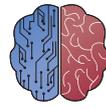




UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Grado en Ingeniería de la Salud



INGENIERÍA
DE LA SALUD

TFG del Grado en Ingeniería de la Salud

**Análisis del Comportamiento Visual y
Fisiológico durante el Proceso de
Aprendizaje: Un enfoque desde la
Ingeniería de la Salud**

Presentado por Javier Sáez García
en Universidad de Burgos

8 de julio de 2024

Tutores: Dra. María Consuelo Saiz Manzanares
Dr. Raúl Marticorena Sánchez

Resumen

En el contexto actual de la educación, la integración de tecnologías avanzadas como el *eye tracking* puede ser una poderosa herramienta para analizar y entender los patrones de aprendizaje de cada uno de los integrantes del estudiantado. Concretamente, es una tecnología que permite el rastreo y el registro continuo de los movimientos oculares de los individuos, proporcionando información detallada sobre cuánto tiempo, dónde y cómo reciben los diferentes estímulos visuales durante el proceso de aprendizaje.

Debido a la captura continua de estos movimientos, este tipo de tecnologías generan grandes volúmenes de datos a una velocidad elevada, lo que presenta un desafío significativo para cualquier profesional que no posea conocimientos avanzados en el análisis de grandes cantidades de datos. Para poder visualizar, procesar y analizar esa información, es crucial utilizar herramientas de análisis de datos y técnicas de Aprendizaje Automático o *Machine Learning* que permitan extraer conclusiones y tomar decisiones informadas. El análisis preciso de estos datos proporciona una ventana única para comprender cómo el alumnado interactúa con el material educativo y cómo su atención visual se distribuye a lo largo de los contenidos durante el proceso de aprendizaje.

Este Trabajo Fin de Grado se enfoca en la integración del *eye tracking* con herramientas que miden el registro electromiográfico, con el objetivo de desarrollar un *software* o cuaderno de programación que permita el análisis de los datos facilitando el tratamiento de los mismos. Este desarrollo servirá como plantilla que permitirá a los profesionales, independientemente de su nivel de conocimiento en análisis de datos, comprender mejor el procesamiento de la información durante el proceso de aprendizaje. A través del estudio de los patrones de seguimiento visual y los registros electromiográficos, este recurso proporciona una herramienta accesible y eficiente para extraer conclusiones y tomar decisiones informadas en el ámbito educativo.

Descriptorios

Eye tracking, respuesta galvánica de la piel, análisis conductual, patrones de aprendizaje, Aprendizaje Automático o *Machine Learning*, minería de datos, *clustering*.

Abstract

In the current context of education, the integration of advanced technologies such as eye tracking can be a powerful tool for analysing and understanding the learning patterns of individual students. Specifically, it is a technology that allows the continuous tracking and recording of individuals' eye movements, providing detailed information on how long, where and how they receive different visual stimuli during the learning process.

Due to the continuous capture of these movements, this type of technology generates large volumes of data at a high speed, which presents a significant challenge for any professional who does not have advanced knowledge in the analysis of large amounts of data. In order to visualise, process and analyse this information, it is crucial to use data analysis tools and Machine Learning techniques to draw conclusions and make informed decisions. Accurate analysis of this data provides a unique window to understand how students interact with educational material and how their visual attention is distributed throughout the content during the learning process.

This Final Degree Project focuses on the integration of the *eye tracking* with tools that measure the electromyographic recording, with the aim of developing a *software* or programming notebook that allows the analysis of the data, facilitating their processing. This development will serve as a template that will allow professionals, regardless of their level of knowledge in data analysis, to better understand the processing of information during the learning process. Through the study of visual tracking patterns and electromyographic recordings, this resource provides an accessible and efficient tool for drawing conclusions and making informed educational decisions.

Keywords

Eye tracking, galvanic skin response, behaviour analysis, learning patterns, Machine Learning, data mining, clustering.

Índice general

Índice general	iii
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vi
Introducción	1
Objetivos	3
Conceptos teóricos	5
3.1. Componentes clave del <i>hardware</i>	5
3.2. Funcionamiento	6
3.3. Métricas	8
3.4. Ventajas de utilizar la tecnología <i>eye tracking</i>	11
3.5. Aplicaciones y usos del <i>eye tracking</i>	13
3.6. Desventajas de la tecnología <i>eye tracking</i>	17
3.7. Estado del arte y trabajos relacionados.	18
Metodología	21
4.1. Descripción y obtención de los datos	21
4.2. Herramientas <i>hardware</i> y <i>software</i> utilizadas	22
4.3. Técnicas metodológicas de programación	27
4.4. Entornos y Aplicaciones	29
4.5. Técnicas	32
Conclusiones	37
5.1. Resumen y discusión de resultados	37
5.2. Aspectos relevantes	46
Lineas de trabajo futuras	49
Bibliografía	51

Índice de figuras

3.1. Componentes <i>hardware</i> de un rastreador ocular [Tobii, 2024] . . .	5
3.2. Representación del destello de la luz infrarroja en la córnea de un ojo real [Tobii, 2024]	6
3.3. Funcionamiento del <i>eye tracking</i> en la estimación del <i>gaze point</i> [Tobii, 2024]	7
3.4. Representación que muestra los cambios producidos en la posición de la pupila respecto al reflejo corneal [Tobii, 2024]	7
3.5. Proceso de seguimiento visual [Sáiz-Manzanares et al., 2021]	8
3.6. Proceso de calibración con la tecnología <i>eye tracking</i> . Fuente propia	9
3.7. Esquema de alguno de los datos visuales que proporciona el <i>eye tracking</i> [Brain and Marketing, 2016]	10
3.8. Mapa de calor generado gracias a la utilización del <i>eye tracking</i> [Parra, 2020]	12
3.9. Mapa de ruta generado con la utilización del <i>eye tracking</i> . Fuente propia	12
3.10. Mapeado de productos reales disponibles en un establecimiento comercial [Marketingdirecto, 2012]	13
3.11. Mapeado web que permite conocer la experiencia de los usuarios en la utilización de un sitio web [Coppola, 2023]	14
3.12. Representación del uso del <i>eye tracking</i> en una cabina real de un avión [Aerospace, 2024]	15
3.13. Representación real del uso del <i>eye tracking</i> en una intervención quirúrgica [Medical, 2024]	15
3.14. Proceso de lectura mediante la aplicación de la tecnología <i>eye tracking</i> [Diagnostico, 2024]	16
4.1. Componentes de <i>Tobii Pro Spark</i> [Products, 2024]	23
4.2. Interfaz de <i>Tobii Pro Lab</i> [Design, 2024, Product, 2024]	24
4.3. Herramienta <i>Shimmer3 GSR+</i> [Shimmersensing, 2024]	26
4.4. Representación de las bibliotecas de <i>Python</i> utilizadas en el trabajo. Fuente propia	28
4.5. Representación de las aplicaciones utilizadas para la realización del trabajo. Fuente propia	30
5.1. Cargas de los componentes principales (<i>PCs</i>). Fuente propia	38
5.2. Representación de la relación entre variables utilizando <i>k-Means</i> con 2 <i>clusters</i> . Fuente propia	40

5.3. Representación de <i>clustering</i> de los datos utilizando <i>k-Means</i> con 2 <i>clusters</i> . Fuente propia	40
5.4. Representación de la relación entre variables utilizando <i>k-Means</i> con 5 <i>clusters</i> . Fuente propia	41
5.5. Representación de <i>clustering</i> de los datos utilizando <i>k-Means</i> con 5 <i>clusters</i> . Fuente propia	41
5.6. Representación de la relación entre variables utilizando <i>DBSCAN</i> . Fuente propia	42
5.7. Representación de <i>clustering</i> de los datos utilizando <i>DBSCAN</i> . Fuente propia	42
5.8. Representación de la relación entre variables utilizando <i>GMM</i> . Fuente propia	43
5.9. Representación de <i>clustering</i> de los datos utilizando <i>GMM</i> . Fuente propia	43
5.10. Representación de la Regresión Lineal. Fuente propia	44
5.11. Valores de los coeficientes de Regresión Lineal. Fuente propia	44
5.12. Métricas para evaluar el modelo <i>KNN</i> . Fuente propia	45
5.13. Reales predichos del algoritmo Vecino Más Cercano (<i>KNN</i>). Fuente propia	45
5.14. Error de predicción del algoritmo Vecino Más Cercano (<i>KNN</i>). Fuente propia	46

Índice de tablas

4.1. Lista de los componentes de <i>Tobii Pro Spark</i> [Products, 2024] . . .	23
5.1. Cargas de las variables con mayor influencia en PC1	38
5.2. Cargas de las variables con mayor influencia en PC2	38

Introducción

La visión es uno de los sentidos más valiosos que posee el ser humano, permitiéndole conectar con el mundo que lo rodea facilitando la interpretación e identificación del entorno. Este sentido juega un papel crucial en la orientación, la comunicación, la toma de decisiones y el aprendizaje. Debido a ello, estudiar los comportamientos visuales de cada individuo puede proporcionar información relevante sobre su relación con el entorno [Oftalmólogos, 2021, Oftalvist, 2019, Torrades and Pérez-Sust, 2008].

El *eye tracking*, como sugiere su traducción en español, es una técnica de seguimiento ocular que consiste en medir y registrar la posición y los movimientos de los ojos. Esta tecnología emplea dispositivos especializados que permiten determinar en cualquier instante de tiempo dónde se dirige la mirada, qué captura su atención y por cuánto tiempo lo hace. Resulta esencial para evaluar la agudeza visual y el enfoque durante el seguimiento y la fijación visual [Coppola, 2023, Wikipedia, 2024].

Actualmente, el *eye tracking* es una tecnología de vanguardia ampliamente utilizada en gran variedad de escenarios, entre los que se incluyen la psicología, la neurociencia, la investigación de mercado, la publicidad y la medicina, proporcionando una herramienta precisa para medir y comprender la atención visual de forma objetiva respecto a los estímulos que lo rodean [BrainSigns, 2024, Calero, 2022].

Esta tecnología es especialmente relevante en el estudio de patrones de aprendizaje, facilitando la identificación de estilos de aprendizaje individuales y permitiendo adaptar las técnicas educativas a las necesidades específicas de cada miembro del estudiantado. Además, el conocimiento de estos patrones ayuda a detectar tempranamente dificultades de aprendizaje, posibilitando intervenciones efectivas, que mejoran tanto la experiencia educativa como el desarrollo integral del alumnado.

Sin embargo, el volumen masivo de datos registrados por esta tecnología puede presentar desafíos significativos. Debido a ello, se vuelve imprescindible poseer conocimientos avanzados sobre técnicas de *Big Data* y métodos de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*) para procesar eficazmente la información y extraer conclusiones relevantes.

En este trabajo, se ha implementado la tecnología *eye tracking* en combinación con la medición de la respuesta galvánica de la piel (*Galvanic Sensor Response* o *GSR*) en el alumnado del grado de Ingeniería de la Salud. El objetivo ha sido analizar el comportamiento visual y fisiológico durante la adquisición de información en el proceso de aprendizaje, utilizando técnicas de Aprendizaje Automático o *Machine Learning* basadas en aprendizaje supervisado y no supervisado en el entorno de programación de *Python*. Se trata de analizar los patrones de comportamientos de los integrantes del estudiantado con el fin de comprender mejor su impacto en el proceso de aprendizaje.

Gracias a este estudio, se podrán conocer los patrones individuales de cada miembro del alumnado, lo que proporcionaría ventajas significativas en el entorno educativo, como la personalización de los métodos de aprendizaje y la optimización de los recursos, que se traducirán en una mejora en la retención y comprensión de la información.

Si se desea obtener más detalles sobre el trabajo, se puede acceder al repositorio en la plataforma web *GitHub*¹. En él se puede encontrar, de forma detallada, toda la información relacionada con los datos recolectados mediante la tecnología *eye tracking* y la herramienta *GSR*, las herramientas utilizadas para su visualización y análisis, así como los resultados obtenidos y el marco teórico que sustenta el estudio.

¹El acceso al repositorio es privado, por lo que se debe solicitar acceso al propietario para consultar su contenido.

Objetivos

Este trabajo surge tras analizar el desafío que supone tratar con grandes archivos de datos proporcionados por la tecnología de seguimiento visual. La gran cantidad de información que produce hace indispensable poseer conocimientos avanzados en informática y análisis de datos, los cuales no son necesariamente comunes entre los usuarios que utilicen esta tecnología. Por ello, este trabajo va a tratar de hacer más accesible este análisis, permitiendo a cualquier profesional interpretar los registros y extraer la información más valiosa.

Durante la realización de este trabajo, se ha buscado abordar una serie de objetivos correctamente definidos, que se pueden clasificar en diferentes áreas:

Por un lado, los objetivos relacionados con el aprendizaje de las tecnologías y/o herramientas de interés:

1. Estudiar y dominar la tecnología y el *software* de seguimiento ocular, así como de la herramienta encargada de la medición de la respuesta galvánica de la piel (*GSR*).
2. Enseñar y explicar de forma detallada estas herramientas al alumnado, con el propósito de aumentar su comprensión del trabajo y fortalecer su conocimiento sobre el uso y aplicación.

Por otro lado, los objetivos técnicos, enfocados al análisis y evaluación de los datos extraídos:

1. Importar, explorar, limpiar, filtrar y procesar los datos extraídos mediante la utilización de técnicas avanzadas de programación.
2. Aplicar herramientas o algoritmos de aprendizaje no supervisado y supervisado.
3. Desarrollar una guía o cuaderno de programación que permita, a cualquier usuario que utilice la tecnología *eye tracking*, visualizar de forma ordenada y precisa los datos recogidos.

Conceptos teóricos

Antes de adentrarse en los detalles técnicos del trabajo, es crucial familiarizarse con ciertos conceptos teóricos fundamentales respecto a la tecnología *eye tracking*. Estos proporcionarán un marco conceptual clave, necesario para interpretar y comprender plenamente el propósito, la metodología y los resultados posteriores obtenidos durante la realización del trabajo.

3.1. Componentes clave del *hardware*

La tecnología de seguimiento ocular engloba la utilización de unos rastreadores oculares complejos, que permiten realizar la medición y el registro de la posición y el movimiento de los ojos. Tal y como se ilustra en la figura 3.1, estos rastreadores se componen de los siguientes elementos:

- Un módulo de iluminación de luz infrarroja.
- Varias cámaras de alta definición que permiten grabar los movimientos.
- Varios procesadores encargados de la realización de modelos 3D de los ojos y la utilización de algoritmos de mapeo de la mirada.

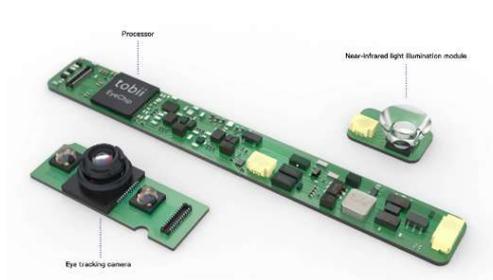


Figura 3.1: Componentes *hardware* de un rastreador ocular [Tobii, 2024]

3.2. Funcionamiento

Siguiendo la referencia del apartado anterior (3.1), la tecnología *eye tracking* se basa en un método llamado “Reflexión Corneal en el Centro de la Pupila (PCCR)”. Este método, por un lado, emplea un módulo que emite luz infrarroja no nociva, invisible para el ojo humano, que permite la iluminación de los ojos y la generación de patrones de reflexión. Específicamente, esta luz incide sobre la pupila (abertura circular de color negro en el centro del ojo) y sobre la córnea (capa exterior transparente que se encuentra en la parte frontal del ojo) [Tobii, 2024].

Por otro lado, este procedimiento utiliza cámaras con sensores integrados que permiten capturar imágenes de los ojos y del reflejo de la luz infrarroja en la córnea, también conocido como destello, tal y como se muestra en la figura 3.2. Cuanto mayor sea la frecuencia con la que se capturan dichas imágenes, mayor será la cantidad de información que se obtiene durante el proceso.

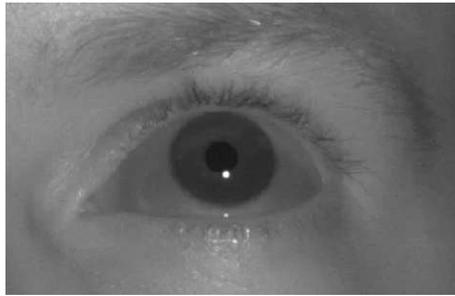


Figura 3.2: Representación del destello de la luz infrarroja en la córnea de un ojo real [Tobii, 2024]

Posteriormente, durante el registro de los datos, la imagen de uno de los ojos se toma de la cámara y se envía para su análisis. Para ello, se utilizan algoritmos avanzados de procesamiento de imágenes, que tratan de estimar la posición del ojo en el espacio y la realización de un modelo 3D del ojo del individuo. El centro de la pupila y el reflejo corneal se detectan en todo momento durante el análisis de la imagen. Este reflejo de la luz en la córnea se rastrea en relación con la posición de la pupila, lo que acaba permitiendo la estimación exacta del punto de mirada o *gaze point*, tal como se muestra en la figura 3.3 [Neurometrics, 2020, Tobii, 2024].

A medida que se produce movimiento en los ojos, la posición de la pupila varía con respecto al reflejo, tal como muestra la figura 3.4, en la que se puede observar un cambio en los puntos de fijación. Concretamente, en la parte superior de la imagen, de izquierda a derecha, se muestra un cambio de fijación desde un punto situado abajo a la izquierda hasta arriba a la izquierda, mientras que, en la parte inferior, también de izquierda a derecha, se muestran los puntos de fijación situados abajo a la derecha y arriba a la derecha. Los algoritmos detectan constantemente estos cambios y realizan cálculos para obtener la ubicación exacta del punto de mirada.

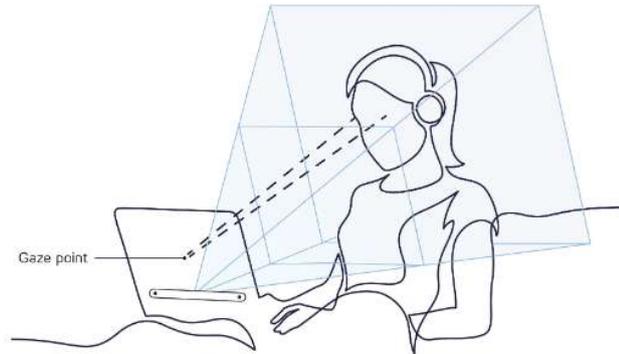


Figura 3.3: Funcionamiento del *eye tracking* en la estimación del *gaze point* [Tobii, 2024]

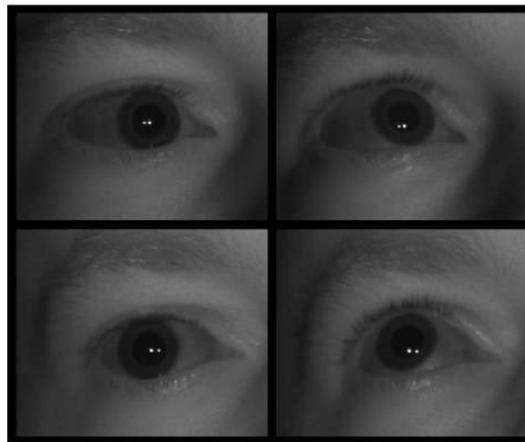


Figura 3.4: Representación que muestra los cambios producidos en la posición de la pupila respecto al reflejo corneal [Tobii, 2024]

En resumen, para su funcionamiento, la tecnología *eye tracking* sigue los siguientes pasos [Dynavox, 2024]:

1. El seguidor ocular que incluye envía un patrón de luz infrarroja hacia los ojos del individuo que lo esté utilizando.
2. La luz infrarroja enviada se refleja directamente en los ojos de la persona. Con esto, consigue obtener la posición de la pupila y de la córnea.
3. Las reflexiones que se producen son captadas por las cámaras que se incluyen en el seguidor ocular.

4. A través de unos algoritmos específicos de análisis de imágenes, el seguidor ocular reconoce, en todo momento, hacia dónde está enfocando la mirada el individuo.

Estos pasos están correctamente representados, de forma visual, en la figura 3.5.

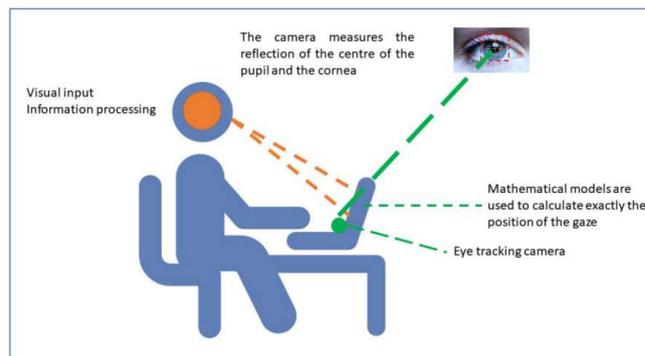


Figura 3.5: Proceso de seguimiento visual [Sáiz-Manzanares et al., 2021]

Antes de proceder con el seguimiento y el análisis de los movimientos oculares, la tecnología *eye tracking* lleva a cabo una calibración específica de los movimientos oculares de cada individuo. Esta fase es crucial debido a las propiedades únicas de cada ojo, las cuales determinan cómo se refleja la luz infrarroja recibida. La calibración asegura un funcionamiento preciso del seguidor ocular al ajustarse de manera personalizada a las características oculares de cada persona [Dynavox, 2024].

El proceso de calibración generalmente implica actividades simples, como por ejemplo, el seguimiento de unos puntos móviles en la pantalla, tal como se muestra en la figura 3.6. ²

3.3. Métricas

El *eye tracking* emerge como una tecnología notable capaz de recopilar y analizar extensas cantidades de datos relacionados con el comportamiento visual de un individuo. Estos datos se categorizan en diversas métricas que varían según el formato o el propósito específico del trabajo, seleccionando aquellas que posean mayor relevancia o interés. Estas métricas están organizadas sistemáticamente en diferentes categorías, cada una dependiendo de los datos que proporciona [EmoturLAB, 2020]:

²Cabe destacar que esta imagen ha sido extraída del proceso de calibración realizado a uno de los participantes del trabajo, por lo que es una imagen real.

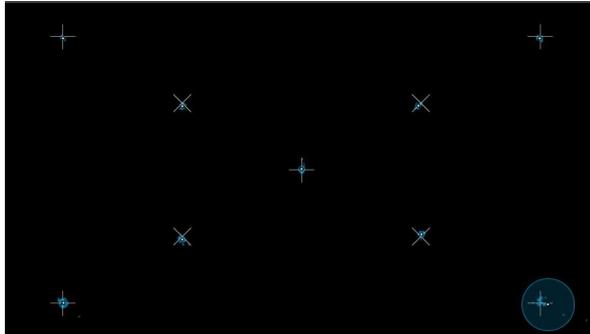


Figura 3.6: Proceso de calibración con la tecnología *eye tracking*. Fuente propia

1. Métricas Generales:

- a) Nombre del trabajo.
- b) Nombre o identificador de los participantes del trabajo.
- c) Nombre y fecha de la grabación (en diferentes formatos).
- d) Hora en la que se inició y se terminó la grabación.
- e) Duración.
- f) Nombre del filtro de fijación aplicado.
- g) Versión del *software*.
- h) Resolución y latencia.
- i) Resultados de la exactitud y precisión del método de calibración.
- j) Valores de exactitud y precisión de los resultados de validación.

2. Datos de seguimiento visual (figura 3.7):

- a) Posición inicial y final de la mirada.
- b) Dirección de cada uno de los ojos.
- c) Diámetro y dilatación de la pupila.
- d) Tipo de movimiento ocular (“fijación”; punto donde el individuo deja sus ojos clavados en una posición fija, y “sacada”; movimiento rápido que ocurren entre fijaciones).
- e) Número de parpadeos.
- f) Puntos de mirada o *gaze point*.
- g) Número de fijaciones y número de movimientos de sacada.
- h) Duración máxima, mínima y media de los intervalos entre los puntos de fijación.
- i) Duración de los puntos de fijación.
- j) Realización de rutas visuales (suma de fijaciones y sacadas).

- k) Velocidad y amplitud media, máxima y mínima de las sacadas.
- l) Número de eventos registrados.
- m) Representación del área de interés según los puntos de fijación (mapa de calor en la figura 3.8).
- n) Representación mapeada del orden en el que se ha registrado el movimiento de los ojos (mapa de rutas en la figura 3.9).

		Definición	Interpretación
	Fijación	Los ojos permanecen en una posición fija para tomar información.	Fijaciones largas: interés/compreensión. Fijaciones cortas: desinterés/incompreensión.
	Sacadas	Movimiento ocular rápido que ocurren entre fijaciones.	Sacadas regresivas: confusión/incompreensión. Sacadas repentinas: cambio de objetivo. Sacadas largas: cambio del centro de atención.
	Rutas visuales	Es la suma de fijaciones y sacadas.	Rutas rápidas y directas: fluidez cognitiva. Rutas lentas y erráticas: confusión/incompreensión.
	Parpadeo	Cierre y apertura rápida de párpados.	Baja frecuencia de parpadeo: mayor exigencia de atención. Alta frecuencia de parpadeo: menor exigencia de atención.
	Dilatación de pupila	Cambios en el tamaño de la pupila.	Dilatación: activación emocional.

Figura 3.7: Esquema de alguno de los datos visuales que proporciona el *eye tracking* [Brain and Marketing, 2016]

3. Datos sobre estímulos:

- a) Nombre y variables de los estímulos proporcionados.
- b) Nombre específico del contenido visual proporcionado a los participantes.
- c) Dimensiones y ubicación del contenido visual presentado a los participantes.
- d) Ubicación y dimensiones del área web visible para los participantes.
- e) Tamaño total de la página web.

4. Datos de otros sensores:

- a) Posición del ratón.
- b) Número de veces que se hace clic con el ratón.
- c) Tiempo de clicado.
- d) Tiempo desde la primera fijación hasta el registro del primer clic con el ratón.
- e) Registro de los datos de la respuesta galvánica de la piel.
- f) Variación, amplitud y media de la respuesta galvánica de la piel.

3.4. Ventajas de utilizar la tecnología *eye tracking*

Como ya se ha podido observar, el *eye tracking* se presenta como una herramienta poderosa y ampliamente adoptada en diversos ámbitos, sobresaliendo notablemente sobre otras alternativas disponibles. En ese sentido, resulta necesario examinar detalladamente cuáles son sus principales ventajas [Brain and Marketing, 2016, Parra, 2020]:

- Tiene una alta capacidad para registrar y analizar, de forma precisa, detallada y objetiva, los movimientos oculares de un individuo, lo que permite obtener una medida fiable sobre su comportamiento visual. Esto posibilita la realización de análisis estadísticos robustos y la extracción de conclusiones sólidas de los datos recopilados, aunque va a ser necesario poseer un conocimiento avanzado para el tratamiento de estos.
- Posee alta resolución espacial y temporal, lo que significa que es capaz de registrar los movimientos oculares de los individuos en orden de milisegundos, permitiendo el análisis de movimientos oculares de cualquier tipo, incluso los más rápidos y sutiles. Esto garantiza la captura completa de la información sin pérdidas.
- Por un lado, el *eye tracking* es una técnica no invasiva, lo que significa que no involucra ningún instrumento capaz de producir daño en la piel o penetrar físicamente en el cuerpo de quien lo utiliza.

Por otro lado, al ser una técnica relativamente discreta, permite que el individuo mantenga su comportamiento natural sin sentirse incómodo o restringido en la realización de cualquier tipo de tarea. Esta característica facilita la obtención de información sobre comportamientos instintivos en situaciones cotidianas.

Ambos aspectos proporcionan la capacidad de recopilar datos en entornos naturales y realistas, asegurando así una alta calidad en los informes recogidos.

- Es una tecnología adaptable y aplicable en una amplia gama de contextos, lo que lo convierte en una herramienta sumamente versátil. Además, al ser móvil y no requerir instalación fija en un lugar específico, facilita su utilización en prácticamente cualquier entorno o escenario.
- Es una herramienta que posee una alta compatibilidad con otras técnicas (como por ejemplo la medición de aspectos como la sudoración de la piel, la actividad eléctrica del corazón o la actividad eléctrica del cerebro), lo que ayuda a obtener una visión más detallada y global acerca de diversos ámbitos o procesos.
- Ofrece una retroalimentación en tiempo real acerca del comportamiento visual de los participantes, lo que le permite ajustar las tareas o intervenciones de manera instantánea, con el objetivo de maximizar la eficacia y la eficiencia de los datos obtenidos.
- Otorga una visualización gráfica de la forma en que los datos son recopilados. Para ello, utiliza la creación de mapas de calor o de rutas [Pallás, 2023].

- Mapas de calor: tal y como se muestra en la figura 3.8, en un mapa de calor se indican las zonas/áreas donde el individuo ha fijado más su atención durante el uso de la herramienta, proporcionando una idea general de cómo observó la escena. Normalmente, las zonas de mayor fijación aparecerán en rojo, y las de menor en verde.



Figura 3.8: Mapa de calor generado gracias a la utilización del *eye tracking* [Parra, 2020]

- Mapas de rutas: tal y como se observa en la figura 3.9,³ estos mapas detallan la trayectoria, punto por punto, de los movimientos oculares del individuo, por lo que dan una idea general del orden que utilizó para visualizar la escena.

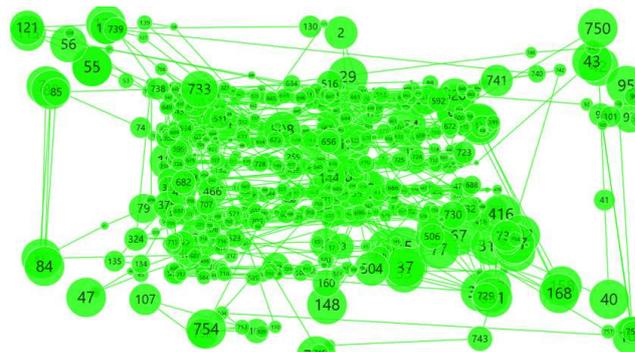


Figura 3.9: Mapa de ruta generado con la utilización del *eye tracking*. Fuente propia

³Esta figura ha sido extraída directamente de la sesión práctica de uno de los participantes del trabajo.

Estos dos mapas permiten la identificación de patrones visuales y áreas de interés, facilitando el análisis del comportamiento visual de manera clara y comprensible.

Las ventajas mencionadas anteriormente lo convierten en una herramienta sólida para el estudio y la comprensión del comportamiento visual y cognitivo en una variedad de contextos y disciplinas. En este trabajo, se utilizará para el análisis del comportamiento visual y fisiológico durante el proceso de aprendizaje.

3.5. Aplicaciones y usos del *eye tracking*

Las características y numerosas ventajas mencionadas anteriormente sobre el *eye tracking* posicionan esta tecnología como una herramienta muy utilizada en diversos campos y/o disciplinas [Parra, 2020]. Entre estos destacan:

3.5.1. Investigación de Mercado

Esta tecnología es altamente valorada en el ámbito de la “investigación de mercado” debido a su capacidad para proporcionar información detallada e imparcial sobre el comportamiento de los consumidores frente a los estímulos presentes en un entorno comercial. Permite a los investigadores analizar el proceso de toma de decisiones de los consumidores al seleccionar un producto específico, identificando qué elementos captaron más su atención y cuáles fueron pasados por alto. En la figura 3.10 se muestra un ejemplo real donde se resalta en color rojo la zona de mayor captación de atención por parte del consumidor, y en color verde aquella de menor interés.

Por consiguiente, esta tecnología ofrece un análisis detallado del comportamiento real de los consumidores, proporcionando datos valiosos que pueden influir en el diseño de la publicidad, el empaquetado y la disposición de productos en un establecimiento comercial. Esto no sólo optimiza la presentación de productos, sino que también permite mejorar la efectividad de las estrategias de marketing y aumentar la probabilidad de captar la atención de los consumidores de manera efectiva [Cardona, 2022, Pallás, 2023].



Figura 3.10: Mapeado de productos reales disponibles en un establecimiento comercial [Marketingdirecto, 2012]

3.5.2. Experiencia de usuarios en aplicaciones y páginas web

Asimismo, el *eye tracking* puede aplicarse para analizar la experiencia de los usuarios en la utilización de plataformas web. El objetivo es comprender los comportamientos, las necesidades, las motivaciones y las tendencias, con el fin de ofrecer soluciones efectivas que satisfagan tanto a los usuarios que busquen adquirir productos, como a los comerciales de las empresas que deseen venderlos.

Mediante el uso de esta herramienta de seguimiento ocular, tal y como se detalló en el apartado de la memoria dedicado a las ventajas (apartado 3.4), es posible generar mapas de calor (como el ilustrado en la figura 3.11). Estos son útiles para identificar problemas en el diseño de la plataforma, así como detectar barreras y distracciones que puedan afectar a la experiencia óptima del usuario. Además, permite explorar soluciones potenciales que traten de optimizar la capacidad de los usuarios para encontrar información de manera efectiva [Cardona, 2022, Intertek, 2021, Pallás, 2023].

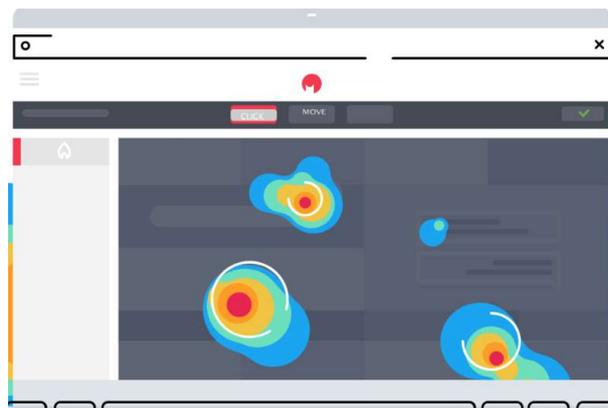


Figura 3.11: Mapeado web que permite conocer la experiencia de los usuarios en la utilización de un sitio web [Coppola, 2023]

3.5.3. Educación y entrenamiento

Gracias a las características técnicas de la herramienta, puede ser utilizada, por un lado, para el entrenamiento de habilidades:

Entrenamiento en pilotos y conductores

Se puede utilizar principalmente para el estudio de la forma en la que los operadores que trabajan en cabinas, salas de control y otros puestos críticos, escanean el entorno que los rodea mientras están al volante o pilotando una aeronave. Una formación rigurosa en entornos reales o simulados, tal como muestra la figura 3.12, puede ayudar a identificar los patrones de comportamiento visual, áreas de atención y toma de decisiones [Aerospace, 2024].



Figura 3.12: Representación del uso del *eye tracking* en una cabina real de un avión [Aerospace, 2024]

Entrenamiento en profesionales de la salud

En el ámbito de la medicina, se puede utilizar en métodos de formación y evaluación en entornos sanitarios simulados. Puede integrarse fácilmente en programas de enseñanza y completar el proceso de formación en perfiles sanitarios como cirujanos o médicos. Podría utilizarse además con el objetivo de comprender cómo dirigen su atención durante algún diagnóstico o proceso quirúrgico, con el afán de mejorar las habilidades y la precisión en dichas actividades. Se puede observar un ejemplo en la siguiente figura (3.13), en la que se muestra un sanitario utilizando la tecnología *eye tracking*, lo que permite proporcionar información mediante la grabación de la intervención, que puede ser utilizada posteriormente en la enseñanza.



Figura 3.13: Representación real del uso del *eye tracking* en una intervención quirúrgica [Medical, 2024]

Por otro lado, puede utilizarse para la educación, en actividades como:

Aprendizaje personalizado y diagnóstico de dificultades

Se puede utilizar en la detección de la manera en que los estudiantes leen y procesan la información en entornos de aprendizaje, ya sea la lectura de textos (como se muestra en la figura 3.14), o la resolución de problemas de tipo matemático. Esto puede ayudar a desarrollar técnicas de aprendizaje que sean efectivas para cada estudiante en particular.

Del mismo modo, gracias a su poder diagnóstico, puede utilizarse en la identificación temprana de problemas relacionados con las dificultades de lecto-escritura, tales como la dislexia (dificultad para comprender parcial o totalmente la información que se está leyendo o escribiendo) o la disgrafía (incapacidad para escribir correctamente). Puede ser una herramienta valiosa en la optimización del diseño de los materiales educativos y la disposición óptima del aula, promoviendo un aprendizaje más eficaz [wikipedia, 2024, MedLinePlus, 2022].

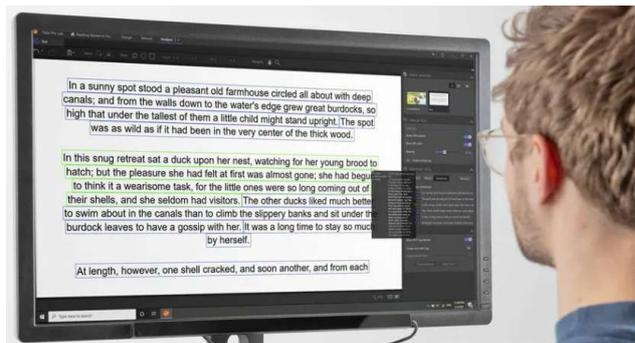


Figura 3.14: Proceso de lectura mediante la aplicación de la tecnología *eye tracking* [Diagnostico, 2024]

3.5.4. Investigación

Investigación para diagnóstico

Tal y como se ha señalado, el *eye tracking* es capaz de obtener información precisa acerca del comportamiento visual de la persona que lo utiliza, por lo que, identificando anomalías en los movimientos oculares, ofrece datos valiosos que pueden ser de ayuda en el diagnóstico precoz de [Diagnostico, 2024]:

- Enfermedades como el Alzheimer (enfermedad degenerativa que cursa con una destrucción lenta de la memoria y la capacidad de pensar), el parkinson (trastorno progresivo que se basa en la muerte progresiva de algunas neuronas del cerebro), la esquizofrenia (espectro que afecta en la forma de percibir la realidad) o el autismo (espectro que causa problemas de socialización y comunicación) [Association, 2024].

- Patologías cognitivas u oculares como el estrabismo (los dos ojos no alinean en la misma dirección) o el ojo vago (visión deficiente que se presenta en un ojo) [Institute, 2022, MedlinePlus, 2022].
- Dificultades de aprendizaje, como problemas de lecto-escritura, que suponen la incapacidad para leer o escribir.

Investigación en ciencias sociales

Respecto a las ciencias sociales, el *eye tracking* puede dar información relevante de acuerdo con diversos campos.

Por un lado, puede ayudar a comprender la manera en la que las personas interactúan visualmente en entornos sociales y culturales, tales como eventos, reuniones, entrevistas, conversaciones cara a cara... Permite estudiar y observar patrones de mirada, analizando cómo las dinámicas de grupo influyen en el comportamiento visual, es decir, permite observar qué aspectos atraen la atención visual durante la interacción y cómo esto afecta a la propia percepción y comprensión del mensaje.

Por otro lado, permite investigar cómo las expresiones faciales y los gestos no verbales influyen en la dirección de la mirada, con el objetivo de analizar, gracias a los patrones de mirada, quién mira a quién, de qué forma lo hacen y cuánto tiempo se mantiene la atención. Esto ayudará a comprender cómo se desarrollan y mantienen las relaciones sociales en distintos contextos.

3.5.5. Medicina de Rehabilitación

Puede ser utilizado como método de rehabilitación en personas que padezcan discapacidades visuales o algún tipo de trastorno neurológico, con el fin de mejorar la capacidad y la función visual, aumentando su calidad de vida [Rehabilitación, 2024].

Por un lado, pueden emplearse terapias diseñadas para fortalecer los músculos oculares y mejorar la coordinación binocular (coordinación de ambos ojos cuando son utilizados a la vez).

Por otro lado, puede emplearse para entrenar movimientos oculares específicos, con el fin de mejorar la capacidad de seguimiento de los pacientes que padezcan algún trastorno del movimiento ocular (como estrabismo o parálisis del nervio ocular). Esta herramienta puede ayudar a reducir la fatiga ocular y aumentar la percepción visual en actividades cotidianas.

3.6. Desventajas de la tecnología *eye tracking*

Hasta el momento, se han abordado únicamente los aspectos positivos y las ventajas que supone la utilización de esta herramienta, que la hacen aplicable en diversos ámbitos y procesos. No obstante, la tecnología *eye tracking* también presenta aspectos negativos y/o limitaciones [Brain and Marketing, 2016, Parra, 2020]:

- Los equipos de *eye tracking* y las licencias necesarias para utilizar el *software* implican un coste elevado, lo cual presenta una limitación para la accesibilidad de algunas entidades o instituciones, especialmente aquellas de menor tamaño.
- Requiere calibración: cada usuario en particular necesita una calibración específica para asegurarse del correcto registro de los datos. Este proceso, si el número de individuos es alto, puede ser laborioso.
- Posee sensibilidad a la iluminación, por lo que, bajo ciertas circunstancias lumínicas, pueden no funcionar correctamente y presentar errores de medición.
- Aquellos equipos que no sean móviles (como el utilizado en la realización del trabajo), presentan limitaciones en cuanto a los movimientos de los participantes, ya que estos deben permanecer en una posición fija durante el estudio. Puede llegar a restringir la naturalidad del comportamiento observado y potencialmente afectar a los resultados obtenidos.
- Aunque proporciona información valiosa, la cantidad masiva de datos que extrae puede suponer un gran problema. Requiere de avanzados conocimientos en interpretación y análisis de datos. Sin un nivel de entendimiento previo, los datos pueden ser difíciles de comprender.
- El uso de esta herramienta puede plantear preocupaciones éticas como la privacidad de los datos, por lo que es muy necesario que todos los participantes firmen un consentimiento informado. Este proceso podría suponer un problema, por ello, es complicado obtener una muestra elevada de individuos.

Tal y como se puede observar, no es una herramienta infalible, tiene sus puntos positivos y sus negativos, por eso, es objeto de estudio en numerosos trabajos.

3.7. Estado del arte y trabajos relacionados.

A continuación, se van a presentar, de forma cronológica, los diferentes estudios encontrados relacionados con el Trabajo Fin de Grado. Este proceso de revisión bibliográfica puede ser de ayuda para la realización del mismo. En todos los casos, se proporcionará un breve resumen del desarrollo del estudio y de la finalidad del mismo:

1. Lifelong Learning from Sustainable Education: An Analysis with Eye Tracking and Data Mining Techniques [Sáiz-Manzanares et al., 2020].

Este trabajo investiga el uso de las tecnologías avanzadas de aprendizaje (*ALT*) y el aprendizaje autorregulado (*SRL*) en un entorno educativo sostenible. Utilizando la tecnología de seguimiento ocular, analiza las diferencias en las trayectorias de exploración ocular entre 36 participantes (estudiantes y profesores universitarios). A estos se les preparó una sesión práctica que consistía en reproducir un vídeo y resolver un crucigrama, definiendo Áreas de Interés (*AOI*) relevantes y no relevantes.

Finalmente, se aplicaron técnicas estadísticas y de minería de datos para identificar las trayectorias de exploración más efectivas. Como conclusión, el estudio subraya la importancia de adaptar la enseñanza a las necesidades individuales de cada estudiante, lo que permite una educación más personalizada y sostenible, facilitando la detección temprana de estudiantes en riesgo y optimizando los recursos educativos.

2. Analysis of the Learning Process through Eye Tracking Technology and Feature Selection Techniques [Sáiz-Manzanares et al., 2021].

Este trabajo explora el uso de la tecnología de seguimiento ocular y técnicas de selección de características para analizar el proceso de aprendizaje. La finalidad es comprender cómo los estudiantes procesan la información durante la resolución de tareas.

La finalidad del estudio se basa en evaluar la eficacia de diferentes técnicas en la identificación de patrones de aprendizaje y en la diferenciación entre grupos de participantes, con el objetivo de facilitar intervenciones educativas personalizadas y mejorar el diseño de programas educativos.

3. [Sáiz Manzanares et al., 2021] Eye-tracking Technology and Data-mining Techniques used for a Behavioral Analysis of Adults engaged in Learning Processes.

Este estudio se centra en la utilización de tecnologías de *eye tracking* y técnicas de minería de datos para analizar el comportamiento o los estilos de aprendizaje en personas adultas (desde los 18 hasta los 69) durante diferentes etapas del proceso de aprendizaje.

Utilizando diferentes técnicas, busca detectar diferencias en los participantes, y agrupar aquellos con formas similares, con el objetivo de permitir a los educadores personalizar la presentación de las tareas y adaptar los materiales educativos según las necesidades individuales o grupales, mejorando así la eficacia del proceso educativo.

4. Estudio de los procesos cognitivos y metacognitivos: utilización de la tecnología *eye tracking* ventajas e inconvenientes [Sáiz Manzanares et al., 2022].

Este trabajo examina cómo el seguimiento ocular permite analizar los procesos cognitivos y metacognitivos en educación. La finalidad es evaluar la eficacia de esta herramienta para mejorar la comprensión de los procesos de aprendizaje y adaptar los métodos educativos a las necesidades individuales de los estudiantes.

5. Using Eye Tracking Technology to Analyse Cognitive Load in Multichannel Activities in University Students [Sáiz-Manzanares et al., 2024] .

Este trabajo analiza el uso de *eye tracking* para estudiar y comprender la carga cognitiva en actividades multicanal en estudiantes universitarios. Mediante la tecnología de seguimiento ocular recopilaron métricas, como la medición de la carga cognitiva y la fatiga visual, que proporcionaron información relevante para el estudio del proceso de aprendizaje bajo diferentes estímulos.

6. Hacia una metodología de evaluación del rendimiento del alumnado en entornos de aprendizaje iVR utilizando eye-tracking y aprendizaje automático [Serrano-Mamolar et al., 2023].

Este estudio se basa en investigar la aplicación de técnicas de *Machine Learning* en entornos de aprendizaje, con el objetivo de predecir el rendimiento del alumnado, y mejorar la comprensión de cómo los factores ambientales afectan en el proceso de aprendizaje.

Metodología

Una vez establecidos los conceptos que proporcionan el marco teórico adecuado, en este capítulo se procederá a describir las metodologías y herramientas utilizadas durante el trabajo para alcanzar los objetivos estipulados. Esto incluirá la obtención y descripción de los datos, la mención de las herramientas *software* y *hardware* empleadas, así como los entornos y aplicaciones utilizadas, entre otros aspectos.

4.1. Descripción y obtención de los datos

En el trabajo se han utilizado datos empíricos obtenidos directamente a través de sesiones prácticas utilizando la tecnología *eye tracking* junto con la herramienta *GSR*. Estas sesiones se llevaron a cabo con el alumnado del grado de Ingeniería de la Salud, quienes previamente firmaron un consentimiento informado, aceptando su participación en la recolección de los datos para el trabajo. Estos documentos no están a disposición pública debido a que contienen información sujeta a la protección de datos. El desarrollo del trabajo se enmarca dentro del trabajo I+D+i «*SmartLearnUni*», financiado por la Agencia Estatal de Investigación. Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidades. Gobierno de España Referencia: PID2020-117111RB-I00. Dicho trabajo tiene un informe positivo de la Comisión de Bioética de la Universidad de Burgos N.º IO 03/2022.

El proceso de recolección de los datos fue meticuloso y riguroso. Se realizaron varias sesiones prácticas (normalmente una por semana, para 3 o 4 participantes), en las que se emplearon las tecnologías mencionadas para capturar información detallada sobre el comportamiento visual y la respuesta fisiológica de los participantes durante el proceso de aprendizaje.⁴

Estas sesiones se basaron principalmente en la explicación teórica de las herramientas utilizadas, y la posterior utilización de las mismas para la contestación de unas preguntas sobre el contenido educativo presentado en uno de los laboratorios que conforman el proyecto *eEarlyCare-T*, que trata sobre el uso de la tecnología *eye tracking* en la Atención Temprana.⁵

⁴Si se quiere observar detalladamente en qué consistían las sesiones, hay un vídeo en la carpeta videos del repositorio de GitHub.

⁵Proyecto cofinanciado por la Unión Europea, n.º 2021-1-ES01-KA220-SCH-000032661 de informe positivo de la Comisión de Bioética de la UBU IO 04/2022.

A diferencia de otros estudios que se basan en datos obtenidos a través de internet o mediante bases de datos preexistentes, este trabajo se ha centrado en la obtención personal de datos reales, originales y específicos de los sujetos estudiados. Este enfoque permite una mayor precisión y relevancia en los resultados, ya que los datos recogidos son directamente representativos del grupo de interés.

Una vez recopilados, los datos se extrajeron para su correcta visualización y posterior preparación (limpieza, filtrado...) y procesado. Para obtener información detallada sobre el proceso de recolección de los datos y sobre la forma de estos, puede leerse el apéndice D.

4.2. Herramientas *hardware* y *software* utilizadas

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las herramientas utilizadas durante la obtención de los datos del trabajo son el *eye tracking* y el *Galvanic Skin Response* (que trata de medir la respuesta galvánica de la piel). En esta sección, se detallarán con mayor precisión los modelos exactos de estas tecnologías, proporcionando una descripción más técnica y específica de los equipos empleados.

Tobii Pro Spark

Es un dispositivo de seguimiento ocular diseñado por *Tobii*, una empresa líder muy reconocida en este tipo de tecnologías. *Tobii Pro Spark* [Products, 2024] es un *eye tracker* ligero y portátil que se acopla (mediante un elemento adhesivo) en la pantalla de un ordenador o monitor, y permite, mediante diversos sensores de cámaras y luces infrarrojas, la recopilación precisa de datos sobre el comportamiento visual de los participantes. Es una herramienta que destaca por poseer unas características óptimas que hacen que realice adecuadamente su función. Estas características son:

- Alta precisión y exactitud en la captura de movimientos oculares.
- Diseño compacto, ligero y portátil, que ofrece la posibilidad de recoger datos en diferentes ubicaciones o entornos, como, por ejemplo, aulas, hospitales o bibliotecas.
- Tiene compatibilidad con dispositivos *Windows*, *MacOS* y *Linux*, lo que amplía enormemente las posibilidades de utilización.
- Tiene una alta capacidad de integración con otros sistemas y *software* de análisis, como *Tobii Pro Lab* (que es el *software* utilizado en el trabajo, del que se hablará a continuación).
- Posee un cable USB (que puede ser normal o de tipo C) que permite la rápida y segura conexión entre los dispositivos.

Tal y como se muestra en la figura 4.1, este *eye tracker* tiene diversos componentes, todos ellos detallados de forma ordenada en la tabla 4.1.



Figura 4.1: Componentes de *Tobii Pro Spark* [Products, 2024]

Número	Elemento
1	Estuche para guardar, proteger y desplazar el <i>eye tracker</i> .
2	<i>Eye tracker Tobii Pro Spark</i> .
3	Elemento de montaje para pantallas curvas o finas.
4	Cable USB tipo C, para la conexión con ordenadores <i>MacOS</i> .
5	Tela para la limpieza de las cámaras y sensores que contiene.
6	Elemento adhesivo que permite el acople al ordenador.
7	Cable USB para la conexión con el puerto USB del ordenador.

Tabla 4.1: Lista de los componentes de *Tobii Pro Spark* [Products, 2024]

Todos estos componentes permiten que esta herramienta se acople a diferentes superficies o pantallas, con el objetivo de recopilar datos de seguimiento ocular en casi cualquier situación. Gracias a su diseño versátil y a la variedad de accesorios incluidos, puede ser utilizado en una amplia gama de entornos, desde laboratorios de investigación, hasta ámbitos educativos y de mercado. Además, la facilidad de instalación y transporte, aseguran una rápida configuración, maximizando la precisión de los datos recopilados.

Por todas estas características mencionadas, es la herramienta seleccionada para realizar las sesiones prácticas a los participantes, encargada de recopilar los datos necesarios para el trabajo.

Tobii Pro Lab

Es un *software* especializado desarrollado por la empresa *Tobii*, diseñado para proporcionar al usuario, mediante la combinación de una preparación sencilla y unas herramientas de visualización avanzadas, la capacidad de crear experimentos complejos, recopilar grandes volúmenes de datos provenientes del seguimiento ocular y observar o analizar cualitativamente grabaciones. Esto permitirá la visualización, el análisis y la interpretación de aspectos relevantes dentro de una amplia gama de estudios, desde pruebas de usabilidad e investigación de mercado, hasta experimentos de psicología y fisiología oculomotora [Product, 2024].

Esta herramienta proporciona una interfaz visual que permite a los investigadores diseñar su propio experimento (tal y como se muestra en la figura 4.2), así como analizar de forma cualitativa y cuantitativa los resultados. Este *software* permite la visualización de gran cantidad de datos, como los filtros de mirada personalizable, datos crudos de mirada y el conocimiento sobre los cálculos de gran cantidad de métricas, que serán útiles para la determinación precisa de conclusiones.

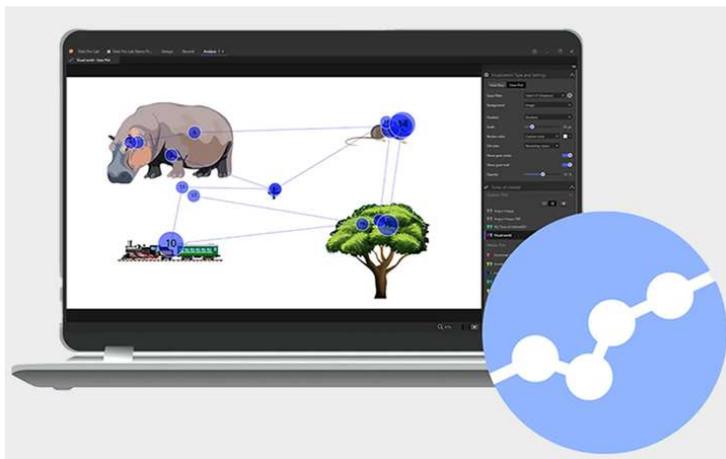


Figura 4.2: Interfaz de *Tobii Pro Lab* [Design, 2024, Product, 2024]

Además de ofrecer herramientas de análisis potentes, *Tobii Pro Lab* también está diseñado para trabajar con otros tipos de *software* o herramientas (como *Tobii Pro Spark* o *GSR*), que son utilizadas para la grabación, el análisis y la obtención de datos. A su vez, habilita las exportaciones de datos en formatos estandarizados, como por ejemplo *Microsoft Excel*, *Matlab* o *SPSS* [Product, 2024] (*Downloads* - “*Tobii Pro Lab Product Description*”).

Tipos de trabajos

Los datos sobre el diseño de los estudios, los estímulos, los participantes y las grabaciones, se almacenan dentro de *Tobii Pro Lab* mediante la creación de trabajos. Pueden seleccionarse hasta cinco tipos de proyectos [Projects, 2024]:

- Proyecto de pantalla o *Screen project*: se representa un estímulo en una pantalla (puede ser de un monitor, un ordenador, una tablet o un teléfono), y se recopilan los datos mediante un dispositivo de seguimiento ocular (como podría ser la herramienta anteriormente comentada; *Tobii Pro Spark*). Con este trabajo se analiza cómo responde visualmente el individuo al estímulo producido.
- Proyecto de Pantalla avanzada o *Advanced Screen project*: se representan una secuencia repetida de estímulos en una pantalla, y se capturan los datos de mirada mediante un dispositivo de seguimiento ocular. Es similar al anterior, pero en este caso se presentan gran cantidad de estímulos de manera continua.
- Proyecto con gafas o *Glasses project*: se utilizan unas gafas (en las que está incluido el dispositivo de seguimiento ocular), para recopilar los datos de visuales durante la duración del trabajo. Este tipo de trabajos posibilita la utilización de estos dispositivos en ambientes cotidianos y sin restricción de movimientos.
- Proyecto con cámara o *Scene camera project*: durante la duración del trabajo se utiliza una cámara de vídeo externa para la grabación de los eventos. No sólo se recopila información con la herramienta de seguimiento visual, sino que también se utilizan herramientas externas, que pueden dar otro tipo de información relevante, como el comportamiento no verbal.
- Proyecto externo o *External presenter project*: se denomina así porque se utiliza un *software* externo o de terceros para desarrollar el trabajo.

Cada uno de los tipos de proyectos mencionados anteriormente puede contener gran variedad de grabaciones, participantes, líneas de tiempo, capturas de pantalla, datos mapeados o eventos en su desarrollo. En concreto, el tipo de proyecto utilizado para realizar el Trabajo Fin de Grado es un trabajo de pantalla o *Screen project*.

Para utilizar el *software*, es indispensable disponer de una licencia, que puede ser perpetua (otorga el derecho a utilizar el *software* durante toda la vida útil del producto, junto con un año de actualizaciones gratuitas), o de suscripción anual (proporciona acceso a las últimas versiones del *software*). En cada ordenador solamente podrá estar activa una de las licencias mencionadas.

La efectividad de esta herramienta radica en su constante actualización, ofreciendo a los usuarios nuevas versiones⁶ que corrigen errores y/o añaden funcionalidades mejoradas con respecto a las versiones previas. Esta característica asegura que los usuarios siempre tengan acceso a las últimas mejoras y características, manteniéndolos informados sobre los cambios que se realizan.

Tobii Pro Lab es el *software* utilizado para la creación de las sesiones prácticas y la recopilación de los datos dentro del trabajo.

⁶Para observar las diferentes versiones de *Tobii Pro Lab*, puede accederse a la página web oficial de *Tobii*.

Shimmer3 GSR+

El *Shimmer3 GSR+* (*Galvanic Skin Response*) es un sensor portátil, versátil y potente, utilizado para medir la respuesta galvánica de la piel en gran variedad de aplicaciones de investigación, como la psicología, la neurociencia, la fisiología y la investigación de mercados [ShimmerGSR, 2024, ShimerGSR, 2021].

Esta medida hace referencia a la capacidad que posee la piel para conducir electricidad debido a la actividad de las glándulas sudoríparas del organismo. Así pues, cuando una persona experimenta emociones intensas, como estrés o ansiedad, el sistema nervioso estimulará las glándulas sudoríparas causando un aumento considerable en la capacidad de conductancia eléctrica de la piel. Este aumento es detectado por el sensor *GSR*, proporcionando una medición precisa, fiable y objetiva acerca de la respuesta fisiológica del cuerpo y de la actividad nerviosa generada ante diferentes estímulos emocionales externos [BrainSigns, 2015].

Esta herramienta, tal y como se puede observar en la figura 4.3, consta de un sensor inalámbrico que monitoriza la conductividad de la piel entre tres electrodos reutilizables conectados a los dedos de la mano.



Figura 4.3: Herramienta *Shimmer3 GSR+* [Shimmersensing, 2024]

Shimmer3 GSR+ es una herramienta muy potente debido a la alta compatibilidad que posee con otros *software* de análisis y de registro de datos. Tiene la capacidad de integrarse con diferentes herramientas, como *Tobii Pro Lab*, permitiendo el uso combinado de ambas.

En el caso de este Trabajo Fin de Grado, ha sido interesante la utilización de este aparato ya que mostraba mayor cantidad de información relevante en el estudio de los objetivos propuestos. A su vez, gracias a su diseño portátil, no invasivo y a su gran capacidad de conectividad, ha permitido la realización de las sesiones prácticas sin ninguna problemática.

4.3. Técnicas metodológicas de programación

Durante la realización de la visualización, limpieza, filtrado y análisis de los datos obtenidos mediante las herramientas detalladas anteriormente, se han utilizado técnicas y herramientas de programación específicas debido al gran volumen y complejidad de los datos.

lenguajes de programación

Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente utilizado que posee una serie de características que lo hacen extremadamente popular en una amplia gama de aplicaciones [Wikipedia, 2024]. Entre los atributos más distintivos se encuentran:

1. Lenguaje interpretado: utiliza un intérprete para ejecutar el código directamente, que lo hace más accesible y fácil de aprender.
2. Lenguaje multiparadigma: es capaz de soportar varios estilos de programación, como la programación orientada a objetos (*POO*) o la programación funcional (basada en la creación de funciones).
3. Sintaxis clara y legible, que proporciona una mejor legibilidad al código y lo hace fácil de entender.
4. Lenguaje de tipado dinámico: no es necesario especificar los tipos de datos de las variables en el momento de la declaración.
5. Lenguaje con una alta portabilidad, es decir, es compatible con la mayoría de los sistemas operativos.

Gracias a estas cualidades distintivas, se optó por utilizar *Python* sobre otros lenguajes de programación, como por ejemplo R, C++ o Java. Este lenguaje ha sido empleado para la visualización, limpieza, filtrado y análisis de los datos extraídos mediante las herramientas *hardware* descritas anteriormente.

Markdown

Markdown es un lenguaje ligero diseñado para formatear texto de manera sencilla y legible en plataformas digitales. El objetivo de este lenguaje es permitir a los usuarios documentar resultados utilizando una estructura básica con un estilo natural de escritura [DaringFireball, 2004]. Entre las características más distintivas se encuentran:

1. Sintaxis intuitiva y simple, lo que lo hace fácil de aprender y de utilizar.
2. Es portable a cualquier editor de texto plano, pues posee alta compatibilidad con la mayoría de las plataformas.
3. Se convierte fácilmente a *HTML* (documento de texto que define la estructura y contenido de una página web).

Markdown ha sido utilizado en el trabajo para documentar adecuadamente los pasos empleados para el filtrado y el análisis de los datos y para comentar adecuadamente los resultados.

Bibliotecas

Además de las características mencionadas sobre el lenguaje de programación de *Python*, se seleccionó este frente a otros debido a que también cuenta con una amplia gama de bibliotecas (tal y como se muestra en la figura 4.4), que incluyen módulos y paquetes que permiten abarcar multitud de tareas.



Figura 4.4: Representación de las bibliotecas de *Python* utilizadas en el trabajo. Fuente propia

Las bibliotecas utilizadas en este trabajo son:

Pandas

Es una biblioteca de *software* de código abierto programada en *Python*. Es flexible, potente y fácil de utilizar, está diseñada principalmente para la manipulación, el manejo y el análisis de estructuras de datos, permitiendo cargar, alinear, manipular y fusionar datos [Pandas, 2022].

Concretamente, en este trabajo se ha utilizado para la lectura, el manejo, la manipulación y la fusión de los datos extraídos de la tecnología *eye tracking* en combinación con la herramienta *GSR*.

Scikit-learn

Es una biblioteca de código abierto para el lenguaje de programación de *Python*, diseñada para la creación de modelos de aprendizaje automático y utilización de algoritmos de minería de datos [DataScientest, 2022].

Es fácil de utilizar, posee una documentación extensa, y tiene una alta capacidad de integración con otras bibliotecas, lo que lo convierte en una herramienta esencial para científicos de datos.

Sea cual sea el modelo que se vaya a utilizar, los pasos del modelado suelen ser similares:

1. Selección de un modelo importando la clase *Scikit-learn* (o *sklearn*).
2. Establecimiento de los parámetros del modelo.
3. Entrenamiento y prueba del modelo generado.

En concreto, en el trabajo se ha utilizado esta biblioteca para la realización de técnicas de aprendizaje supervisado y no supervisado, de las que se hablará posteriormente (concretamente, en el punto 4.5).

Matplotlib

Es una librería de *Python* especializada en la creación de gráficos y visualizaciones en dos dimensiones. Permite generar y personalizar gran cantidad de gráficos de diferentes tipos; diagramas de barras, de líneas, de áreas, de contornos, gráficos estadísticos, histogramas [Alberca, 2020]...

Seaborn

Es una biblioteca que forma parte de *Scikit-learn* y que permite la creación de gran cantidad de gráficos diferentes, entre los que destacan los gráficos estadísticos. Estos permitirán observar y analizar, de forma visual, los resultados obtenidos [Seaborn, 2023].

Statsmodels

Es una biblioteca de *Python* que permite a los usuarios estimar y realizar pruebas de análisis y modelado de datos estadísticos. Su sintaxis sencilla y reproducible permite utilizar, modelar y explorar series estadísticas sin dificultad [Daniel, 2022].

Concretamente, en el trabajo se ha utilizado esta biblioteca para la generación de la técnica de regresión lineal, sobre la que se hablará en el apartado 4.5.

4.4. Entornos y Aplicaciones

Para el desarrollo adecuado del trabajo, se han empleado una serie de aplicaciones que han posibilitado la documentación, la organización y el desarrollo adecuado del mismo. El conjunto de aplicaciones utilizadas se muestran en la figura 4.5.



Figura 4.5: Representación de las aplicaciones utilizadas para la realización del trabajo. Fuente propia

Overleaf

Se trata de un editor *LaTeX* en formato web que permite escribir, visualizar y compartir documentos y publicaciones científicas. *LaTeX* es una herramienta que se basa en el lenguaje de programación *TeX*, y permite realizar el procesamiento de un documento de texto plano, convirtiéndolo en documentos científicos y técnicos con una alta calidad tipográfica [UCM, 2021, Wikipedia, 2015].

Esta herramienta es la que se ha utilizado para la generación de la memoria del trabajo [Overleaf, 2024].

Anaconda Navigator - Jupyter Notebook

Por un lado, *Anaconda Navigator* es una interfaz gráfica de usuario disponible para *Windows*, *macOS* y *Linux*, que facilita la gestión de paquetes, entornos de desarrollo y aplicaciones relacionadas con la ciencia de datos, utilizando el lenguaje de programación de *Python* [Conde, 2019][Rondón, 2022].

Por otro lado, *Jupyter Notebook* es una aplicación web de código abierto que permite crear y compartir documentos que contienen, en celdas individuales, código ejecutable, ecuaciones matemáticas en formato *LaTeX*, elementos gráficos y texto en formato *Markdown*. Es una herramienta versátil, compatible con gran cantidad de lenguajes de programación, que puede adaptarse a una amplia variedad de casos de uso, desde el análisis de datos, hasta la enseñanza y la investigación [Fernandez, 2023].

Concretamente, *Anaconda Navigator* ha sido utilizada en el trabajo para la ejecución de *Jupyter Notebook* con el objetivo de crear un cuaderno que permitiera visualizar, analizar y documentar los datos extraídos de la herramienta *eye tracking* junto con *GSR*.

Visual Studio

Es un editor de código fuente de *software* libre y multiplataforma desarrollado por la empresa *Microsoft*. Es una herramienta utilizada para escribir, depurar (ayuda a detectar errores en el código) y compilar código en diferentes lenguajes de programación, como *Python* o *C++*.

Concretamente, esta aplicación se ha utilizado para la comprobación de la correcta función del cuaderno generado [Flores, 2022].

GitHub

Es una plataforma web gratuita que permite el alojamiento de código fuente, la colaboración y la planificación de tareas (puede realizarse un seguimiento de los cambios y mantener un registro de errores). Es una herramienta fundamental en el desarrollo *software*, proporcionando un entorno colaborativo, seguro y eficiente para la gestión y generación de repositorios, que pueden ser públicos o privados [Fernández, 2019].

Esta plataforma se ha utilizado para generar un repositorio privado (tal y como se indica en el capítulo de introducción de la memoria) en el que se encuentra detallado el código fuente del trabajo, los datos extraídos y generados, la información teórica, el proceso seguido desde el inicio hasta la finalización del trabajo... Es decir, esta herramienta se ha utilizado para llevar el seguimiento adecuado del trabajo.

Excel

Es una herramienta que permite el manejo y el análisis de grandes cantidades de datos. Divide estos datos en celdas agrupadas en filas y columnas, las cuales pueden contener números, texto o incluso fórmulas. Con estas celdas pueden crearse gráficos o tablas dinámicas que van a permitir el estudio profundo de los datos [colaboradores Wikipedia, 2024].

Esta aplicación se ha utilizado para el guardado y visualización de los datos extraídos directamente del *eye tracking* y de la herramienta *GSR*.

Zube

Se trata de una plataforma ágil de gestión de trabajos diseñada para equipos de desarrollo *software*. Cuenta con una integración con *GitHub*, permitiendo planificar y rastrear trabajos de forma colaborativa y mantener actualizadas las tareas y los problemas que surgen durante el proceso. Ofrece una visión clara y sencilla a través de tableros *Kanban* que permiten estructurar las funciones y acciones de cada uno de los miembros del equipo.

Concretamente, ha sido utilizada para la planificación y organización de las tareas necesarias para llevar a cabo el trabajo. [WebCatalog, 2023].

4.5. Técnicas

Tal como se indica en la definición de los objetivos del trabajo, se busca aplicar algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado sobre los datos obtenidos de las herramientas, para el análisis y la toma de decisiones sobre aspectos relativos al proceso de aprendizaje de los participantes. Se van a definir qué son cada uno de ellos, y con qué objetivo se realizaron en el trabajo:

Aprendizaje supervisado

El aprendizaje supervisado es una subcategoría de la Inteligencia Artificial o *Machine learning* que se basa en el ajuste de un modelo por medio de datos preparados de entrenamiento, para que, posteriormente, sea capaz de predecir y clasificar los resultados con precisión [IBM, 2024].

Pueden dividirse en dos tipos:

- **Clasificación:** utiliza algoritmos para predecir a qué categoría o clase pertenecen los nuevos datos, basándose en las similitudes con los datos pasados como entrenamiento. Solamente se utiliza cuando las salidas son categóricas (es decir, cuando tienen diferentes categorías, como por ejemplo que un color pueda ser “rojo” o “azul”).
- **Regresión:** trata de entender la relación entre variables. Se utiliza para hacer predicciones futuras sobre el valor numérico de nuevos datos, basándose en la similitud con los datos de entrenamiento. Sólo es aplicable sobre salidas continuas (por ejemplo, detectar el precio de una casa dependiendo el tamaño, la ubicación...).

Regresión Lineal

Es un método de aprendizaje supervisado que se basa en un modelo matemático de análisis de datos que puede ayudar a determinar qué variables tienen un impacto significativo sobre la variable objetivo del estudio. Es capaz de describir la dirección y la magnitud de las relaciones entre variables [Saavedra, 2022].

En concreto, en el trabajo se va a utilizar esta técnica para evaluar si las variables de género, visualización previa del laboratorio, visualización con audio o sin audio, duración de la grabación, tipo de movimiento ocular (fijación o sacada) y la media de la respuesta galvánica de la piel, influyen en la cantidad total de aciertos en el test, y, por ende, en la calidad del proceso de aprendizaje.

Para ello, utiliza una fórmula que puede ser representada de forma sencilla:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon$$

Donde β_0 es el denominado intercepto o punto de partida, $\beta_1 \beta_2 \beta_p$ son los coeficientes, es decir, los valores que indican cuánto y cómo cada variable afecta a la variable objetivo, y ϵ , que es el error o la parte que no puede ser explicada por las variables independientes.

Algoritmo *K-Nearest Neighbors*

El algoritmo *K-Nearest Neighbors* (*KNN*) o “Vecino Más Cercano” es un método de aprendizaje supervisado utilizado para problemas de clasificación y regresión. Este algoritmo asume que los datos similares están unos cerca de otros, y, como resultado, busca calcular la distancia entre todos los puntos, para asignarlos después a una categoría o determinar su valor [IBM, 2022].

En el caso concreto de este trabajo, va a utilizarse *KNN* con fines de regresión, es decir, se va a intentar predecir el número total de aciertos en el test, a partir de los parecidos en los datos pasados como entrenamiento. En regresión, este algoritmo sigue la siguiente ecuación:

$$\hat{y} = \frac{1}{K} \sum_{i \in \mathcal{N}_K(x^*)} y_i$$

Donde \hat{y} es la predicción del valor para el nuevo dato introducido, $\frac{1}{K}$ es el número de vecinos utilizados para la predicción del nuevo valor del dato, $i \in \mathcal{N}_K(x^*)$ es el conjunto de los K vecinos que están más cercanos al punto, e y_i son los valores objetivo de los puntos vecinos.

Aprendizaje no supervisado

Por otro lado, el aprendizaje no supervisado es una rama del aprendizaje automático que utiliza algoritmos para encontrar patrones (similitudes o diferencias) o estructuras ocultas y agrupar conjuntos de datos sin etiquetas. A diferencia del aprendizaje supervisado, en este no se utilizan datos de entrenamiento, sino que es el propio algoritmo el que debe descubrir la estructura por sí mismo [IBM, 2023] .

Los métodos de aprendizaje supervisado se han utilizado en este trabajo para dos aspectos en concreto:

Agrupación mediante *clusters* o *Clustering*

Es una técnica que trata de agrupar los datos en *clusters* o grupos en función de sus similitudes o diferencias. Se basa en que los datos del interior de cada *cluster* han de ser más parecidos entre sí que con los datos de otros grupos [Caparrini, 2023, KeyTrends, 2023].

Concretamente, en este trabajo se han evaluado tres algoritmos de *clustering*:

1. *k-Means*: trata de agrupar un conjunto de datos en K *clusters*. El objetivo es dividir los datos de tal forma que cada punto pertenezca al *cluster* o grupo con el centroide más cercano a él, de forma que los puntos que se encuentren en el mismo *cluster* se parecerán más entre sí que respecto a los de otro grupo [w3Schools, 2024] .

Inicialmente, elige K puntos iniciales llamados centroides de forma aleatoria, después, calcula la distancia euclidiana entre cada punto de datos y todos los centroides, asignando el punto al cluster más cercano. Seguidamente, actualiza los puntos de los centroides mediante el cálculo de la media de todos los puntos de este *cluster*.

Este proceso lo repite tantas veces como sea necesario hasta que la posición de los centroides no cambie entre iteraciones.

Dependiendo el número de *clusters* que se seleccionen inicialmente, los resultados variarán considerablemente, por eso es muy importante ajustar correctamente el número de los grupos a la estructura de los datos. Para detectar el número óptimo de *clusters* a utilizar según el conjunto de datos, en este trabajo se utilizó el denominado “Método del Codo”, el cual estudia el comportamiento de la curva de la suma de las distancias cuadradas dentro del *cluster* a medida que se aumenta el número de grupos. Normalmente, si este valor aumenta, los puntos de los datos están más cerca del centroide, hasta que llega un punto que el beneficio disminuye. Ese punto es el que finalmente determina el número óptimo de *clusters* a utilizar [Barrios, 2023].

2. *DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)*: algoritmo basado en densidad, agrupa puntos cercanos formando *clusters* de alta densidad, y separa puntos aislados en áreas de baja densidad o ruido [Wikipedia, 2023].

Al igual que en *k-Means*, hay unas métricas que deben estudiarse, y que, dependiendo de su valor, los resultados varían considerablemente. Estos son *epsilon* (ϵ), que es la distancia máxima para considerar que dos puntos pertenecen al mismo grupo, o *minPts*, que es el número mínimo de puntos necesarios para ser considerado grupo.

3. *Mixturas Gaussianas (GMM)*: asume que los datos pueden ser representados como una combinación múltiple de distribuciones *gaussianas*, permitiendo así que cada punto de datos tenga una probabilidad de pertenecer a cada uno de los *clusters*. Este método, por tanto, trata de determinar a qué distribución de probabilidad *gaussiana* (también denominada distribución normal), pertenecen en mayor medida cada uno de los datos [GeeksforGeeks, 2023].

Inicialmente, establece unos parámetros para las K distribuciones *gaussianas*, después, calcula la probabilidad de que cada punto de datos pertenezca a cada distribución y, por último, maximiza y recalcula estos valores. Este proceso se realiza hasta que los cambios en los parámetros sean menores que un umbral establecido.

Al igual que en *k-Means*, será necesario determinar el número de componentes o número de *gaussianas* que se espera encontrar en los datos.

Para evaluar el rendimiento de las agrupaciones de cada uno de los algoritmos mencionados, en este trabajo se ha utilizado la métrica *ARI (Adjusted Rand Index)*, que trata de comparar agrupaciones diferentes del mismo conjunto de datos. Muestra qué tan similares son las agrupaciones teniendo en cuenta el azar. El rango de valores de *ARI* oscila entre 1 y -1, un valor igual a 1 mostraría que las agrupaciones realizadas son idénticas, valores cercanos a 0 indican una similitud esperada por azar, y, por último, valores negativos indican una similitud peor que la esperada por azar [AIML, 2022, GeeksforGeeks, 2024].

Reducción de la dimensionalidad

Tal y como su nombre indica, es una técnica utilizada para reducir el número de variables bajo las que se describen los datos, manteniendo la mayor cantidad posible de información relevante. Se utiliza cuando el número de características o dimensiones de un determinado conjunto de datos es demasiado elevado, con el objetivo de mejorar la eficiencia computacional, reducir el ruido y facilitar la visualización.

Durante la realización del trabajo, se ha utilizado el método de reducción basado en “Análisis de Componentes Principales o *PCA*”. Este método transforma un conjunto de variables correlacionadas entre sí, en un conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. Estas componentes son combinaciones lineales de las variables originales del conjunto de datos, y se ordenan de manera que la primera capture la mayor varianza, la segunda capture la segunda mayor varianza, y así consecutivamente. De esta forma, se reducirán las dimensiones del conjunto de datos mientras se conservan la mayor cantidad posible de la información original [Wikipedia, 2023, Zubcoff, 2022]

En el trabajo, a su vez, se ha buscado la obtención del cálculo de las cargas de estos componentes, es decir, se ha evaluado qué variables son las que influyen más en la creación de cada uno de los componentes principales, con el objetivo de ver cuál de ellas son las que pueden agrupar mejor a los participantes.

Conclusiones

5.1. Resumen y discusión de resultados

Como se ha mencionado anteriormente durante la memoria, el trabajo se fundamenta en la realización de sesiones prácticas con los miembros del alumnado del grado de Ingeniería de la Salud, utilizando la tecnología de *eye tracking* junto con el medidor de respuesta galvánica de la piel (*GSR*). Estas sesiones se realizaron con dos objetivos claros:

- Por un lado, el aprendizaje y la explicación práctica del uso de ambas herramientas.
- Por otro lado, la recolección de datos sobre el comportamiento visual y fisiológico de individuos reales para la determinación de conclusiones respecto al proceso de aprendizaje.

Gracias al estudio profundo de los datos recopilados durante las sesiones prácticas, se han podido obtener una serie de conclusiones que ofrecen una orientación acerca del comportamiento visual y fisiológico de las personas durante el proceso de aprendizaje. Sin embargo, debido al tamaño muestral tan reducido (únicamente 17 sujetos), estas conclusiones no pueden considerarse representativas ni definitivas, si no que proporcionan una guía preliminar que podría estar cercana a la realidad. Es importante mencionar que el tratamiento de los datos junto con los resultados detallados se encuentran en el apéndice experimental (E), en el que se explican, utilizando elementos gráficos, las tendencias observadas en los resultados y se discuten posibles predicciones y relaciones entre variables.

Se pueden dividir las deducciones en dos categorías, cada una proporcionando información relevante desde distintos puntos de vista. La primera se basa en los resultados obtenidos mediante técnicas de aprendizaje no supervisado, mientras que la segunda se centra en los resultados derivados de técnicas de aprendizaje supervisado. La combinación de ambas perspectivas permitirá definir una conclusión más completa y holística sobre el comportamiento visual y fisiológico ya mencionado.

Aprendizaje No Supervisado

Tras la evaluación de los resultados obtenidos gracias a la aplicación de técnicas de aprendizaje no supervisado, pueden obtenerse ciertas tendencias.

Análisis de Componentes Principales

De la utilización de técnicas para redimensionar el conjunto de datos (“Análisis de Componentes Principales (*PCA*)”), se ha podido observar que, entre todas las variables a estudio; duración de la grabación de la sesión, relación entre el número de eventos de fijación respecto a número de eventos de sacada, respuesta galvánica media de la piel, previa visualización del laboratorio, tipo de visualización (con audio o sin audio) y el número de aciertos en el test, las que más influyen a la hora de redimensionar los datos en 2 dimensiones (“PC1” y “PC2”) están representadas en la figura 5.1:

	PC1	PC2
Recording duration	0.210880	0.626128
Fixation to Saccade Ratio	-0.079508	-0.523831
Galvanic skin response (GSR)	0.095776	-0.480021
Visualizacion laboratorio	-0.546115	0.282645
Tipo de visualizacion	0.559402	-0.083311
Aciertos Test	-0.573466	-0.127730

Figura 5.1: Cargas de los componentes principales (*PCs*). Fuente propia

Al examinar las cargas de PC1 y PC2, se pueden identificar qué variables han tenido una mayor influencia en la definición de estos componentes principales. En el caso de PC1 (tabla 5.1), las variables más influyentes son los aciertos en el test, el tipo de visualización (con o sin audio), y la previa visualización del laboratorio. Es importante considerar que algunas de estas variables tienen cargas positivas y otras negativas; sin embargo, lo crucial es el valor absoluto de la carga, que indica la magnitud de su influencia real en el componente principal correspondiente.

Variable	Carga
Aciertos finales en el test	-0,57
Visualización con audio o sin audio	0,55
Previa visualización del laboratorio	-0,54

Tabla 5.1: Cargas de las variables con mayor influencia en PC1

Por otro lado, en el caso de PC2, las variables más influyentes se encuentran representadas en la tabla 5.2:

Variable	Carga
Duración total de la grabación	0,62
Ratio fijación respecto sacada.	-0,52
Respuesta galvánica de la piel	-0,48

Tabla 5.2: Cargas de las variables con mayor influencia en PC2

Estas cargas son fundamentales para interpretar cómo cada variable contribuye a la estructura y variabilidad capturada por los componentes principales en el análisis de *PCA*. Las variables descritas con mayor carga poseen mayor influencia en la forma en la que se agrupan los datos.

Clustering

De la utilización de técnicas de *clustering*, se ha podido analizar las relaciones entre las variables de estudio y las agrupaciones resultantes (tal y como muestran las figuras 5.2, 5.4, 5.6 y 5.8). Estas técnicas han permitido identificar patrones y tendencias en los datos, mostrando cómo las diferentes variables interactúan entre sí y qué combinaciones de variables son más comunes en ciertos grupos de datos. Concretamente, la utilización de diferentes algoritmos ha permitido la validación de los resultados obtenidos, la exploración de distintas facetas respecto a la estructura subyacente de los datos, y una mejora en la interpretación.

Del análisis de las relaciones observadas utilizando los diferentes algoritmos de *clustering* (*k-Means*, *DBSCAN*, *GMM*) representadas en las figuras 5.2, 5.4, 5.6 y 5.8, junto con los datos obtenidos de las agrupaciones (figuras 5.3, 5.5, 5.7 y 5.9), se han podido observar ciertas tendencias de comportamiento en los participantes del trabajo. En particular, todos estos métodos deducían que los sujetos que obtenían un mayor número de aciertos en el test eran aquellos que:

- Visualizaron previamente el laboratorio.
- Seleccionaron la visualización sin audio.
- Obtuvieron una mayor media registrada de la respuesta galvánica de la piel.
- Obtuvieron un mayor número de registros de fijación, respecto a los registros de sacada.
- Representaron una mayor dispersión y un mayor pico en cuanto a la duración del laboratorio, lo que indica que hubo más casos con duraciones extremas.

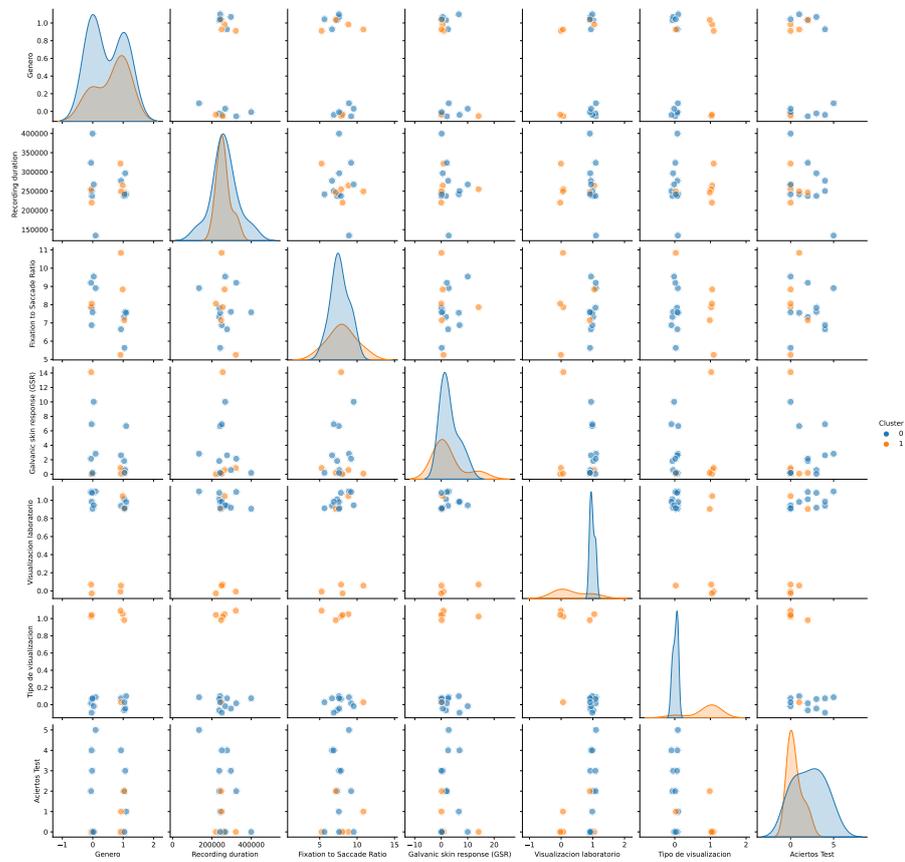


Figura 5.2: Representación de la relación entre variables utilizando *k-Means* con 2 *clusters*. Fuente propia

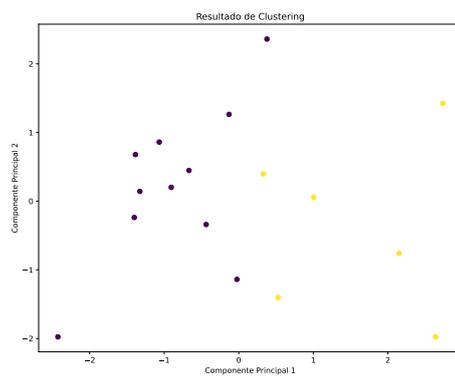


Figura 5.3: Representación de *clustering* de los datos utilizando *k-Means* con 2 *clusters*. Fuente propia

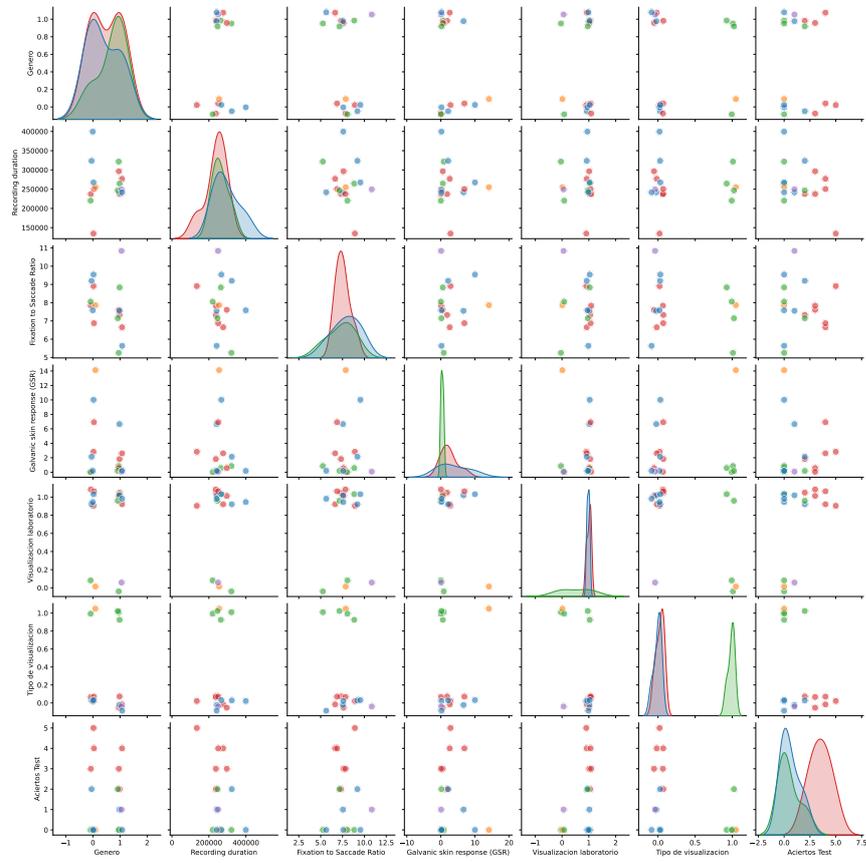


Figura 5.4: Representación de la relación entre variables utilizando *k-Means* con 5 *clusters*. Fuente propia

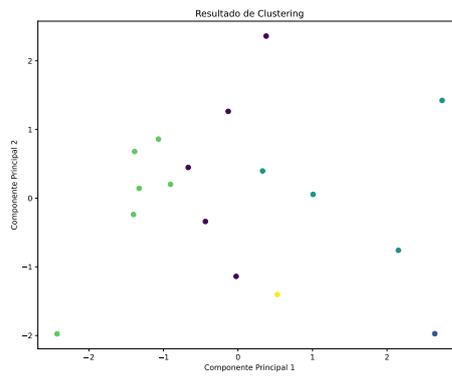


Figura 5.5: Representación de *clustering* de los datos utilizando *k-Means* con 5 *clusters*. Fuente propia

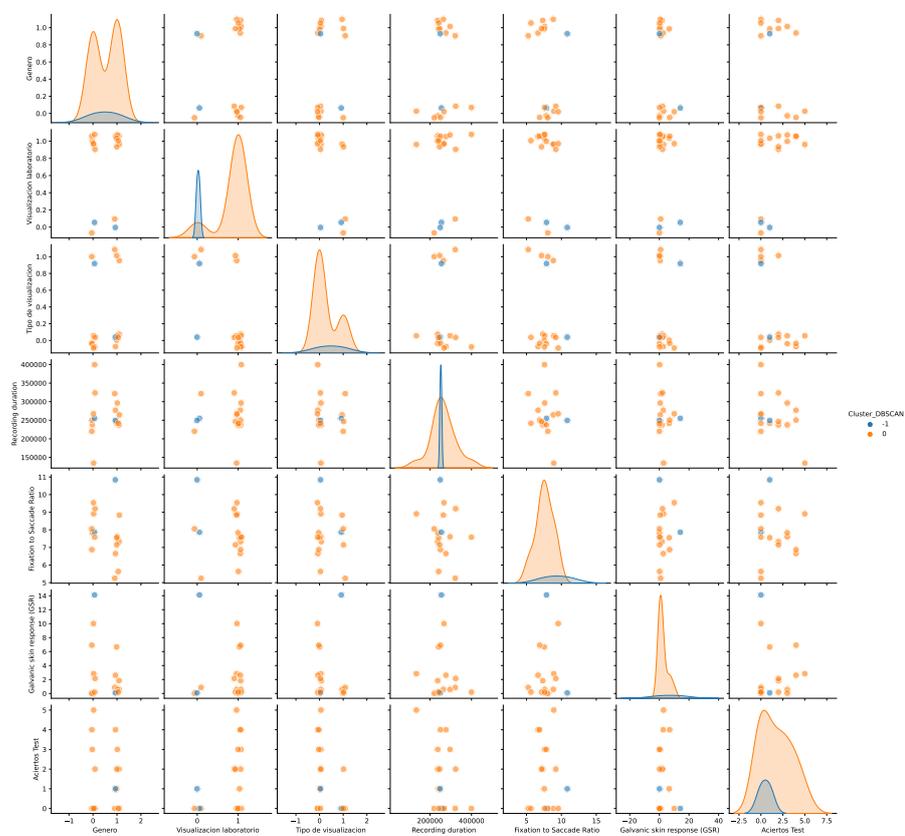


Figura 5.6: Representación de la relación entre variables utilizando *DBSCAN*.
Fuente propia

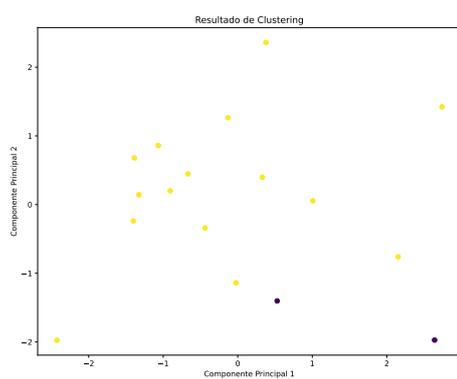


Figura 5.7: Representación de *clustering* de los datos utilizando *DBSCAN*.
Fuente propia

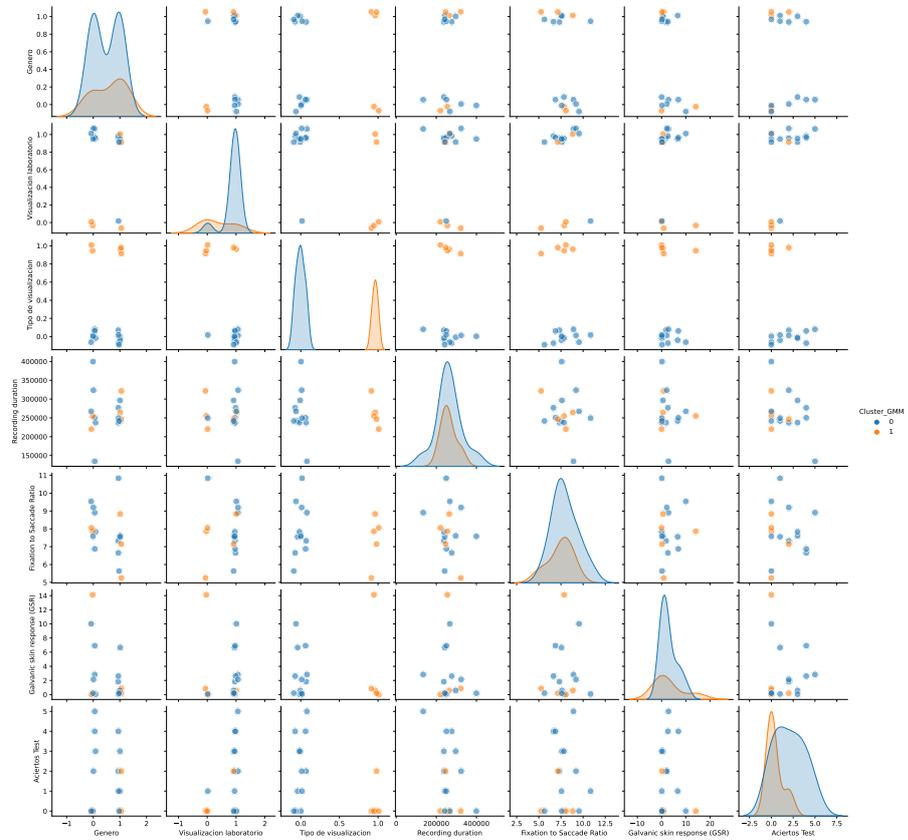


Figura 5.8: Representación de la relación entre variables utilizando *GMM*. Fuente propia

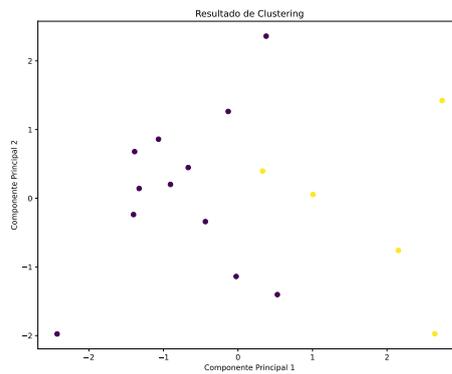


Figura 5.9: Representación de *clustering* de los datos utilizando *GMM*. Fuente propia

Aprendizaje Supervisado

Como se ha detallado anteriormente en la metodología del trabajo, se utilizaron diversos algoritmos de aprendizaje supervisado con el objetivo de aumentar el conocimiento de los datos y de los patrones seguidos en el proceso de aprendizaje.

Por un lado, se utilizó el método de Regresión Lineal, en el que se introdujeron todas las variables a estudio, y se propuso determinar cuál de ellas tenían un mayor impacto en el número de aciertos de test. Los resultados obtenidos (representados en la figura 5.10) sugieren que podría haber una tendencia a que el tipo de visualización (con audio o sin audio) y la visualización previa del laboratorio influyen considerablemente en la variable dependiente.

El problema que surge es que, tal como indica la figura 5.11, los p-valores obtenidos están por encima del valor considerado de referencia (0,05), por lo que no hay suficiente evidencia estadística como para afirmar dicha teoría con un alto nivel de confianza. Esto puede venir dado debido a que el tamaño de la muestra es tan pequeño, que hace que el modelo no sea capaz de predecir o definir de forma correcta el objetivo buscado (ya que, al únicamente tener 17 muestras, hay más variabilidad entre ellas, y el modelo no logra realizar su función de manera precisa).

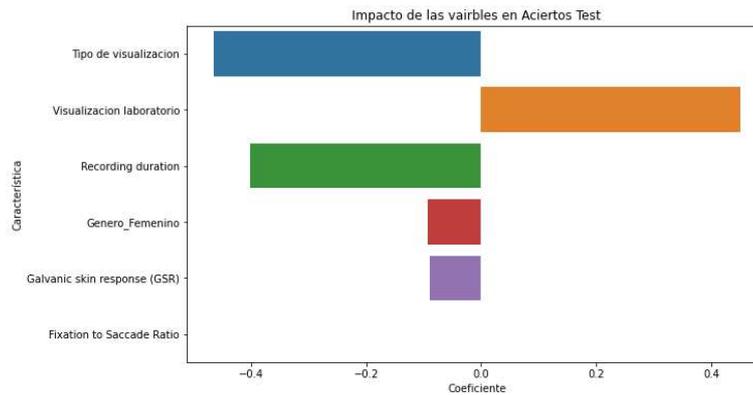


Figura 5.10: Representación de la Regresión Lineal. Fuente propia

	Característica	Coefficiente	p-valor
4	Tipo de visualización	-0.465680	0.059582
3	Visualización laboratorio	0.450694	0.069431
0	Recording duration	-0.402561	0.109151
5	Genero_Femenino	-0.092597	0.723737
2	Galvanic skin response (GSR)	-0.089396	0.732955
1	Fixation to Saccade Ratio	-0.001312	0.996013

Figura 5.11: Valores de los coeficientes de Regresión Lineal. Fuente propia

Por otro lado, se aplicó el algoritmo de Vecino Más Cercano (*KNN*), en el que se intentó entrenar al modelo con una parte de los datos extraídos para predecir el valor numérico de aciertos en el test que obtendría una nueva observación. En este caso, tras analizar las métricas (*MSE*, *RMSE*, *MAE* y *R2*) de los resultados (figura 5.12), se puede observar que el modelo no realiza bien su cometido. En concreto, *MSE* (*Mean Squared Error*) indica que, en promedio, los errores del modelo son relativamente altos, *RMSE* (*Root Mean Squared Error*) muestra que el error promedio de las predicciones del modelo es un valor muy alto, lo que significa que el modelo no posee buen rendimiento, *MAE* (*Mean Absolute Error*) sugiere que, en promedio, las predicciones del modelo están desviadas de los valores reales, y *R2* indica que un bajo porcentaje de la variabilidad de los datos se explica con el modelo, lo que sugiere un bajo poder predictivo.

```
Mean Squared Error: 0.9215561224489796
Root Mean Squared Error: 0.9599771468368294
Mean Absolute Error: 0.6938775510204083
R2 Score: 0.1250000000000001
```

Figura 5.12: Métricas para evaluar el modelo *KNN*. Fuente propia

Además, se ve claramente, gracias a las gráficas de comparación de valores reales y predichos (5.13) y a la de errores de predicción (5.14), como el modelo tiene gran cantidad de errores en la predicción (los valores predichos en la mayoría de los casos no se asemejarían a los valores reales), lo que sugiere un mal rendimiento de este. Esto proviene de que, debido a la baja cantidad de muestras, el modelo no puede entrenarse correctamente y, por tanto, hace que no pueda predecir el número de aciertos de manera satisfactoria.

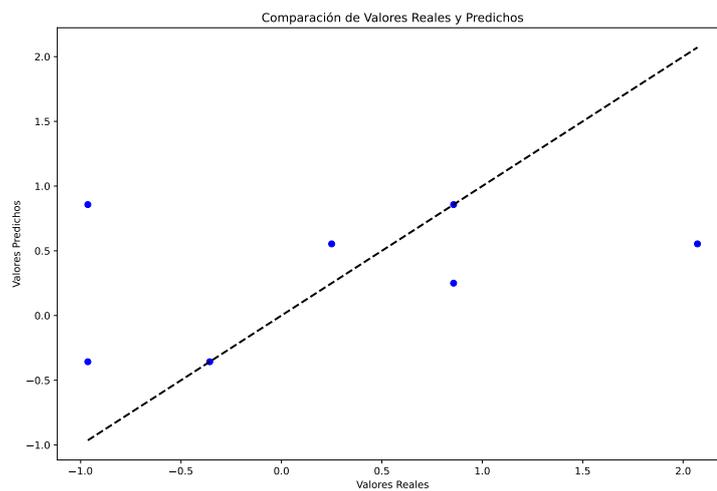


Figura 5.13: Reales predichos del algoritmo Vecino Más Cercano (*KNN*). Fuente propia

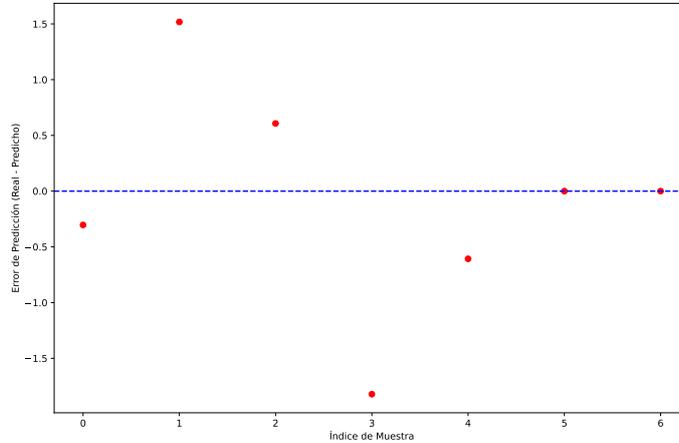


Figura 5.14: Error de predicción del algoritmo Vecino Más Cercano (*KNN*). Fuente propia

Como conclusión del trabajo, la baja cantidad de datos limita la capacidad de entrenamiento de modelos de aprendizaje supervisado, lo que hace que no sean capaces ni de predecir ni de obtener relaciones concluyentes entre las variables a estudio. Además, como hay tan pocos participantes, la variabilidad individual entre ellos puede tener un impacto mucho más significativo en los resultados, lo que hace difícil establecer patrones y/o similitudes que permitan agrupar los datos. Por tanto, para la obtención de resultados más robustos, correctos y generalizables, sería necesario ampliar considerablemente esta muestra y considerar un experimento con mayor número de participantes.

5.2. Aspectos relevantes

Finalmente, en relación al trabajo, en términos generales, se han podido alcanzar de forma satisfactoria los objetivos que se establecieron inicialmente, logrando ciertos aspectos relevantes:

- En primer lugar, durante el trabajo se ha logrado adquirir un profundo entendimiento del uso e integración de herramientas como el *eye tracking* y *GSR*, así como del *software* asociado a ellas. Este conocimiento se transmitió a todos los participantes del trabajo, logrando una comprensión integral y facilitando la implementación efectiva de las herramientas.
- En segundo lugar, una vez recogidos los datos relativos al comportamiento visual y fisiológico de todos los participantes, el siguiente paso era extraerlos, para poder visualizarlos correctamente. Este proceso se podía hacer de dos formas:

1. La primera es la extracción en un fichero con extensión “.xlsx”, lo que comúnmente se denomina fichero “*excel*”. Esta es la forma que se ha utilizado para el seguimiento del trabajo.
 2. La segunda es la obtención de un fichero con extensión “.tsv”, que se trata de un archivo de texto plano que almacena datos organizados en forma de tabla en el que los elementos están separados por tabuladores. Es similar a los ficheros anteriores, pero son más difíciles de leer, acceder e interpretar, por lo que se descartó su uso. El objetivo era sentirse cómodo con el fichero de datos, puesto que iba a ser el pilar fundamental del trabajo, además, como es un fichero menos habitual, se podía llegar a perder información durante su utilización.
- Más adelante, para la realización de la limpieza, filtrado y procesamiento de los datos, tal y como se ha comentado durante la realización de la memoria, se utilizó el lenguaje de programación de *Python*. Inicialmente, se propuso la idea de utilizar el lenguaje de R en su lugar, pero luego se vio que el primero ofrecía grandes alternativas (por ejemplo, la cantidad de librerías que hay, con las que se podían ejecutar gran cantidad de algoritmos y herramientas útiles para el análisis), por lo que este último se descartó. Además, dado que se tenía mayor familiaridad con el primero, se decidió definitivamente que era la mejor alternativa.

Posteriormente, una vez se seleccionó *Python* como lenguaje, se barajaron dos opciones; utilizar el entorno de *Anaconda Navigator* para generar un *Jupyter Notebook*, o utilizar *Visual Studio Code*. Finalmente, aunque ambas proporcionaban características similares, se eligió el primero de ellos, puesto que es una herramienta más sencilla de manejar.

- Una vez con los datos introducidos en el *notebook* correspondiente, se comenzó con el proceso de limpieza, filtrado y procesado de los datos, lo que supuso un trabajo tedioso.

Al inicio, la idea general era aplicar diversos algoritmos de *clustering* y gran variedad de técnicas de aprendizaje supervisado, puesto que se querían realizar predicciones y/o clasificaciones que aumentaran el conocimiento sobre los comportamientos en el proceso de aprendizaje. Tras analizar los datos, y tras ver que, debido al tamaño muestral tan pequeño, los resultados no iban a ser representativos, se decidió reducir el número de técnicas a utilizar. Finalmente se optó por implementar *k-Means*, *DBSCAN* y *Mixturas Gaussianas* para la agrupación por *clustering* (omitiendo otros algoritmos como *Fuzzy C-Means*, *HDBSCAN...*), y se aplicaron métodos como la Regresión Lineal y el Vecino Más Cercano como técnicas de aprendizaje supervisado (omitiendo algoritmos como *Naive Bayes*, Redes Neuronales o *Random Forest*, puesto que, con tan pocos datos, los modelos iban a dar resultados bastante pobres debido al poco entrenamiento que se le podía proporcionar).

Lineas de trabajo futuras

Aunque el trabajo haya conseguido, en mayor o menor medida, abarcar los objetivos propuestos, hay diversos aspectos que podrían realizarse para mejorar, tanto en el proceso, como en los resultados.

En primer lugar, en el proceso de recolección de los datos, gracias a las diferentes alternativas que ofrece el *software* de *Tobii Pro Lab* utilizado, se podrían haber generado sesiones prácticas con una estructura diferente a la utilizada en este trabajo. En concreto, el uso de una plantilla en la web (para acceder a los laboratorios de *EarlyCare-T* y al test) ha propiciado diversos problemas y errores durante el proceso, por ello, es por lo que hay participantes de prueba en los datos extraídos, porque había momentos en los que la web no funcionaba y se debía parar y reiniciar de nuevo el proceso. Para omitir estos problemas, sería recomendable utilizar vídeos, imágenes o cualquier otra herramienta ya cargada localmente en el ordenador e introducirlas directamente en el *software*.

En segundo lugar, en este trabajo se han utilizado dos herramientas combinadas; el *eye tracking* y el *GSR*. Gracias a la facilidad que posee el *software* de *Tobii Pro Lab* respecto a la unión y utilización de nuevas herramientas conectadas, podría ser interesante que a este trabajo se le añadieran nuevos dispositivos, como electrocardiogramas (para medir la actividad eléctrica del corazón), o electroencefalogramas (para medir la actividad eléctrica del cerebro), que seguro proporcionarían mayor cantidad de información relevante respecto al proceso de aprendizaje.

En tercer lugar, y quizás la parte más compleja de abarcar, es la búsqueda de un mayor número de participantes, con el objetivo de conseguir un aumento considerable del tamaño muestral. Si se pudiera obtener una muestra de pacientes del orden de siete o diez veces mayor que la obtenida en este trabajo, la utilización de la plantilla proporcionada tendría mucho más sentido debido a que los resultados sí podrían ser representativos, y, por tanto, se podrían llegar a tomar decisiones reales y verídicas sobre el proceso de aprendizaje. Con un mayor número de participantes, los modelos utilizados en el trabajo sí podrían agrupar según características y podrían entrenarse correctamente. Con ello, se conseguiría obtener, de manera satisfactoria, predicciones de los resultados finales en el test.

En cuarto lugar, sería interesante ampliar este trabajo para incluir personas con diferentes condiciones y perfiles. Por ejemplo, se podrían utilizar las técnicas mencionadas para la evaluación del comportamiento visual y fisiológico en el proceso de aprendizaje de personas con diferentes perfiles académicos. No sólo se podría trabajar con el alumnado del grado de Ingeniería de la Salud, sino también con estudiantes de otras disciplinas como Magisterio, Administración y Dirección de Empresas, Química... Además, podría ser valioso incluir participantes con diferentes edades, lo que añadiría una dimensión extra al estudio y permitiría obtener un conocimiento más profundo y variado sobre cómo estas técnicas pueden aplicarse en distintos contextos educativos y etapas de la vida. Adicionalmente, se podrían considerar otros factores diferenciales como el nivel socioeconómico, las habilidades cognitivas o las condiciones de salud mental. Incorporar estas variables permitiría realizar un análisis más comprensivo y detallado, contribuyendo así a desarrollar estrategias educativas más inclusivas y efectivas.

En último lugar, mejoraría considerablemente el valor del trabajo si se realizara la tarea de programación de una página web didáctica. Gracias a esta, podrían observarse tanto los datos obtenidos, como los resultados generados mediante elementos interactivos y visualizaciones dinámicas que permitieran a los usuarios explorar y comprender, tanto los datos, como las conclusiones definidas. Además, se podría incluir documentación detallada paso a paso para guiar a través del proceso de análisis, facilitando el aprendizaje y la comprensión global del trabajo. Para ello, podrían utilizarse herramientas como *Streamlit*, que es un *framework* (esquema o marco de trabajo que ofrece una estructura base para la elaboración de un trabajo) de código abierto, que permite la creación sencilla de aplicaciones web interactivas.

Bibliografía

- [Aerospace, 2024] Aerospace, T. (2024). Eye tracking improves aerospace & tactical training. <https://www.tobii.com/solutions/training-and-skills-assessment/aerospace-and-tactical-training>. Accessed: 2024-6-23.
- [AIML, 2022] AIML (2022). What is adjusted rand index (ARI)? *AIML.com*.
- [Alberca, 2020] Alberca, A. S. (2020). La librería matplotlib. <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/matplotlib/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Association, 2024] Association, A. P. (2024). *Manual diagnóstico y estadístico de los trastornos mentales : DSM-5-TR : texto revisado*. Editorial Médica Panamericana, Madrid [etc, 5^a ed. edition.
- [Barrios, 2023] Barrios, A. (2023). Tutorial del algoritmo k-means en python - latinxinai - medium.
- [Brain and Marketing, 2016] Brain and Marketing (2016). Técnicas de neuro-marketing (v): Eye tracking. <https://brainandmarketing.blogspot.com/2016/02/eye-tracking-neuromarketing.html>. Accessed: 2024-6-23.
- [BrainSigns, 2015] BrainSigns (2015). GSR - brainsigns. <https://brainsigns.com/es/science/s2/technologies/gsr>. Accessed: 2024-6-23.
- [BrainSigns, 2024] BrainSigns (2024). Eyetracker - brainsigns. <https://brainsigns.com/es/science/s2/technologies/eyetracker>. Accessed: 2024-6-23.
- [Calero, 2022] Calero, V. (2022). Qué es un eyetracking. <https://www.arimetrics.com/glosario-digital/eyetracking>. Accessed: 2024-6-23.
- [Caparrini, 2023] Caparrini, F. S. (2023). Clustering. <https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/Clustering/>. Accessed: 2024-6-24.
- [Cardona, 2022] Cardona, L. (2022). ¿qué es el eye tracking? función y beneficios en marketing. <https://www.cyberclick.es/numerical-blog/que-es-el-eye-tracking-funcion-y-beneficios-en-marketing>. Accessed: 2024-6-23.

- [colaboradores Wikipedia, 2024] colaboradores Wikipedia (2024). Microsoft Excel.
- [Conde, 2019] Conde, J. (2019). <https://tecnologia.uniandes.edu.co/anaconda-navigator/#:~:text=Anaconda>. Accessed: 2024-6-23.
- [Coppola, 2023] Coppola, M. (2023). Qué es el eye tracking, cómo funciona y para qué sirve? <https://blog.hubspot.es/website/eye-tracking>. Accessed: 2024-6-23.
- [Daniel, 2022] Daniel (2022). Statsmodels : todo acerca de la biblioteca de python. <https://datascientest.com/es/statsmodels-todo-acerca>. Accessed: 2024-6-23.
- [DaringFireball, 2004] DaringFireball (2004). Markdown. <https://daringfireball.net/projects/markdown/>. Accessed: 2024-6-23.
- [DataScientest, 2022] DataScientest (2022). Scikit-Learn : Descubre la biblioteca de python dedicada al machine learning. <https://datascientest.com/es/scikit-learn-decubre-la-biblioteca-python>. Accessed: 2024-6-23.
- [Design, 2024] Design, T. (2024). Developmental psychology — eye tracking reveals insights. <https://www.tobii.com/solutions/scientific-research/developmental-psychology>. Accessed: 2024-6-23.
- [Diagnostico, 2024] Diagnostico, T. (2024). Psychology & neuroscience research with eye tracking. <https://www.tobii.com/solutions/scientific-research/psychology-and-neuroscience>. Accessed: 2024-6-23.
- [Dynavox, 2024] Dynavox, T. (2024). ¿qué es el seguimiento ocular? <https://es.tobiidynavox.com/pages/what-is-eye-tracking?tab=0>. Accessed: 2024-6-23.
- [EmoturLAB, 2020] EmoturLAB (2020). Eye tracking. <https://emotur.ulpgc.es/neuroturismo/eye-tracking/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Fernandez, 2023] Fernandez, O. (2023). Descubre jupyter notebook: La herramienta imprescindible para la ciencia de datos. <https://aprenderbigdata.com/jupyter-notebook/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Fernández, 2019] Fernández, Y. (2019). Qué es github y qué es lo que le ofrece a los desarrolladores. <https://www.xataka.com/basics/que-github-que-que-le-ofrece-a-desarrolladores>. Accessed: 2024-6-23.
- [Flores, 2022] Flores, F. (2022). Líderes en formación tecnológica, reskilling y upskilling. <https://openwebinars.net/blog/que-es-visual-studio-code-y-que-ventajas-ofrece/>. Accessed: 2024-6-23.
- [GeeksforGeeks, 2023] GeeksforGeeks (2023). Gaussian mixture model. <https://www.geeksforgeeks.org/gaussian-mixture-model/>. Accessed: 2024-6-24.
- [GeeksforGeeks, 2024] GeeksforGeeks (2024). Rand-index in machine learning. <https://www.geeksforgeeks.org/rand-index-in-machine-learning/>. Accessed: 2024-6-24.

- [IBM, 2022] IBM (2022). ¿qué es el algoritmo de k vecinos más cercanos? <https://www.ibm.com/es-es/topics/knn>. Accessed: 2024-6-23.
- [IBM, 2023] IBM (2023). ¿qué es el aprendizaje no supervisado? <https://www.ibm.com/es-es/topics/unsupervised-learning>. Accessed: 2024-6-23.
- [IBM, 2024] IBM (2024). ¿qué es el aprendizaje supervisado? <https://www.ibm.com/es-es/topics/supervised-learning>. Accessed: 2024-6-23.
- [Institute, 2022] Institute, N. E. (2022). Ambliopía (ojo perezoso u ojo vago) | National Eye Institute.
- [Intertek, 2021] Intertek (2021). Neuromarketing – técnica eye-tracking. <https://www.intertek.es/analisis-sensorial/eye-tracking/>. Accessed: 2024-6-23.
- [KeyTrends, 2023] KeyTrends (2023). Clustering. <https://keytrends.ai/es/academy/glosario/inteligencia-artificial/clustering>. Accessed: 2024-6-24.
- [Marketingdirecto, 2012] Marketingdirecto (2012). Las marcas de productos de gran consumo apuestan por el eye-tracking para mejorar sus diseños. <https://www.marketingdirecto.com/marketing-general/marketing/las-marcas-de-productos-de-gran-consumo-apuestan-por-el-eye-tracking-para-mejorar-sus-disenos>. Accessed: 2024-6-24.
- [Medical, 2024] Medical, T. (2024). Medical training & simulation using eye tracking. <https://www.tobii.com/solutions/training-and-skills-assessment/medical-training-and-simulation>. Accessed: 2024-6-23.
- [MedLinePlus, 2022] MedLinePlus (2022). Disgrafía: Medlineplus enciclopedia médica.
- [MedlinePlus, 2022] MedlinePlus (2022). Estrabismo: MedlinePlus enciclopedia médica.
- [Neurometrics, 2020] Neurometrics (2020). Neurometrics. <https://neurometrics.la/como-funciona-el-eyetracker/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Oftalmólogos, 2021] Oftalmólogos, V. (2021). ¿cómo funciona el sentido de la vista? <https://www.vistaoftalmologos.es/como-funcion-el-sentido-de-la-vista/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Oftalvist, 2019] Oftalvist, C. (2019). El sentido de la vista: Definición, partes y funcionamiento. <https://www.oftalvist.es/blog/sentido-de-la-vista>. Accessed: 2024-6-23.
- [Overleaf, 2024] Overleaf (2024). Learn LaTeX in 30 minutes. https://www.overleaf.com/learn/latex/Learn_LaTeX_in_30_minutes. Accessed: 2024-6-23.
- [Pallás, 2023] Pallás, G. (2023). Qué es el eye tracking o seguimiento ocular, y cómo utilizarlo en marketing. <https://www.inboundcycle.com/blog-de-inbound-marketing/eye-tracking-o-seguimiento-ocular-y-como-utilizarlo-en-marketing>. Accessed: 2024-6-23.

- [Pandas, 2022] Pandas (2022). Pandas : La biblioteca de python dedicada a la data science. <https://datascientest.com/es/pandas-python>. Accessed: 2024-6-23.
- [Parra, 2020] Parra, A. (2020). ¿qué es el eye tracking? <https://www.questionpro.com/blog/es/que-es-el-eye-tracking/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Product, 2024] Product, T. (2024). Eye tracking software for behavior research. <https://www.tobii.com/products/software/behavior-research-software/tobii-pro-lab>. Accessed: 2024-6-23.
- [Products, 2024] Products, T. (2024). Enter the world of eye tracking. <https://www.tobii.com/products/eye-trackers/screen-based/tobii-pro-spark>. Accessed: 2024-6-23.
- [Proyectos, 2024] Proyectos, T. (2024). Tobii pro lab product description. https://go.tobii.com/tobii_pro_lab_product_description. Accessed: 2024-6-23.
- [Rehabilitación, 2024] Rehabilitación, T. (2024). Eye tracking enhances medical assessment & treatment. <https://www.tobii.com/solutions/healthcare-technology/assessment-and-treatment>. Accessed: 2024-6-23.
- [Rondón, 2022] Rondón, I. (2022). ¿qué es anaconda? <https://eiposgrados.com/blog-python/que-es-anaconda/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Saavedra, 2022] Saavedra, J. A. (2022). Regresión lineal: qué es, para qué sirve, por qué es importante, tipos y ejemplos de uso. <https://ebac.mx/blog/regreson-lineal>. Accessed: 2024-6-23.
- [Seaborn, 2023] Seaborn (2023). Seaborn: todo sobre la herramienta de data visualization python. <https://datascientest.com/es/seaborn-la-herramienta-de-data-visualization-python>. Accessed: 2024-6-23.
- [Serrano-Mamolar et al., 2023] Serrano-Mamolar, A., Miguel-Alonso, I., Checa, D., and Pardo-Aguilar, C. (2023). Towards learner performance evaluation in iVR learning environments using eye-tracking and Machine-learning. *Comunicar digital/Comunicar*, 31(76).
- [ShimerGSR, 2021] ShimerGSR (2021). Shimmer wearable sensor technology. <https://shimmersensing.com/>. Accessed: 2024-6-23.
- [ShimmerGSR, 2024] ShimmerGSR, T. (2024). Combine GSR and eye tracking to enhance your research. <https://www.tobii.com/products/accessories/shimmer3-gsr-unit>. Accessed: 2024-6-23.
- [Shimmersensing, 2024] Shimmersensing (2024). Shimmer3 GSR+ unit. <https://shimmersensing.com/product/shimmer3-gsr-unit/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Sáiz-Manzanares et al., 2020] Sáiz-Manzanares, M. C., Diez, J. J. R., Sánchez, R. M., Yáñez, M. J. Z., and Menéndez, R. C. (2020). Lifelong learning from sustainable education: An analysis with eye tracking and data mining techniques. *Sustainability*, 12(5).

- [Sáiz-Manzanares et al., 2024] Sáiz-Manzanares, M. C., Marticorena-Sánchez, R., Antón, L. J. M., González-Díez, I., and Ángel Carbonero Martín, M. (2024). Using eye tracking technology to analyse cognitive load in multichannel activities in university students. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(12):3263–3281.
- [Sáiz Manzanares et al., 2022] Sáiz Manzanares, M. C., Marticorena Sánchez, R., and Rodríguez Arribas, S. (2022). Estudio de los procesos cognitivos y metacognitivos: utilización de la tecnología eye tracking, ventajas e inconvenientes. In *Investigación y práctica en contextos clínicos y de la salud*, pages 11–22. Dykinson, Madrid. Casalini id: 5494697.
- [Sáiz Manzanares et al., 2021] Sáiz Manzanares, M. C., Payo Hernanz, R. J., Zaparaín Yáñez, M. J., Andrés López, G., Marticorena Sánchez, R., Calvo Rodríguez, A., Martín, C., and Rodríguez Arribas, S. (2021). Eye-tracking technology and data-mining techniques used for a behavioral analysis of adults engaged in learning processes. *J. Vis. Exp.*
- [Sáiz-Manzanares et al., 2021] Sáiz-Manzanares, M. C., Pérez, I. R., Rodríguez, A. A., Arribas, S. R., Almeida, L., and Martin, C. F. (2021). Analysis of the learning process through eye tracking technology and feature selection techniques. *Applied Sciences*, 11(13).
- [Tobii, 2024] Tobii (2024). How do eye trackers work? <https://www.tobii.com/resource-center/learn-articles/how-do-eye-trackers-work>. Accessed: 2024-6-23.
- [Torrades and Pérez-Sust, 2008] Torrades, S. and Pérez-Sust, P. (2008). Sistema visual. la percepción del mundo que nos rodea. *Offarm*, 27(6):98–105.
- [UCM, 2021] UCM (2021). Overleaf: edición de documentos en LaTeX en la nube. <https://www.uc3m.es/sdic/articles/2021/overleaf>. Accessed: 2024-6-23.
- [w3Schools, 2024] w3Schools (2024). Machine learning - k-means. https://www.w3schools.com/python/python_ml_k-means.asp. Accessed: 2024-6-24.
- [WebCatalog, 2023] WebCatalog (2023). Zube. <https://webcatalog.io/es/apps/zube/>. Accessed: 2024-6-23.
- [Wikipedia, 2015] Wikipedia (2015). Latex — wikipedia, la enciclopedia libre. [Internet; descargado 30-septiembre-2015].
- [WiKipedia, 2023] WiKipedia (2023). https://es.wikipedia.org/wiki/Análisis_de_componentes_principales. Accessed: 2024-6-24.
- [Wikipedia, 2023] Wikipedia (2023). DBSCAN. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=DBSCAN&oldid=154476948>. Accessed: 24-06-24.
- [wikipedia, 2024] wikipedia (2024). Dislexia.
- [WiKipedia, 2024] WiKipedia (2024). Python. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Python&oldid=160694526>. Accessed: 22-06-2024.

[Wikipedia, 2024] Wikipedia (2024). Seguimiento de ojos. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Seguimiento_de_ojos&oldid=157953181. Accessed: 24-06-2024.

[Zubcoff, 2022] Zubcoff, J. J. (2022). Principal component analysis. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/72567/1/Analisis-multivariante-PCA.pdf>. Accessed: 2024-6-24.