asesoramiento (en higiene, imagen, etc.).</li> </ol>                                 |
| <b>Centros</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>10. Apoyo para integración inicial y adaptación del usuario al centro.</li> <li>11. Creación de actividades adaptadas (juegos, memoria, orientación) y lúdicas (recorridos históricos o líneas temporales).</li> <li>12. Notificación al familiar sobre el estado y seguimiento de los usuarios, mediación entre familiares.</li> <li>13. Recepción de usuarios y orientación espacial y temporal.</li> <li>14. Actuación ante situaciones de emergencia según protocolos establecidos.</li> </ol>                                       |
| <b>Residencias</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>15. Ayuda en tareas diarias (medicación, desplazamientos, logística).</li> <li>16. Vigilancia y realización de rondas nocturnas.</li> <li>17. Detección de comportamientos inusuales e incidencias y actuación ante emergencias.</li> <li>18. Guía en espacios, apoyo a personas desorientadas o deambulantes.</li> <li>19. Monitorización del estado de los residentes.</li> <li>20. Incentivo a la movilidad y participación en actividades.</li> <li>21. Uso de telepresencia para actividades externas o excursiones.</li> </ol> |

Finalmente, se identificó la necesidad de incorporar protocolos de actuación ante situaciones críticas, como caídas, solicitudes de ayuda o la posible detección de olores como indicador de situaciones anómalas, así como trabajar de forma explícita la accesibilidad, teniendo en cuenta aspectos como la visión periférica reducida en personas mayores o sus limitaciones motoras y cognitivas.

En cuanto a las narrativas, los participantes visualizan a los robots sociales en numerosas actividades de la vida diaria de las personas mayores, asociándoles diversos roles que se comentan a continuación.

**El robot como mediador terapéutico y profesional:** Una de las representaciones más repetitivas en las narrativas es la del robot como apoyo a las consultas terapéuticas, especialmente en la estimulación cognitiva y el seguimiento de los usuarios: un participante escribió que el robot permite “volcar todas las valoraciones cognitivas y [...] han registrado la participación y los retos conseguidos por cada uno de ellos” (P0909). El robot también es concebido como una ayuda para facilitarles el trabajo a los terapeutas: “han adquirido un robot que les facilitara su trabajo, [...] las actividades que proponen son divertidas, ni fáciles ni difícil” (P0909).

**El robot como compañero emocional y afectivo:** Otro aspecto planteado es el rol del robot como acompañante, capaz de generar bienestar emocional y reducir la soledad. En varias narrativas, el robot es descrito como algo cercano, que aporta ánimo y estabilidad emocional. Por ejemplo, una participante expresa que la presencia del robot le ayuda a no sentirse nostálgica: “si estuviese sola me pondría más nostálgica pero tu presencia me anima más” (PMLOB). Asimismo, el robot es

presentado como útil para personas con deterioro cognitivo: “Nuria [...] esperaba a Lolo todas las mañanas en los pasillos de la residencia para hablar de su pueblo, la costura y de ese viaje que nunca pudo hacer con su marido a París” (P5701). Estas narrativas muestran al robot como un compañero con características emocionales y afectivas, capaz de escucharlos y entenderlos.

**El robot como apoyo a la orientación y seguridad:** Las narrativas también reflejan una concepción del robot como agente de seguridad y apoyo: “Lolo y Lola [...] aportan seguridad” (6700). En otra narrativa se observa también, el uso del robot como sistema de aviso: “Tendría el robot para que pase por el pasillo y con una luz [...] identificar si el residente lo necesita, para que él comunique a los cuidadores su llamada” (P3001).

**El robot como parte de modelos comunitarios y de convivencia compartida:** La narrativa del participante 6700, ubica al robot en convivencias compartidas, la cual titula: “Vida en comuna (solos pero acompañados)”. En la comunidad, el robot no solo cumple funciones prácticas, sino que se integra en un proyecto de vida colectiva: “Lolo y Lola son dos robots de compañía que unos pocos años antes ayudaron a crear y aportar ideas para hoy vivir así” y ayudan “personalizando necesidades” (P6700).

#### 4.2. Características del robot

Como resultado del proceso de definición de las características del robot social, se estableció un conjunto de requisitos orientados a mejorar la aceptación, accesibilidad y efectividad de la interacción con personas mayores. En relación con el **comportamiento social**, los participantes destacaron la importancia de que el robot fuera capaz de expresar cercanía y afectividad mediante gestos sociales (como el gesto de abrazar) y a través de, expresiones faciales que transmitieran emociones. Se mencionó el uso del humor y que tratara a las personas por su nombre. Asimismo, se identificó la necesidad de adaptar el **estilo comunicativo** en función del género del usuario: una comunicación más directa en el caso de los hombres y una interacción más conversacional con las mujeres. La **personalidad** del robot se definió como paciente y tranquila, evitando comportamientos que pudieran generar estrés o confusión.

Desde el punto de vista **físico y de movilidad**, se determinó que el robot debía tener movilidad autónoma y orientarse siempre hacia la persona durante la interacción. En relación con la **seguridad física**, se identificaron diversos riesgos vinculados a la movilidad del robot en entornos residenciales. Entre ellos, se planteó la posibilidad de provocar caídas durante situaciones de deambulación, la obstrucción de zonas de paso y la pérdida de estabilidad del usuario en caso de apoyarse sobre el robot. Para reducir estos riesgos, se propusieron recomendaciones de diseño físico, como la incorporación de ruedas bloqueables, una estructura estable, un tamaño y altura adecuado al contexto de uso (por ejemplo, mayor altura en situaciones de deambulación y dimensiones más reducidas en espacios donde los usuarios permanecen sentados), así como la no apariencia excesivamente humanoide que pudiera generar miedo o rechazo. También, se señaló la necesidad de que el robot evitara zonas de paso, detectara obstáculos de forma activa y gestionara de manera segura aspectos técnicos como la batería de alimentación.

En cuanto a **la voz y los sonidos** se estableció como requisito una voz emocionalmente familiar o natural, con un tono agradable, con velocidad lenta, buena vocalización y capacidad de adaptar el volumen a las capacidades auditivas de los mayores. Además, el robot debería tener luces,

expresiones faciales o sonidos suaves, para llamar la atención a los usuarios en dependencia de la situación que lo requiera. En cuanto a la **interacción**, se concluyó que esta debía ser mayoritariamente por voz, por ser la forma más natural, reforzada con apoyos visuales para aquellas personas con problemas auditivos. Estos apoyos incluyen el uso de pantalla con letras grandes, colores adecuados, uso de elementos visuales como relojes o pictogramas. También se planteó la posibilidad de utilizar proyección como complemento visual, especialmente útil en casos de deambulación, sordera o dificultades de atención. La definición de la interacción tuvo en cuenta la diversidad funcional de los usuarios y las situaciones de riesgo, por lo que se pensó en un botón para solicitar ayuda en caso de que fuese necesario.

### 4.3. Consideraciones éticas

Como parte del proceso de co-diseño, se abordaron de manera específica las consideraciones éticas asociadas al diseño e implementación de la solución. En cuanto a la **seguridad de los datos**, se mencionó la importancia de un uso restrictivo y responsable de la información personal de los usuarios. Se identificaron como sensibles los datos relativos al historial clínico y determinados temas de conversación, además, de establecer alertas automáticas ante contenidos críticos (por ejemplo, suicidios o temas políticos). Como solución, se propuso solo utilizar la historia ocupacional y social del usuario, y evitar información sensible, como conflictos familiares. Asimismo, se planteó el uso de distintos permisos de acceso a la información y modos de funcionamiento del robot, de forma que solo se utilicen determinados datos en función del modo de interacción habilitado. Se puso de manifiesto no registrar ni almacenar conversaciones, ni vídeos de las interacciones.

La **transparencia** puso el foco en la relación entre el usuario y el robot. Se discutió qué el usuario siempre tuviera en cuenta que interactúa con un robot y no con una persona, así como la necesidad de que el robot explique claramente sus limitaciones, derivando al usuario a profesionales o familiares cuando no pueda ofrecer ayuda adecuada. Asimismo, se estableció que el robot debería informar al usuario, de que cierta información compartida podrá ser comunicada a profesionales o familiares si se detectan estados emocionales preocupantes.

La **consideración emocional** incluyó también la identificación de riesgos asociados a una posible dependencia excesiva del robot. Se señaló la posibilidad de que el robot monopolizara la atención del usuario, generara adicción o redujera la interacción social con profesionales, otros residentes o familiares. Para minimizar estos riesgos, se propuso que el robot detectara patrones de uso excesivo y generara alertas para los profesionales. Además, el robot debería informar al usuario cuando el tiempo de interacción sea elevado y sugerir la interacción con otras personas del entorno. En relación con la imposición del comportamiento, se abordó la necesidad de que el robot fuera capaz de detectar comportamientos inapropiados, como insultos, comentarios sexistas o conductas agresivas, no solo dirigidas al robot, sino también a profesionales, residentes o familiares. Se planteó que el robot no debe tolerar este tipo de comportamientos y establecer límites.

## 5. CONCLUSIONES

A partir de la experiencia de co-diseño llevada a cabo en el contexto del laboratorio ciudadano, SeniorLab, el estudio presentado aborda en profundidad las expectativas de los usuarios y los roles que pueden desempeñar los robots sociales en distintos contextos relacionados con las personas

mayores. Además, se ponen de manifiesto las características de diseño, tanto físicas como sociales, que favorezcan su aceptación y uso, junto con el análisis de las consideraciones éticas asociadas al uso de estos dispositivos. En general, los robots sociales son concebidos como herramientas de apoyo y acompañamiento, visualizándolos con roles como terapeuta, acompañante emocional, agente de seguridad y como mediador en modelos comunitarios. Asimismo, se plantea su papel como herramienta para ofrecer actividades de psico-estimulación apoyadas en la reconstrucción de experiencias y recuerdos significativos, para fomentar la interacción social y conversacional entre los usuarios. En cuanto, a las características de diseño, se plantea un conjunto de requisitos relativos al comportamiento social, personalidad, aspectos físicos y de movilidad, seguridad física, voz y sonido. En el ámbito ético, se identifican preocupaciones sobre la transparencia, la seguridad de los datos y aspectos emocionales, por lo que se ha propuesto diversas recomendaciones para mitigar estos riesgos.

El taller llevado a cabo se concibe como un primer paso en el futuro desarrollo de aplicaciones para mayores basadas en robots sociales en contextos comunitarios que sean útiles, viables y éticamente responsables.

**Agradecimientos:** Este trabajo está financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y la UE (FEDER) mediante el contrato PID2022-136779OB-C31, y por el Gobierno de Aragón (Grupo T60-23R). Agradecemos al Gobierno de Aragón por permitirnos participar en la iniciativa SeniorLab, a los participantes y a Paula Soriano por su ayuda durante el mismo.

## 6. REFERENCIAS

- Axelsson, M., Spitale, M., & Gunes, H. (2024). Robots as mental well-being coaches: Design and ethical recommendations. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 13(2), 1-55.  
<https://doi.org/10.1145/3643457>
- Axelsson, M., Oliveira, R., Racca, M., & Kyrki, V. (2021). Social robot co-design canvases: A participatory design framework. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 11(1), 1-39.  
<https://doi.org/10.1145/3472225>
- Boch, A., & Thomas, B. R. (2025). Human-robot dynamics: a psychological insight into the ethics of social robotics. *International Journal of Ethics and Systems*, 41(1), 101-141.  
<https://doi.org/10.1108/IJOES-01-2024-0034>
- Cho, M., Kim, D., Jang, M., Lee, J., Kim, J., Yun, W. H., ... & Jang, C. (2024). Evaluating human-care robot services for the elderly: An experimental study. *International Journal of Social Robotics*, 16(7), 1561-1587. <https://doi.org/10.1007/s12369-024-01157-7>
- Dawe, J., Sutherland, C., Barco, A., & Broadbent, E. (2019). Can social robots help children in healthcare contexts? A scoping review. *BMJ paediatrics open*, 3(1), e000371.  
<https://doi.org/10.1136/bmjpo-2018-000371>
- Department of Economic. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. Stylus Publishing, LLC.
- De Graaf, M. M., Ben Allouch, S., & Van Dijk, J. A. (2015, October). What makes robots social?: A user's perspective on characteristics for social human-robot interaction. In *International Conference on*

- Social Robotics (pp. 184-193). Cham: Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-25554-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25554-5_19)
- De Michelis, C., Ferrari, M., Rozin, T., & Stern, B. (2015). Teaching for Wisdom in an Intergenerational High-School-English Class. *Educational Gerontology*, 41(8), 551–566.  
<https://doi.org/10.1080/03601277.2014.994355>
- De Schutter, B., Roberts, A. R., & Franks, K. (2016). Miami six-O: Lessons learned from an intergenerational game design workshop. In *Game-based learning across the lifespan: Cross-generational and age-oriented topics* (pp. 13-27). Cham: Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-41797-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41797-4_2)
- Gasteiger, N., Ahn, H. S., Lee, C., Lim, J., MacDonald, B. A., Kim, G. H., & Broadbent, E. (2022). Participatory design, development, and testing of assistive health robots with older adults: an international four-year project. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 11(4), 1-19.
- Mahdi, H., Akgun, S. A., Saleh, S., & Dautenhahn, K. (2022). A survey on the design and evolution of social robots—Past, present and future. *Robotics and Autonomous Systems*, 156, 104193.  
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104193>
- Macalupu Chira, V. A., Rittenbruch, M., Chamorro-Koc, M., & Donovan, J. (2024). Designing the future together: a collaborative designerly approach to socially interactive robots with older adults as co-designers. *Journal of Responsible Innovation*, 11(1), 2390708. <https://doi.org/10.1080/23299460.2024.2390708>
- Ostrowski, A. K., Breazeal, C., & Park, H. W. (2021, August). Long-term co-design guidelines: empowering older adults as co-designers of social robots. In *2021 30th IEEE international conference on robot & human interactive communication (RO-MAN)* (pp. 1165-1172). IEEE. doi: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515559.
- Potter, S., Hawley, M., Higgins, A., Amirabdollahian, F., Dragone, M., Di Nuovo, A., & Caleb-Solly, P. (2026). Assistive robotics for healthy aging: a foundational phenomenological co-design exercise. *Journal of Medical Internet Research*, 28, e77179. <https://doi.org/10.2196/77179>
- Rasouli, S., Gupta, G., Nilsen, E., & Dautenhahn, K. (2022). Potential applications of social robots in robot-assisted interventions for social anxiety. *International Journal of Social Robotics*, 14(5), 1-32.  
<https://doi.org/10.1007/s12369-021-00851-0>
- Rogers, W. A., Kadylak, T., & Bayles, M. A. (2022). Maximizing the benefits of participatory design for human–robot interaction research with older adults. *Human factors*, 64(3), 441-450.  
<https://doi.org/10.1177/00187208211037465>
- Tunc, S., Nijboer, F., Ludden, G. D., van Velsen, L. S., & Tabak, M. (2023). Scenario-based co-design with older adults: A design case on decreasing loneliness. *International journal of design*, 17(2), 99-113. <https://doi.org/10.57698/v17i2.06>
- Khaksar, W., Lindblom, D. S., Bygrave, L. A., & Torresen, J. (2025). Robotics in elderly healthcare: A qualitative analysis of 20 recent European research projects. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 14(2), 1-38. <https://doi.org/10.1145/3711936>

## *Affective touch*: Estudio preliminar de estímulos vibrotáctiles en interfaces hápticas

### *Affective Touch: A preliminary study of vibrotactile stimuli in haptic interfaces*

<sup>(1)</sup> Noelia González-Sánchez [0009-0005-3125-4673], <sup>(1,2)</sup> Arturo S. García [0000-0003-0671-324X], <sup>(1,2,3)</sup> Antonio Fernández-Caballero [0000-0002-8211-0398], <sup>(1,2)</sup> José P. Molina [0000-0001-6832-3250]

<sup>(1)</sup> Instituto de Investigación en Informática de Albacete, 02071 Albacete, España

<sup>(2)</sup> Departamento de Sistemas Informáticos, Universidad de Castilla-La Mancha, 02071 Albacete, España

<sup>(3)</sup> CIBERSAM (Biomedical Research Networking Centre in Mental Health), 28029 Madrid, España

**Resumen.** *Affective touch* desempeña un papel fundamental en la homeostasis física y el bienestar social, y se diferencia del tacto discriminativo por su conexión intrínseca con los sistemas neurobiológicos de recompensa y regulación emocional. Este mecanismo actúa como amortiguador del estrés al atenuar la reactividad fisiológica y promover estados de seguridad psicológica. Aunque tradicionalmente se ha asociado con la estimulación de la piel con vello, investigaciones recientes sugieren que las interfaces hápticas también pueden modular la valencia y la activación *arousal* del usuario. Dentro de este marco, el experimento propuesto estudia los estímulos generados por un sistema de retroalimentación vibrotáctil mediante guantes hápticos para identificar qué parámetros físicos específicos (intensidad, duración y zona anatómica) provocan respuestas emocionales positivas y modulan el estado afectivo del usuario. En lugar de evaluar predisposiciones estables, el presente estudio investiga la reactividad inmediata (ansiedad de estado) ante estos estímulos vibrotáctiles mediante cuestionarios basados en el afecto para las dimensiones de valencia (agrado-desagrado) y *arousal* (activación-calma). La configuración de parámetros resultante debe entenderse como un paso preliminar que puede servir posteriormente de base para el diseño y el desarrollo de sistemas hápticos más complejos e inmersivos.

**Palabras clave:** *Affective touch*, hápticos, ansiedad-estado, realidad virtual.

**Abstract.** Affective touch plays a fundamental role in physical homeostasis and social well-being, and differs from discriminative touch in its intrinsic connection to neurobiological systems of reward and emotional regulation. This mechanism acts as a stress buffer by attenuating physiological reactivity and promoting states of

psychological safety. Although it has traditionally been associated with stimulation of hair-bearing skin, recent research suggests that haptic interfaces can also modulate the user's valence and arousal levels. Within this framework, the proposed experiment examines stimuli generated by a vibrotactile feedback system using haptic gloves to identify which specific physical parameters (intensity, duration, and anatomical location) elicit positive emotional responses and modulate the user's affective state. Rather than assessing stable predispositions, the present study investigates immediate reactivity (state anxiety) to these vibrotactile stimuli using affect-based questionnaires for the dimensions of valence (pleasure-displeasure) and arousal (activation-calm). The resulting parameter configuration should be understood as a preliminary step that can subsequently serve as a basis for the design and development of more complex and immersive haptic systems.

**Keywords:** Affective touch, haptics, anxiety-state, virtual reality.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La ansiedad se define, en términos generales, como un estado emocional de anticipación aprensiva frente a amenazas o peligros futuros, acompañado de un proceso natural de activación fisiológica y cognitiva orientada a movilizar a los seres humanos y otros animales ante el peligro (Atienza, 2010). En su forma adaptativa, la ansiedad cumple una función protectora, es decir, prepara al organismo para enfrentar o evitar peligros mediante la activación de la respuesta de lucha o huida, incrementando así las posibilidades de supervivencia (American Psychiatric Association, 2023). Este proceso adaptativo involucra un aumento transitorio de la alerta y de la actividad fisiológica, lo que conlleva un aumento de la frecuencia cardíaca o de la tensión muscular, facilitando una respuesta más rápida ante estímulos potencialmente dañinos (American Psychiatric Association, 2023). Sin embargo, cuando la respuesta de ansiedad se activa de forma excesiva, crónica o desproporcionada en ausencia de un peligro real, deja de ser adaptativa para convertirse en patológica, interfiriendo con el funcionamiento diario y el bienestar del individuo (Atienza, 2010). Dada esta complejidad sintomatológica, en el contexto de la evaluación experimental es fundamental diferenciar entre la predisposición de la personalidad a sentir ansiedad y la respuesta momentánea ante un estímulo.

En este sentido, el *affective touch* emerge como un mecanismo para regular esta ansiedad. Aunque tradicionalmente se ha asociado con la estimulación suave de las fibras aferentes C-táctiles presentes en la piel con vello, (Marshall & McGlone, 2020), estudios como (Zhao et al., 2022) han demostrado que las interfaces hápticas también pueden replicar estos beneficios. Específicamente, la estimulación vibrotáctil es capaz de modular el estado emocional del usuario pudiendo usarse como una intervención pasiva e inmediata para mitigar la ansiedad (Zhao et al., 2022). Dentro de este marco, resulta de gran interés identificar qué propiedades hápticas específicas pueden evocar respuestas emocionales positivas y regular el estado afectivo del usuario en el momento.

Para abordar estos objetivos, este artículo se ha estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, se exponen los fundamentos teóricos del *affective touch*, explicando sus principios neurofisiológicos y cómo influye la estimulación en la piel glabra, es decir, piel sin vello, como la

presente en las palmas de las manos y las yemas de los dedos. En segundo lugar, se detalla el contexto de interacción en entornos de realidad virtual y el papel de las interfaces hápticas. En tercer lugar, se describe la metodología y se analizan los resultados del experimento realizado. Por último, se presentan las conclusiones derivadas del estudio y sus implicaciones para futuros desarrollos.

## **2. AFFECTIVE TOUCH**

El sentido del tacto tradicionalmente se ha entendido como un sistema discriminativo, es decir, permite percibir la forma de las cosas, la presión o la localización de estímulos. Además, apoya la exploración háptica y la manipulación de objetos, ayudando a la detección de estímulos externos en la superficie de la dermis (Kidd et al., 2022). Sin embargo, a diferencia del tacto meramente discriminativo, el affective touch está ligado a componentes emocionales y de recompensa (Morrison et al., 2010), jugando un papel fundamental en la homeostasis física y bienestar social (He et al., 2024). Esta dimensión, mediada en gran parte por las fibras aferentes C-Táctiles (CT) presentes en la piel vellosa, constituyen la parte neurobiológica básica para el desarrollo del cerebro social y la regulación del estrés a lo largo de la vida (Marshall & McGlone, 2020). Privar de este tacto durante ciertos periodos del desarrollo se asocia con niveles elevados de ansiedad, hipervigilancia y una regulación deficiente del hipotalámico-hipofisario-adrenal (HPA) en la vida adulta. Marshall y McGlone, proponen que la función principal de las aferentes CT no es solo señalar el placer, sino promover una sensación de seguridad y de actuar como un amortiguador del estrés, permitiendo al organismo sentir que “todo está bien” a través de señales autonómicas y neurohormonales.

El tacto afectivo ejerce un efecto calmante directo sobre los sistemas de respuesta al estrés. Estudios como (Marshall & McGlone, 2020), destacan que el tacto interpersonal suave puede reducir la actividad del sistema nervioso simpático, los niveles de cortisol y la frecuencia cardíaca, aumentando la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV). Este proceso de regulación emocional a través del tacto suele ocurrir en tres etapas: modificación de la situación, despliegue atencional y reevaluación cognitiva, lo que ayuda a aliviar el estrés (He et al., 2024). Clásicamente, este tacto afectivo se ha asociado a la estimulación de las fibras CT, no obstante, existe una distinción fisiológica fundamental cuando los estímulos se aplican en áreas como la palma y los dedos de la mano. La piel glabra carece de las fibras CT típicas de la piel vellosa, estando compuesta predominantemente por mecanorreceptores de bajo umbral conectados a fibras A-beta, las cuales están especializadas en funciones sensoriomotoras rápidas y en el tacto discriminativo (He et al., 2024).

A pesar de la ausencia de fibras CT en la mano, estudios como (Mazza et al., 2023) afirman que el procesamiento afectivo no se restringe exclusivamente a la estimulación directa de estas fibras. En la piel glabra, cualquier respuesta hedónica observada no debe atribuirse a una activación interoceptiva límbica directa, sino a un procesamiento cortical de orden superior, al aprendizaje previo y a asociaciones sensoriales. Las propiedades físicas de un estímulo, captadas de forma discriminativa por las fibras A-beta, son procesadas por la corteza somatosensorial y posteriormente evaluadas por la corteza orbitofrontal, desencadenando respuestas hedónicas a través de mecanismos de refuerzo secundario (McGlone et al., 2014). El sistema nervioso central recurre a estos mecanismos cognitivos para comparar la información sensorial entrante con representaciones almacenadas en la memoria, asignando un valor hedónico subjetivo basado en experiencias previas (Dezcallar Sáez, 2012).

Dentro de este marco teórico, el presente estudio busca trasladar estos principios de regulación emocional a una experiencia digital mediante el uso de guantes hápticos vibrotáctiles. Estos sistemas integran matrices de actuadores que se activan de forma secuencial induciendo un estímulo vibrotáctil, que posteriormente, el usuario percibe como un estímulo continuo (Cansev et al., 2025), evocando niveles de agrado y respuestas hedónicas (Huisman et al., 2016). Este fenómeno se fundamenta en un procesamiento cognitivo y de orden superior en el que el cerebro humano integra la información de la velocidad y el patrón del estímulo vibrotáctil, comparándola con representaciones y memorias de interacciones táctiles previas para asignarle un significado afectivo (Huisman et al., 2016).

Los guantes hápticos, al estimular los mecanorreceptores A-beta de la mano, envían señales que el cerebro procesa y que pueden ser medidos subjetivamente como “agradables” o “desagradables” (McGlone et al., 2014). La experiencia sensorial pasa por un nivel de evaluación afectivo-cognitiva donde intervienen la memoria y las experiencias individuales (Dezcallar Sáez, 2012). La información proporcionada por los guantes a través de las vibraciones se compara en la memoria, evocando recuerdos que disparan la respuesta emocional correspondiente (Dezcallar Sáez, 2012). La respuesta afectiva que se observará al usar los guantes hápticos será, por tanto, producto de un procesamiento cortical de orden superior. Al no existir una vía directa en la mano que conecte con la parte emocional del cerebro (fibras CT), el cerebro debe recurrir a mecanismos de aprendizaje y refuerzo secundarios (McGlone et al., 2014). El usuario percibirá las propiedades discriminativas mediante las fibras A-beta y, a través de la conexión cognitivo-límbica, asignará un valor hedónico basado en asociaciones aprendidas y memorias previas (Dezcallar Sáez, 2012).

### 3. EXPERIMENTO

Dentro de un entorno de realidad virtual, la mano es el principal medio utilizado para la exploración, manipulación e interacción con el entorno. En este sentido, los guantes hápticos permiten establecer una relación natural entre el gesto realizado por el usuario y la retroalimentación sensorial recibida (Perez Ariza & Santis-Chaves, 2016). Al aplicar estimulación mecánica en las yemas de los dedos, los guantes hápticos integran la retroalimentación háptica de forma directa en la acción y refuerzan la sensación de inmersión. Más allá de su utilidad funcional, estos dispositivos, al utilizar vibraciones mecánicas localizadas en la yema de los dedos, generan una respuesta subjetiva y psicológica, que puede medirse en términos de valencia y *arousal*.

Tradicionalmente, las interfaces hápticas se utilizan para confirmar la ejecución de una acción, señalar errores o guiar espacialmente la interacción del usuario (Sun et al., 2024). Sin embargo, este estudio propone utilizar la retroalimentación vibrotáctil para mejorar la comodidad y el bienestar durante la experiencia inmersiva. Desde esta perspectiva, el desarrollo de señales vibrotáctiles agradables puede contribuir con una interacción más positiva, reduciendo la fatiga sensorial y las sensaciones aversivas, favoreciendo una mayor sensación de seguridad en entornos virtuales (Sun et al., 2024).

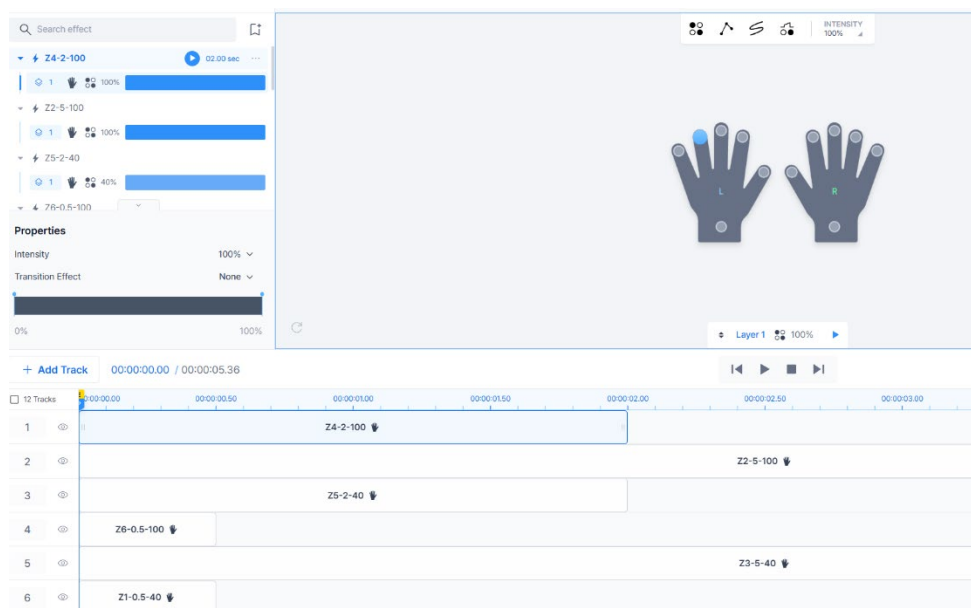
En línea con este planteamiento, este estudio tiene como objetivo evaluar la capacidad de diferentes estímulos vibrotáctiles, aplicados mediante guantes hápticos, para inducir perfiles afectivos diferenciados en los participantes. Específicamente, se busca determinar si la estimulación táctil en la piel glabra de la mano puede evocar respuestas subjetivas consistentes que distingan entre estados

de regulación emocional (calma/agrado) y estados de alerta o rechazo (activación/desagrado), fundamentadas en la interacción entre el procesamiento sensorial y la valoración cognitiva-emocional (McGlone et al., 2014).

### 3.1. Participantes y diseño experimental

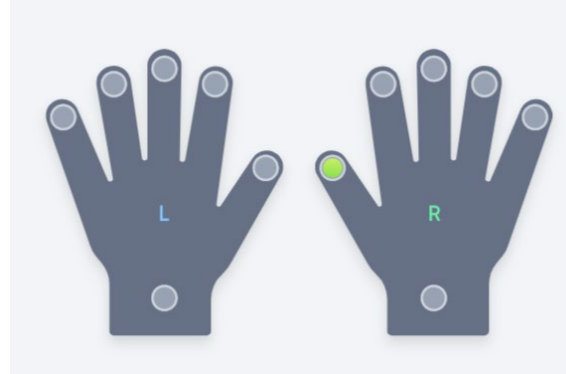
Para el presente estudio se involucraron 12 participantes (8 hombres y 4 mujeres), con un rango de edad comprendido entre los 22 y los 31 años, de los cuales 11 eran diestros y 1 era zurdo. Todos los sujetos seleccionados presentaron un estado de salud sano y fueron clasificados como neurotípicos, sin antecedentes de trastornos neurológicos. Se empleó un diseño experimental intra-sujeto, en el cual todos los participantes fueron expuestos a la totalidad de las condiciones experimentales, correspondientes a los diferentes estímulos vibrotáctiles generados por los guantes hápticos TactGlove DK2 desarrollado por bHaptics (bHaptics Inc., 2026), para evaluar la respuesta afectiva y sensorial frente a la estimulación táctil.

Este dispositivo proporciona retroalimentación vibrotáctil en entornos de realidad virtual y realidad aumentada. Su funcionamiento general se basa en la integración de seis actuadores lineales resonantes (LRA) de alta definición, ubicados en las yemas de los cinco dedos y uno en la muñeca, sumando un total de 12 puntos de retroalimentación por par. Los actuadores utilizados operan a una frecuencia de resonancia nominal aproximada de 170Hz, cuya aceleración pico generada por los motores ronda 1G (aceleración gravitacional) a su máxima capacidad de salida (bHaptics Inc., 2026). Esto permite expresar las intensidades programadas en el entorno experimental como equivalencias físicas aproximadas en G y en  $m/s^2$ , entendidas como valores nominales de referencia y, dado que la experiencia sensorial del tacto afectivo depende de las diferencias individuales (Cansev et al., 2025), este método ha permitido aislar la variabilidad subjetiva y asegurar la validez de las mediciones. Para la presente investigación se emplearon estímulos vibrotáctiles localizados, desarrollados en la aplicación bHaptics Designer (Figura 1), generados mediante los actuadores integrados en los guantes hápticos TactGlove DK2 (bHaptics Inc., 2026).



**Figura 1.** Desarrollo de los estímulos con la herramienta bHaptics Designer.

En el experimento se evaluaron distintos estímulos aplicados de forma independiente en los seis actuadores que posee cada guante, situados en las yemas de los cinco dedos y en la muñeca (Figura 2) (*bHaptics Inc.*, 2026). Así, cada uno de estos puntos de contacto se evaluó bajo diferentes combinaciones de los parámetros temporales y de intensidad definidos para la prueba.



**Figura 2.** Posición de los actuadores en cada una de las manos.

Los factores experimentales manipulados fueron la intensidad y la duración del estímulo. Se establecieron dos niveles de intensidad, 100% y 40% del valor de salida programado, y tres duraciones, 0,5, 2 y 5 segundos. De la combinación de ambos factores resultaron seis condiciones de estimulación para cada localización. Esto permitió analizar de forma sistemática cómo la intensidad y el tiempo de exposición influyen en la percepción afectiva de la vibración.

En cuanto a la intensidad, los porcentajes utilizados corresponden a los niveles de salida definidos en el software de control, por lo que representan una proporción del rendimiento del actuador y no una magnitud física absoluta. Así, un estímulo configurado al 100% corresponde al nivel máximo disponible del sistema, representando una señal intensa y fácilmente discriminable. Y, por otro lado, un estímulo al 40% representa una estimación aproximada de 0,4 veces la aceleración pico máxima nominal, es decir, aproximadamente  $3,92\text{m/s}^2$ . Esto permitió incluir una condición de menor intensidad que seguía siendo perceptible. Respecto a la duración, se seleccionaron tres tiempos de estimulación con el fin de abarcar un rango representativo dentro de un contexto de interacción en realidad virtual, evitando exposiciones prolongadas que pudieran favorecer la habituación. Estudios como (Macdonald et al., 2020) señalan que, tras varios segundos de vibración continua (entre 8 y 12 segundos), la sensación percibida en la mano puede atenuarse afectando a la percepción efectiva del estímulo. Por este motivo, no se utilizaron duraciones superiores a 5s.

De esta forma, se tuvieron en cuenta como variables independientes:

- **Intensidad del estímulo:** configurada en dos niveles (100% y 40% de la salida del actuador).
- **Zona de estimulación:** definida en seis niveles correspondientes a distintas áreas de la mano (pulgar, dedo índice, dedo corazón, dedo anular, dedo meñique y muñeca).
- **Duración del estímulo:** establecida en tres niveles de exposición temporal (5, 2 y 0,5 segundos).
- **Lateralidad** (mano estimulada): con dos niveles, derecha e izquierda.

La combinación de los parámetros físicos de la estimulación generó una batería base de 36 estímulos hápticos únicos, divididos en 6 bloques, los cuales se aplicaron de forma aleatoria en ambas manos, completando los 72 estímulos realizados en ambas manos.

Como variables dependientes principales se registraron las respuestas afectivas subjetivas de los usuarios frente a cada uno de los estímulos. Estas respuestas se fundamentaron en el modelo circunplejo del afecto (Macdonald et al., 2020), evaluando las emociones a través de cuestionarios para las dos dimensiones principales:

1. Dimensión hedónica (agradable - desagradable): Los participantes evaluaron el grado de placer percibido en los estímulos.
2. Dimensión de activación (me calma - me activa): Se evaluó el impacto de los estímulos en el estado de regulación emocional del participante, oscilando entre la relajación y la activación.

Como variable dependiente secundaria y de control físico, se registró la presencia de sensaciones residuales (específicamente, hormigueo) tras la estimulación. Finalmente, se incluyó el registro del estado de ansiedad como variable de control psicológico.

### 3.2. Procedimiento

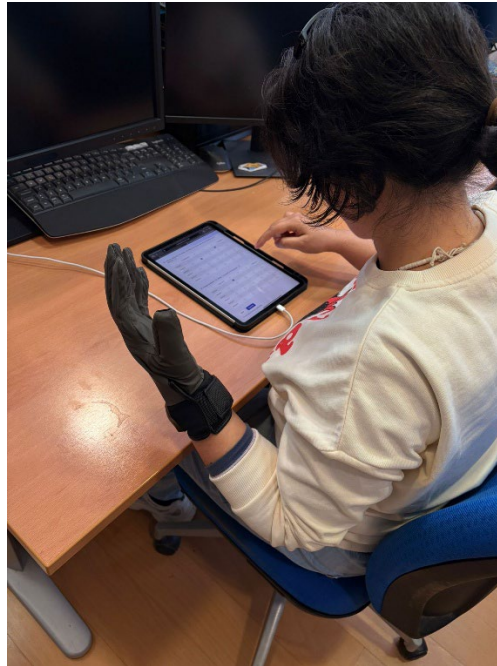
El protocolo experimental se llevó a cabo en un entorno de laboratorio controlado para minimizar posibles distracciones ambientales o interacciones no deseadas. El procedimiento constó de las siguientes fases secuenciales.

Al inicio de la sesión, los participantes rellenaron un cuestionario inicial para registrar sus datos demográficos básicos, específicamente edad, sexo y mano dominante. Inmediatamente después de proveer esta información, los participantes completaron el cuestionario de ansiedad STAI (*State-Trait Anxiety Inventory*) (Spielberger, 2010) en su subescala de estado, con el propósito de establecer una línea base cuantitativa de su nivel de ansiedad subjetiva previa a la exposición a los estímulos.

A continuación, dio comienzo la fase de estimulación estructurada en dos bloques. El primer bloque se realizó de manera exclusiva sobre la mano derecha. Los participantes fueron expuestos de forma sucesiva a la batería de los 36 estímulos configurados. Inmediatamente después de la presentación de cada estímulo, el participante procedía a evaluarlo en las dimensiones afectivas de valencia y *arousal* mediante los cuestionarios Likert, en el que para la dimensión de valencia 1 representaba una sensación “desagradable” y 5 una sensación “agradable”, y, para la dimensión de *arousal* 1 significaba “me calma” y 5 significaba “me activa” (*Figura 3*).

Una vez evaluados los 36 estímulos de este primer bloque, se realizó una pausa. En este punto, el investigador preguntó de forma explícita a los participantes si experimentaban alguna sensación de hormigueo, entumecimiento o alteración perceptiva en la mano derecha a causa de la estimulación.

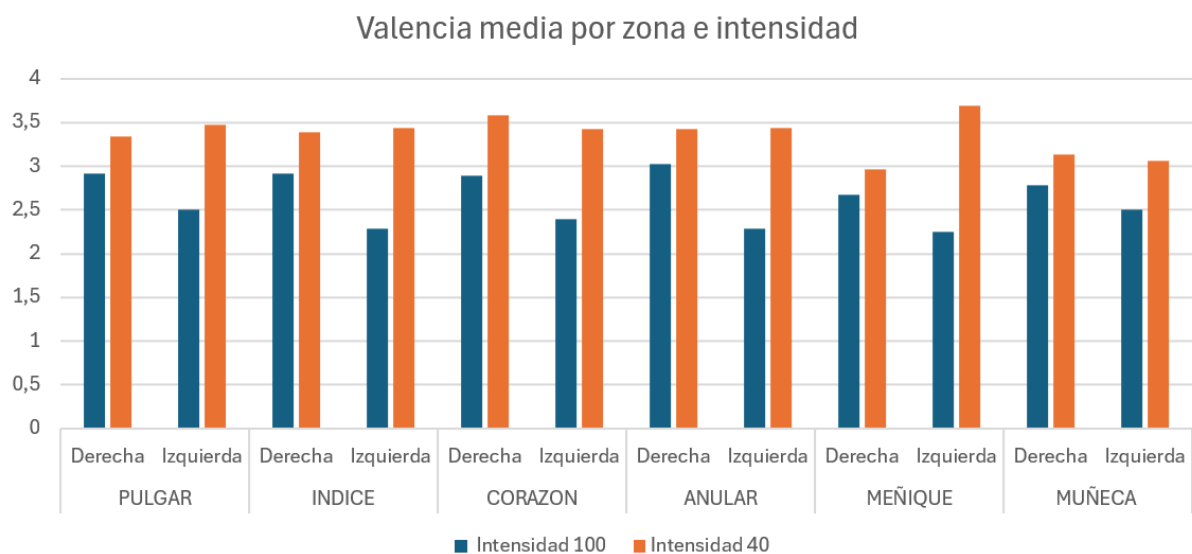
Posteriormente, se dio paso al segundo bloque experimental, en el cual se replicó exactamente el mismo procedimiento, pero utilizando la mano izquierda. Los participantes recibieron nuevamente la batería de 36 estímulos y reportaron sus niveles de valencia y *arousal* tras cada ensayo. Al concluir la evaluación del último estímulo con la mano izquierda, se procedió a realizar nuevamente la pregunta de control sobre la presencia de hormigueo en dicha mano, dando por finalizado el experimento.



**Figura 3.** Desarrollo del experimento.

### 3.3. Resultados

Los datos obtenidos para la dimensión de valencia, como se puede ver en la Figura 4 reveló efectos principales en función de la lateralidad, la intensidad, la duración y la zona anatómica. A nivel global, los estímulos aplicados en la mano derecha obtuvieron una puntuación media de valencia ligeramente superior (media 3,1) a los aplicados en la mano izquierda (media 2,8). Sin embargo, la mano izquierda fue más reactiva y polarizada ante los cambios en la configuración de los estímulos, presentando tanto las puntuaciones más bajas de desagrado ante condiciones aversivas, como los picos más altos de agrado ante condiciones favorables.



**Figura 4.** Medias de valencia obtenidas en cada zona estimulada de la mano derecha e izquierda para las dos intensidades evaluadas.

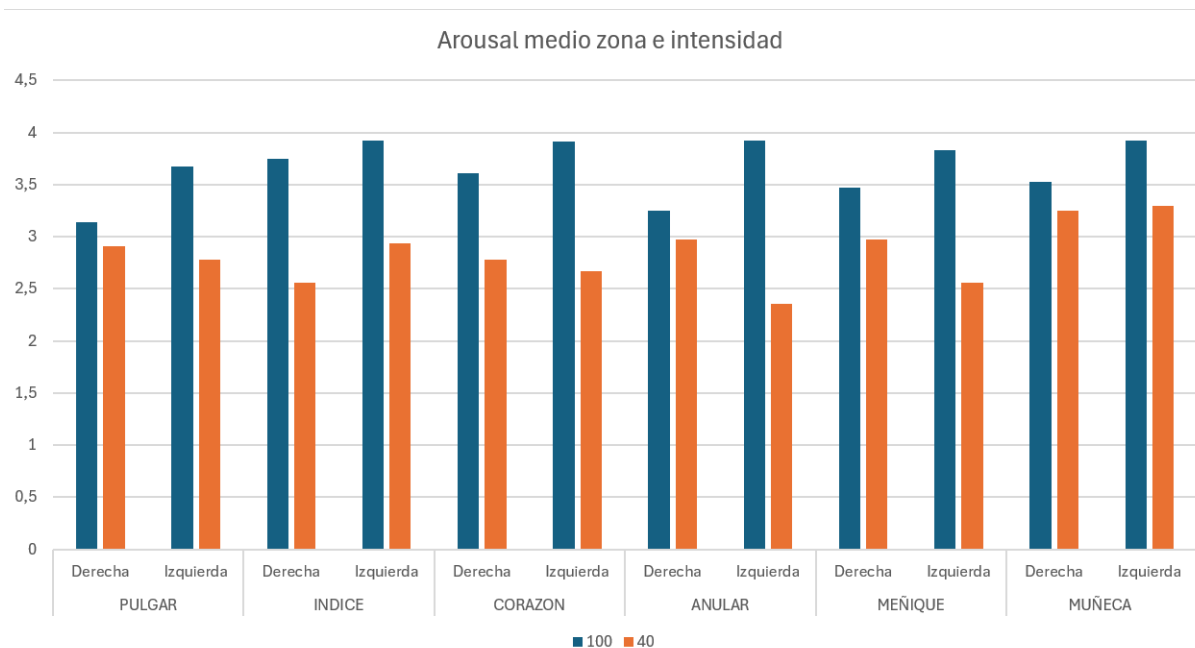
En cuanto a la intensidad, demostró ser un factor determinante en el agrado del estímulo. De manera consistente, la intensidad baja (40) fue evaluada como significativamente más agradable que la intensidad alta (100) en casi todas las configuraciones. Al analizar la interacción entre intensidad y mano, se observó que la mano izquierda es más sensible a los estímulos fuertes, la media de valencia cae (hasta aproximadamente 2,3) con la intensidad 100, especialmente en los dedos índice, corazón y anular. En contraste, la mano derecha presenta una mayor tolerancia a la intensidad 100, manteniendo puntuaciones cercanas a 2,9. Por el contrario, al aplicar la intensidad baja (40), la mano izquierda superó a la derecha en agrado general, registrando el pico de máxima valencia del estudio.

En lo que respecta al análisis de las medias por duración, los participantes mostraron una clara preferencia por los estímulos cortos frente a los prolongados. La duración de 5s reportó sistemáticamente las puntuaciones de valencia más bajas en ambas manos, mientras que la duración de 0,5s generó el mayor grado de agrado (valencia media superior a 3), equiparando la percepción positiva en ambas manos. En la mano derecha, tanto la duración de 0,5s como la de 2s fueron evaluadas muy positivamente (superando a la de 5s), mientras que, en la mano izquierda, la duración de 0,5s fue la única que generó niveles de agrado equivalentes a los de la mano derecha, siendo notablemente preferida sobre las duraciones de 2s y 5s.

El nivel de agrado varió dependiendo del área específica estimulada. La mano derecha mostró una percepción afectiva más homogénea a lo largo de todos los dedos y la muñeca, con puntuaciones medias que superaron a las de la mano izquierda en casi todas las zonas. La excepción notable fue el dedo meñique de la mano izquierda. Mientras que los dedos centrales de la mano izquierda (índice, corazón y anular) fueron las zonas peor evaluadas del experimento, el meñique izquierdo destacó como la zona con la media de agrado más alta de esa extremidad, especialmente cuando se combinó con una intensidad baja (40) y duraciones cortas (0,5s).

El análisis de las respuestas subjetivas para la dimensión de *arousal* como se puede ver en la Figura 5 reveló efectos principales atribuibles a la intensidad, la duración, la lateralidad y la zona anatómica estimulada. La intensidad del estímulo influye en el nivel de activación percibido por los participantes. De manera sistemática y generalizada, los estímulos configurados con una intensidad alta (100) produjeron las puntuaciones más altas de la escala, percibiéndose como los más calmantes (con medias globales que superan el 3,5). Por el contrario, la intensidad baja (40) generó puntuaciones más bajas, indicando que estos estímulos resultaron significativamente más activantes para los usuarios (con medias entre el 2,5 y el 3,0) en todas las zonas evaluadas.

El análisis temporal mostró que la prolongación del estímulo incrementa la sensación de relajación. La duración más larga (5s) reportó sistemáticamente las puntuaciones de *arousal* más altas (tendencia a la calma, con medias superiores a 3,3) tanto en la mano derecha como en la izquierda. En contraposición, las duraciones más cortas (0,5s y 2s) obtuvieron medias inferiores (cercanas a 3,0 y 3,2), siendo percibidas como estímulos más estimulantes. Destaca especialmente el alto nivel de calma reportado en la muñeca izquierda y derecha bajo la duración de 5s.



**Figura 5.** Medias de arousal obtenidas en cada zona estimulada de la mano derecha e izquierda para las dos intensidades evaluadas.

A nivel global, los estímulos aplicados en la mano izquierda generaron una sensación ligeramente mayor de calma (media global aproximada de 3,3) en comparación con la mano derecha (media global de 3,2). Adicionalmente, se observó una interacción pronunciada entre la lateralidad y la intensidad en las falanges: la mano izquierda se mostró más polarizada frente a los cambios de fuerza. En los dedos índice, corazón, anular y meñique de la mano izquierda, la brecha entre la calma inducida por la intensidad alta (100) y la fuerte activación inducida por la intensidad baja (40) fue notablemente más amplia que la registrada en las mismas zonas de la mano derecha. Al evaluar el área específica de contacto, los resultados indican que la muñeca es la zona con mayor propensión a generar calma, reportando las medias más altas de *arousal* de todo el conjunto, independientemente de la mano. Por el contrario, los dedos resultaron ser áreas más receptivas a la activación. Las puntuaciones más bajas de la escala se concentraron en las zonas de los dedos al aplicar la intensidad baja (40), destacando particularmente los dedos anular e índice de la mano izquierda, los cuales registraron medias de activación por debajo de 2,5.

### 3.4. Discusión

Los resultados obtenidos para la dimensión de valencia revelan que la percepción del agrado de los estímulos vibrotáctiles depende de una compleja interacción entre los parámetros físicos del estímulo (intensidad y duración) y factores anatómicos (lateralidad y zona estimulada). La intensidad baja (40) fue evaluada como significativamente más agradable que la intensidad alta (100), lo que es consistente con la literatura sobre háptica afectiva. Estos hallazgos concuerdan con la evidencia previa sobre el diseño de interfaces hápticas afectivas. Así, estudios como (Hasegawa et al., 2019) han demostrado que la amplitud (intensidad) de la vibración se correlaciona positivamente con el nivel de *arousal* y negativamente con la valencia y el confort. En lo que respecta al tiempo de exposición, una vibración continua o prolongada provoca que la acumulación temporal del estímulo se perciba como excesivamente intensa, lo que disminuye el confort y la valencia (Hasegawa et al.,

2019). Esto explica la preferencia por los estímulos cortos (0,5s). Al ser breve, minimiza esta fatiga o sobreestimulación de los mecanorreceptores, logrando mantener el estímulo en un rango perceptible pero no intrusivo, equiparando así la experiencia afectiva positiva en ambas manos. Durante el experimento destacaron los estímulos de menor intensidad (40) y menor duración (0,5s y 2s), ya que fueron percibidos como más calmantes en contraposición a estudios previos (Hasegawa et al., 2019). Esto se debe principalmente al fenómeno de habituación y acumulación temporal, el cual, se constató de manera directa en el experimento, ya que, después de calificar los estímulos, la mayoría de los participantes reportó sufrir una sensación de hormigueo residual en las manos, un efecto secundario documentado ante la exposición a vibraciones prolongadas (He et al., 2024).

En cuanto a la diferencia de reactividad entre la mano derecha y la izquierda. La mayor tolerancia de la mano derecha a estímulos aversivos (intensidad 100 y duración 5 s) y su homogeneidad en las puntuaciones sugieren un efecto de habituación. Dado que la mano derecha es la dominante para la mayoría de los participantes (11 participantes diestros y 1 zurdo), se puede observar que está sometida a un uso continuo en tareas de discriminación táctil, manipulación de herramientas y exploración activa que requieren fuerza y precisión. Estudios como (McGlone et al., 2014) señalan que la exposición continua moldea la percepción del tacto afectivo, esto hace que la mano dominante tenga un umbral de desagrado más alto ante estímulos mecánicos más fuertes. Por el contrario, la mano izquierda (no dominante en la mayoría de los participantes) demostró ser mucho más reactiva y polarizada, mostrando una mayor sensibilidad general. La caída de la valencia a 2,3 con alta intensidad en los dedos índice, corazón y anular izquierdos subraya que estas zonas, típicamente orientadas a la discriminación fina cuando se usan, son altamente intolerantes a vibraciones fuertes. Sin embargo, esta misma sensibilidad permitió que la mano izquierda registrara el pico máximo de agrado del estudio, localizado específicamente en el dedo meñique ante la intensidad baja (40) y duración corta (0,5s). Al ser un dedo con menor implicación en las tareas de agarre o exploración discriminativa principal, el meñique izquierdo podría conservar una mayor capacidad para procesar señales táctiles sutiles desde una dimensión puramente hedónica, asociando estímulos suaves y rítmicos con sensaciones relajantes.

Los resultados obtenidos para la dimensión de *arousal* demuestran que la respuesta de alerta del sistema somatosensorial no es lineal, sino que depende de una interacción entre las propiedades temporales y de magnitud del estímulo, así como de la densidad de los receptores en la zona anatómica estimulada. Los estímulos de menor intensidad (40) y menor duración (0,5s y 2s) fueron percibidos como los más activantes. En estudios sobre la percepción háptica, se ha observado que los estímulos cortos o de carácter impulsivo tienden a provocar mayores respuestas de *arousal* o alerta (Hasegawa et al., 2019). En lo que respecta a la zona anatómica los dedos (especialmente el índice y el anular) resultaron ser altamente receptivos a la activación, registrando los picos máximos de *arousal* con estímulos suaves. Esto es coherente con el hecho de que las yemas de los dedos al poseer una mayor densidad de mecanorreceptores de bajo umbral tienen una mayor capacidad para la discriminación táctil y la detección de microvibraciones (McGlone et al., 2014). En contraste, la muñeca fue la zona que indujo mayor calma, debido a una menor densidad de receptores discriminativos en comparación con la palma y los dedos. Esto hace que los estímulos se perciban de forma más difusa y menos intrusiva, promoviendo una respuesta de menor alerta.

#### 4. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

Este estudio tuvo como objetivo principal evaluar la capacidad de diferentes estímulos vibrotáctiles, aplicados a través de interfaces hápticas, para inducir perfiles afectivos positivos y modular el estado de ansiedad y activación del usuario en función de sus propiedades físicas (intensidad, duración y zona anatómica). Para ello se analizó la reactividad inmediata de una muestra pequeña de 12 participantes. Debido a esto, los resultados obtenidos no pueden generalizarse a la población general, sino que deben interpretarse como tendencias preliminares.

A pesar de esta limitación, el estudio sugiere que la percepción afectiva de los estímulos vibrotáctiles no es uniforme, sino que depende de una compleja interacción entre la intensidad, la duración, la lateralidad y la topografía anatómica. Los resultados indican que, para generar una experiencia de retroalimentación háptica positiva (alta valencia) y estimulante (alta activación), los parámetros óptimos son una intensidad baja (40) y una duración muy corta (0,5s). Estos estímulos sutiles logran captar la atención de los mecanorreceptores sin llegar a abrumarlos. Por el contrario, la aplicación de estímulos de alta intensidad (100) y larga duración (5s) resulta contraproducente para el diseño de interfaces afectivas. Aunque en la escala de *arousal* los participantes asociaron estas configuraciones con la “calma”, los datos de valencia negativa y el reporte generalizado de hormigueo en las manos al finalizar el experimento confirman que no se trata de una relajación placentera. En su lugar, el estímulo continuo satura los receptores táctiles provocando fatiga sensorial y un adormecimiento aversivo.

Asimismo, se concluye que el diseño de interfaces debe adaptarse a la zona de contacto. Los dedos, especialmente en la mano izquierda (no dominante para la mayoría de los participantes), son más sensibles y polarizados, por lo que requieren vibraciones muy suaves. En contraste, la muñeca posee una menor densidad de receptores, permitiendo que tolere mejor la vibración prolongada y siendo el canal más adecuado para transmitir sensaciones de calma sostenida con baja intrusión. Este hallazgo permite validar la capacidad de la estimulación vibrotáctil parametrizada para modular el estado de activación y la ansiedad, estableciendo una base empírica para su futura integración en entornos inmersivos y sistemas portátiles en los que se potencie la respuesta afectiva a través de interfaces hápticas más complejas.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha contado con el apoyo parcial de la subvención PID2023- 149753OB-C21 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y “ERDF A way to make Europe”, y por la subvención 2025-GRIN-38441 financiada por Universidad de Castilla-La Mancha and “ERDF A way to make Europe”. Este trabajo ha contado con el apoyo parcial de Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) (a través de Red [225RT0169]). Este trabajo también ha sido financiado en parte por CIBERSAM-ISCIII y cofinanciado por “ERDF A way to make Europe”.

#### 5. REFERENCIAS

- American Psychiatric Association. (2023). *What Are Anxiety Disorders?*  
(<https://www.psychiatry.org/patients-families/anxiety-disorders/what-are-anxiety-disorders>)
- Atienza, R. C. (2010). *Ansiedad y depresión: Guía práctica*. Formación Alcalá.
- bHaptics Inc. (2026). *Manual TactGlove DK2*.

- Cansev, M. E., Kindermann, M., Blik, A., & Beckerle, P. (2025). Affective Touch via Haptic Interfaces: A Sequential Indentation Approach. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2025.3565157>
- Dezcallar Sáez, T. (2012). *Relación entre procesos mentales y sentido háptico: emociones y recuerdos mediante el análisis empírico de texturas*. Universitat Autònoma de Barcelona,.
- Hasegawa, H., Okamoto, S., Ito, K., & Yamada, Y. (2019). Affective Vibrotactile Stimuli: Relation between Vibrotactile Parameters and Affective Responses. *International Journal of Affective Engineering*, 18(4), 171–180. <https://doi.org/10.5057/ijae.ijae-d-18-00008>
- He, S., Zeng, H., Xue, M., Huang, G., Yao, C., & Ying, F. (2024). Affective Stroking: Design Thermal Mid-Air Tactile for Assisting People in Stress Regulation. *Applied Sciences*, 14(20), 9494. <https://doi.org/10.3390/app14209494>
- Huisman, G., Frederiks, A. D., Van Erp, J. B. F., & Heylen, D. K. J. (2016). Simulating affective touch: Using a vibrotactile array to generate pleasant stroking sensations. *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, 240–250.
- Kidd, T., Devine, S. L., & Walker, S. C. (2022). Affective touch and regulation of stress responses. *Health Psychology Review*, 17(1), 60–77. <https://doi.org/10.1080/17437199.2022.2143854>
- Macdonald, S. A., Brewster, S., & Pollick, F. (2020). Eliciting Emotion with Vibrotactile Stimuli Evocative of Real-World Sensations. *Proceedings of the 2020 International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '20*, 125–133. <https://doi.org/10.1145/3382507.3418812>
- Marshall, A. G., & McGlone, F. P. (2020). Affective Touch: The Enigmatic Spinal Pathway of the C-Tactile Afferent. *Neuroscience Insights*, 15. <https://doi.org/10.1177/2633105520925072>
- Mazza, A., Cariola, M., Capiotto, F., Diano, M., Schintu, S., Pia, L., & Dal Monte, O. (2023). Hedonic and autonomic responses in promoting affective touch. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37471-9>
- McGlone, F., Wessberg, J., & Olausson, H. (2014). Discriminative and Affective Touch: Sensing and Feeling. *Neuron*, 82(4), 737–755. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.05.001>
- Morrison, I., Löken, L. S., & Olausson, H. (2010). The skin as a social organ. *Experimental Brain Research*, 204(3), 305–314.
- Perez Ariza, V. Z., & Santis-Chaves, M. (2016). Interfaces hapticas: sistemas cinestesicos vs. sistemas tactiles. *Revista EIA*, (26), 13–29.
- Spielberger, C. D. (2010). State-Trait Anxiety Inventory. In *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (p. 1). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0943>
- Sun, W., Banakou, D., Świdrak, J., Valori, I., Slater, M., & Fairhurst, M. T. (2024). Multisensory experiences of affective touch in virtual reality enhance engagement, body ownership, pleasantness, and arousal modulation. *Virtual Reality*, 28(4). <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01056-2>
- Zhao, Y., Tao, Y., Le, G., Maki, R., Adams, A., Lopes, P., & Choudhury, T. (2022). Affective Touch as Immediate and Passive Wearable Intervention. *Proceedings of the ACM on*

*Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 6(4), 1–23.

<https://doi.org/10.1145/3569484>

## Aprender accesibilidad web a través de la creación de ejemplos. Un estudio sobre percepción, dificultad y estrategias en la aplicación de las WCAG

### *Learning Web Accessibility Through the Creation of Examples: A Study on Perception, Difficulty, and Strategies in the Implementation of the WCAG*

<sup>(1)</sup> Afra Pascual Almenara <sup>[0000-0002-2368-755X]</sup>, <sup>(2)</sup> Alberto Pedrero Esteban <sup>[0000-0002-1222-0882]</sup>, <sup>(3)</sup> Susana Bautista <sup>[0000-0003-1648-0208]</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Informàtica y Diseño Digital Universitat de Lleida, Spain, [afra.pascual@udl.cat](mailto:afra.pascual@udl.cat)

<sup>(2)</sup> Facultad de Informática Universidad Pontificia de Salamanca, Salamanca, Spain, [apedreros@upsa.es](mailto:apedreros@upsa.es)

<sup>(3)</sup> Escuela Politécnica Superior. Universidad Francisco de Vitoria. Madrid, Spain. [susana.bautista@ufv.es](mailto:susana.bautista@ufv.es)

**Resumen.** La accesibilidad web sigue siendo un desafío pese a la existencia de estándares como las WCAG y de marcos regulatorios como la European Accessibility Act (EAA) y el EN 301549. Este trabajo analiza cómo el estudiantado aprende accesibilidad mediante una actividad basada en la creación y evaluación de ejemplos accesibles (ACC) y no accesibles (NOA). El estudio se basa en aproximadamente 250 respuestas a un cuestionario y combina datos cuantitativos (dificultad, confianza, comprensión y transferencia) con información cualitativa. Los resultados muestran que la aplicación de las WCAG se percibe como más compleja que su comprensión, especialmente en la creación de ejemplos no accesibles. El análisis cualitativo evidencia un cambio desde una visión visual de la interfaz hacia una comprensión estructural basada en semántica e interacción, junto con una mayor conciencia sobre las barreras de accesibilidad. El uso de herramientas, incluida la inteligencia artificial, reduce la dificultad percibida, aunque no garantiza una mayor comprensión. Estos hallazgos sugieren la necesidad de enfoques pedagógicos centrados en la práctica, la reflexión y la transferencia del conocimiento.

**Palabras clave:** accesibilidad web, pautas WCAG, educación en accesibilidad, educación superior, análisis cualitativo, experiencia de usuario, proceso de aprendizaje.

**Abstract.** Web accessibility remains a challenge despite the existence of standards such as WCAG and regulatory frameworks such as the European Accessibility Act (EAA) and EN 301549. This paper examines how students learn accessibility through an activity based on the creation and evaluation of accessible (ACC) and non-accessible (NOA) examples. The study is based on approximately 250 questionnaire responses and combines quantitative data (difficulty, confidence, understanding, and transfer) with qualitative evidence. The results show that applying WCAG is perceived as more complex than understanding it, especially when creating non-accessible examples. Qualitative analysis reveals a shift from a visual understanding of interfaces to a structural understanding based on semantics and interaction, together with increased awareness of accessibility barriers. The use of tools, including artificial intelligence, reduces perceived difficulty, although it does not guarantee deeper understanding. These findings suggest the need for pedagogical approaches focused on practice, reflection, and knowledge transfer.

**Keywords:** web accessibility, WCAG, accessibility education, higher education, qualitative analysis, user experience, learning process.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La accesibilidad web se ha consolidado como un elemento clave en el desarrollo de sistemas digitales inclusivos, garantizando el acceso a la información y a los servicios en línea para todas las personas, incluidas aquellas con diversas capacidades. En este contexto, las Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) (W3C, 2018), desarrolladas por la Iniciativa de Accesibilidad Web (WAI) (WAI, 2023) del World Wide Web Consortium (W3C), se han establecido como el estándar internacional de referencia. Estas directrices no solo definen criterios técnicos verificables, sino que constituyen un marco conceptual para el diseño universal y la accesibilidad digital.

Sin embargo, pese a la consolidación de estos estándares y de un marco regulatorio (W3C, 2026) reforzado en Europa mediante iniciativas como la European Accessibility Act (EAA) (Unión Europea, 2019) y la EN 301549 (ETSI, 2021), la accesibilidad web continúa siendo deficiente. El informe WebAIM de 2026 (WebAIM, 2026) revela que el 95.9% de las páginas de inicio analizadas presenta errores detectables de conformidad con WCAG, una cifra que se mantiene estable desde 2019. Este resultado es consistente con otros trabajos (Martins & Duarte, 2024) (Acosta-Vargas et al., 2023), que muestran una alta densidad de errores por página y una proporción mínima de sitios plenamente accesibles.

Algunos trabajos indican que esta brecha no puede explicarse solo por limitaciones técnicas (Ballesteros et al., 2015), sino también por factores formativos y organizativos (Parthasarathy et al., 2025). La accesibilidad continúa percibiéndose como un requisito secundario, con bajos niveles de formación especializada, lo que limita la adquisición de competencias aplicadas en este ámbito (Zhang et al., 2022) y dificultades en su integración en los procesos de diseño y desarrollo (Ahmetovic et al., 2021).

Además, la correcta aplicación de los criterios WCAG depende en gran medida de la comprensión conceptual y del juicio del desarrollador. Por ello, la accesibilidad no puede abordarse exclusivamente como un problema técnico, sino como un desafío educativo.

La taxonomía de Bloom (Bloom, 1971) ofrece un marco útil para estudiar el aprendizaje de los criterios WCAG al articularlo en fases progresivas: comprensión del criterio, aplicación mediante ejemplos accesibles, pensamiento crítico a través de ejemplos no accesibles, consolidación reflejada en la seguridad percibida y transferencia a nuevos contextos. Este enfoque permite observar no solo si el alumnado conoce un criterio, sino cómo lo interpreta y lo traduce en decisiones de diseño y desarrollo.

El presente estudio se desarrolla en tres universidades españolas y combina aproximadamente 250 respuestas asociadas a criterios WCAG. A partir de ellas se analizan dificultad, confianza, comprensión y transferencia, junto con explicaciones y observaciones abiertas del alumnado. El análisis de datos pretende dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación:

- RQ1. ¿Qué partes del trabajo con WCAG resultan más difíciles —comprender el criterio, crear ejemplos no accesibles (NOA) y crear ejemplos accesibles (ACC)— y cómo varía esta dificultad en función de la universidad, el criterio y el principio evaluado?
- RQ2. ¿Qué estrategias, herramientas y referencias indica el alumnado durante el proceso de creación y cómo se asocian con variables clave del aprendizaje como la dificultad percibida, la confianza, la comprensión práctica y la capacidad de transferencia?
- RQ3. ¿Qué patrones conceptuales emergen en las respuestas abiertas del alumnado —en particular en la explicación del criterio en palabras propias y en las observaciones personales— y cómo se relacionan estos patrones con las medidas cuantitativas?

El artículo se estructura en cinco apartados: introducción, trabajo relacionado, contexto y diseño del estudio, resultados y conclusiones.

## 2. TRABAJO RELACIONADO

La enseñanza de la accesibilidad web en educación superior ha puesto de manifiesto la necesidad de integrar estos contenidos de forma más efectiva en los planes de estudio (Putnam et al., 2012) (Shinohara et al., 2018). En HCI, distintos trabajos señalan que la accesibilidad sigue insuficientemente incorporada a la formación de diseñadores y desarrolladores, lo que repercute en la calidad de los sistemas digitales (Petrie et al., 2018) (Kane et al., 2019), pese a que en el ámbito español existen guías (Fundación ONCE, 2022). Algunos enfoques proponen el uso de metodologías activas que permitan al estudiante enfrentarse a problemas reales de accesibilidad, favoreciendo un aprendizaje más significativo. Entre estas aproximaciones destacan los modelos basados en aprendizaje experiencial y aprendizaje activo, que han demostrado ser eficaces en la adquisición de competencias complejas en contextos técnicos (Kolb, 2015) (Freeman et al., 2014).

El aprendizaje basado en ejemplos resulta especialmente relevante en accesibilidad, ya que reduce la abstracción de los criterios WCAG y facilita su interpretación en contextos concretos (Sweller et al., 2011) (Renkl, 2014). Diversos trabajos han explorado la creación de ejemplos accesibles y no accesibles como estrategia didáctica, mostrando dificultades en la comprensión y aplicación de los criterios WCAG y variabilidad en la calidad de los ejemplos generados (Abou-Zahra, 2012) (Pascual-Almenara, 2025) (Pascual-Almenara et al., 2025) (Alsaeedi, 2020) (Yesilada et al., 2015)

Frente a estos enfoques, este trabajo se centra en el proceso de aprendizaje e integra indicadores de dificultad, confianza, comprensión y transferencia con el análisis sistemático de respuestas abiertas,

con el fin de observar la accesibilidad no solo como contenido técnico, sino como proceso de construcción conceptual y de desarrollo de criterio profesional.

### 3. CONTEXTO Y DISEÑO DEL ESTUDIO

A continuación, se describe el contexto y diseño del estudio llevado a cabo para analizar la comprensión de las pautas WCAG.

#### 3.1. Contexto educativo y motivación del estudio

Este estudio se enmarca en una experiencia docente orientada a mejorar la comprensión de las pautas de accesibilidad web, las pautas WCAG (W3C, 2018) en contextos universitarios técnicos. Participaron tres universidades españolas con asignaturas de diseño web, interacción persona-ordenador y desarrollo de interfaces. El objetivo fue promover un aprendizaje activo de las pautas WCAG mediante la creación y análisis de ejemplos accesibles y no accesibles, así como estudiar la dificultad percibida, las estrategias empleadas, el uso de herramientas y la construcción conceptual del alumnado.

#### 3.2. Diseño de la actividad formativa

La actividad consistió en una tarea individual de creación de ejemplos basada en aprendizaje experiencial. Cada estudiante recibió entre tres y cuatro subcriterios WCAG y, para cada uno, elaboró un ejemplo accesible, un ejemplo no accesible, una justificación, evidencias y referencias documentales. El trabajo se desarrolló en tres fases: exploración de documentación, creación de ejemplos y cumplimentación del cuestionario de autoevaluación.

#### 3.3. Participantes y contexto institucional

El estudio se llevó a cabo en el curso 2024/25 con 81 estudiantes de tres universidades españolas (Consultar Tabla 1). Dado que cada estudiante trabajó con entre tres y cuatro criterios, el corpus analizado reúne aproximadamente 250 respuestas asociadas a criterios concretos.

**Tabla 1.** Lista de universidades, asignatura y estudiantes que han participado en el estudio. Se incluye también la cantidad de criterios asignados a cada estudiante.

| Universidad                                | Grado                                                                       | Asignatura                                    | Estudiantes | Criterios        |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|------------------|
| Universitat de Lleida (UdL)                | Grado de Diseño Digital y Nuevas Tecnología (Universitat de Lleida, 2026)   | Diseño Web                                    | 38 alumnos  | 3 por estudiante |
| Universidad Francisco de Vitoria (UFV)     | Grado en Ingeniería Informática (Universidad Francisco de Vitoria, 2026)    | Human computer interaction                    | 15 alumnos  | 4 por estudiante |
| Universidad Pontificia de Salamanca (UPSA) | Grado en Ingeniería Informática (Universidad Pontificia de Salamanca, 2026) | Diseño, evaluación y desarrollo de interfaces | 28 alumnos  | 4 por estudiante |

### 3.4. Diseño metodológico

El estudio actual sigue un enfoque cuantitativo–cualitativo basado exclusivamente en el análisis de las respuestas del cuestionario de autoevaluación cumplimentado por el estudiantado tras la realización de la actividad. Este instrumento permite capturar tanto dimensiones cuantitativas como cualitativas del aprendizaje, proporcionando una visión integral del proceso formativo. Se recogieron:

- Datos cuantitativos: mediante escalas Likert (1–5) sobre dificultad percibida, confianza, comprensión y capacidad de transferencia.
- Datos cualitativos: a través de preguntas abiertas donde el alumnado explica el criterio en sus propias palabras y reflexiona sobre su proceso de aprendizaje.

Este diseño permite analizar el aprendizaje desde una perspectiva centrada en la percepción, las estrategias utilizadas y la construcción conceptual, sin evaluar la corrección técnica de los ejemplos generados.

### 3.5. Instrumento: cuestionario de autoevaluación

El cuestionario se dividió en tres bloques: información contextual, proceso de creación y autoevaluación del aprendizaje (consultar la sección 8.1 del Anexo para ver las preguntas concretas). Se obtuvieron datos sobre dificultad, confianza, comprensión y transferencia, así como dos preguntas abiertas sobre explicación del criterio y reflexión sobre el proceso de aprendizaje.

### 3.6. Consideraciones éticas

La actividad formaba parte de una práctica puntuable de cada asignatura y los datos fueron anonimizados antes de su análisis. No se recogió información personal identificable.

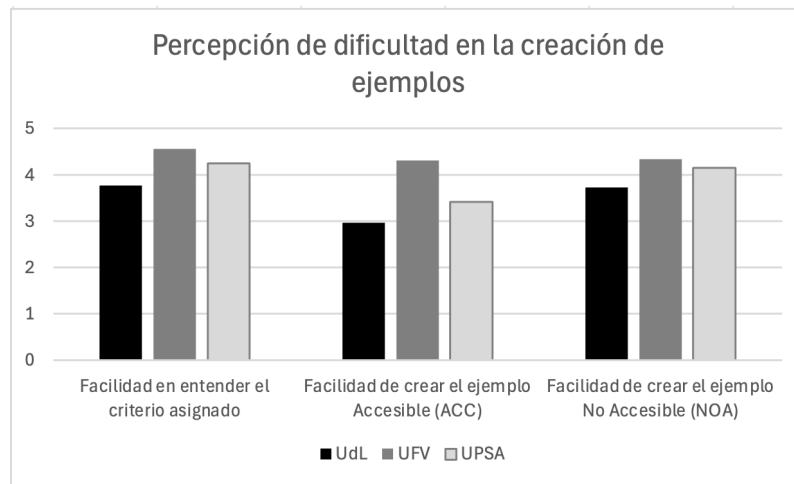
## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan las secciones que corresponden a cada pregunta de investigación.

### 4.1. Dificultad percibida en el trabajo con WCAG (RQ1)

El análisis de la dificultad percibida muestra diferencias claras entre las distintas fases del trabajo con los criterios WCAG (Consultar Figura 1). En términos generales, el estudiantado percibe que la tarea más compleja no es la comprensión del criterio, sino su aplicación práctica, especialmente en la creación de ejemplos no accesibles (NOA). En comparación, la creación de ejemplos accesibles (ACC) presenta una dificultad moderada, mientras que la comprensión inicial del criterio tiende a percibirse como la fase menos compleja. Este resultado sugiere que la dificultad no reside únicamente en la interpretación del estándar, sino en su traducción a situaciones concretas de diseño, sobre todo cuando se ha de crear un entorno no accesible. El análisis por universidad muestra variaciones en la percepción de dificultad, lo que puede estar relacionado con el perfil formativo del alumnado (diseño vs. ingeniería). Adicionalmente, la distribución de respuestas revela una variabilidad significativa en la percepción de dificultad, especialmente en la creación de ejemplos NOA, lo que indica que esta tarea depende en gran medida de factores individuales y de la interpretación del criterio.

Una revisión de las respuestas abiertas confirma este patrón: la mayor dificultad no está en comprender la definición del criterio, sino en localizar y justificar casos reales de incumplimiento.

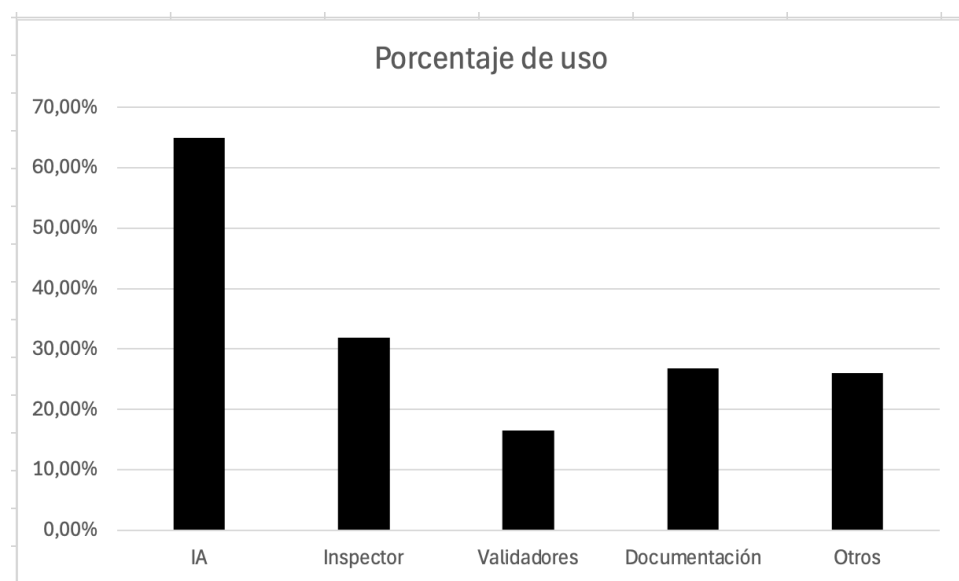


**Figura 1.** Percepción de dificultad de creación de los ejemplos de las pautas WCAG. Facilidad en entender el criterio asignado [1 = No entendí casi nada y 5 = Lo comprendí con claridad]; Facilidad de crear el ejemplo Accesible (ACC) y No Accesible (NOA) [1 = Muy difícil y. 5 = Muy fácil]

#### 4.2. Estrategias, herramientas y proceso de creación (RQ2)

Se identifican tres estrategias principales: búsqueda de ejemplos reales, creación propia basada en documentación y uso de herramientas, incluida IA. Las herramientas se codificaron en cinco categorías no excluyentes: IA, inspección/prueba manual, validadores específicos, documentación y otros recursos de apoyo (Consultar la Tabla 2 en la sección 8.2 del Anexo).

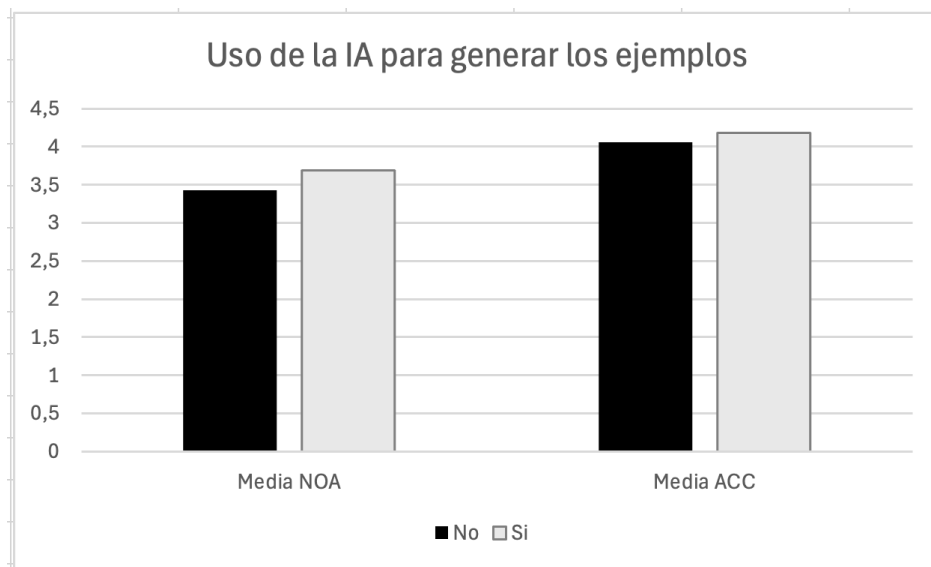
Los resultados muestran que las categorías más frecuentes son la inteligencia artificial y las herramientas de inspección/prueba manual, seguidas por la documentación y los validadores específicos (Consultar Figura 2). Este patrón sugiere que el aprendizaje no se apoya en una única fuente, sino en combinaciones de recursos que permiten alternar comprensión conceptual, exploración de código y contraste con casos reales.



**Figura 2.** Uso declarado de herramientas y recursos durante la creación de ejemplos WCAG

El uso de IA se asocia con una menor dificultad percibida en la creación de ejemplos. En los ejemplos NOA, la facilidad media aumenta de 3.43 a 3.69 (+0.26), mientras que en ACC pasa de 4.06 a 4.18

(+0.12). Estos datos sugieren que la IA resulta especialmente útil en tareas con mayor dificultad inicial, aunque su efecto parece centrarse más en reducir la fricción de entrada que en consolidar una comprensión más profunda (Consultar la Figura 3).

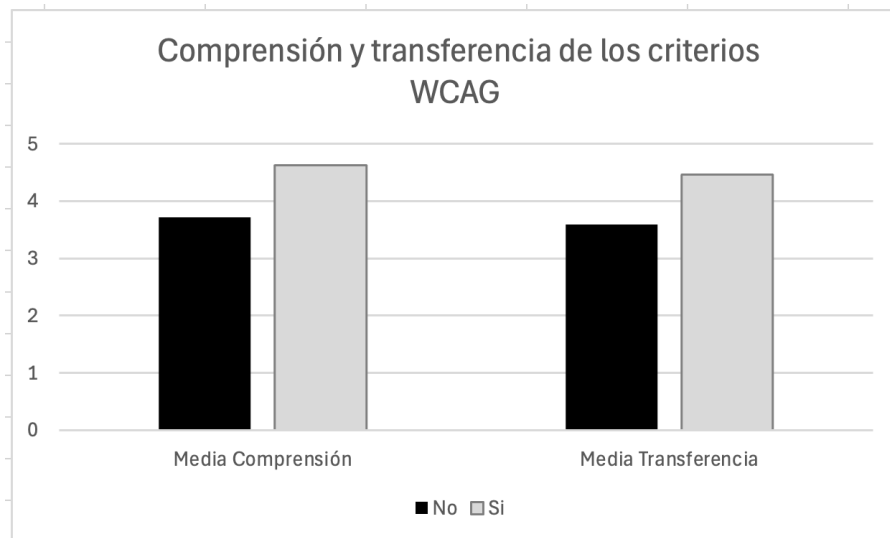


**Figura 3.** Uso de IA y facilidad en la creación de ejemplos (3.3. ¿Fue fácil o difícil crear el ejemplo accesible (ACC) y No accesible (NOA)? (1 = Muy difícil y 5 = Muy fácil)

#### 4.3. Confianza en la comprensión y capacidad de transferencia (RQ2)

El análisis de las variables de autoevaluación indica que el estudiantado presenta niveles relativamente altos de percepción de comprensión y transferencia de los criterios WCAG. En concreto, la comprensión percibida alcanza una media de 4,62 sobre 5 (pregunta 3.5: “¿En qué medida comprendes para qué sirve este criterio en la práctica?”), mientras que la capacidad de transferencia obtiene una media de 4,46 sobre 5 (pregunta 3.6: “¿Podrías aplicar este criterio en otro proyecto o web distinta?”). Al desagregar los resultados según la confianza del estudiantado en la corrección de sus ejemplos (pregunta 3.4. ¿Qué seguridad tienes de que tus ejemplos son correctos? 1 = No estoy seguro y 5 = Totalmente seguro), se observa una brecha relevante: aquellos estudiantes con menor seguridad muestran valores más bajos tanto en comprensión (3,71 sobre 5) como en transferencia (3,5 sobre 5), frente a quienes sí confían en sus respuestas (Consultar la Figura 4).

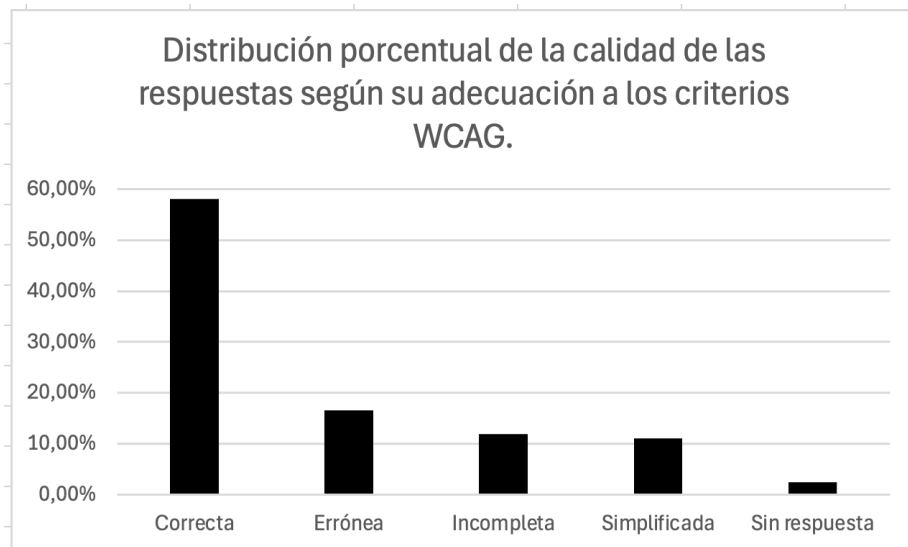
Estos resultados sugieren que, aunque la percepción global es positiva, la falta de confianza se asocia con una menor consolidación real de la comprensión y la capacidad de aplicación, evidenciando la necesidad de reforzar estrategias que mejoren la seguridad del alumnado en contextos prácticos.



**Figura 4.** Confianza en la comprensión y transferencia de los criterios WCAG (3.4. ¿Qué seguridad tienes de que tus ejemplos son correctos? 1 = No estoy seguro y 5 = Totalmente seguro)

#### 4.4. Análisis cualitativo de las respuestas abiertas (RQ3)

El análisis de las respuestas abiertas permite identificar patrones conceptuales en la forma en que el estudiantado interpreta y explica los criterios WCAG. Las respuestas abiertas fueron organizadas en cuatro categorías (correcta, simplificada, incompleta y errónea), en función de su adecuación conceptual al criterio WCAG correspondiente. Las respuestas en blanco se clasificaron como ausencia de respuesta (Consultar Figura 5).



**Figura 5.** Distribución porcentual de la calidad de las respuestas según su adecuación a los criterios WCAG.

El 58.10% de las respuestas se clasificó como correcto, frente a un 39.53% de respuestas simplificadas, incompletas o erróneas, lo que indica una comprensión mayoritaria, aunque no plenamente consolidada. El alumnado suele captar la finalidad práctica (“que se entienda”, “que se pueda usar”, “que no dependa solo del color”), pero no siempre conserva con claridad el alcance técnico específico del subcriterio. Este resultado refuerza la idea de que la enseñanza de las WCAG requiere trabajar no solo el “qué” del criterio, sino también sus límites, matices y relación con otros criterios cercanos.

#### **4.5. Análisis cualitativo de las observaciones personales**

Las observaciones personales muestran tres patrones principales: comprensión de la accesibilidad como cuestión estructural y no solo visual, desarrollo de empatía hacia personas usuarias con discapacidad y dificultad para localizar ejemplos reales no accesibles. También se valoran positivamente la comparación ACC/NOA, el uso de herramientas y la experimentación práctica. Con el fin de profundizar en estos matices, la Tabla 3 (consultar la sección 8.3 del Anexo) presenta un análisis cualitativo ampliado con la distribución de los patrones por universidad.

En conjunto, las observaciones personales muestran que el aprendizaje de las WCAG no es únicamente un proceso técnico, sino también interpretativo y reflexivo. El alumnado no solo aplica criterios, sino que reconstruye progresivamente su comprensión a través de la práctica, la comparación y la interacción con herramientas, desarrollando al mismo tiempo una mayor conciencia del impacto real de la accesibilidad.

#### **4.6. Síntesis de resultados**

En síntesis, el aprendizaje de las WCAG según el trabajo de investigación llevado a cabo, se organiza en una secuencia basada en la taxonomía de Bloom (Bloom, 1971) que combina comprensión inicial, fricción cognitiva, apoyo en herramientas, experimentación y reconstrucción del modelo mental, tal como se resume en la Figura 6. El modelo de aprendizaje de la accesibilidad basado en el análisis cualitativo de las observaciones del alumnado, parte de la exposición inicial a los criterios, pasa por una fase de fricción cognitiva y se activa mediante la experimentación práctica, lo que favorece la comprensión estructural de la accesibilidad. Este proceso conduce a un cambio en el modelo mental del alumnado, promueve el desarrollo de empatía hacia las personas usuarias y culmina en la transferencia a contextos profesionales. En este proceso, se incluyen factores facilitadores, barreras y elementos compensatorios como el uso de herramientas o IA que minimizan la complejidad de la tarea.

El modelo de aprendizaje presentado en la Figura 6 ha surgido a raíz de observar las actividades y tareas que han realizado los alumnos y refleja la forma en la que estos aprenden e interiorizan los aspectos relacionados con las pautas WCAG.

### **5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

Este trabajo analiza cómo el alumnado aprende accesibilidad web mediante una actividad basada en la creación y evaluación de ejemplos accesibles y no accesibles de criterios WCAG. Los resultados muestran que la principal dificultad no reside en la comprensión inicial del criterio, sino en su aplicación práctica, especialmente en la identificación y justificación de ejemplos no accesibles. Asimismo, el estudio evidencia un cambio desde una visión visual de la interfaz hacia una comprensión estructural basada en semántica, comportamiento e interpretación por tecnologías de asistencia. El uso de herramientas, incluida la inteligencia artificial, reduce la dificultad percibida, aunque no garantiza una comprensión más profunda. Además, la relación positiva entre comprensión y transferencia confirma la importancia de una base conceptual sólida para aplicar el conocimiento en nuevos contextos. Como línea futura, se plantea complementar este enfoque con la evaluación de la corrección técnica de los ejemplos y profundizar en las diferencias entre perfiles disciplinares.

## Modelo de aprendizaje de la accesibilidad en el alumnado



**Figura 6.** Modelo de aprendizaje de la accesibilidad en el alumnado.

**Agradecimientos:** Los autores desean agradecer a los estudiantes que han participado en la actividad y en la recogida de datos, cuya colaboración ha sido fundamental para el desarrollo de este estudio.

## 6. REFERENCIAS

- Abou-Zahra, S., & Education and Outreach Working Group (EOWG). (2012). Before and after demonstration (bad example). World Wide Web Consortium (W3C). <https://www.w3.org/WAI/demos/bad/>
- Acosta-Vargas, P., Salvador-Ullauri, L., & Luján-Mora, S. (2023). A systematic review of web accessibility evaluation tools. *Universal Access in the Information Society*. <https://doi.org/10.1007/s10209-022-00932-6>
- Ahmetovic, D., et al. (2021). Accessibility issues in modern web development: Practices and challenges. *International Journal of Human-Computer Studies*.
- Alsaeedi, A. (2020). Comparing web accessibility evaluation tools and evaluating the accessibility of webpages: Proposed frameworks. *Information*, 11(1), 40. <https://doi.org/10.3390/info11010040>
- Ballesteros, E., Ribera, M., Pascual, A., & Granollers, T. (2015). Reflections and proposals to improve the efficiency of accessibility efforts. *Universal Access in the Information Society*, 14, 583–586. <https://doi.org/10.1007/s10209-014-0356-1>
- Bloom, B. S. (1971). *Taxonomía de los objetivos de la educación*. El Ateneo.
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2021). EN 301 549 V3.2.1: Accessibility requirements for ICT products and services. [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/301500\\_301599/301549/03.02.01\\_60/en\\_301549v030201p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301549/03.02.01_60/en_301549v030201p.pdf)
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410–8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- Fundación ONCE. (2022). Formación curricular en accesibilidad y diseño para todas las personas en titulaciones técnicas relacionadas con las TIC. <https://biblioteca.fundaciononce.es/publicaciones/otras-editoriales/coleccion-accesibilidad/formacion-curricular-en-accesibilidad-y>
- Kane, S. K., Ladner, R. E., & Wobbrock, J. O. (2019). Accessible design for all: Understanding the role of accessibility in human-computer interaction. *Communications of the ACM*, 62(6), 62–71. <https://doi.org/10.1145/3310334>
- Kolb, D. A. (2015). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development* (2nd ed.). Pearson Education.
- Martins, B., & Duarte, C. (2024). A large-scale web accessibility analysis considering technology adoption. *Universal Access in the Information Society*, 23, 1857–1872. <https://doi.org/10.1007/s10209-023-01010-0>
- Parthasarathy, P. D., Adler, R. F., Kletenik, D., Joshi, S., & Mittal, A. M. (2025). Skill, will, or both? Understanding digital inaccessibility from accessibility professionals' viewpoint. In *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–9).
- Pascual-Almenara, A., & Granollers Saltiveri, T. (2025). Improve communication of accessibility web barriers with an empathetic perspective to enhance the accessible user experience (AUX). *Universal Access in the Information Society*, 24, 3143–3163. <https://doi.org/10.1007/s10209-025-01188-5>

- Pascual-Almenara, A., Pedrero-Esteban, A., & Bautista, S. (2025) Evaluación de la comprensión de las pautas WCAG 2.1: Análisis de ejemplos prácticos en tres universidades españolas / Evaluation of the comprehension of WCAG 2.1 guidelines: Analysis of practical examples in three Spanish universities. Congreso Interacción 2025.
- Petrie, H., Savva, A., & Power, C. (2018). Towards a unified definition of web accessibility. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173823>
- Putnam, C., Wozniak, K., Zefeldt, M., & Cheng, J. (2012). How do professionals who create computing technologies consider accessibility? Proceedings of the ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS).
- Renkl, A. (2014). Toward an instructionally oriented theory of example-based learning. *Cognitive Science*, 38(1), 1–37. <https://doi.org/10.1111/cogs.12086>
- Shinohara, K., et al. (2018). Accessibility in computing education: Barriers and opportunities. Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Unión Europea. (2019). Directiva (UE) 2019/882 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de abril de 2019, sobre los requisitos de accesibilidad de los productos y servicios. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32019L0882>
- Universidad Francisco de Vitoria, Guía docente de la asignatura Human Computer Interaction, 2026. URL: [https://notas.ufv.es/documentos/gd/5633\\_p.pdf](https://notas.ufv.es/documentos/gd/5633_p.pdf) (recuperado en junio de 2026)
- Universidad Pontificia de Salamanca, Guía docente de la asignatura Diseño, evaluación y desarrollo de interfaces, 2026. URL: [https://adminpro.upsa.es/uploads/Diseno\\_Interfaces\\_Guia\\_Docente\\_Informatica\\_21\\_22\\_a6a5ba40ef.pdf](https://adminpro.upsa.es/uploads/Diseno_Interfaces_Guia_Docente_Informatica_21_22_a6a5ba40ef.pdf) (recuperado en junio de 2026)
- Universitat de Lleida, Guía docente de la asignatura Diseño Web del Grado Diseño Digital y nuevas tecnologías, 2024 26. URL: [https://guiadocent.udl.cat/es/html/2024-25\\_102184](https://guiadocent.udl.cat/es/html/2024-25_102184) (recuperado en junio de 2026)
- W3C Web Accessibility Initiative (WAI). (2023). Web Accessibility Initiative (WAI). <https://www.w3.org/WAI/>
- WebAIM. (2026). The WebAIM Million. <https://webaim.org/projects/million/>
- World Wide Web Consortium (W3C). (2018). Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2. <https://www.w3.org/TR/WCAG22/>
- World Wide Web Consortium (W3C). (2026). Web accessibility laws & policies. <https://www.w3.org/WAI/policies/>
- Yesilada, Y., Brajnik, G., Vigo, M., & Harper, S. (2015). Exploring perceptions of web accessibility: A survey approach. *Behaviour & Information Technology*, 34(2), 119–134. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2013.848238>
- Zhang, X., et al. (2022). Understanding accessibility education in computing curricula. *ACM Transactions on Computing Education*.

## ANEXO

A continuación, se incluyen diversos apartados con información relacionada del artículo

### Lista de preguntas de la encuesta

Dirección web para cumplimentar el cuestionario: <https://forms.gle/KBPPeD6stHUsrvET8>

#### 1. Información básica

- 1.1. Añade la dirección (URL) del ejemplo del criterio WCAG que has creado en la wiki:
- 1.2. Incluye el criterio que has creado en la wiki:
- 1.3. Incluye el subcriterio que has creado en la wiki:
- 1.4. Incluye la dirección web del subcriterio de la wiki (consultar: <https://www.wikiwcag.udl.cat/index.php/>):
- 1.5. Indica el nombre de tu universidad o curso:
- 1.6. Incluye tu nombre de usuario de la wiki:

#### 2. Aporte personal

##### 2.1. Proceso de creación:

Explica cómo has generado los ejemplos. Analiza brevemente tu metodología (investigación, creación propia, uso de IA, etc.):

##### 2.2. Herramientas usadas:

Indica herramientas de evaluación, editores, IA o validadores que utilizaste:

##### 2.3. Referencias complementarias:

Incluye solo las que te hayan ayudado realmente a entender el criterio o crear el ejemplo.  
(Indica una herramienta o referencia por cada línea)

#### 3. Autoevaluación del aprendizaje

- 3.1. ¿Fue fácil o difícil entender el criterio? 1 = No entendí casi nada | 5 = Lo comprendí con claridad
- 3.2. ¿Fue fácil o difícil crear el ejemplo no accesible (NOA)? 1 = Muy difícil | 5 = Muy fácil
- 3.3. ¿Fue fácil o difícil crear el ejemplo accesible (ACC)? 1 = Muy difícil | 5 = Muy fácil
- 3.4. ¿Qué seguridad tienes de que tus ejemplos son correctos? 1 = No estoy seguro | 5 = Totalmente seguro
- 3.5. ¿En qué medida comprendes para qué sirve este criterio en la práctica? 1 = No entiendo su utilidad | 5 = Puedo explicar claramente por qué es útil
- 3.6. ¿Podrías aplicar este criterio en otro proyecto o web distinta? 1 = No sabría hacerlo | 5 = Podría hacerlo sin problema
- 3.7. Explica este criterio como si se lo explicarás a un compañero: Resume el criterio con tus propias palabras:
- 3.8. Observaciones personales:  
Qué aprendiste, qué te costó más, qué te resultó útil:

## Diccionario de categorías de herramientas usadas por los alumnos

Las herramientas que utilizaron los alumnos para llevar a cabo la actividad de creación de ejemplos accesibles y no accesibles de las pautas WCAG, se codificaron en cinco categorías no excluyentes: IA, inspección/prueba manual, validadores específicos, documentación y otros recursos de apoyo

**Tabla 2.** Diccionario de categorías para la codificación de herramientas

| <b>Categoría</b>                           | <b>Descripción</b>                                                                                                                     | <b>Términos incluidos en las respuestas de los alumnos</b>                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inteligencia artificial (IA)               | Uso de sistemas de generación o asistencia automatizada durante el proceso de aprendizaje o creación de ejemplos                       | IA, inteligencia artificial, ChatGPT, Gemini, Gemini Pro, Google Gemini, Claude, Claude Code, Copilot, Grok, chatbot(s), asistente de IA                                                                                                                                                                 |
| Herramientas de inspección y prueba manual | Exploración directa del código o evaluación manual de la interfaz mediante herramientas del navegador o interacción sin automatización | inspector, inspección, inspeccionar, DevTools, Chrome DevTools, Web Element Inspector, herramientas de desarrollo, developer tools, browser developer tools, F12, DOM, navegador, tabulación, teclado, navegación por teclado, keyboard-only testing                                                     |
| Validadores y herramientas específicas     | Herramientas diseñadas para evaluar accesibilidad o validar aspectos técnicos de forma automatizada o asistida                         | WAVE, WAVE Evaluation Tool, HeadingsMap, Web Developer, Web Developer Toolbar, CCA, Colour/Color Contrast Analyser, contrast checker, Accessibility Insights, validator, validador, Markup Validator, Validation Service, Rastreador OAW, PEAT, NVDA, VoiceOver, lector de pantalla, Circles Bookmarklet |
| Documentación                              | Fuentes teóricas, normativas o materiales de apoyo utilizados para comprender los criterios WCAG                                       | WCAG, WCAG Wiki, Wiki WCAG, WikiWCAG, W3C, OAW, Observatorio, guía(s), documentación oficial, PDF(s), Moodle, PAe, página de la asignatura                                                                                                                                                               |
| Otros recursos de apoyo                    | Herramientas auxiliares no específicas de accesibilidad utilizadas durante el proceso de trabajo                                       | VS Code, Visual Studio Code, Visual Studio, editor de texto, editor básico, Word, Google Docs, Google Forms, smartphone, cronómetro, capturas, recortes, Photoshop, Live Server, CodePen                                                                                                                 |

### Análisis cualitativo de las respuestas de los alumnos

Análisis cualitativo ampliado con la distribución de los patrones por universidad obtenidos de las respuestas cualitativas de los alumnos.

**Tabla 3.** Análisis cualitativo ampliado de las observaciones del alumnado. Universitat de Lleida (UdL), Universidad Francisco de Vitoria (UFV) y Universidad Pontificia de Salamanca (UPSA).

| Dimensión                   | Patrón observado                             | Ejemplos de contenido                | UdL (Diseño Web)      | UFV (HCI)                      | UPSA (Interfaces)      |
|-----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------|
| Aprendizaje conceptual      | Accesibilidad como estructura, no apariencia | semántica HTML, DOM, foco, contraste | Frecuente, progresivo | Frecuente, orientado a usuario | Muy frecuente, técnico |
| Aprendizaje técnico         | Relación criterio–implementación             | labels, ARIA, teclado                | Variable              | Medio                          | Alto nivel técnico     |
| Cambio de modelo mental     | Visual → estructural                         | “el código importa”                  | Presente              | Marcado                        | Muy marcado            |
| Conciencia y empatía        | Barreras reales de uso                       | discapacidad, lectores pantalla      | Fuerte                | Muy fuerte (UX)                | Técnica                |
| Percepción de lo invisible  | Elementos no visibles                        | aria-live, idioma, foco              | Emergente             | Moderado                       | Muy desarrollado       |
| Dificultades principales    | Encontrar ejemplos NOA                       | “no encontraba casos”                | Muy frecuente         | Frecuente                      | Muy frecuente          |
| Dificultades conceptuales   | Interpretación WCAG                          | niveles, ARIA                        | Altas                 | Moderadas                      | Moderadas              |
| Dificultades técnicas       | Implementación                               | código                               | Altas                 | Bajas-medias                   | Moderadas              |
| Dificultades instrumentales | Uso de la wiki                               | formato, subida                      | Altas                 | Bajas                          | Bajas                  |
| Recursos: comparación       | ACC vs NOA                                   | contraste                            | Muy valorado          | Muy valorado                   | Muy valorado           |
| Recursos: herramientas      | Herramientas análisis                        | WAVE, inspector                      | Frecuente             | Frecuente                      | Muy frecuente          |
| Recursos: experimentación   | Práctica activa                              | teclado, zoom                        | Frecuente             | Frecuente                      | Frecuente              |
| Apoyo externo               | IA y documentación                           | ChatGPT, guías                       | Alto                  | Medio                          | Bajo                   |
| Transferencia               | Aplicación futura                            | “lo usaré”                           | Presente              | Muy presente                   | Presente               |
| Valoración                  | Utilidad percibida                           | profesional                          | Alta                  | Muy alta (UX)                  | Alta (técnica)         |

## Posicionamiento en interiores utilizando Bluetooth para la detección y el análisis de interacciones sociales

### *Indoor positioning using Bluetooth for the detection and analysis of social interactions*

<sup>(1)</sup> José J. González-García <sup>[0009-0000-2651-0621]</sup>, <sup>(1)</sup> Luis Zhinin-Vera <sup>[0000-0002-6505-614X]</sup>, <sup>(1,2)</sup> Víctor López-Jaquero <sup>[0000-0002-0902-9681]</sup>, <sup>(1,2)</sup> Francisco Montero <sup>[0000-0002-0902-9681]</sup>, <sup>(1,2)</sup> Pascual González <sup>[0000-0003-3549-5712]</sup>

<sup>(1)</sup> Albacete Research Institute of Informatics, University of Castilla-La Mancha, C/ Investigación, 2, Albacete, 02071, Castilla-La Mancha, Spain, josejesus.gonzalez@uclm.es

<sup>(2)</sup> LoUISE Research Group, Computing Systems Department, Campus Universitario, s/n, Albacete, 02071, Castilla-La Mancha, Spain

**Resumen.** Las interacciones sociales son esenciales para la cohesión social y el bienestar individual. Aunque la transformación digital ha permitido analizar grandes volúmenes de datos, aún faltan herramientas eficaces para estudiar estas interacciones de forma natural. Este artículo presenta un sistema capaz de medir tanto la cantidad como la calidad de las interacciones en diferentes contextos, usando la proxémica y la psicología cognitiva. Mediante el uso de la tecnología Bluetooth de los smartwatches, ha sido posible estimar la posición y dirección relativa de los dispositivos, sin necesidad de balizas, con el fin de procesar y comprender las interacciones entre las personas en diferentes contextos sociales. La herramienta se ha implementado en un sistema de gestión de conferencias científicas. Su objetivo es mejorar la experiencia de los participantes a través de la interacción entre el smartwatch y el usuario, lo que permite al organizador comprender los intereses de cada participante y entender la complejidad de las interacciones y la organización de su evento. Por último, se llevó a cabo una evaluación con sociólogos y usuarios potenciales, en la que se valoró la usabilidad y su opinión sobre las diferentes funciones de interacción y medición.

**Palabras clave:** Smartwatch, Interacción social, Posicionamiento en interiores, Posicionamiento Bluetooth.

**Abstract.** Social interactions are essential for social cohesion and individual well-being. Although the digital transformation has made it possible to analyze large volumes of data, there is still a lack of effective tools for studying these interactions

in a natural setting. This article presents a system capable of measuring both the quantity and quality of interactions in different contexts, using proxemics and cognitive psychology. By utilizing Bluetooth technology in smartwatches, it has been possible to estimate the relative position and direction of the devices—without the need for beacons—in order to process and understand interactions between people in different social contexts. The tool has been implemented in a scientific conference management system. Its goal is to enhance the participants' experience through interaction between the smartwatch and the user, enabling the organizer to identify each participant's interests and understand the complexity of interactions and the organization of their event. Finally, an evaluation was conducted with sociologists and potential users, in which usability was assessed and their opinions on the various interaction and measurement features were gathered.

**Keywords:** Smartwatch, Social interaction, Indoor positioning, Bluetooth positioning.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las interacciones sociales constituyen un aspecto fundamental de las relaciones humanas, especialmente en lo que respecta a la cohesión social y al bienestar individual (Berkman et al., 2000; House et al., 1988; Macdonald et al., 2021). A lo largo de los años, las interacciones sociales se han estudiado ampliamente desde múltiples perspectivas teóricas y empíricas, revelando su papel central en la comunicación, la cooperación y el desarrollo de vínculos emocionales (Baumeister & Leary, 1995; Goffman, 1956; Helliwell & Putnam, 2004; House et al., 1988; Teubner & Stockhinger, 2020). Sin embargo, existen pocas herramientas, estándares y métricas que permitan estudiarlas de forma natural. Esta carencia se hace aún más evidente en el contexto de la interacción persona-ordenador, un campo que ha adquirido una importancia considerable debido a la creciente digitalización y que puede funcionar como motor para orientar la medición de las interacciones, ya que las métricas tradicionales, como la frecuencia de los mensajes o el tiempo de respuesta, ofrecen una visión limitada (Teubner & Stockhinger, 2020).

Es por esto por lo que comprender adecuadamente el contexto social posee especial importancia en entornos como las aulas escolares, oficinas y los grandes eventos sociales, donde las interacciones son demasiado numerosas y complejas como para estudiarlas de forma individual (Macdonald et al., 2021). Comprender estas interacciones es esencial, ya que dichos espacios van más allá del simple intercambio de información: fomentan el sentido de pertenencia, el apoyo y la colaboración (Blinkoff et al., 2023; Macdonald et al., 2021; Sciortino, 2018). Por ejemplo, en entornos escolares, las interacciones sociales poseen una influencia particular en la salud mental, la autoestima y las funciones ejecutivas de los estudiantes (Umberson & Montez, 2010). Por esta razón, no basta solo con que los gestores, profesores o expertos midan únicamente la asistencia o la participación, sino también se ha de medir, de manera óptima, la calidad de las interacciones y vínculos sociales, idealmente a través de sistemas no invasivos que protejan el anonimato y la seguridad de los datos.

Por lo tanto, en este artículo se presenta una herramienta de detección e interpretación de interacciones sociales. Esta herramienta permite a un experto o al administrador de un evento

evaluar la calidad, la duración y el contexto de las interacciones sociales en un entorno social a gran escala. Este sistema permite a dichos mediadores, a los participantes y a todas las personas involucradas en estas interacciones sociales comprender su entorno, creando un espacio óptimo para una mejor convivencia. A efectos de este artículo, la herramienta se enmarca como un sistema diseñado para funcionar dentro de un contexto operativo específico: las conferencias científicas. Así, la herramienta permite a los gestores de conferencias identificar tendencias y áreas populares, recopilando información importante sobre los participantes, lo que más o menos les gustó, los lugares o salas de conferencias más concurridos y la calidad de las interacciones medidas. No obstante, como se ha mencionado anteriormente, el sistema es aplicable a otros escenarios relevantes, como los entornos escolares y laborales. El uso de sistemas embebidos, para entornos como patios y escuelas, puede permitir entender estas interacciones, detectando comportamientos más complejos y negativos, como el bullying, a través de teorías como la Teoría de la Mente (Tirapu-Ustárrroz et al., 2007).

## **2. PERSPECTIVAS TEÓRICAS SOBRE LA INTERACCIÓN SOCIAL**

### **2.1. El concepto de interacción social**

Existen diversos conceptos e interpretaciones sobre el significado y la importancia de las relaciones sociales, que resultan necesarios para crear una herramienta que ayude a comprender e interpretar dichas interacciones. Es fundamental comprender que las interacciones sociales están influenciadas, no solo por las personas implicadas, sino también por su cultura, su contexto social y sus intenciones (Goffman, 1956, 1967). Según la Asociación Americana de Psicología (APA), el comportamiento social es una acción que se ve influida, directa o indirectamente, por la presencia real, imaginada, esperada o implícita de otras personas, incluso en contextos de desarrollo de la cooperación, la competencia y la influencia del estatus, particularmente en la dinámica del comportamiento grupal, el liderazgo y la conformidad (American-Psycological-Association, 2023a, 2023b). Así, desde el punto de vista sociológico, las interacciones sociales pueden definirse como un conjunto de influencias recíprocas que se desencadenan en cualquier situación en la que dos o más individuos se encuentran en proximidad física inmediata (Goffman, 1956).

### **2.2. Interpretación de la psicología cognitiva**

#### *2.2.1. Identificación de las interacciones sociales*

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, con el objetivo de entender cómo se estructuran las interacciones sociales, ya que se pretende que el sistema entienda cómo las identifica nuestro cerebro (Pfeiffer et al., 2013). Es por esto por lo que el sistema está basado en los conceptos propuestos por la psicología cognitiva, campo fundamental para mejorar las capacidades de la interacción persona-ordenador, ya que permite comprender los diferentes componentes físicos de la interacción social, con especial referencia a estudios de gran relevancia como la "Teoría de la mente" (Tirapu-Ustárrroz et al., 2007). La psicología cognitiva divide las interacciones sociales en tres primitivas sociales, fundamentales para el desarrollo del sistema, y han de ser identificadas en

tiempo real. Estas primitivas son señales visuales que ayudan al sistema visual humano a inferir si dos o más agentes están interactuando (McMahon & Isik, 2023):

1. **La distancia a la que se produce la interacción:** La distancia a la que se encuentran las personas dentro de esa interacción.
2. **La dirección de la mirada:** La dirección en la que miran y se orientan durante una interacción.
3. **Movimiento contingente:** Representa la relación interactiva entre los participantes, dependiendo de cómo el movimiento de un participante depende del de otro. Por ejemplo, caminar juntos hacia un punto.

Además, se categorizan distintos componentes de las interacciones sociales, que permiten entender qué tipo de interacción está ocurriendo y la relación social entre los agentes. Estos componentes son tres, y permiten a un sistema identificar estas interacciones de manera más natural (McMahon & Isik, 2023):

1. **Interacción física:** Se refiere a las interacciones físicas directas, como empujar o tocar, que definen el contexto de una interacción (amistad, conflicto, etc.).
2. **Interacción comunicativa:** Interacciones que consisten en intercambios de información, como el habla, los gestos o las expresiones, que son esenciales para transmitir mensajes y emociones.
3. **Compatibilidad de objetivos:** Se refiere a las intenciones subyacentes, que pueden centrarse en cooperar con la otra persona o en obstaculizarla.

#### 2.2.2. La teoría de la proxémica

Por lo tanto, el sistema debe ser capaz de comprender y clasificar estas interacciones sociales identificando sus elementos básicos subyacentes. Por este motivo, es esencial comprender la proxémica. La proxémica se refiere al estudio de cómo las personas utilizan el espacio en sus relaciones con los demás (RAE, 2024). Este campo de estudio, que se enmarca en el ámbito de la sociología, examina las relaciones que las personas establecen con los demás. Así, es posible analizar la naturaleza de la interacción y la relación que las personas tienen con aquellos con quienes interactúan, en función de las distancias que mantienen durante las interacciones sociales (Hall, 1990). Por lo tanto, cuando se producen interacciones, uno de los elementos más significativos que hay que identificar es la distancia que mantienen los individuos en éstas y cómo estas varían según la cultura y el contexto (Hall, 1990). Como se observa en la Figura 1, los diferentes espacios o zonas alrededor de un individuo están definidos psicológicamente y pueden cambiar en función del tipo de encuentro y de la relación que mantengan los participantes (Hall, 1990). En un contexto cultural de Europa Occidental, el cual ha sido utilizado para el presente sistema, las distancias pueden definirse de la siguiente manera:

- **Distancia íntima:** Esta distancia oscila entre el contacto físico y unos cuarenta o cuarenta y cinco centímetros. Se reserva para interacciones cercanas o personales, como abrazos, susurros o confidencias.
- **Distancia personal informal:** De 45 centímetros a 1,2 metros. Esta distancia se asocia a conversaciones con amigos y conocidos, en las que se mantiene la cercanía, pero con un cierto espacio personal.

- **Distancia social-consultiva:** De un metro veinte centímetros a tres metros sesenta centímetros. Esta distancia de interacción se da en situaciones menos íntimas, como reuniones de trabajo o con conocidos con los que no se tiene mucha confianza. Reservada para una mayor formalidad, es una distancia que no "invade" el espacio personal de la persona.
- **Distancia pública:** A partir de tres metros y sesenta centímetros. Esta distancia se utiliza en situaciones formales o interacciones en las que participan muchas personas. Estas interacciones suelen ser impersonales y formales, adecuadas para discursos o charlas en grupos grandes.

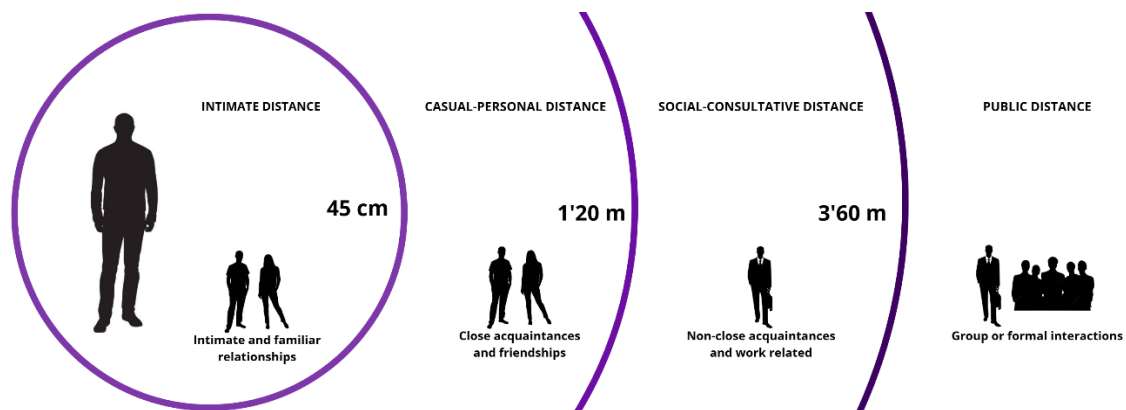


Figura 1. Interacciones de la teoría de la proxémica basadas en las distancias.

### 3. SISTEMA DE DETECCIÓN DE INTERACCIONES

#### 3.1. Objetivos y definición del sistema

El sistema ha sido diseñado para identificar las interacciones sociales en eventos con gran afluencia de personas, de manera que este clasifica la calidad, duración y evolución de las interacciones mediante la aplicación de los conceptos descritos en la Sección 2.2. El objetivo principal de este proyecto radica, sobre todo, en la necesidad de contar con una herramienta que permita estudiar las interacciones y relaciones que tienen lugar en diferentes entornos de una forma mínimamente invasiva. Para ello, se hace uso de los sensores Bluetooth que poseen los smartwatches, para determinar y mostrar gráficamente la posición de los usuarios en espacios de interior sin necesidad de utilizar balizas. Los datos recopilados se procesan en un ecosistema de microservicios y se envían a una aplicación web, donde se representan las posiciones y las interacciones en tiempo real a través de un mapa y diversos gráficos. El uso de smartwatch permite no solo aprovechar los sensores avanzados disponibles en los dispositivos comerciales, sino también llevar a cabo un análisis exhaustivo de forma no intrusiva, reduciendo así la incomodidad y preservando la naturalidad de los comportamientos de los participantes (Arakawa, 2018; Fuller et al., 2020). De este modo, al realizar una observación indirecta, se interfiere lo menos posible en el comportamiento de los usuarios, obteniendo así resultados lo más realistas posible.

### 3.2. Cálculo de la posición interior

La parte fundamental del sistema es el cálculo de las distancias entre las personas y su posicionamiento en un espacio relativo. El sistema permite el posicionamiento en interiores de dispositivos smartwatch, localizando a los usuarios sin necesidad de balizas. Para poder calibrar correctamente el sistema, es esencial tomar un dispositivo como centro relativo a los demás dispositivos. Para ello, se establece uno de los dispositivos como punto de partida, con coordenadas [0,0], y el resto de los dispositivos se posicionan en relación con él. La posición del dispositivo se calcula utilizando la intensidad de la señal (RSSI) Bluetooth de los dispositivos. El sistema infiere, a través de la información obtenida de todos los dispositivos, la distancia media que hay entre ellos para, posteriormente, obtener una matriz de distancias y unas coordenadas en un entorno relativo.

Hay que tener en cuenta que, al tratarse de dispositivos con señales Bluetooth de baja intensidad (BLE), existen problemas de interferencias y potencia insuficiente. Como solución, el sistema utiliza valores promedios y filtros para eliminar el ruido. Durante un breve periodo de tiempo, se recogen los valores de intensidad de señal de cada dispositivo para calcular la media de dichos valores. Mediante la siguiente fórmula el sistema obtiene un valor que indica, a partir de la intensidad de la señal en dBm, la distancia en metros (Wajgi et al., 2024). La fórmula es:

$$10^{\frac{RSSIo - RSSIm}{10n}}$$

Donde:

- **RSSIo** es la intensidad de señal calibrada, medida a un metro de distancia.
- **RSSIm** es la media de los valores de RSSI obtenidos durante un breve periodo de tiempo.
- **n** es una variable de "entorno", que se ajusta en función del número de interferencias, el número de señales en el entorno y el ruido en la ubicación donde se llevará a cabo la sesión.

El resultado es una matriz de distancias. Sin embargo, el resultado no es una matriz simétrica, debido al ruido en las lecturas de intensidad de cada dispositivo, por lo que no se puede utilizar directamente para localizarlos en el espacio, y se requiere cierto procesamiento para sintetizarla. Este proceso se realiza en la capa de microservicios, durante la fase de procesamiento:

1. Por cada dispositivo, a partir de las matrices de distancia obtenidas en las iteraciones anteriores y la más reciente calculada, se obtienen las últimas cuatro matrices de distancia.
2. Se calcula una matriz media a partir de las distancias de todos los dispositivos. Para ajustar y eliminar ruido, se pondera con las últimas cuatro matrices calculadas, asignado ponderaciones a estas, de modo que su peso se reduce en función de su fecha y hora de creación (más reciente, más peso en la ponderación).
3. La matriz obtenida se simetriza, sumándola a su transpuesta y dividiendo el resultado entre dos.
4. Sus posiciones se calculan utilizando el algoritmo MDS (Algoritmo de Escalamiento Multidimensional) (Scikit-Learn, 2024), que permite calcular la similitud o disimilitud de los datos en un espacio de menor dimensión. Esta técnica permite posicionar los dispositivos en un espacio relativo a uno de ellos de forma clara y eficiente, como se muestra en la Figura 2.
5. Se calcula una matriz final de distancias ponderada, que se envía directamente a evaluar para identificar interacciones sociales y, si se ha configurado, para el sistema de "intereses" y cercanía.

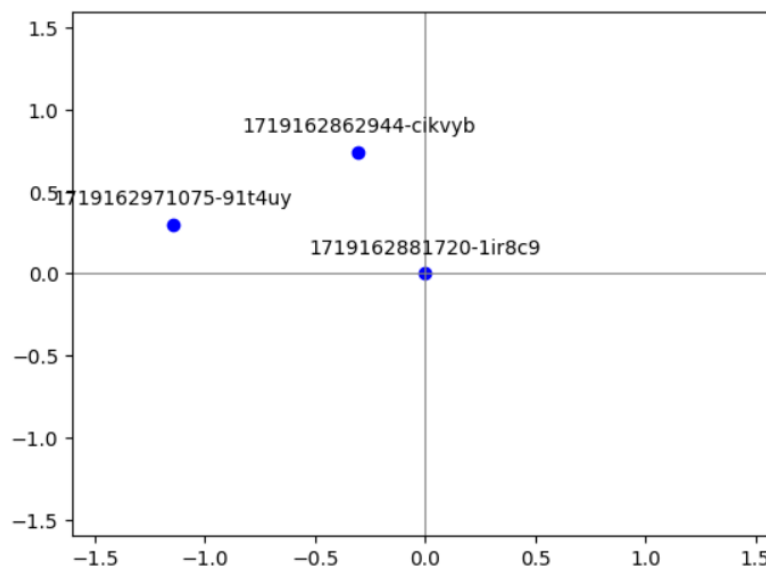


Figura 2. Resultado del posicionamiento interior debido al procesamiento.

### 3.3. Detección de interacciones en tiempo real

El sistema utiliza la distancia media entre dos usuarios para determinar la naturaleza de la interacción entre ambos participantes durante un periodo determinado. El uso de valores medios es importante a la hora de evaluar una interacción, ya que la duración de la misma también es relevante, especialmente en contextos concurridos y dinámicos, como las conferencias científicas. Tal y como se describe en la Sección 2.2, la clasificación de las interacciones sociales varía principalmente en función de la distancia entre los participantes en una interacción. No obstante, para que una interacción se clasifique según la definición de la proxémica, también debe tener una duración específica. Por lo tanto, el sistema debe ser también capaz de especificar si cuando dos participantes se encuentran muy próximos en un momento concreto, esto podría significar que es una interacción, un encuentro fortuito o si pudiese tratarse de una colisión fuera de un acercamiento social real.

Es por esto por lo que el sistema calcula la media de las matrices de distancia obtenidas previamente, calculadas durante la fase de procesamiento. De este modo, solo se conservan aquellas interacciones que se encuentran dentro de los rangos propuestos por la teoría de la proxémica. Esto permite al sistema clasificar qué agente interactúa, con quién y cómo. También realiza un seguimiento de la duración de estas interacciones basándose en las ventanas de tiempo definidas y el momento en el que ocurre el análisis. De este modo, el administrador o responsable puede comprender la relación entre los participantes, además de comprender cómo estas interacciones pueden mejorar o cambiar con el tiempo y la naturaleza en las que se producen. Todo este procesamiento ocurre en tiempo real, a través de la integración efectiva de los servicios de llamadas de red, la comunicación por sockets con los smartwatches y las lecturas de memoria tanto en Redis como en InfluxDB. Como resultado, todos los valores recopilados se sincronizan en tiempo real y, opcionalmente, las sesiones pueden guardarse para su posterior análisis.

Además, aparte de la posición, se calculan tanto el movimiento como la orientación del dispositivo utilizando los sensores de acelerómetro, giroscopio y la brújula. Para que estos se configuren correctamente y se adapten al entorno y a la orientación del mapa, es necesario realizar un paso adicional en la sincronización del dispositivo. Al sincronizar el dispositivo, este debe estar orientado hacia el norte, en las mismas condiciones y posición que el primer dispositivo configurado. De este modo, el algoritmo MDS puede calibrarse mejor para mejorar la estabilidad y la precisión, alineando el mapa relativo con la orientación del mundo real. Las direcciones a las que mira el usuario se representan gráficamente, de modo que los expertos puedan evaluar la naturaleza de una interacción. En términos generales, el sistema proporciona al administrador o al experto una representación visual de la ubicación de los distintos dispositivos, junto con información detallada de cada uno de ellos, describiendo los tipos de interacción identificados que se están produciendo en tiempo real.

### 3.4. Caso de uso: Medición de las interacciones sociales en conferencias

Con el fin de evaluar y analizar la eficacia del sistema propuesto, este se integró en una plataforma de gestión de congresos científicos. En este contexto, convergen distintos perfiles de usuarios, principalmente organizadores y participantes, cuyas interacciones permiten estudiar la dinámica social generada durante el evento. El objetivo principal es comprender la naturaleza de las relaciones e interacciones que tienen lugar, así como el ambiente social que se crea en el congreso o la conferencia, y determinar en qué medida se cumple el propósito fundamental del sistema: facilitar la interacción entre los participantes.

De forma complementaria, desde la perspectiva de los participantes, el interés principal radica en reunirse, establecer contactos e interactuar con personas que comparten intereses o líneas de investigación similares. La elección de este contexto de aplicación no fue arbitraria, sino que se llevó a cabo tras un análisis detallado de su idoneidad, considerando diversas cuestiones previamente identificadas que podrían verse favorecidas mediante el uso de un sistema de detección de interacciones sociales, tales como:

- **Networking ineficaz:** En muchas conferencias, los participantes suelen tener dificultades para identificar y conocer a otros asistentes con los mismos intereses u objetivos de investigación similares.
- **Falta de información para los usuarios:** Debido a la gran cantidad de presentaciones, pósteres y sesiones que hay en una conferencia, los asistentes suelen sentirse abrumados a la hora de elegir a cuáles asistir.
- **Falta de seguimiento de la colaboración:** Los participantes pueden perderse información o actualizaciones durante la conferencia debido a la falta de un medio para obtener información en tiempo real.
- **Dificultad para identificar tendencias y áreas populares:** Los organizadores y los investigadores pueden tener dificultades para identificar las presentaciones o los temas de mayor interés para los participantes, lo que dificulta la organización tanto de la conferencia actual como de futuras conferencias en torno a los temas más populares.
- **Evaluación de la cantidad y la calidad de las interacciones:** Para los organizadores, resulta difícil medir el número de interacciones reales que tienen lugar en este tipo de eventos, así

como la calidad y la relevancia de las distintas interacciones entre los participantes. Este tipo de información puede ayudar a los organizadores a determinar si las estrategias que han definido para fomentar las interacciones entre los participantes están funcionando o si es necesario ajustarlas para promover dichas interacciones.

- **Una forma de recopilar y analizar datos sobre los asistentes:** Para los organizadores, es importante recopilar datos clave sobre los participantes, incluyendo lo que les gustó en mayor o menor medida, a qué actividades acudieron más o menos, y con qué frecuencia.

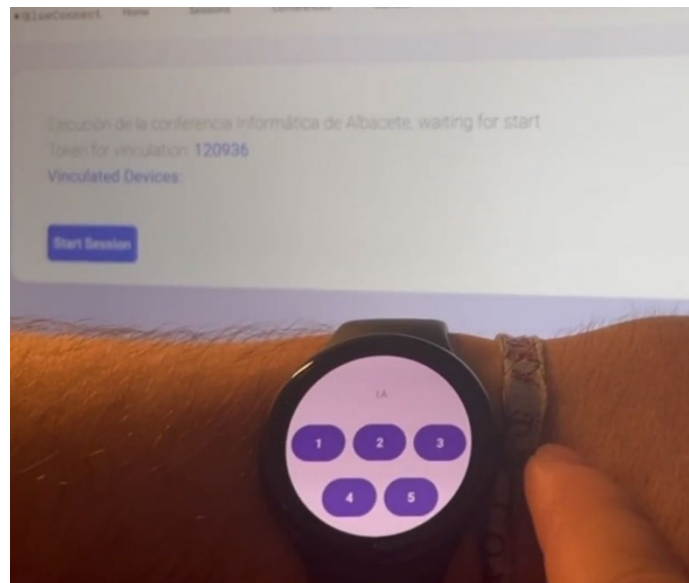
Así, dentro del sistema, se han integrado diferentes funcionalidades que utilizan la potencia de la herramienta de detección de interacciones. Por un lado, el sistema cuenta con una aplicación web en la que el administrador de la conferencia y/o el equipo organizador pueden configurar sus eventos. Para cada evento, pueden crear y nombrar los distintos temas que se tratarán durante la conferencia. A cada tema se le puede asignar un nivel de relevancia, en función de si se tratan en ese evento y en qué medida.

Los administradores también pueden configurar el sistema de notificaciones del smartwatch para informar a los participantes de eventos que cubren temas que puedan ser del interés del usuario, así como para avisar a un participante de la presencia de otros participantes cercanos con intereses o temas de trabajo similares, tal y como se muestra en la Figura 3. El coordinador puede configurar: (i) la distancia máxima a la que puede estar otro usuario para que se considere que está cerca; (ii) la similitud (obtenida a través de la similitud coseno) con respecto a otros usuarios; y (iii) el mensaje concreto que se le mostrará al participante. Por ejemplo, un administrador puede decidir mostrar un mensaje que indique que hay personas con intereses similares a los del participante cuando esa persona se encuentre en un radio de 3 metros y comparta intereses similares en un 60% o más.



**Figura 3.** Interfaz smartwatch notificando al participante de otro usuario con intereses similares.

Durante la conferencia, los participantes portan un smartwatch durante la duración de esta. Este smartwatch se conectará a la sesión mediante un token único generado al crear la sesión, y debe ser configurado por un administrador de la conferencia, donde introduce información relevante del participante (id, nombre, fecha de exposición, etc.). Esta información no será visible en el mapa de interacciones, ya que los dispositivos se anonimizan de cara a estudiar las interacciones en el evento. Antes de que comience una sesión, los participantes valoran su nivel de interés en los temas que se tratarán en la conferencia en una escala del uno al cinco (Figura 4).



**Figura 4.** Interfaz para establecer el nivel de interés en los temas de la conferencia.

Esta escala se emplea dentro del sistema de gestión de *intereses* descrito anteriormente. Dicha funcionalidad tiene como objetivo recopilar información relevante de los usuarios con el fin de recomendar eventos y facilitar el contacto entre participantes que comparten intereses y objetivos similares, fomentando así el *networking*. Para ello, tal como se ha explicado previamente, el administrador emplea la plataforma web para definir los temas que se abordarán durante la conferencia (Figura 5), así como para configurar los distintos eventos que tendrán lugar y sus correspondientes horarios de inicio. Con el propósito de calcular el grado de similitud entre los intereses de los participantes y los eventos disponibles, se utilizó la medida de similitud coseno. Esta técnica matemática permite cuantificar la similitud entre dos vectores en un espacio multidimensional mediante el cálculo del coseno del ángulo que forman entre sí. La similitud coseno resulta especialmente adecuada en este contexto, ya que permite capturar eficazmente relaciones de afinidad independientemente de la magnitud de los vectores y requiere un bajo coste computacional.

En el caso de los eventos (como charlas, talleres o sesiones de pósteres), cada 10 minutos se evalúa la similitud temática entre los eventos programados para comenzar en los siguientes 15 minutos, y se notifica a los usuarios cuando se detectan intereses coincidentes. Para fomentar el *networking*, al inicio de la sesión se calcula la similitud de cada participante con respecto a los demás, y estos datos se almacenan en una matriz. Cada dos minutos, el sistema calcula una puntuación media de proximidad para cada participante y comprueba si hay algún usuario dentro del alcance del dispositivo cuya puntuación de similitud sea mayor o igual al umbral establecido por el administrador. Si es así, como se ha mencionado anteriormente, el sistema envía un mensaje a través del servicio adecuado para notificar a ambos participantes de su proximidad (Figura 3).

**Conference events planner**

| Event time and day | Event name          | Similarity | Themes                                                                                                                                                                                | Delete       |
|--------------------|---------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 28/06/2024 18:55   | Convención sobre IA | 60         | I.A. <input type="text" value="5"/><br>Gemelos digitales <input type="text" value="2"/><br>Hardware <input type="text" value="4"/><br>Machine Learning <input type="text" value="4"/> | Remove event |

**Figura 5.** Configuración de los intereses de la conferencia.

En cuanto a la protección de datos y privacidad del usuario, es importante destacar que el sistema incorpora mecanismos de privacidad orientados a minimizar la exposición de información personal durante la visualización y gestión de la actividad. En concreto, el mapa gráfico accesible para el administrador no muestra identificadores directos ni datos personales sensibles, como nombres, imágenes faciales u otros elementos que permitan identificar conductas específicas con un usuario. Estos datos son tratados exclusivamente por el servidor interno, y solo son utilizados para la similitud entre usuarios y notificar su cercanía. Sin embargo, al administrador solo se le proporciona información general sobre los intereses, las categorías y las interacciones de los usuarios.

## 4. EVALUACIÓN

### 4.1. Participantes y diseño experimental

Debido a las dificultades para evaluar el sistema en un entorno real, se planteó un estudio exploratorio cuyo objetivo fue recoger opiniones, observaciones y valoraciones preliminares sobre la propuesta desarrollada. Para ello, se contó con dos perfiles de participantes considerados relevantes para la evaluación del sistema, por un lado, estudiantes de doctorado que comienzan a asistir a congresos y, por otro, expertos en sociología. En conjunto, la muestra estuvo formada por 9 personas.

El primer perfil estuvo formado por estudiantes de doctorado que comenzaban a participar en congresos académicos, con una edad media aproximada de 25 años. Su inclusión resultó relevante por su cercanía al contexto de uso previsto para el sistema.

El segundo perfil estuvo compuesto por expertos en sociología, incluyendo sociólogos y estudiantes de sociología, con una edad media aproximada de 24 años. Algunos de ellos habían asistido previamente a conferencias del área, lo que permitió obtener valoraciones más fundamentadas sobre la adecuación y pertinencia del sistema.

La selección de la muestra se llevó a cabo mediante un procedimiento de muestreo en cadena. Tanto los expertos como los participantes difundieron la información del estudio por correo electrónico entre personas con perfiles similares, con el fin de ampliar la participación (Parker et al., 2019). Así pues, las aportaciones recogidas a través de este proceso resultaron relevantes para valorar la usabilidad del sistema y su adecuación a las necesidades y requerimientos de los distintos perfiles.

El estudio se planteó como una evaluación basada en cuestionarios web, lo que permitió recoger datos de forma remota sin necesidad de recrear un entorno real de congreso. Para ello, se utilizó una

base común orientada a evaluar la usabilidad percibida del sistema, complementada con cuestionarios específicos adaptados al perfil de cada participante.

## 4.2. Procedimiento

La evaluación se realizó mediante un cuestionario web, por lo que los participantes únicamente necesitaban disponer de un dispositivo con acceso a internet que les permitiera visualizar un vídeo y completar el formulario, como un ordenador o un teléfono móvil. El cuestionario fue desarrollado con Microsoft Forms, mientras que el análisis posterior de los datos se llevó a cabo mediante las herramientas de visualización ofrecidas por la propia plataforma y mediante Microsoft Excel.

El procedimiento de evaluación comenzaba con una presentación general de la aplicación, en la que se explicaban su finalidad, sus características principales y el equipo responsable de su desarrollo. A continuación, los participantes debían revisar una declaración de consentimiento informado. En esta declaración se especificaba el carácter anónimo de las respuestas, así como el uso previsto de los datos recopilados. Solo tras aceptar dicho consentimiento se podía continuar con el proceso.

Una vez completada esta fase inicial, los participantes visualizaban un vídeo explicativo en el que se mostraban las características y los objetivos de la aplicación. Este material servía para proporcionar un contexto común a todas las personas participantes antes de responder al cuestionario, de modo que sus valoraciones pudieran basarse en una comprensión mínima compartida del funcionamiento y propósito del sistema.

Para medir la usabilidad percibida se utilizó el cuestionario UMUX-Lite, una herramienta breve compuesta por dos ítems (Lewis et al., 2015). Uno orientado a valorar la facilidad de uso de la aplicación y otro dirigido a evaluar en qué medida sus características satisfacen las necesidades del usuario. A partir de las respuestas obtenidas, se calculó una puntuación global de usabilidad mediante una media ponderada de ambas preguntas. Posteriormente, este resultado se transformó a una escala equivalente al SUS, lo que permitió expresar la usabilidad en un rango comprendido entre 1 ("*Peor usabilidad posible*") y 100 ("*Mejor usabilidad posible*") (Jim Lewis, 2021).

Además de esta medida general de usabilidad, se elaboraron dos cuestionarios específicos, uno para cada perfil participante. En el caso de los expertos en sociología, el cuestionario se centró en evaluar el uso que hace el sistema de los datos, la idoneidad del reloj inteligente como herramienta de apoyo y la calidad con la que se aplican los fundamentos teóricos en la propuesta. En el caso de los estudiantes de doctorado, las preguntas se orientaron a valorar si las funcionalidades del sistema resultarían útiles y accesibles en un contexto de congreso, si podrían contribuir a mejorar la experiencia de asistencia y si el reloj inteligente sería un dispositivo cómodo de utilizar en este tipo de situaciones.

En todos los cuestionarios se empleó una escala de Likert de 1 a 7 para valorar cada afirmación. Esta escala permitía recoger el grado de acuerdo de los participantes, desde 1, correspondiente a "totalmente en desacuerdo", hasta 7, correspondiente a "totalmente de acuerdo". Junto con las preguntas cerradas, también se incorporaron preguntas de respuesta abierta, con el fin de recoger comentarios más libres y matizados sobre la propuesta. Esto permitió complementar los resultados cuantitativos con observaciones cualitativas útiles para interpretar mejor la percepción de los participantes y detectar posibles mejoras del sistema.

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. UMUX-Lite

En general, de acuerdo con los criterios de este cuestionario y con la puntuación obtenida, presentada en la Tabla 1, la herramienta se sitúa en el rango de “muy buena usabilidad”. Este resultado indica una percepción positiva por parte de los usuarios, tanto en relación con su facilidad de uso como con su capacidad para satisfacer sus necesidades (Jim Lewis, 2021).

**Tabla 1.** Resultados UMUX-Lite

| Categoría        | Participantes | Expertos |
|------------------|---------------|----------|
| Pregunta primera | 6.6           | 5.5      |
| Pregunta segunda | 6.6           | 5.5      |
| Puntuación SUS   | 93.33         | 75       |
| Categoría SUS    | Excelente     | Buena    |

#### 4.3.2. Cuestionario de los participantes

Las opiniones de los participantes fueron, en general, positivas. Desde su perspectiva como potenciales usuarios en el contexto de conferencias, valoraron favorablemente la utilidad de la herramienta para facilitar el establecimiento de contactos y mejorar la organización de su asistencia a este tipo de eventos. Al mismo tiempo, sus respuestas permitieron identificar varias líneas de mejora orientadas a optimizar la aplicación a partir de sus necesidades y preferencias de uso.

Entre las sugerencias recogidas, destacó la conveniencia de ampliar el acceso a la herramienta más allá del reloj inteligente. En este sentido, algunos participantes señalaron que una mayor compatibilidad con otros dispositivos podría favorecer un uso más extendido. Esta idea aparece reflejada en comentarios como: *“Para que la herramienta se utilice más ampliamente, sería útil ampliar la posibilidad de usarla no solo en un reloj inteligente, sino también en otros dispositivos”* y *“Poder introducir datos desde un teléfono móvil sería más cómodo para el usuario”*. Estas aportaciones apuntan a la necesidad de mejorar la accesibilidad y flexibilidad del sistema mediante su integración con otros dispositivos, especialmente el teléfono móvil.

Además, la funcionalidad relacionada con los intereses fue valorada de forma especialmente positiva. Los participantes indicaron que esta característica podría contribuir a una mejor organización de la agenda durante las conferencias, al facilitar recomendaciones de charlas y eventos ajustadas a sus preferencias. Esta percepción se refleja en comentarios como: *“Esta herramienta es útil para organizar mejor mi agenda al recomendarme charlas y eventos de mi interés”*. En relación con este ítem, el 60 % de las respuestas otorgó la puntuación máxima de 7, el 20 % asignó un 6 y el 20 % restante un 5, lo que muestra una valoración claramente favorable de esta funcionalidad.

#### 4.3.3. Cuestionario de los expertos

Las opiniones de los expertos fueron, en general, muy positivas. Consideraron que la teoría de la proxémica se aplica de forma adecuada a la finalidad del sistema, cumpliendo así el objetivo de fomentar la interacción entre los asistentes. Asimismo, señalaron que la propuesta constituye un primer paso relevante hacia una herramienta capaz de identificar y analizar la complejidad de las interacciones sociales en conferencias y otros eventos.

Entre los aspectos mejor valorados, destacó la percepción de que el sistema aborda de manera adecuada cuestiones relacionadas con la privacidad y el tratamiento de los datos. Esta idea se refleja en comentarios como: "Creo que es un sistema práctico que protege la identidad de las personas al tiempo que permite a los organizadores de eventos estudiar cómo se desarrollan estos". Este tipo de respuesta sugiere que los expertos perciben la herramienta como una propuesta útil no solo desde el punto de vista funcional, sino también desde una perspectiva ética y metodológica.

Además, los expertos valoraron positivamente su potencial para mejorar el análisis de las interacciones sociales. En este sentido, consideraron que la aplicación constituye una base sólida sobre la que desarrollar soluciones más completas en el futuro. Esta valoración queda reflejada en comentarios como: *"Creo que es una herramienta que aplica la teoría sociológica de forma correcta y responsable y que puede facilitar una mayor comunicación e intercambio de opiniones en las conferencias de divulgación pública. Aunque se encuentra en una fase inicial, tiene el potencial de convertirse en una herramienta muy útil tanto para los gestores como para los usuarios"*.

#### 4.4. Discusión

Aunque el número de participantes fue reducido, la evaluación permitió obtener conclusiones preliminares relevantes sobre la usabilidad del sistema y su posible aplicación futura. En términos generales, los comentarios recibidos reflejan una valoración positiva de la herramienta, especialmente en relación con su utilidad, su portabilidad y su potencial de desarrollo en distintos contextos.

No obstante, la evaluación también puso de manifiesto algunas cuestiones relacionadas con la gestión de datos personales. El uso de una herramienta de este tipo a gran escala puede implicar riesgos de uso indebido de la información, especialmente si su explotación prioriza los intereses de terceros por encima de los de los propios usuarios. Por ello, se considera necesario que el sistema mantenga un equilibrio entre la obtención de información útil para el análisis del evento y la protección de la privacidad individual. En este sentido, la herramienta debería limitarse a proporcionar únicamente la información práctica y necesaria, preservando la identidad de los usuarios durante el análisis de la conferencia.

Además, los comentarios de los expertos señalaron posibles riesgos asociados a la percepción de hipervigilancia y al denominado efecto panóptico, especialmente en contextos académicos o laborales. Aun así, también se indicó que estos problemas podrían reducirse si el uso del sistema se limita, al menos en una primera fase, a conferencias de carácter informativo, tal y como se plantea en esta propuesta. Del mismo modo, el empleo de dispositivos no intrusivos, como los smartwatches, junto con una explicación clara sobre qué datos se recogen y con qué finalidad se utilizan, podría contribuir a disminuir esta percepción de vigilancia.

En conjunto, la valoración general del sistema fue positiva. Destacan especialmente los resultados del cuestionario UMUX-Lite, en el que ambas encuestas situaron la herramienta en el rango de “usabilidad muy buena”. Asimismo, varios expertos la consideraron una propuesta sólida y prometedora, con potencial para evolucionar hacia una aplicación analítica capaz de detectar interacciones sociales más complejas, apoyada en una base teórica consistente y compatible con la protección de la privacidad. Por su parte, los participantes valoraron la herramienta como una propuesta interesante y manifestaron su disposición a utilizarla en conferencias y en otros contextos sociales similares.

## 5. CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

La psicología cognitiva y la teoría de la proxémica abarcan un conjunto amplio y complejo de factores, por lo que resulta difícil considerar todos sus parámetros en un único sistema. Aun así, la propuesta presentada busca extraer información a partir de la aplicación de fundamentos teóricos, en lugar de basarse en criterios aleatorios o en percepciones subjetivas, como ocurre con frecuencia en muchas aplicaciones y redes sociales. Como resultado, el proyecto ha dado lugar al desarrollo de una aplicación capaz de adaptarse a distintos entornos y de favorecer la interacción social. En el contexto de las conferencias, esta herramienta permite a los organizadores analizar las interacciones sociales que tienen lugar durante el evento, así como caracterizar su naturaleza a partir de la teoría de la proxémica. De este modo, es posible obtener información tanto sobre el tipo de interacción como sobre la relación existente entre los distintos individuos.

A lo largo del proyecto se alcanzaron los objetivos establecidos al inicio del desarrollo. Sin embargo, el propio proceso de diseño y evaluación dio lugar a nuevas ideas y posibilidades de ampliación que no pudieron implementarse en esta fase. A partir de las evaluaciones realizadas y de los comentarios proporcionados por los expertos, se identificaron las principales líneas de trabajo para el desarrollo futuro. Entre ellas, se dará prioridad a la mejora de la privacidad y a la detección de interacciones, con especial atención a la gestión segura de los datos y a la presentación de la información desde un enfoque más alineado con la teoría empleada. Además, las aportaciones de los expertos en relación con la psicología cognitiva abren la posibilidad de incorporar nuevos marcos teóricos al sistema. Entre ellos, destaca la teoría interaccionista, que plantea que los conflictos o diferencias que surgen en tiempo real, como la diversidad de gustos u opiniones, pueden generar debate y, con ello, favorecer nuevas interacciones y posibles soluciones desde la perspectiva de cada individuo. Por último, también se prevé realizar una evaluación del rendimiento del sistema en un entorno social con un mayor número de participantes, con el fin de analizar tanto su comportamiento en situaciones de carga elevada como la percepción de los usuarios desde un punto de vista sociológico.

**Agradecimientos:** Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente por los proyectos I+D+i PID2022-140907OB-I00 y PID2025-171341OB-I00, financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y ERDF, UE. También, ha sido subvencionado parcialmente por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha/ERDF (SBPLY/24/180225/000020) y por la Universidad de Castilla-La Mancha (2025-GRIN-38441).

## 6. REFERENCIAS

American-Psycological-Association. (2023a). *Definición de comportamiento social*.

- American-Psycological-Association. (2023b). *Definición de la interacción social*.
- Arakawa, T. (2018). Recent research and developing trends of wearable sensors for detecting blood pressure. *Sensors (Switzerland)*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/s18092772>
- Baumeister, R. F., & Leary, M. R. (1995). The Need to Belong: Desire for Interpersonal Attachments as a Fundamental Human Motivation. *Psychological Bulletin*, 117(3), 497–529. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.117.3.497>
- Berkman, L. F., Glass, T., Brissette, I., & Seeman, T. E. (2000). From social integration to health: Durkheim in the new millennium☆☆This paper is adapted from Berkman, L.F., & Glass, T. Social integration, social networks, social support and health. In L. F. Berkman & I. Kawachi, *Social Epidemiology*. New York: Oxford University Press; and Brissette, I., Cohen S., Seeman, T. Measuring social integration and social networks. In S. Cohen, L. Underwood & B. Gottlieb, *Social Support Measurements and Intervention*. New York: Oxford University Press. *Social Science & Medicine*, 51(6), 843–857. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-9536\(00\)00065-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0277-9536(00)00065-4)
- Blinkoff, E., Nesbitt, K., Golinkoff, R., & Hirsh-Pasek, K. (2023). Investigating the contributions of active, playful learning to student interest and educational outcomes. *Acta Psychologica*, 238, 103983. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2023.103983>
- Fuller, D., Colwell, E., Low, J., Orychock, K., Ann Tobin, M., Simango, B., Buote, R., van Heerden, D., Luan, H., Cullen, K., Slade, L., & Taylor, N. G. A. (2020). Reliability and Validity of Commercially Available Wearable Devices for Measuring Steps, Energy Expenditure, and Heart Rate: Systematic Review. *JMIR MHealth and UHealth*, 8(9). <https://doi.org/10.2196/18694>
- Goffman, E. (1956). *The Presentation of Self in Everyday Life*. University of Edinburgh.
- Goffman, E. (1967). *Interaction Ritual: Essays on Face-to-Face Behavior*. University of Edinburgh.
- Hall, E. T. (1990). *The Hidden Dimension*. Knopf Doubleday Publishing Group. <https://books.google.es/books?id=zGYPwLj2dCoC>
- Helliwell, J. F., & Putnam, R. D. (2004). The Social Context of Well-Being. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359(1449), 1435–1446. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1522>
- House, J. S., Landis, K. R., & Umberson, D. (1988). Social Relationships and Health. *Science*, 241(4865), 540–545. <https://doi.org/10.1126/science.3399889>
- Jim Lewis, J. S. (2021). *How to Estimate SUS Using the UX-Lite – MeasuringU*.
- Lewis, J. R., Utesch, B. S., & Maher, D. E. (2015). Measuring Perceived Usability: The SUS, UMUX-LITE, and AltUsability. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(8), 496–505. <https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1064654>
- Macdonald, B., Luo, M., & Hülür, G. (2021). Daily social interactions and well-being in older adults: The role of interaction modality. *Journal of Social and Personal Relationships*, 38(12), 3566–3589. <https://doi.org/10.1177/02654075211052536>

- McMahon, E., & Isik, L. (2023). Seeing social interactions. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(12), 1165–1179. <https://doi.org/10.1016/J.TICS.2023.09.001>
- Parker, C., Scott, S., & Geddes, A. (2019). *Snowball Sampling*. SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.4135/9781526421036831710>
- Pfeiffer, U. J., Timmermans, B., Vogeley, K., Frith, C. D., & Schilbach, L. (2013). Frontiers research topic: “Towards a neuroscience of social interaction.” *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(JAN), 42174. <https://doi.org/10.3389/FNHUM.2013.00022/BIBTEX>
- RAE. (2024). *proxémico, proxémica | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE*.
- Scikit-Learn. (2024). *MDS — scikit-learn 1.5.0 documentation*.
- Sciortino, F. (2018). Why organizing a scientific conference can produce huge benefits. *Nature*, 559, 431. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05714-9>
- Teubner, R. A., & Stockhinger, J. (2020). Literature review: Understanding information systems strategy in the digital age. *The Journal of Strategic Information Systems*, 29(4), 101642. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2020.101642>
- Tirapu-Ustárrroz, J., Pérez-Sayes, G., Erekatxo-Bilbao, M., & Pelegrín-Valero, C. (2007). ¿Qué es la teoría de la mente? *REV NEUROL*, 44(8), 479.
- Umberson, D., & Montez, J. K. (2010). Social Relationships and Health: A Flashpoint for Health Policy. <Http://Dx.Doi.Org/10.1177/0022146510383501>, 51(1\_suppl), S54–S66. <https://doi.org/10.1177/0022146510383501>
- Wajgi, D. W., Tembhurne, J. V., & Wajgi, R. D. (2024). Distance-Based Localization in Wireless Sensor Network Using Exponential Grey Prediction Model. *International Journal of Business Data Communications and Networking*, 19(1), 1–22. <https://doi.org/10.4018/ijbdcn.353393>