



# **EL IMPACTO DE LAS NEUROCIENCIAS Y NEUROTECNOLOGÍAS EN EL DERECHO FUNDAMENTAL A LA PROTECCIÓN DE DATOS PERSONALES**

**UN ESTUDIO SOBRE EL RÉGIMEN JURÍDICO APLICABLE A LOS DATOS  
CEREBRALES O NEURODATOS A LA LUZ DEL RGPD (UE)**

**YASNA BASTIDAS CID**

**2024**

# **EL IMPACTO DE LAS NEUROCIENCIAS Y NEUROTECNOLOGÍAS EN EL DERECHO FUNDAMENTAL A LA PROTECCIÓN DE DATOS PERSONALES**

**UN ESTUDIO SOBRE EL RÉGIMEN JURÍDICO APLICABLE A LOS DATOS CEREBRALES O  
NEURODATOS A LA LUZ DEL RGPD (UE)**

*Primera edición no publicada de 06 de septiembre de 2022  
Revisado y actualizado por última vez el 14 de febrero de 2024*

**YASNA BASTIDAS CID**

*Investigadora y Profesora del Máster en Derecho de las Telecomunicaciones,  
Protección de Datos, Audiovisual y Sociedad de la Información  
de la Universidad Carlos III de Madrid*

**2024**

Este estudio se distribuye bajo licencia “Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



## AGRADECIMIENTOS

La primera edición no publicada de este estudio ha sido financiada por la Agencia Española de Protección de Datos con número de expediente 24/2022, y ha servido como guía y sustento jurídico de la «DECLARACIÓN SOBRE NEURODATOS DE LA RED IBEROAMERICANA DE PROTECCIÓN DE DATOS 2023»

Asimismo, para la revisión y actualización de este estudio, se ha contado con la ayuda concedida por el grupo de investigación TRES-i: Trabajo Líquido y Riesgos Emergentes en la Sociedad de la Información de la Universidad Internacional de la Rioja (UNIR), en el marco del programa de Doctorado en Sociedad del Conocimiento y Acción en los Ámbitos de la Educación, la Comunicación, los Derechos y las Nuevas Tecnologías 2024.

De igual forma, para la difusión y comunicación de este estudio, se ha contado con el apoyo del Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información, y Protección de Datos Personales de México (INAI), que lo ha presentado en sus jornadas conmemorativas del Día Internacional de la Protección de Datos, realizadas entre los días 24 de enero y 08 de febrero de 2024.



## ÍNDICE

<b>ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>

### CAPÍTULO I

#### **EL ESTADO DEL ARTE DE LAS NEUROTECNOLOGÍAS: EN PARTICULAR, ESTUDIO DE LA INTERFAZ CEREBRO – COMPUTADORA**

1. Las neurociencias y las nuevas neurotecnologías: las dos caras de una misma moneda ...	10
2. De la Internet de las cosas (IoT) a la Internet de los cuerpos (IoB) .....	23
3. Avances en la ciencia del cerebro y las neurotecnologías omnipresentes .....	26
4. Principales iniciativas de investigación cerebral en el mundo .....	34
4.1 Australian Brain Alliance (ABA) .....	35
4.2 The Canada Brain Research Fund (Canada) .....	35
4.3 China Brain Project (People's Republic of China) .....	36
4.4 Cuban Human Brain Mapping Project CHBMP (CUBA) .....	37
4.5 Human Brain Project, "HBP" (European Union, EU) .....	39
4.6 Israel Brain Technologies (Israel) .....	41
4.7 Latin American Brain Mapping Network (LABMAN) .....	41
4.8 Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies, "Brain/MINDS" (Japan) .....	42
4.9 Korea Brain Initiative (Korea) .....	45
4.10 Blue Brain Project (Switzerland) .....	45
4.11 Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, "BRAIN Initiative" (United States) .....	46
5. Las interfaces cerebro – computadora: el elemento común de las principales iniciativas de investigación cerebral .....	48
5.1 Consideraciones previas .....	48
5.2 Concepto de BCI .....	51
5.3 Componentes de un sistema BCI .....	52
a) Los electrodos o sensores .....	53
b) Sistema de adquisición de señales EEG .....	54
i. Origen fisiológico de las señales .....	54
ii. Señales endógenas o exógenas .....	55
iii. Señales comúnmente utilizadas .....	55

iv.	Tipos de dispositivos según el método de obtención de la señal .....	58
c)	Computadora y software de captura de señales EEG .....	65
i.	Pre procesamiento .....	65
ii.	Extracción de características .....	65
iii.	Traducción y clasificación de características.....	66
iv.	Entrenamiento.....	66
d)	Dispositivo o actuador .....	66
e)	Usuario .....	66
5.4	Objetivo, funcionamiento y medida de una BCI .....	66
5.5	Las BCI híbridas: el uso conjunto de diversas alternativas.....	69
a)	El concepto de BCI híbrido.....	69
b)	Combinación de Hardware .....	71
c)	Combinación de señales cerebrales .....	76
d)	Ventajas de hBCI.....	80
5.6	BCI y hBCI: Aplicaciones.....	80
a)	Aplicación clínica .....	81
b)	Neuroergonomía .....	88
c)	Entornos inteligentes.....	89
d)	Educación y autorregulación .....	90
e)	Neuromarketing y neuropolítica.....	91
f)	Juegos y entretenimiento .....	93
g)	Seguridad, identificación y autenticación .....	102
h)	Ingeniería militar .....	103
i)	Procedimientos judiciales .....	105

## **CAPÍTULO II**

### **NEUROCIENCIAS, NEUROTECNOLOGÍAS Y DERECHO: DESDE LOS DATOS CEREBRALES HASTA LOS NEURODERECHOS HUMANOS**

1.	El dato cerebral o neurodato: una breve mirada desde las neurociencias .....	108
1.1	El concepto de dato cerebral o neurodato .....	108
1.2	Características de los datos cerebrales o neurodatos: parámetros para determinar “la novedad” .....	110
2.	El valor de los neurodatos: hacia una nueva configuración de los Derechos Humanos ...	112
2.1	Los Neuroderechos Humanos como instrumento de protección ante los avances de la neurotecnología .....	112

2.2 La especial consideración de la protección de datos como derecho fundamental, autónomo e independiente en la UE y España: un especial desafío para la regulación de los Neuroderechos Humanos.....	122
3. Los datos cerebrales o neurodatos merecen una especial protección: Del excepcionalismo genético al neuroexcepcionalismo .....	131

### **CAPÍTULO III**

#### **ANÁLISIS JURÍDICO DE LOS DATOS CEREBRALES O NEURODATOS DESDE LA PERSPECTIVA DEL REGLAMENTO GENERAL DE PROTECCIÓN DE DATOS DE LA UNIÓN EUROPEA (RGPD)**

1. Consideraciones previas: privacidad, protección de datos, y nuevas neurotecnologías ..	137
2. Naturaleza jurídica de los datos cerebrales o neurodatos.....	137
3. La consideración de los datos mentales como datos cerebrales: aplicación del instituto de la <i>Fictio iuris</i> .....	148
4. El dato cerebral o neurodato como dato de carácter personal: iniciativas, conceptos y definiciones internacionales, regionales y locales .....	153
5. Variables y Clasificación de los datos cerebrales o neurodatos.....	160
5.1 Variables que influyen en la clasificación de los datos cerebrales o neurodatos.....	160
a) El contexto del tratamiento .....	161
b) La finalidad del tratamiento .....	162
c) El riesgo para los derechos y libertades fundamentales de las personas físicas .....	163
5.2 Clasificación de los datos cerebrales o neurodatos .....	163
a) El dato cerebral o neurodato elevado a la categoría de datos relativos a la salud ..	166
b) El dato cerebral o neurodato elevado a la categoría de dato biométrico .....	169
5.3 El tratamiento de datos cerebrales o neurodatos como operación de alto riesgo ....	173
6. Bases de legitimación para el tratamiento de los datos cerebrales o neurodatos: en especial el consentimiento explícito .....	175
6.1 El consentimiento explícito como supuesto de tratamiento de los neurodatos .....	175
6.2 Supuestos de licitud del tratamiento que operan como excepción al “consentimiento explícito” .....	179

## **CAPÍTULO IV**

### **RESPONSABILIDAD PROACTIVA (ACCOUNTABILITY) Y GESTIÓN DE RIESGOS EN EL TRATAMIENTO DE DATOS CEREBRALES O NEURODATOS**

1. El principio de responsabilidad proactiva o <i>Accountability</i> .....	181
2. El enfoque de riesgo .....	183
3. Riesgos específicos de privacidad y seguridad de los datos cerebrales o neurodatos: en particular, en entornos BCI.....	190
4. Medidas y garantías para gestionar el riesgo en entornos neurotecnológicos .....	198
4.1 Medidas de índole organizativas .....	201
a) Neutralidad tecnológica y Privacidad desde el diseño (PbD) y por defecto.....	201
b) Evaluación de Impacto (EIPD): Privacy Impact Assessments (PIA).....	204
c) Designar un delegado de protección de datos (DPD) .....	207
d) Nombrar un auditor de sesgos algorítmicos.....	208
e) Llevar un Registro de Actividades de Tratamiento (RAT).....	209
f) Celebrar contratos con los encargados del tratamiento.....	210
g) Mantener relaciones con la autoridad de control .....	212
h) Deber de confidencialidad y secreto .....	212
i) Gestión de los derechos de los titulares de datos cerebrales .....	214
j) Establecer medidas de concienciación y formación del personal .....	215
4.2 Medidas de índole técnicas .....	215
a) Mantenimiento de los equipos, sistema operativo o software .....	215
b) Comunicación con los servidores de la institución, organización o empresa .....	217
c) Seudonimización y anonimización.....	217
d) Control de acceso a los equipos .....	218
e) Instalación de cortafuegos o firewalls .....	219
f) Salvaguardar la información: copias de seguridad .....	220
g) Destrucción de soportes.....	220
h) Implementar arquitecturas descentralizadas y distribuidas .....	221
i) Incorporar un sistema de trazabilidad .....	222
j) Utilizar mecanismos de certificación y códigos de conducta .....	222
k) Notificación de las brechas de seguridad .....	223
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>225</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>229</b>
<b>DOCUMENTOS DE TRABAJO.....</b>	<b>250</b>
<b>NORMATIVA RELEVANTE .....</b>	<b>252</b>

## **INDICE DE IMÁGENES**

Imagen 1. Sistema Nervioso Central y Periférico .....	11
Imagen 2. Hemisferios cerebrales .....	12
Imagen 3. Sistema Nervioso Central .....	13
Imagen 4. El cerebro humano: órganos .....	14
Imagen 5. Funcionamiento neuronal .....	15
Imagen 6. Clasificación de neuronas según ramificaciones.....	15
Imagen 7. Clasificación de neuronas según su función .....	16
Imagen 8. La micrología en el sistema nervioso central .....	17
Imagen 9. Cerebro normal y cerebro con Alzheimer.....	18
Imagen 10. Comparativo IRMf .....	19
Imagen 11. Internet of Bodies Technologies .....	25
Imagen 12. Ejemplo de flujo de los datos EEG hasta el análisis del grafo .....	27
Imagen 13. Las imágenes obtenidas con IRMf .....	30
Imagen 14. Emotiv Epoc+, EEG portátil, inalámbrico y económico .....	31
Imagen 15. Dispositivo XWAVE .....	32
Imagen 16. El dispositivo llamado Stendrode .....	33
Imagen 17. Registro de la señal EEG del mono .....	50
Imagen 18. Componentes de un sistema BCI .....	52
Imagen 19. Posiciones estándares de los electrodos, Sistema Internacional 10-20.....	53
Imagen 20. Chip Telephaty.....	60
Imagen 21. Brazo robótico dirigido por mono .....	61
Imagen 22. Propósitos de una interfaz híbrida cerebro-computadora .....	71
Imagen 23. BCI EEG-electrooculografía (EOG).....	74
Imagen 24. BCI electroencefalografía-electromiografía (EMG).....	75
Imagen 25. BCI electroencefalografía (EEG-NIRS) .....	76
Imagen 26. Mindbalance videojuego .....	96
Imagen 27. Videojuego Son of Nor.....	99
Imagen 28. Auriculares Mindware Mobile NeuroSky.....	100
Imagen 29. Dispositivo Nextmind .....	101
Imagen 30. Posición estándar de los electrodos (10-20).....	139
Imagen 31. Pasos básicos en la gestión de riesgos.....	187

## **ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS**

<b>AC</b>	Autoridad de Control
<b>AEPD</b>	Agencia Española de Protección de Datos
<b>BCI</b>	Interfaz cerebro-computador
<b>CEPD</b>	Comité Europeo de Protección de datos
<b>CE</b>	Comisión Europea
<b>CPR</b>	Constitución Política de la República de Chile
<b>DPD</b>	Delegado de protección de datos
<b>DPO</b>	<i>Data Protection Officer</i>
<b>EEG</b>	Electroencefalograma
<b>fMRI</b>	Imagen por resonancia magnética funcional
<b>EIPD</b>	Evaluación de impacto en protección de datos
<b>GT 29</b>	Grupo de trabajo del artículo 29
<b>IA</b>	Inteligencia Artificial
<b>IA ACT</b>	Ley de Inteligencia Artificial de la UE
<b>IdT</b>	Internet del Todo
<b>IoB</b>	<i>Internet of Bodies</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>LOPDGDD</b>	Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de protección de datos personales y garantía de los derechos digitales. BOE núm. 294, de 6 de diciembre de 2018
<b>OEA</b>	Organización de Estados Americanos
<b>OCDE</b>	Organización para la cooperación y desarrollo económicos
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>PET</b>	Tomografía por emisión de positrones
<b>PbD</b>	<i>Privacy by Design</i> / Privacidad desde el diseño
<b>RAT</b>	Registro de actividades de tratamiento

<b>RGPD</b>	Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos y por el que se deroga la Directiva 95/46/CE (Reglamento general de protección de datos)
<b>SN</b>	Sistema Nervioso
<b>SNC</b>	Sistema Nervioso Central
<b>SNP</b>	Sistema Nervioso Periférico
<b>TAC</b>	Tomografía axial computarizada
<b>TIC</b>	Tecnologías de la información y comunicación
<b>UE</b>	Unión Europea

## **INTRODUCCIÓN**

En neurociencia, los programas de investigación y desarrollo a gran escala están dando lugar a una serie de nuevos enfoques, técnicas y capacidades para comprender, leer e intervenir el cerebro humano. Los avances en la ciencia del cerebro y la neurotecnología abren nuevas vías para mejorar el diagnóstico y el tratamiento de los trastornos mentales y neurológicos, pero de igual manera tienen asociados muchas implicaciones éticas, sociales y legales, que incluyen desde cuestiones de seguridad del producto, privacidad mental, hasta mejora humana e identidad. De tal manera que, las consecuencias de la utilización de neurotecnologías merece la atención y responsabilidad de los científicos, de los académicos, de la sociedad y del Estado en general.

El desarrollo de las neurotecnologías ha impulsado de sobremanera la investigación sanitaria. La investigación en BCI basada en el análisis de electroencefalograma es la más prometedora en el área de la medicina curativa y de las neurociencias. Los recientes avances en neurotecnología e inteligencia artificial están permitiendo un acceso mayor y más rápido a la información acumulada en el cerebro de las personas otorgándole capacidad a las máquinas de leer nuestros impulsos mentales, procesarlos, interpretarlos y manipularlos, pudiendo alterar, incluso nuestro concepto de ser humano.

Asimismo, como veremos más adelante, se ha demostrado en diferentes estudios que, tanto la estructura cerebral como el patrón de ondas cerebrales de cada individuo es único, y que ambos pueden ser utilizados para la autenticación e identificación biométrica.

Así, este nuevo ecosistema neurotecnológico genera el escenario perfecto para el acceso a una ingente cantidad de información de carácter sensible, datos neurales vinculados a la salud, identificadores neuronales biométricos, y datos muy personales como las emociones y los pensamientos más íntimos y privados de las personas.

El rápido desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) mejorará aún más las herramientas para emular la función cerebral, por esa razón cobra relevancia delimitar los potenciales problemas antes de tiempo, permitiendo con este ejercicio abrir caminos para la investigación y el desarrollo y, por lo tanto, permitir, no obstaculizar, la innovación.

Este estudio tiene como objetivo general analizar el impacto de las neurociencias y neurotecnologías en el derecho fundamental a la protección de datos personales desde la perspectiva del Reglamento General de Protección de datos de la UE, teniendo

en consideración que existe potencialmente un conjunto de intereses en juego en el procesamiento de los datos cerebrales, que no se percibieron como relevantes en la construcción del marco regulatorio actual.

Como objetivos específicos se pretende dar respuesta a dos interrogantes: Por un lado, ¿Cómo puede responder la legislación de la UE ante este nuevo escenario?, y por otro, ¿Podría el actual marco de protección de datos personales proporcionar garantías adecuadas para los intereses en juego que emanan del tratamiento de datos cerebrales en entornos BCI, a pesar de que estos intereses no se hayan considerado en la construcción del marco?

Responderemos a estas interrogantes dividiendo este trabajo en 4 capítulos: en el primer capítulo haremos un estudio del estado del arte de las neurotecnologías y su relación con las neurociencias, en particular, de la interfaz cerebro-computador; pondremos hincapié en los avances de la ciencia del cerebro unida a las tecnologías y a la inteligencia artificial; abordaremos las relaciones hombre-máquina; y analizaremos profundamente el campo de acción de la interfaz cerebro-computador (BCI). Este primer capítulo nos permitirá comprender y concluir muchos de los conceptos que irán apareciendo en los capítulos posteriores.

En el segundo capítulo, íntimamente relacionado con el primero, indagaremos el concepto de dato cerebral o neurodato desde el punto de vista de las neurociencias, teniendo en cuenta que no existe un concepto unificado del mismo para los neurocientíficos. Sin embargo, en este capítulo aportaremos en la construcción del concepto de dato cerebral o neurodato a partir de sus características y de su valor, con especial hincapié en la cultura de protección de datos de la UE. Como punto final, este capítulo nos invita a reflexionar sobre la siguiente cuestión ¿podrían los enfoques que se siguieron en la regulación de los datos genéticos servir como modelos de regulación para abordar los datos cerebrales y/o neurodatos?

En el tercer capítulo se realizará un análisis jurídico de los datos cerebrales o neurodatos desde la perspectiva del Reglamento General de Protección de datos; y teniendo presente las Directrices del Comité Europeo de Protección de Datos, determinaremos si dentro de los grandes volúmenes de información procesada a través de neurotecnología, se puede identificar a una persona; y, por ende, si se está ante un tratamiento de datos personales, actividad estrictamente regulada por el RGPD. Nos encaminará a determinar la naturaleza jurídica de los datos cerebrales, atribuirles un concepto legal, clasificarlos según su tipología o categorización, y analizar las especialidades de su tratamiento.

Finalmente, el cuarto capítulo está dedicado a la gestión de riesgos y responsabilidad proactiva en el contexto de la protección de datos cerebrales en entornos neurotecnológicos. En particular, el capítulo aborda el cambio de paradigma

que significó el RGPD en cuanto al enfoque basado en el riesgo, en función de naturaleza, alcance, contexto y finalidades del tratamiento de datos que realicen, así como de los riesgos o probabilidades de intromisión en los derechos y libertades de los interesados. Por otra parte, se analizan los riesgos específicos de privacidad y seguridad de los datos cerebrales, en particular, en el contexto de las BCIs, y se proponen una serie de medidas técnicas y organizativas para gestionar dichos riesgos.

Es menester destacar, que al contrario de lo que ocurre con la información cerebral en el ámbito de la privacidad, los efectos jurídicos del tratamiento de datos cerebrales en el contexto del derecho fundamental a la protección de datos personales no han sido abordados científicamente, por lo que el presente estudio pretende ser pionero en la materia, y establecer unas bases esenciales y unos estándares mínimos de protección para el tratamiento de los datos cerebrales o neurodatos, en un futuro previsible.

En consecuencia, este estudio pretende tener una repercusión indiscutida desde dos puntos de vista. Por un lado, este trabajo servirá de punto de partida para la configuración y regulación de un nuevo tipo de dato personal en el RGPD: «los datos cerebrales o neurodatos». De otro lado, este trabajo dará resultados que se convertirán en una línea de base para el desarrollo futuro de una guía, informe o directriz que aporte valor científico y certeza jurídica, en cuanto a los aspectos esenciales del tratamiento de datos cerebrales en el contexto del tratamiento de datos personales en la Unión Europea. De tal manera que, servirá de apoyo para las adaptaciones, correcciones o mejoras necesarias destinadas a eliminar o mitigar los riesgos, en el ámbito de las organizaciones, tanto públicas como privadas, que realicen tratamiento de datos cerebrales.

## CAPÍTULO I

### EL ESTADO DEL ARTE DE LAS NEUROTECNOLOGÍAS: EN PARTICULAR, ESTUDIO DE LA INTERFAZ CEREBRO – COMPUTADORA

#### 1. Las neurociencias y las nuevas neurotecnologías: las dos caras de una misma moneda

Para entablar un diálogo fecundo entre el derecho y las neurociencias resulta conveniente aclarar que las especulaciones filosóficas sobre la naturaleza jurídica de los estados mentales resultan incompletas si no se integran con los conocimientos disponibles sobre neuroanatomía, electrofisiología, mecanismos celulares y moleculares subyacentes a los procesos psicológicos de mayor complejidad, así como con las diferentes aportaciones de la neurociencia cognitiva.

Por tanto, al intentar desarrollar una teoría adecuada sobre las relaciones entre la mente y el cerebro y las consecuencias de esta interacción en el ámbito jurídico, es imprescindible entender, prolijamente, la estructura y el funcionamiento del sistema nervioso. De tal manera que, conocer el campo de acción de la neurociencia como ciencia interdisciplinaria es fundamental<sup>1</sup>.

La neurociencia es un conjunto de disciplinas científicas basadas en investigación metodológicamente regulada centradas en el estudio de la estructura, función, bases moleculares y patologías del sistema nervioso (en adelante, SN), y de cómo la interacción entre estos diferentes elementos constituye las bases biológicas de nuestra conducta<sup>2</sup>.

Así confluyen en esta minuciosa tarea de comprensión de la conducta humana de manera interdisciplinaria la neuroanatomía, neuroquímica, neuroendocrinología, neurofisiología, genética, biología molecular, neuroquímica, filosofía, psicología, informática, ingeniería, lingüística, etc.

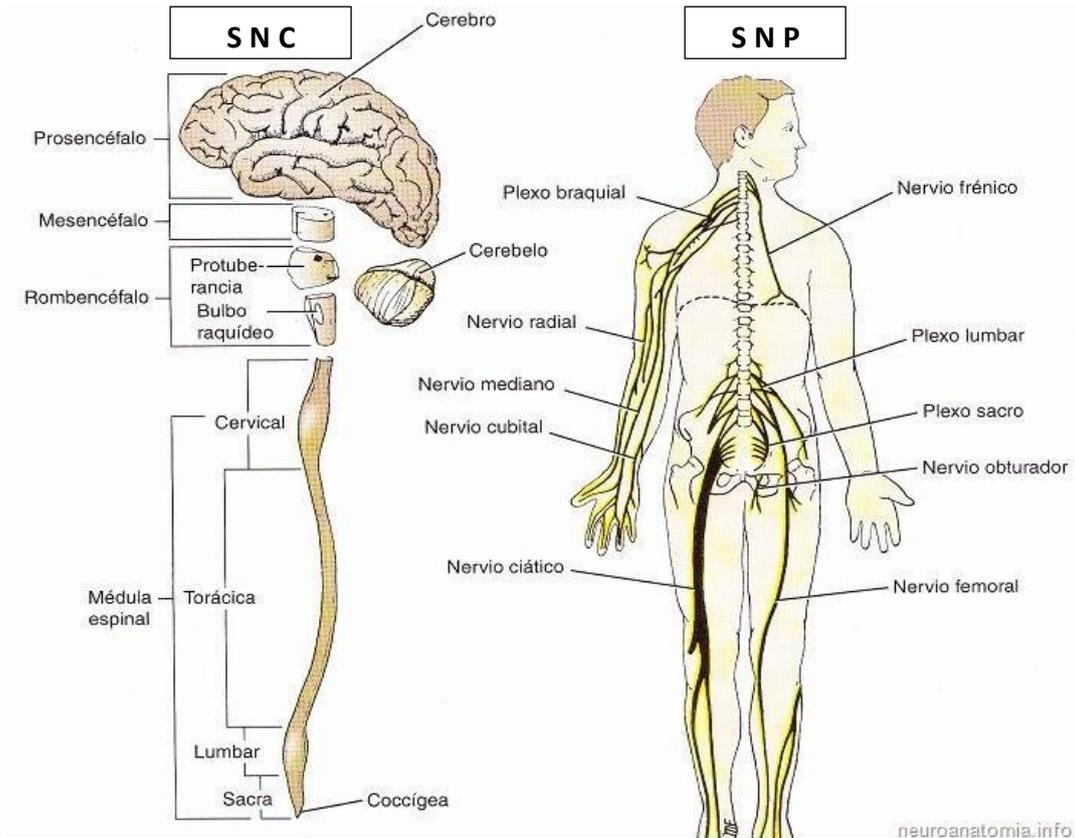
Se debe tener claro que, el sistema nervioso es uno solo, pero solo para efectos académicos y de estudio se ha dividido en dos: sistema nervioso central (en adelante, SNC), y sistema nervioso periférico (en adelante, SNP)<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> CASALES, R. (2011). De la Neurociencia a la Neuroética. Narrativa científica y reflexión filosófica. *Revista Tópicos de la Universidad Panamericana de México*, N°40, pp.261-268.

<sup>2</sup> GAGO, L., & ELGIER, Á. (2018). Trazando puentes entre las neurociencias y la educación. Aportes, límites y caminos futuros en el campo educativo. *Psicogente*, 21(40), 476-494.

<sup>3</sup> RUIZ, M. (2012). El sistema nervioso, en M. Leira Permy, *Manual de bases biológicas del comportamiento humano*, pp. 61-124. Montevideo: Universidad de la República.



*Imagen 1. Sistema Nervioso Central y Periférico  
Fuente: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)*

Para nuestros intereses nos centraremos en el estudio del SNC, pues sobre sus elementos se han centrado las investigaciones y las innovaciones neurotecnológicas.

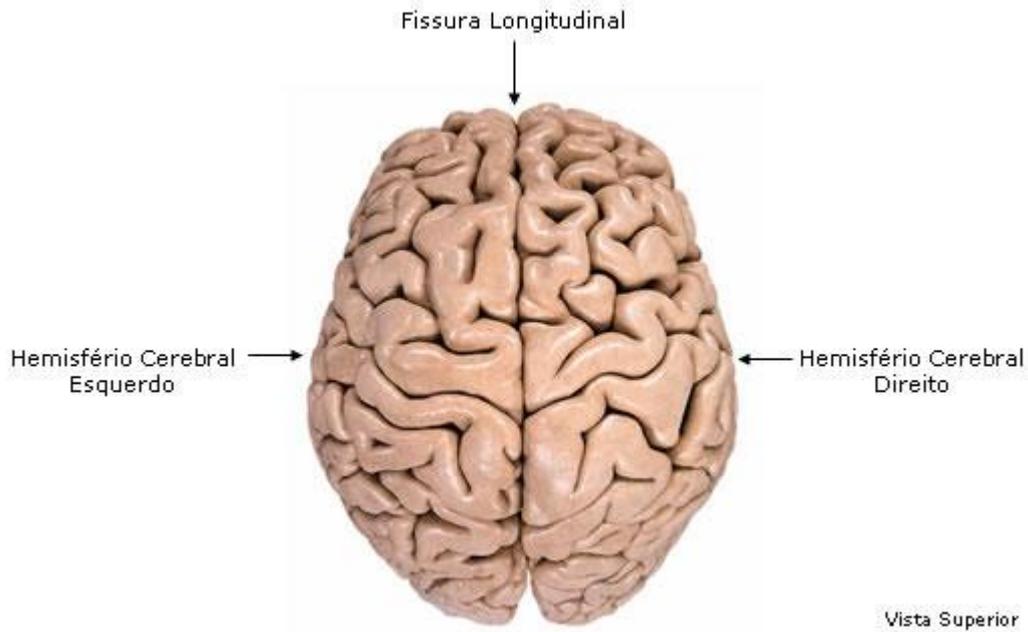
Ya hemos adelantamos que, las neurociencias se encargan de estudiar los elementos que forman el sistema nervioso y lo hace de dos formas:

- i. Por un lado, estudia la estructura, función, bases moleculares y patologías individualmente, por separado, ya que cada uno de estos elementos es un terreno muy fértil del cual podemos extraer información relevante.
- ii. Por otro lado, estudia la interacción de estos elementos, y para ello se apoya de las diferentes disciplinas a las que hemos aludido anteriormente.

De este orden de ideas podemos extraer lo siguiente. Se sabe que el SNC está compuesto por el encéfalo y la médula espinal.

El encéfalo es la parte del SNC que está protegida por los huesos del cráneo, y está formado por el cerebro, cerebelo y tronco encefálico.

El cerebro es la parte más voluminosa del encéfalo, y está dividido por un surco central llamado cisura longitudinal que da lugar a dos hemisferios, uno derecho y otro izquierdo, comunicados mediante el cuerpo calloso.



*Imagen 2. Hemisferios cerebrales  
Fuente: [www.auladeanatomia.com](http://www.auladeanatomia.com)*

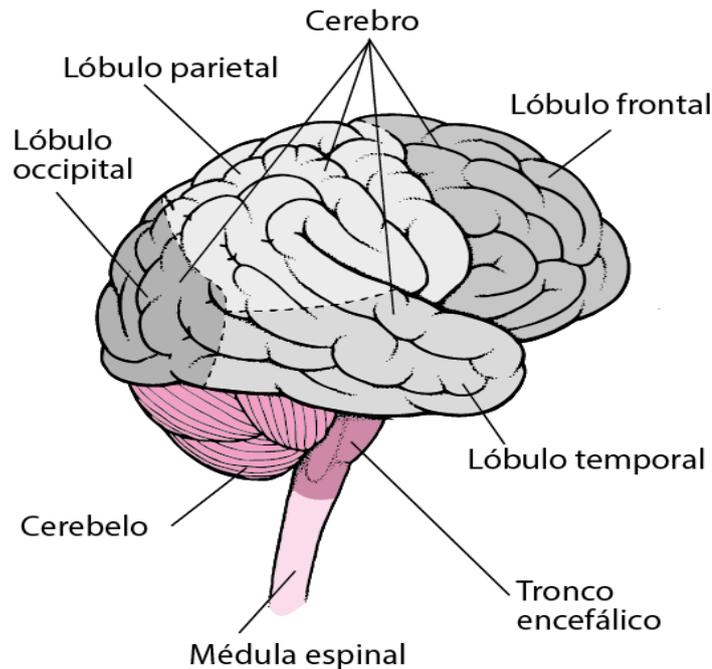
La superficie de cada hemisferio se denomina corteza cerebral, y está formada por un conjunto de depresiones irregulares llamadas cisuras o surcos que dan origen a las circunvoluciones o giros, que son elevaciones de masa del cerebro constituidas de sustancia gris.

La disposición que adoptan estos surcos nunca es igual entre los cerebros de diferentes personas. También adoptan disposiciones distintas en cada hemisferio del cerebro.

Cada hemisferio cerebral posee varias cisuras que dividen la corteza cerebral en cuatro lóbulos<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Ruiz, M. (2012). El sistema nervioso... *Op. Cit.* p.122

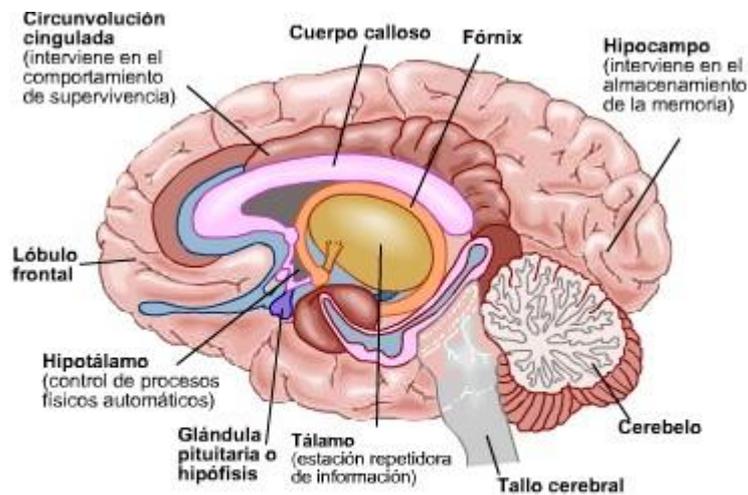


*Imagen 3. Sistema Nervioso Central  
Fuente: [www.msdmanuals.com](http://www.msdmanuals.com)*

- i. **Lóbulo frontal:** Es el lóbulo más grande del cerebro, ocupando alrededor de un tercio del hemisferio cerebral. Está ubicado en la cara anterior de la cavidad craneal. Separado de los lóbulos parietales mediante una cisura conocida como el surco central o cisura de Rolando, y de los lóbulos temporales por medio del surco lateral o cisura de Silvio. Está asociado con funciones cognitivas superiores, tales como la toma de decisiones, motivación, planeación, movimientos coordinados, pensamiento crítico, comportamiento.
- ii. **Lóbulo parietal:** Ubicado justo debajo del hueso parietal, posterior al lóbulo frontal y anterior y superior a los lóbulos temporal y occipital. Esta región está encargada de procesar principalmente, información somatosensorial, es decir, maneja datos sobre el tacto, dolor, movimiento, cálculo, orientación y propiocepción.
- iii. **Lóbulo temporal:** Abarca gran parte de la fosa craneal media y su nombre está relacionado a su proximidad con la región temporal y hueso temporal del cráneo. El lóbulo temporal procesa los recuerdos, es decir, controla la memoria visual, auditiva y comprensión del habla.
- iv. **Lóbulo occipital:** Forma la porción posterior del cerebro, ubicándose detrás de los lóbulos parietal y temporal. El lóbulo occipital es reconocido como el centro principal del procesamiento visual. Se encuentra asociado

a la identificación de colores, el reconocimiento facial, la percepción de la profundidad, el procesamiento visual y espacial, y la interpretación de dicha información.

Desde del punto de vista de los órganos que lo componen, podemos mencionar, por ejemplo, el tálamo, hipotálamo, hipocampo, glándula pituitaria o hipófisis, cuerpo calloso, etc<sup>5</sup>.



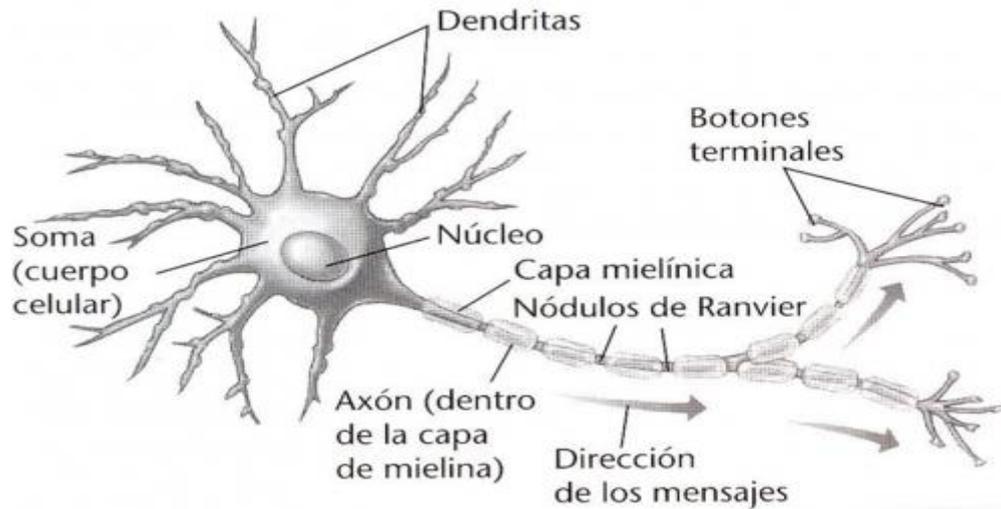
*Imagen 4. El cerebro humano: órganos  
Fuente: [www.educ.ar](http://www.educ.ar)*

A nivel celular, el SN se compone de dos tipos de células: neuronas y glía. Se estima que el encéfalo humano contiene alrededor de 100 mil millones de neuronas<sup>6</sup>.

La neurona, es la unidad estructural y funcional del sistema nervioso. Las neuronas son células eucariotas especializadas en recibir, procesar y transmitir información mediante impulsos nerviosos. Una tercera parte de las neuronas se concentra en la corteza cerebral, que es el sitio donde se lleva a cabo el más alto nivel de procesamiento neuronal.

<sup>5</sup> Ruiz, M. (2012). El sistema nervioso... *Op. Cit.* p.60

<sup>6</sup> *Ibidem*, pp.67-72



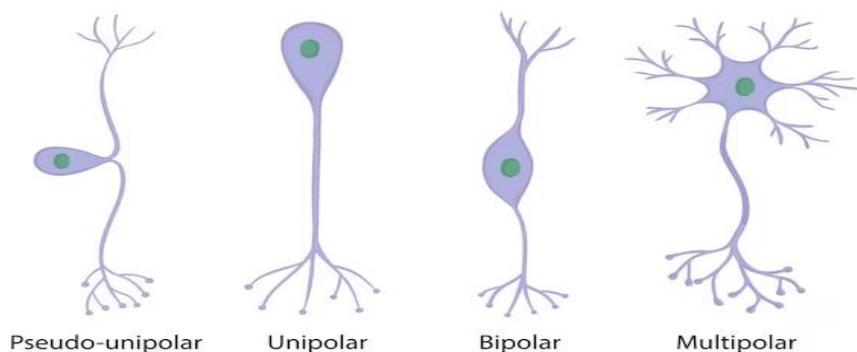
*Imagen 5. Funcionamiento neuronal*

Fuente: <https://espanol.nichd.nih.gov/salud/temas/neuro/informacion/partes>

Cada neurona posee un cuerpo o soma celular, que incluye el núcleo celular, y extensiones especiales denominadas axones y dendritas. El tamaño del cuerpo de la neurona es variable, puede medir desde 5 hasta 135 micrómetros (mcm), la forma del soma neuronal es diversa, puede ser poliédrica, alargada, esférica, estrellada o piramidal.

En cuanto a los tipos de neuronas, con base en el número, la longitud y la forma de sus ramificaciones, las neuronas se clasifican en: monopolares o unipolares; pseudomonopolares o pseudounipolares; bipolares; y multipolares.

## Basic Neuron Types



*Imagen 6. Clasificación de neuronas según ramificaciones*

Fuente: [www.psicooactiva.com](http://www.psicooactiva.com)

De acuerdo con la función que realizan, las neuronas pueden ser: sensoriales o aferentes; motoras o eferentes; y las interneuronas.

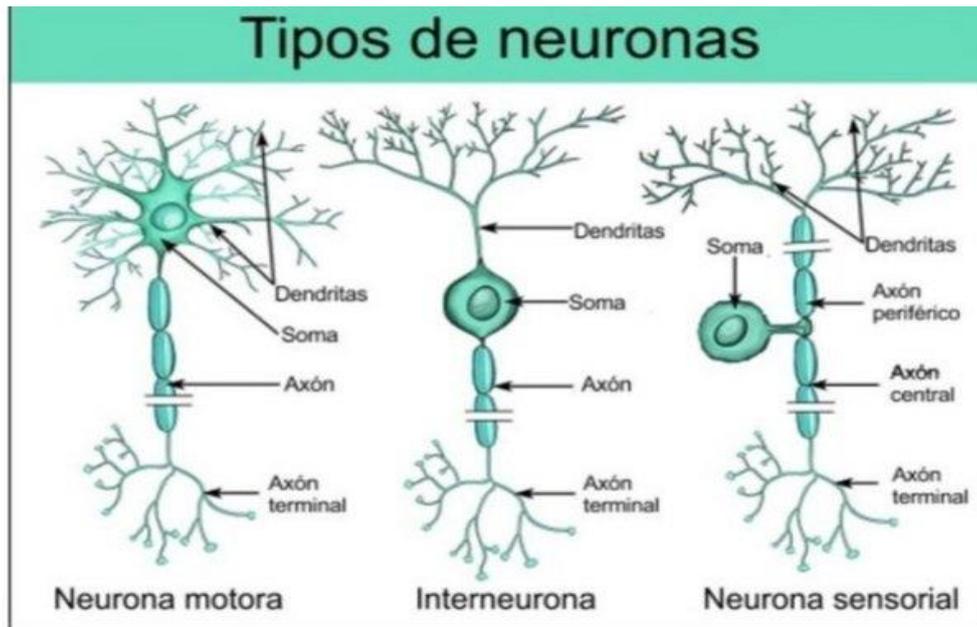


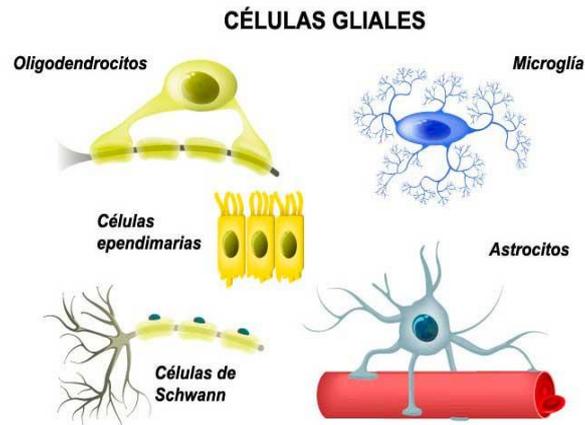
Imagen 7. Clasificación de neuronas según su función  
Fuente: [www.es.quora.com](http://www.es.quora.com)

Por el tipo de neurotransmisor que sintetizan, las neuronas se clasifican en: colinérgicas; noradrenérgicas; dopaminérgicas; serotoninérgicas; y gabaérgicas<sup>7</sup>.

Las células gliales, por su parte, son células que realizan la función de soporte y protección de las neuronas. Las neuronas no pueden funcionar en ausencia de las células gliales. Existen 4 tipos de células gliales en el SNC: astrocitos; oligodendrocitos, microglía y células ependimarias<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Ruiz, M. (2012). El sistema nervioso... *Op. Cit.* pp.81-84

<sup>8</sup> La glía del sistema nervioso periférico (SNP), también denominada neuroglia periférica contiene dos tipos celulares principales: las células de Schwann (neurolemocitos) y las células satélite. Estas células son homólogas a los oligodendrocitos y astrocitos del SNC.



*Imagen 8. La micrología en el sistema nervioso central  
Fuente: [www.psicooactiva.com](http://www.psicooactiva.com)*

Como mencionamos en párrafos anteriores, el SNC también está compuesto por el cerebelo, el tronco encefálico y la médula espinal<sup>9</sup>. El cerebelo es la porción del encéfalo ubicada en la región posterior de la cabeza entre el cerebro y el tronco encefálico. El cerebelo controla el equilibrio para caminar y estar parado, y otras funciones motoras complejas.

El tronco encefálico o tronco cerebral, es la parte más caudal del encéfalo y está conformada por el mesencéfalo, la protuberancia anular o puente y el bulbo raquídeo. Es la mayor ruta de comunicación del cerebro, la médula espinal y los nervios periféricos, y maneja las funciones involuntarias básicas<sup>10</sup>.

La médula espinal, es la continuación caudal del tronco encefálico, formado por nervios y se encuentra en el interior del conducto vertebral<sup>11</sup>. La médula espinal es el punto de conexión entre el cerebro y el resto del organismo. Posee neuronas que reciben información de los distintos órganos, como también neuronas encargadas de transmitir la información (tanto sensorial como motora) y órdenes pertinentes a diferentes zonas del cuerpo. La médula se encarga de procesar la información recibida antes de enviarla al cerebro, que es donde la estimulación se hace consciente.

Ahora bien, al estudiar el SNC, se hace necesario determinar la interrelación de los diferentes elementos que lo componen (estructuras, funciones, bases moleculares y patologías) para tener una visión holística del funcionamiento de nuestro cerebro. Así,

<sup>9</sup> Véase imagen 1.

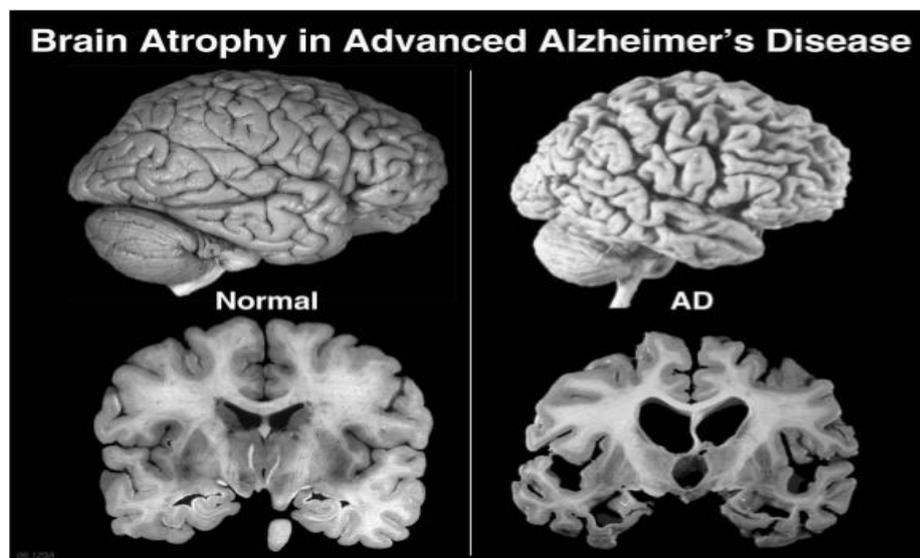
<sup>10</sup> Ruiz, M. (2012). El sistema nervioso... *Op. Cit.* pp.94-96

<sup>11</sup> *Ibidem.* pp.89-94

por ejemplo, tenemos que la memoria utiliza varias estructuras cerebrales, las principales partes del cerebro involucradas con la memoria son la amígdala, el hipocampo, el cerebelo y la corteza prefrontal.

A nivel de interacción, mediante técnicas como genética, neuroquímica o biología molecular podremos estudiar las bases moleculares de la actividad biológica, y observar qué neuroquímicos viajan a través de nuestras estructuras cerebrales<sup>12</sup>.

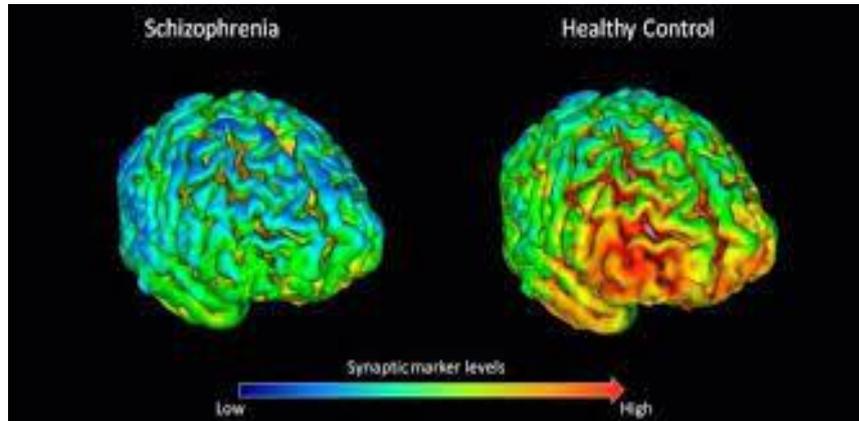
Entonces, el estudio conjunto de las bases moleculares, patología, estructuras y funciones cerebrales nos ayudarán a entender cuando algo en nosotros no funciona como normalmente debe funcionar, dando origen a algún tipo de padecimiento o enfermedad. Así, por ejemplo, en las personas con enfermedad de Alzheimer, la concentración de acetilcolina puede ser baja, es decir, se puede apreciar neuronas colinérgicas que han muerto y una reducción de receptores de acetilcolina. En este caso, la acetilcolina es un neuroquímico que no puede viajar a través de las estructuras que se relacionan con la memoria, es decir, nos encontramos ante un proceso neurodegenerativo que conduce a anomalías en la neurotransmisión que explican la aparición progresiva de dos tipos de síntomas: cognitivos, como alteraciones de la memoria (pérdida de recuerdos, recientes y antiguos); y psicoconductuales, como depresión, agresividad, agitación, apatía, etc.



*Imagen 9. Cerebro normal y cerebro con Alzheimer  
Fuente: [www.estimulacioncognitiva.info](http://www.estimulacioncognitiva.info)*

<sup>12</sup> BARCHAS HUDA, JACK D.; GLEN R, AKIL; BRUCE HOLMAN, ELLIOTT R.; WATSON, STANLEY J; BARCHAS HUDA, JACK D.; GLEN R, AKIL; BRUCE HOLMAN, ELLIOTT R.& WATSON, STANLEY J. (1979). Neuroquímica de la conducta: neuroreguladores y estados conductuales. *Revista Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México*, pp.23-38.

Al contrario, por ejemplo, en personas con esquizofrenia se ha observado un exceso de dopamina, un aumento de los receptores de dopamina, de manera que tenemos estructuras del cerebro por las que circula la dopamina en condiciones anormales que explican la aparición de síntomas como: delirios y alucinaciones.



*Imagen 10. IRMf*

*18 voluntarios sanos (derecha) tienen en promedio niveles más altos (amarillo-rojo) de la proteína marcadora de la sinapsis SV2A, que 18 participantes con esquizofrenia (izquierda)*

*Fuente: MRC London Institute Of Medical Sciences*

Desde la década de 1950 en adelante, el estudio científico del sistema nervioso ha experimentado enormes avances, principalmente debido al progreso en otros campos relacionados, como la neurociencia computacional, la electrofisiología y la biología molecular<sup>13</sup>. Así, los neurocientíficos han podido estudiar la estructura, las funciones, el desarrollo, las anomalías y las formas en que se puede alterar el sistema nervioso, con el apoyo de, por ejemplo, la neurociencia computacional, utilizando ordenadores para simular y modelar funciones cerebrales, y aplicar técnicas de matemáticas, física y otros campos similares para estudiar la función cerebral; la neuroingeniería, utilizando técnicas de ingeniería para comprender, reemplazar, reparar o mejorar los sistemas neuronales; la neuroinformática, integrando datos en todas las áreas de la neurociencia, para ayudar a comprender el cerebro y tratar enfermedades, la neuroinformática implica adquirir datos, compartir, publicar y almacenar información, análisis, modelado y simulación; la neuroimagen, utilizadas para obtener una imagen de la estructura, función o farmacología del sistema nervioso; la neurociencia de sistemas, para seguir las vías del flujo de datos dentro del sistema nervioso central e intentar definir los tipos de procesamiento que se llevan a cabo allí, utilizando esa información para explicar las funciones de comportamiento; la neurociencia celular, estudiando de las neuronas, incluida su forma y propiedades fisiológicas a nivel celular; la neurociencia

<sup>13</sup> SÁNCHEZ, C. (2016). Historia de la neurociencia: el conocimiento del cerebro y la mente desde una perspectiva interdisciplinar. *Revista Ideas y Valores*, vol.65(160), pp.266-277.

molecular, explorando los genes, las proteínas y otras moléculas que guían el funcionamiento de las neuronas, entre otros<sup>14</sup>.

Estos avances han dado lugar a un nuevo concepto dentro del campo de la neurociencia aplicada, que engloba una serie de sistemas que interactúan directamente con el cerebro o el sistema nervioso, «*las neurotecnologías*».

*Eaton e Illes* en la revista *Nature Biotechnology* de 2007, definen la neurotecnología como “*todo desarrollo que permite monitorear o modificar el funcionamiento cerebral*”<sup>15</sup>. De tal manera, la neurotecnología deriva en un conjunto de herramientas que sirven para manipular, registrar, medir y obtener información del cerebro, con el fin de analizar e influir sobre el sistema nervioso del ser humano.

Así, por ejemplo, existen neurotecnologías que permiten la manipulación de la actividad del cerebro con precisión celular, donde se utiliza la bioingeniería para insertar información genética de proteínas sensibles a la luz en las células cerebrales, generando así, cambios genéticos en las neuronas que las hacen fotosensibles, un claro ejemplo lo encontramos en la optogenética<sup>16</sup>. De igual manera, existen neurotecnologías que registran la actividad del cerebro y a partir de sistemas computarizados trasladan esta información para controlar prótesis o sistemas robóticos periféricos, los denominados, dispositivos para la estimulación cerebral profunda o interfaces cerebro ordenador, que son utilizados para el tratamiento de múltiples enfermedades<sup>17</sup>.

Pero, además, confluyen en la minuciosa área de las neurociencias las tecnologías como la inteligencia artificial, el *Big Data*, la realidad virtual, la nanotecnología y las interfaces cerebro-computador, entre otros. Sus aplicaciones son fenomenales en el área de la salud. La inteligencia artificial (en adelante, IA) unida al *big data* destaca por su capacidad de ayudar a los expertos en la personalización de los tratamientos. Gracias al análisis de datos por parte de la IA se puede aprender de cada paciente en concreto. Las propuestas más innovadoras respecto a la Inteligencia Artificial están intentando ir más allá del uso del *machine learning* para analizar cantidades ingentes de información y se están aventurando en la investigación de los aspectos más humanos de la Inteligencia Artificial. Un ejemplo claro es el diseño de

---

<sup>14</sup> GIMÉNEZ-AMAYA, J., & MURILLO, J. (2007). *Mente y cerebro en la neurociencia contemporánea. Una aproximación a su estudio interdisciplinar. Scripta Theológica*, vol.39(2), pp.607-635

<sup>15</sup> EATON, M. L., & ILLES, J. (2007). *Commercializing cognitive neurotechnology—the ethical terrain. Nature Biotechnology*, vol.25(4), pp.393-397.

<sup>16</sup> SALIN-PASCUAL, R. (2015). *Optogenética: la luz como una herramienta para el estudio del funcionamiento cerebral en los mecanismos del sueño-vigilia y la conducta alimentaria. Revista Mexicana de Neurociencias*, vol.16(3), pp. 39-51.

<sup>17</sup> LEBEDEV, M., & NICOLELIS, M. (2017). *Brain-Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation. Physiological Reviews*, vol.97(2), pp.767-837.

máquinas que sean capaces de sentir emociones o ser conscientes de su propia existencia<sup>18</sup>.

Por su parte, la realidad virtual, mediante un cúmulo de técnicas informáticas permite crear imágenes y espacios simulados computarizados en los que una persona, mediante un dispositivo visual, tiene la sensación de estar y poder desenvolverse dentro de ellos. Esta valiosa técnica no solo es utilizada con fines de esparcimiento y entretenimiento, sino que, además, puede aportar mucha información social relacionada con el comportamiento de las personas en situaciones determinadas. Capturando los micromovimientos de las personas, se puede lograr entender algunas de las dinámicas interpersonales más básicas, pero también, se puede definir cómo funcionan los grupos de gente en conjunto. De esta forma, se vuelve una herramienta tecnológica poderosa en la intervención de pacientes con trastorno del espectro autista, adicciones, etc<sup>19</sup>.

Ser capaces de manejar una máquina con nuestro cerebro hoy es posible gracias al uso extendido de las interfaces cerebro-máquina. Se trata de un dispositivo que se basa en la adquisición de ondas cerebrales para luego ser procesadas, interpretadas y decodificadas por un algoritmo en una máquina u ordenador en tiempo real, y que, en función del modo de aplicación de la tecnología pueden dividirse en invasivas y no invasivas. Las primeras requieren de la cirugía para incorporar receptores o emisores cerca o junto a áreas del cerebro o terminaciones nerviosas que van a ser afectadas. Un buen ejemplo de estos, son los implantes cerebrales microtecnológicos o nanotecnológicos normalmente introducidos en el córtex cerebral de una persona en el tratamiento de enfermedades como el Parkinson o la epilepsia. En general, lo que se busca es reconstruir movimientos intencionales desde patrones de disparo neuronal. Las segundas no requieren de cirugía eliminando los inconvenientes derivados de la intervención quirúrgica. Estas últimas utilizan emisores y receptores que envían o captan señales alterando o recopilando los estados sensoriales característicos del cerebro o el sistema nervioso. Un gran ejemplo de estos, son los electroencefalogramas (EEG), estudio que detecta la actividad eléctrica del cerebro mediante pequeños discos metálicos con cables delgados (electrodos) colocados sobre el cuero cabelludo y que envían señales a una computadora para registrar los resultados<sup>20</sup>.

También pone a disposición su sello innovador la nanotecnología. Veníamos comentando que, las últimas técnicas en las interfaces cerebro-computador permiten la instalación de electrodos en el cerebro para restaurar sentidos como la vista o el oído,

---

<sup>18</sup> VADILLO BUENO, G. (2020). Futuros de la Inteligencia Artificial. *Revista Digital Universitaria*, vol. 21(1) pp.1-12.

<sup>19</sup> FUNDACIÓN INNOVACIÓN BANKINTER. (2019). Neurociencias: Más allá del cerebro. *Future Trends Forum*, pp.15-33.

<sup>20</sup> LUCERO, B., & MUÑOZ-QUEZADA, M. T. (2014). Sistemas de interfaz neuronal y su desarrollo en las neurociencias: revisión bibliográfica sistemática acerca de su aplicación en personas con parálisis. *Revista Ciencias Psicológicas*, vol.8(2), pp.187-197.

frenar los temblores de la enfermedad de Párkinson. Sin embargo, el método utilizado, es decir romper el cráneo, daña tejidos cerebrales sanos, crea un riesgo de infección y deja cables que sobresalen de su cabeza, que, a lo largo del tiempo, desarrollan tejidos de cicatriz alrededor de los electrodos, aislándoles del tejido cerebral activo. La nanotecnología ha permitido incursionar en el desarrollo un nuevo procedimiento para llegar al cerebro sin tocar el cráneo. Se trata de un método para conectar los electrodos a pequeñas agrupaciones de células cerebrales o incluso neuronas individuales, utilizando el sistema cardiovascular como el conducto por el que se hilan los nanocables<sup>21</sup>.

Asimismo, la nanotecnología del grafeno se ha abierto como una nueva área de investigación. El grafeno es un material bidimensional, muy delgado y fuerte, que tiene una serie de propiedades únicas que lo hacen ideal para aplicaciones neuroelectrónicas. Por ejemplo, el grafeno es un conductor eléctrico excelente, lo que significa que puede utilizarse para crear dispositivos capaces de detectar y amplificar señales eléctricas neuronales. Además, el grafeno es biocompatible, lo que significa que puede implantarse en el cuerpo sin provocar una reacción inmunitaria. En los últimos años, se están desarrollando dispositivos basados en grafeno que pueden utilizarse para crear interfaces neuronales de alta densidad, que sean más pequeñas, más eficientes y más seguras. A medida que estos dispositivos se desarrollen y se perfeccionen, tendrán un impacto significativo en el campo de la neurociencia y la neuromedicina. Estos dispositivos son capaces de registrar la actividad de cientos o incluso miles de neuronas a la vez, lo que permite a los investigadores estudiar el funcionamiento del cerebro con un nivel de detalle sin precedentes<sup>22</sup>.

En suma, las neurotecnologías resultan de una combinación sinérgica, particularmente de las nuevas tecnologías avanzadas, que, aplicadas a la salud y las capacidades físicas de las personas tienen como consecuencia, la respuesta a un sinnúmero de necesidades humanas básicas.

Por lo tanto, las neurociencias y las neurotecnologías son dos caras de una misma moneda: la neurociencia sienta las bases para comprender la estructura y funcionamiento del cerebro, en tanto que, la neurotecnología proporciona las herramientas técnicas para estudiar esta estructura y funcionamiento.

---

<sup>21</sup>KUNO, N. (2016). La nanotecnología cobra vida con dispositivos de interfaz humana basados en agujas. News Center Latam.

<sup>22</sup> En concreto, el equipo de Carolina Aguilar, Chief Executive Officer & Co-Founder y Jose Antonio Garrido, CEO y Fundador y Director Científico de INBRAIN Neuroelectronics respectivamente, está trabajando en el desarrollo de microdispositivos inteligentes basados en grafeno que puedan implantarse en el cerebro para tratar enfermedades neurológicas. Estos dispositivos serían capaces de decodificar señales cerebrales con una elevada fidelidad, lo que permitiría a los médicos controlar los síntomas de la enfermedad y restaurar la función cerebral.

## **2. De la Internet de las cosas (IoT) a la Internet de los cuerpos (IoB)**

Vivimos en un mundo conectado, cada vez más objetos están siendo integrados con sensores, ganando capacidad de comunicación, y con ello las barreras que separan el mundo real del virtual se difuminan. El mundo se está convirtiendo en un campo de información global y la cantidad de datos que circulan por las redes está creciendo exponencialmente.

Este concepto, mundialmente conocido como el «Internet de las Cosas» («*The Internet of Things*» en adelante IoT), consiste en que los objetos puedan conectarse a Internet en cualquier momento y lugar. El término IoT fue empleado por primera vez en 1999 por el pionero británico Kevin Ashton para describir un sistema en el cual los objetos del mundo físico se podían conectar a Internet por medio de sensores. Ashton acuñó este término para ilustrar el poder de conectar a Internet las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) que se utilizaban en las cadenas de suministro corporativas para contar y realizar un seguimiento de las mercancías sin necesidad de intervención humana<sup>23</sup>.

El fenómeno del IoT ha irrumpido a nuestro alrededor, dando vida a objetos cotidianos que se interconectan gracias a la Red y que constituyen fuentes inagotables de información. Para ello, ha sido necesaria la conjunción de tres fenómenos que posibilitan el empleo del IoT por los usuarios. Primero, la miniaturización por la cual los componentes de los ordenadores son cada vez más pequeños, lo que facilita que se pueda conectar prácticamente cualquier cosa, desde cualquier sitio, en cualquier momento. Segundo, la superación de la limitación de la infraestructura de telefonía móvil. Y, tercero, la proliferación de las aplicaciones y los servicios que ponen en uso la gran cantidad de información creada a partir del IoT<sup>24</sup>.

El hecho de que Internet esté presente al mismo tiempo en todas partes permite la construcción de entornos inteligentes, de esta manera, cada vez estamos más interconectados y las personas y objetos pueden interactuar de manera completamente distinta.

Esta nueva era del IoT está produciendo un impacto social en los seres humanos, muchos de estos objetos conectados están sustituyendo a los actuales dispositivos por terminales insertados en el cuerpo humano. Por ello, se puede afirmar, que en la evolución del llamado IoT el mismo se está moviendo hacia y dentro del cuerpo humano, convirtiéndose en el Internet de los cuerpos (en adelante, IoB).

---

<sup>23</sup> ROSE, K., ELDRIDGE, S., & CHAPIN, L. (2015). La Internet de las Cosas- Una breve reseña para entender mejor los problemas y desafíos de un mundo más conectado. *Internet Society*, pp.13-16.

<sup>24</sup> FUNDACIÓN DE LA INNOVACIÓN BANKINTER. (2011). El Internet de la Cosas. En un mundo conectado de objetos inteligentes. pp.9-10.

La relación entre el cuerpo humano y la tecnología es cada vez más habitual, aunque no podemos desconocer que se lleva explorando desde hace muchos años. Esto demuestra el interés del ser humano, como colectivo, en mejorar nuestras capacidades a través de tecnología. Ya en 1961 había sido creado el primer ordenador para vestir. Inventado por los matemáticos *EDWARD O. THORPE* y *CLAUDE SHANNON*, era un zapato que contenía un pequeño dispositivo capaz de calcular las posibilidades de dónde caería la bola en la ruleta –tenía un índice de acierto del 44%- y lo enviaba por radio al apostador. Otros aparatos similares aparecieron más adelante, hasta el punto que en 1985 el estado de Nevada los prohibió. Justo un año antes de la creación de este dispositivo los científicos *MANFRED E. CLYNES* y *NATHAN S. KLINE* habían inventado el término “*cyborg*” para referirse a una criatura compuesta de elementos orgánicos y dispositivos cibernéticos generalmente con la intención de mejorar las capacidades de la parte orgánica mediante el uso de tecnología<sup>25</sup>.

De esta forma, en los últimos años han surgido personas que se definen a sí mismas como *cyborg*. Un caso muy conocido es el de *NEIL HARBISSON*, artista que cuenta con una antena en la cabeza que le permite ver y percibir colores incluso invisibles para el ojo humano a través de frecuencias de sonido. *HARBISSON* decidió implantarse este sistema para compensar su acromatopsia, enfermedad que le impide ver los distintos tonos de colores<sup>26</sup>.

Así, este ámbito de la tecnología del Internet de los cuerpos (IoB), nos remite al estudio de la relación de los dispositivos y nuestro cuerpo, es decir, aparatos conectados fuera de nosotros y que llevamos en nuestro exterior (relojes inteligentes); o aparatos que albergamos temporal o permanentemente dentro de nuestro cuerpo (cápsulas con microcámaras para hacer endoscopias o marcapasos inteligentes); o aquellos dispositivos que fusionan la mente humana con computadoras externas e internet.

---

<sup>25</sup> ELIO, J. (25 de septiembre de 2016). [elespañol.com](http://elespañol.com).

<sup>26</sup> ORFILA, M. (16 de marzo de 2019). [elobservador.com](http://elobservador.com).

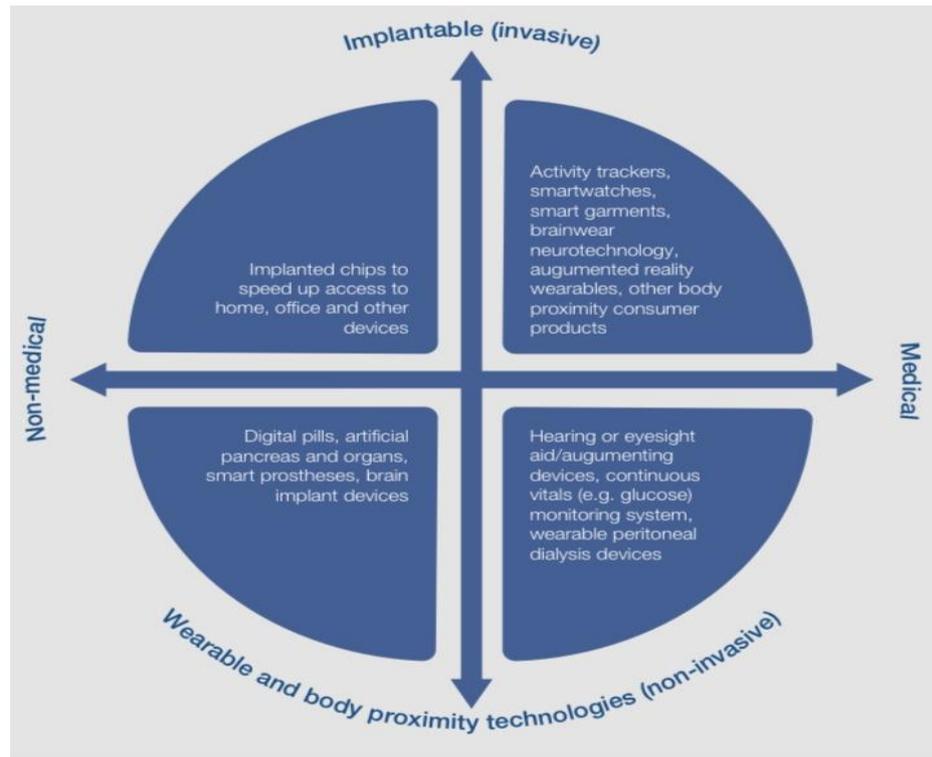


Imagen 11. Internet of Bodies Technologies<sup>27</sup>

Según ANDREA M. MATWYSHYN podemos clasificar el IoB en tres generaciones<sup>28</sup>:

- a) *IoB de primera generación. Cuerpo externo:* Son dispositivos ponibles que, ubicados junto a la piel proporcionan una visión en datos corporales. Estos dispositivos son aparentemente ubicuos, y abarcan tres categorías de productos externos al cuerpo: dispositivos médicos; dispositivos de bienestar general que presentan bajo riesgo y promueven un de estilo de vida saludable; y varios otros dispositivos corporales no relacionados con la salud, educativos y recreativos que se conectan a Internet, directamente o indirectamente. Los dispositivos médicos de IoB de primera generación incluyen dispositivos como máquinas de cirugía robótica con acceso a Internet y prótesis conectadas que un paciente maneja desde un teléfono móvil. En comparación, la categoría de IoB de primera generación de "bienestar y estilo de vida general" abarca dispositivos familiares como los rastreadores de actividad física y relojes "inteligentes" con capacidad de seguimiento del estilo de vida. Ejemplos de la última categoría de estos dispositivos IoB de primera generación son, las gafas conectadas y los cascos que ofrecen regularmente la información de los trabajadores en tiempo real en

<sup>27</sup> LU, X., & MERRITT, J. (2020). *Shaping the future of the Internet of Bodies: New challenges of technology governance*. *World Economic Forum*, p.7.

<sup>28</sup> MATWYSHYN, A. M. (2019). *The Internet of Bodies*. *William & Mary Law Review*, vol.61(77), pp.89-115.

entornos empresariales y los proyectos de exoesqueletos para soldados que ofrecen nuevas capacidades de combate.

- b) *IoB de segunda generación. Cuerpo interno:* Se refiere a dispositivos donde una parte del mismo reside dentro del cuerpo o accede al cuerpo rompiendo la piel. Por ejemplo, los marcapasos y los implantes cocleares que ahora incluyen funcionalidad dependiente de Bluetooth o pastillas digitales que se basan en un circuito impreso en 3D y un transmisor dentro de una cápsula. De manera similar, varias compañías están compitiendo actualmente para traer un "páncreas" artificial implantable conectado a Internet, gestionado por un software y una aplicación de teléfono móvil.
  
- c) *IoB de tercera generación. Cuerpo fusionado:* Los dispositivos IoB de tercera generación fusionan la mente humana con computadoras externas e Internet. Como se conceptualiza actualmente, estos dispositivos involucran principalmente interfaces cerebrales informáticas inyectadas o implantadas que actúan de manera bidireccional de lectura / escritura. En otras palabras, extienden y exteriorizan funcionalmente porciones de la mente humana. Por lo tanto, uno de los objetivos de IoB de tercera generación es la mejora cognitiva de seres humanos (sanos en principio) con la ayuda de computadoras y vínculos con implantes cerebrales. Se han aplicado principalmente en pacientes con la enfermedad de Parkinson. Unida a la robótica también destacan en el tratamiento de pacientes con nula movilidad o movilidad reducida. Actualmente, los esfuerzos se han concentrado en utilizar estas técnicas para descubrir las causas del Alzheimer y proceder a su tratamiento.

En consecuencia, la convergencia tecnológica actual descansa, principalmente, en la IoT y la IoB, por lo tanto, no es muy difícil convenir en que es la Internet el punto de encuentro entre la neurociencia y la tecnología, de tal manera, ambas se encuentran unidas por una relación bidireccional habiendo entre ellas una retroalimentación constante.

### **3. Avances en la ciencia del cerebro y las neurotecnologías omnipresentes**

Los rápidos avances en neurociencia y neurotecnología abren un conjunto de posibilidades sin precedentes en el acceso, recolección, diseminación y manipulación de datos del cerebro humano. El desarrollo de la tecnología ha llevado a las computadoras de uso común a ser equipos con gran capacidad de cálculo y almacenamiento de estos datos.

En 1878, *RICHARD CANTON* descubrió la transmisión de señales eléctricas a través del cerebro de un animal. Cuarenta y seis años después, se registró la primera

electroencefalografía (EEG) humana. Desde entonces, la revolución neurotecnológica ha tenido lugar dentro y fuera de la clínica. En los años 1990, a veces llamada “la década del cerebro”, el uso de técnicas de imágenes para estudios neuroconductuales aumentó drásticamente<sup>29</sup>.

Hoy en día, mientras un amplio espectro de tecnologías de neuroimágenes se ha vuelto clínica y comercialmente disponible, el registro y la visualización no invasivas de patrones de actividad cerebral se ha convertido en una práctica estándar. Por ejemplo, los registros de EEG se están utilizando ampliamente para medir de forma no invasiva la actividad eléctrica del cerebro y detectar fluctuaciones de voltaje. Además, los derivados de la técnica de EEG, como los potenciales evocados (EP, por las siglas en inglés) y los potenciales relacionados con evento (ERP), permiten promediar las respuestas del EEG a la presentación y procesamiento de los estímulos, y así registrar las señales del cerebro durante el desempeño de tareas sensoriales, cognitivas o motoras específicas.

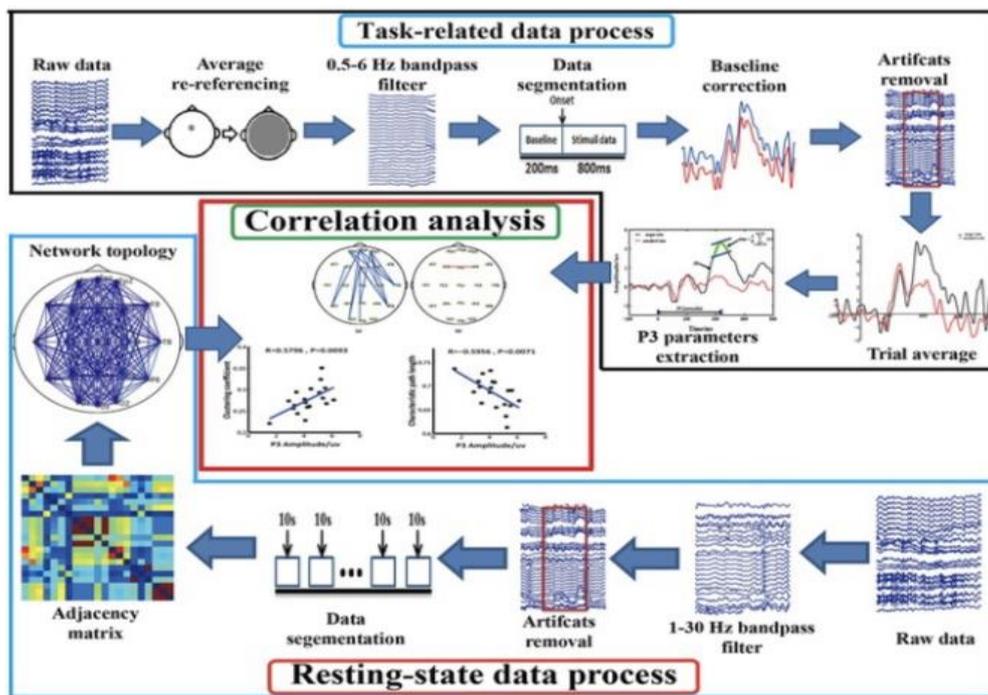


Imagen 12. Ejemplo de flujo de los datos, desde los datos crudos del EEG hasta el análisis del grafo<sup>30</sup>

<sup>29</sup> ILLES, J. (2003). *Neuroethics in a new era of neuroimaging*. *Am J Neuroradiol*, vol.24(9), pp. 1739-1741.

<sup>30</sup> En la figura 1 se puede ver un ejemplo de los pasos por los que pasan los datos hasta su análisis final. Las señales tomadas por el EEG filtran bandas de frecuencia que están por fuera del rango de interés. Luego, dependiendo el tipo de experimento, o bien se identifican las regiones donde ocurrieron eventos relevantes y se recortan estas series temporales o se procesa todo sin particionar, esto último ocurre por ejemplo cuando se realiza un experimento de *resting* donde no hay estímulos o eventos particulares que sean de interés. Acto seguido se eliminan fuentes de ruido como contracciones musculares. Después, dependiendo el tipo de experimento, o bien se genera una matriz de correlación analizando la similitud entre distintos electrodos o se genera una serie temporal promedio de la cual se estudia su forma de onda. A partir de estos resultados se realizan *tests* estadísticos para intentar verificar si el fenómeno

Por su parte, la resonancia magnética funcional (fMRI), técnica que permite medir la actividad eléctrica del cerebro de forma indirecta, esto es, utilizando las respuestas hemodinámicas (el flujo sanguíneo cerebral) como marcadores indirectos, permite localizar la actividad cerebral, representar gráficamente los patrones de activación neuronal, y determinar su intensidad codificando por medio de colores la fuerza de la activación. Esta técnica se implementa para una variedad de propósitos que incluyen la evaluación de riesgos antes de una cirugía, el mapeo funcional de áreas del cerebro para detectar anomalías (por ejemplo, asimetría hemisférica en las regiones del lenguaje y la memoria), el monitoreo de la recuperación después de un accidente cerebrovascular o de una cirugía, así como los efectos de terapias farmacológicas y de comportamiento. Además, un número de condiciones neurológicas como la depresión y la enfermedad de Alzheimer ahora pueden ser diagnosticadas por medio del uso de fMRI<sup>31</sup>.

Se ha probado que la capacidad de las técnicas de neuroimágenes de mapear las funciones del cerebro es también eficaz en la obtención de información sobre las intenciones, puntos de vista y actitudes de las personas. Por ejemplo, se pudo inferir qué acciones tenían la intención de realizar los participantes de un experimento a partir de la decodificación de su actividad cerebral. La tarea en cuestión consistía en decidir si sumar o restar dos números y mantener encubierta su intención por unos pocos segundos. Durante ese lapso de tiempo, los científicos pudieron determinar con un 70% de precisión cuál de las dos tareas los sujetos intentaban realizar encubiertamente<sup>32</sup>. En otro estudio, los participantes recorrieron primero varias casas en un espacio de realidad virtual, y luego sus cerebros fueron escaneados mientras recorrían otro conjunto de casas. Al identificar ciertos patrones de actividad cerebral para cada casa, los científicos pudieron determinar cuáles eran las casas en las que los sujetos habían estado antes<sup>33</sup>.

Los escáneres cerebrales no sólo permiten “leer” las intenciones y recuerdos concretos relacionados con un experimento, sino que parecen incluso ser capaces de decodificar preferencias más generales. Un estudio estadounidense ha demostrado que la resonancia magnética puede utilizarse para deducir las opiniones políticas de los usuarios identificando diferencias funcionales entre los cerebros de demócratas y

---

esperado se observa de forma significativa. Imagen extraída de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28938855>

<sup>31</sup> KOCH, W., TEIPEL, S., MUELLER, S., BENNINGHOFF, J., WAGNER, M., BOKDE, A.L., & MEINDL, T. (2012). *Diagnostic power of default mode network resting state fMRI in the detection of Alzheimer's disease. Neurobiol Aging*, vol.33(3), pp.466-478.

<sup>32</sup> HAYNES, J.-D., SAKAI, K., REES, G., GILBERT, S., FRITH, C., & PASSINGHAM, R.E. (2007). *Reading hidden intentions in the human brain. Curr Biol*, vol.17(4), pp.323-328.

<sup>33</sup> SMITH, K. (2013). *Brain decoding: Reading minds. Nature*, n°502, pp.428-430.

republicanos<sup>34</sup>. De manera similar, la frecuente preferencia de los hombres por coches deportivos se ha correlacionado con diferencias funcionales específicas entre los cerebros de hombres y mujeres<sup>35</sup>.

La posibilidad de identificar de forma no invasiva los correlatos mentales de diferencias cerebrales funcionales es de particular interés para el marketing. Hace más de una década, *MCCLURE Y OTROS* utilizaron fMRI para mostrar diferencias funcionales (mayor activación en la corteza prefrontal dorsolateral, el hipocampo y el mesencéfalo) entre el cerebro de personas bebiendo Coca Cola a sabiendas y el cerebro de las mismas personas bebiendo Coca Cola sin etiquetar. Sus resultados mostraron que las diferentes estrategias de marketing (por ejemplo, la etiqueta de Coca Cola) pueden determinar diferentes respuestas en el cerebro de los consumidores<sup>36</sup>. Estos resultados fueron pioneros en el establecimiento de una rama de la neurociencia en la intersección con la investigación en marketing llamada 'neuromarketing', que se ha expandido rápidamente durante la década pasada. Hoy en día, varias empresas multinacionales como *Google, Disney, CBS, y Frito-Lay* utilizan los servicios de investigación en neuromarketing para medir las preferencias e impresiones de los consumidores respecto de sus anuncios o productos. Además, un número de compañías especializadas en neuromarketing incluyendo *EmSense, Neurosence, MindLab International y Nielsen*, aplican rutinariamente técnicas de neuroimágenes, principalmente fMRI y EEG, pero también topografía de estado estable (SST en inglés) y mediciones fisiológicas (por ejemplo, la respuesta galvánica de la piel) para estudiar, analizar y predecir el comportamiento del consumidor.

La posibilidad de una extracción de datos de la mente puede ser potencialmente utilizada no solo para inferir las preferencias mentales, sino también para incitar, implantar o activar esas preferencias. Por ejemplo, *Neurofocus*, una empresa multinacional americana de neuromarketing recientemente adquirida por Nielsen, probó técnicas subliminales con el fin de producir respuestas (por ejemplo, preferir un ítem A en lugar de uno B) que las personas no pueden registrar conscientemente<sup>37</sup>. Estas técnicas presuponen insertar estímulos de menos de 30 milisegundos, bajo el umbral de

---

<sup>34</sup> SCHREIBER, D., FONZO, G., SIMMONS, A.N., DAWES, C.T., FLAGAN, T., FOWLER, J.H., & PAULUS, M.P. (2013). *Red brain, blue brain: Evaluative processes differ in Democrats and Republicans*. *PLoS One*, vol.8(2), e52970.

<sup>35</sup> BARON-COHEN, S. (2004). *Essential difference: Male and female brains and the truth about autism*. *Basic Books*.

<sup>36</sup> MCCLURE, S. M., LI, J., TOMLIN, D., CYPERT, K. S., MONTAGUE, L.M., & MONTAGUE, P.R. (2004). *Neural correlates of behavioral preference for culturally familiar drinks*. *Neuron*. 44(2), pp.379-387.

<sup>37</sup> PENENBERG, A. (2011). *NeuroFocus uses neuromarketing to hack your brain*. *Fast Company*. [Consulta: 28 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.fastcompany.com/1769238/neurofocus-uses-neuromarketing-hack-your-brain>

la percepción consciente. En vista de estos desarrollos, se ha subrayado la necesidad de establecer normas éticas y jurídicas para las prácticas de neuromarketing<sup>38</sup>.

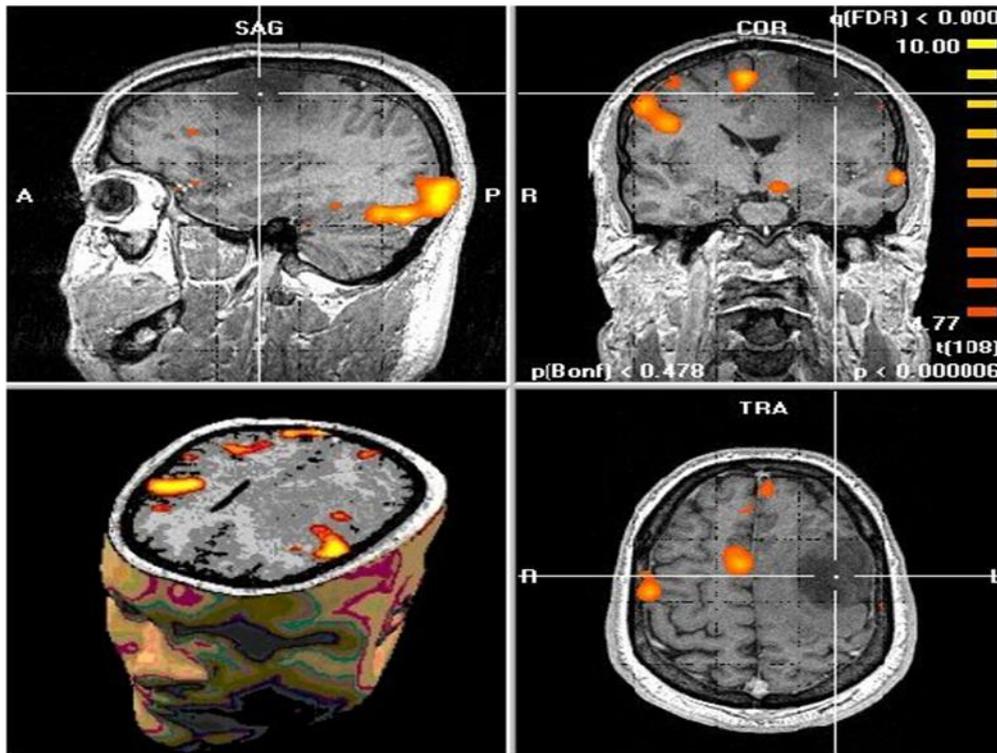


Imagen 13. Las imágenes obtenidas con IRMf permite a los científicos observar lo que ocurre en el cerebro durante el ejercicio

Fuente: <http://neuromarca.com/neuromarketing/fmri/>

Las técnicas de imágenes cerebrales se desarrollaron originalmente, y todavía se aplican en su mayoría, en el contexto de la medicina clínica y la investigación neurocientífica. Sin embargo, en los últimos años, una serie de aplicaciones neurotecnológicas se han abierto camino en el mercado y están ahora integradas a un conjunto de dispositivos de consumo para usuarios sanos con diversos fines no clínicos.

El término genérico que se suele utilizar para englobar a todas estas neurotecnologías no invasivas, escalables y potencialmente ubicuas es “*neurotecnología omnipresente*”<sup>39</sup>, una noción derivada de la más extendida “*computación omnipresente*”. Hoy en día, las aplicaciones dominantes de la neurotecnología incluyen interfaces cerebro-computadora (BCIs) para el control de dispositivos o la neuromonitorización en tiempo real, sistemas de operación de vehículos a partir de neurosensores, herramientas de entrenamiento cognitivo, sistemas de estimulación

<sup>38</sup> ULMAN, Y.I., ÇAKAR, T., YILDIZ, G. (2015). *Ethical issues in neuromarketing: “I consume, therefore I am!”*. *Sci Eng Ethics*, vol.21(5), pp.1271–84.

<sup>39</sup> FERNÁNDEZ, A., SRIRAMAN, N., GUREVITZ, B., & OUIILLER, O. (2015). *Pervasive neurotechnology: A groundbreaking analysis of 10,000+ patent filings transforming medicine, health, entertainment and business*. SharpBrains.

magnética o eléctrica del cerebro, dispositivos portátiles para el bienestar mental y sistemas de realidad virtual.

La mayoría de estas aplicaciones usan registros de EEG que monitorean la actividad eléctrica en el cerebro para una variedad de propósitos, incluyendo la neuromonitorización (evaluación en tiempo real del funcionamiento del cerebro), el entrenamiento neurocognitivo (usando ciertas bandas de frecuencia para mejorar las funciones neurocognitivas) y el control de dispositivos. Los BCIs basados en EEG se están usando cada vez más como accesorios portátiles para un número de actividades diarias incluyendo juegos, entretenimiento y el control remoto de teléfonos inteligentes. Por ejemplo, las empresas *Emotiv* y *Neurosky* ofrecen un gran surtido de cascos inalámbricos para uso diario que se pueden conectar a teléfonos inteligentes compatibles y computadoras personales<sup>40</sup>. El control cerebral puede ser usado para controlar a distancia varios tipos de dispositivos y realizar varias actividades, incluidos juegos y otras formas de entretenimiento, marketing, automonitoreo y comunicación.



*Imagen 14. Emotiv EPOC+, EEG portátil, inalámbrico y económico  
Fuente: <https://www.emotiv.com/epoc-x/>*

La posibilidad de un control cerebral no invasivo ha captado la atención de la industria de la comunicación móvil. Varias compañías líderes, incluyendo *Apple* y *Samsung*, han incorporado dispositivos neuronales (*neurogadgets*) entre los accesorios de sus productos principales. Por ejemplo, accesorios de iPhone como el casco *XWave* ya pueden conectarse directamente a iPhones compatibles y leer las ondas cerebrales. Mientras tanto, el control por medio de actividad cerebral a través de BCIs basados en EEG ya se ha probado en los prototipos de próxima generación de *tablets* de Samsung

---

<sup>40</sup> IENCA, M., & HASELAGER, P. (2016). *Hacking the brain: brain-computer interfacing technology and the ethics of neurosecurity*. *Ethics Inf Technol*, vol.18(2), pp.117-129.

Galaxy y otros dispositivos móviles o portátiles<sup>41</sup>. A la luz de estas tendencias, YUAN y colegas predijeron que los dispositivos neurológicos reemplazarán gradualmente el teclado, la pantalla táctil y el ratón como la forma preferida de los humanos para interactuar con las computadoras<sup>42</sup>.



*Imagen 15. XWAVE recoge señales eléctricas que transmite el cerebro humano a través del cráneo y las convierte en señales digitales con las que es posible manejar aplicaciones en el iPhone, iPod Touch o el iPad sin mover un dedo, sólo con el pensamiento  
Fuente: [www.plxwave.com](http://www.plxwave.com)*

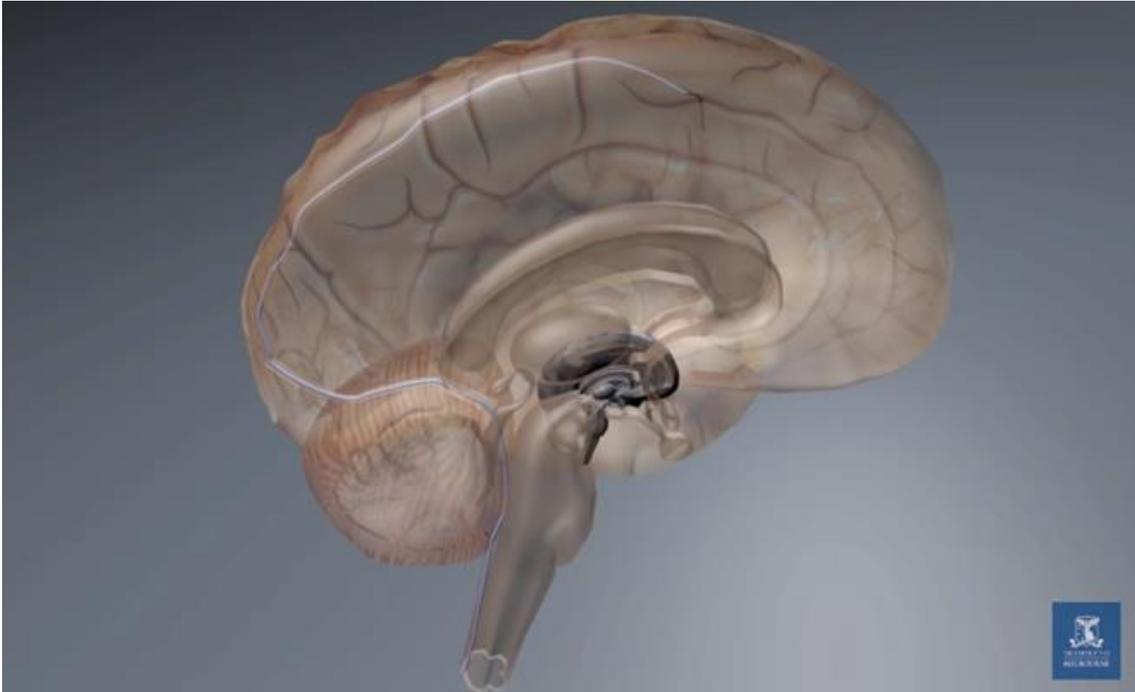
No solo los dispositivos de neuroimágenes y las BCIs entran en la categoría de la neurotecnología omnipresente. Varios estimuladores eléctricos del cerebro también encajan en esta categoría. A diferencia de las neuroimágenes, los neuroestimuladores no se utilizan principalmente para registrar o decodificar el cerebro sino para estimular o modular eléctricamente la actividad cerebral. Dispositivos portátiles y fáciles de usar de estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS) son la forma más extendida de neuroestimulador de consumidor. Se utilizan en una serie de aplicaciones de bajo costo dirigidas al consumidor, destinadas a optimizar el rendimiento del cerebro en una variedad de tareas cognitivas, dependiendo de la región del cerebro que se esté estimulando. Recientemente, la estimulación magnética transcraneal (TMS), un método magnético utilizado para estimular brevemente pequeñas regiones del cerebro para

<sup>41</sup> POWELL, C., MUNETOMO, M., SCHLUETER, M., MIZUKOSHI, M. (2013). *Towards thought control of next-generation wearable computing devices* Documento presentado en International Conference on Brain and Health Informatics.

<sup>42</sup> YUAN, B. J., HSIEH, C.-H., CHANG, C.-C. (2010). *National technology foresight research: A literature review from 1984 to 2005*. *Int J Foresight Innov Policy*, vol.6(1), pp.5-35.

finés tanto diagnósticos como terapéuticos, también ha sido implementada en dispositivos portátiles, lo que resultó eficaz para el tratamiento de la migraña<sup>43</sup>.

Finalmente, una técnica quirúrgica invasiva llamada estimulación cerebral profunda (DBS) que implica la implantación de un neuroestimulador en el núcleo ventral intermedio del tálamo, ha obtenido la aprobación de la FDA y ahora se utiliza cada vez más como tratamiento para el temblor esencial, la enfermedad de Parkinson, la distonía y el trastorno obsesivo-compulsivo.



*Imagen 16. El dispositivo llamado Stendrode tiene 4 mm de diámetro y se implanta sin necesidad de cirugía invasiva -a través de una vena del cuello- un vaso sanguíneo aledaño a las áreas motoras del cerebro para permitir estímulos localizados*

*Fuente: Universidad de Melbourne*

Así el interés médico por los beneficios de las neurotecnologías se ve complementado por un interés económico evidente. Un informe de *EVALUATE*<sup>44</sup> destaca a la neurología como el área de dispositivos de más rápido crecimiento, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 7,6 % entre 2015 y 2022. Se espera que las ventas en neurotecnología médica alcancen los 11100 millones de USD en 2022. En marzo de 2017, dos programas aceleradores para nuevas empresas de tecnología cerebral, *Brainnovations* y *NeuroLaunch de Israel Brain Technologies (IBT)*, se asociaron para fomentar la inversión, la innovación y el diálogo internacional entre empresarios

<sup>43</sup> LEFAUCHEUR, J.-P., ANDRÉ-OBADIA, N., ANTAL, A., AYACHE, S. S., BAEKEN, C., BENNINGER, D. H., & DE RIDDER, D. (2014). *Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS)*. *Clin Neurophysiol*, vol.125(11), pp.2150-2206.

<sup>44</sup> EVALUATE (2016), *EvaluateMedTech: World Preview 2016, Outlook 2022*. [consulta: 28 de enero de 2024]. Disponible en: <http://info.evaluategroup.com/rs/607-YGS-364/images/mt-wp16.pdf>

estadounidenses e israelíes que trabajan en los campos de la neurociencia y la neurotecnología.

#### **4. Principales iniciativas de investigación cerebral en el mundo**

Los avances en neurotecnología están siendo impulsados en parte por tendencias más generales en la convergencia de biotecnología, nanotecnología y tecnología de la información<sup>45</sup>. La interfaz entre los campos científicos, por ejemplo, la biología molecular, la ciencia física, la ingeniería y la investigación clínica, nos está dotando de nuevas capacidades para comprender, manipular y mejorar el funcionamiento del cerebro<sup>46</sup>. Por ejemplo, las poderosas herramientas ahora hacen posible describir los procesos moleculares, bioquímicos y función física de una sola neurona como parte de una acción colectiva a través de los sistemas sinápticos.

Se espera que las iniciativas de investigación del cerebro a gran escala, arrojen luz sobre cuestiones de larga data en la investigación del cerebro, la medicina y la humanidad, responder preguntas tales como: ¿cuáles son, por ejemplo, los correlatos neuronales de la mente y la conciencia? ¿Cómo grandes redes de células nerviosas procesan información en cerebros sanos?, ¿cuáles son los cambios patológicos en lesiones y enfermedades? ¿Cómo se coordinan y trabajan juntas partes dispares del cerebro? ¿Y cómo construyes computadoras de maneras diferentes y más "inteligentes"?

Los objetivos y los posibles impactos futuros de las principales iniciativas de neurotecnología y ciencia del cerebro difieren en el enfoque, algunos buscan una comprensión más integrada de la estructura y función del cerebro a través de las tecnologías de la información y las comunicaciones, otros buscan construir modelos de circuitos neuronales y otros buscan desarrollar nuevas tecnologías para involucrar la función cerebral.

En mayor o menor medida, las principales iniciativas de investigación cerebral en todo el mundo han abrazado el desarrollo y uso de las neurotecnologías. A continuación, podemos observar algunos proyectos:

---

<sup>45</sup> VASEAHTA, A. (2012), *"The potential utility of advanced science convergence"*, in James Giordano (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, CRC Press.

<sup>46</sup> DONOGHUE, J. (2015), *"Neurotechnology"*, in Marcus, G. and J. Freeman (eds.), *The future of the brain*, Princeton University Press.

#### 4.1 Australian Brain Alliance (ABA)

*Australian Brain Alliance* (ABA) es una iniciativa de la Academia Australiana de Ciencias con la visión de coordinar e impulsar la investigación estratégica del cerebro en Australia<sup>47</sup>.

La ABA se estableció en febrero de 2016 bajo el auspicio de la Academia Australiana de Ciencias con miembros fundadores que incluyen el Comité Nacional del Cerebro y los principales organismos de la Sociedad de Neurociencia de Australasia y la Sociedad Psicológica de Australia.

Está dirigida por un comité directivo compuesto por los principales neurocientíficos y psicólogos de Australia, presidido por la profesora Patricia Michie.

Desde su creación, la ABA ha crecido hasta incluir 28 organizaciones miembros, dentro de las cuales se encuentran la mayoría de las universidades e institutos de investigación australianos.

La ABA ha propuesto el establecimiento de *Australian Brain Initiative* (ABI), una agenda de investigación cerebral transformadora destinada a coordinar a los investigadores existentes en Australia y a científicos de otras disciplinas con el objetivo de "descifrar el código del cerebro". Con una ciencia de convergencia integradora, junto con un marco de traducción novedoso, la ABA espera que la ABI propuesta logre avances significativos hacia la optimización y restauración de la función cerebral, el desarrollo de interfaces neuronales avanzadas, la comprensión de la base neuronal del aprendizaje a lo largo de la vida y el desarrollo de nuevos conocimientos para la computación inspirada en el cerebro.

#### 4.2 The Canada Brain Research Fund (Canada)

*Brain Canada* es una organización nacional sin fines de lucro con sede en Montreal, Québec, que apoya investigaciones sobre el cerebro excelentes, innovadoras y que cambian el paradigma en Canadá<sup>48</sup>. Su objetivo final es reducir la carga social y económica de los problemas neurológicos y de salud mental a través de la prevención, el diagnóstico temprano y el tratamiento.

La visión de *Brain Canada* es comprender el cerebro, en la salud y la enfermedad, para mejorar vidas y lograr un impacto social. De tal manera que, mira el cerebro como un sistema y ha subrayado la necesidad de una mayor colaboración entre disciplinas e

---

<sup>47</sup> AUSTRALASIAN NEUROSCIENCE SOCIETY. (2016). *ans.org*. [consulta: 30 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.ans.org.au/resources/issues/about-the-australian-brain-alliance>

<sup>48</sup> BRAIN CANADA. (2011). *braincanada.ca*. [consulta: 30 de enero 2024]. Disponible en: <https://braincanada.ca/fr/a-propos/a-propos-de-la-fondation-brain-canada>

instituciones, garantizando, así, que Canadá tenga una fuente sólida de talento para permanecer a la vanguardia en el campo de la investigación del cerebro.

El *Canada Brain Research Fund* es una asociación innovadora entre el Gobierno de Canadá (a través de *Health Canada*) y *Brain Canada*, diseñada en el año 2011 para alentar a los canadienses a aumentar su apoyo a la investigación del cerebro y maximizar el impacto y la eficiencia de esas inversiones. El Fondo apoya lo mejor de la neurociencia canadiense, fomentando la investigación colaborativa y acelerando el ritmo de los descubrimientos para mejorar la salud y la calidad de vida de los canadienses que padecen trastornos cerebrales. Durante los últimos 20 años, *Brain Canada* y sus donantes y socios han invertido \$277 millones en más de 370 proyectos de investigación en todo el país.

#### *4.3 China Brain Project (People's Republic of China)*

*China Brain Project* es un proyecto de 15 años, aprobado por el Congreso Nacional del Pueblo Chino en marzo de 2016 como parte del 13° Plan Quinquenal (2016-2020); es uno de los cuatro programas piloto del *programa Innovation of Science and Technology Forward 2030*, dirigido a la investigación de la base neuronal de la función cognitiva<sup>49</sup>.

Los objetivos adicionales incluyen mejorar el diagnóstico y la prevención de enfermedades cerebrales e impulsar proyectos de tecnología de la información e inteligencia artificial inspirados en el cerebro.

El *China Brain Project* prioriza la IA inspirada en el cerebro sobre otros enfoques. El Proyecto aborda cuestiones legales, éticas y sociales relacionadas con la emulación del cerebro (neuroética) de acuerdo con los estándares internacionales y los valores chinos .

En comparación con otros proyectos de investigación sobre el cerebro, CBP es de naturaleza más integral; cubre la investigación básica sobre la base natural de las funciones cognitivas, la investigación aplicada en el desarrollo de métodos para el diagnóstico y la intervención de trastornos cerebrales, así como métodos y dispositivos informáticos inspirados en el cerebro. Todo teniendo en consideración que China tiene la población de pacientes más grande del mundo, ofreciendo a los investigadores una amplia base de datos que involucra la puesta a disposición de una infinidad de datos sobre diversos trastornos cerebrales.

---

<sup>49</sup> WANG, L. (2017). *Mu-ming Poo: China Brain Project and the future of Chinese neuroscience*. *National Science Review*, 258-263. [consulta: 04 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.cibr.ac.cn/about/department?language=en>

El Proyecto cuenta con el apoyo del Centro de Excelencia en Ciencia e Inteligencia del Cerebro de la Academia China de Ciencias (CAS), un consorcio de laboratorios en más de veinte institutos y universidades de la CAS, y el Instituto Chino para la Investigación del Cerebro, lanzado en marzo de 2018.

#### *4.4 Cuban Human Brain Mapping Project CHBMP (CUBA)*

El repositorio *Cuban Human Brain Mapping Project (CHBMP)* es un conjunto de datos cognitivos y de neuroimagen multimodal abierto de 282 participantes sanos (31,9 ± 9,3 años, rango de edad de 18 a 68 años). Este conjunto de datos se adquirió entre 2004 y 2008 como un subconjunto de una muestra aleatoria estratificada más grande de 2019 participantes del municipio La Lisa en La Habana, Cuba. La exclusión incluía la presencia de enfermedades o disfunciones cerebrales. La información puesta a disposición de todos los participantes comprende: electroencefalogramas (EEG) en estado de reposo de alta densidad (64-120 canales), imágenes de resonancia magnética (IRM), pruebas psicológicas (MMSE, *Wechsler Adult Intelligence Scale -WAIS III*, pruebas de tiempo de reacción informatizadas mediante un paradigma de *go-no-go*), así como información general (edad, género, educación, etnia, destreza manual y peso). Los datos de EEG contienen grabaciones con una duración mínima de 30 minutos que incluyen las siguientes condiciones: ojos cerrados, ojos abiertos, hiperventilación y recuperación posterior. La resonancia magnética consistió en imágenes anatómicas T1 y T2, así como imágenes ponderadas por difusión (DWI) adquiridas en un sistema de 1,5 Tesla. Los datos están disponibles para usuarios registrados en la base de datos LORIS, que forma parte del ecosistema de neuroinformática de MNI<sup>50</sup>.

El énfasis del CHBMP ha estado en la evaluación cuantitativa, conocida como electroencefalograma cuantitativo (qEEG)<sup>51</sup>. Se ha demostrado que qEEG identifica trastornos cerebrales en una amplia variedad de entornos y, por lo tanto, es candidato para su uso como herramienta de detección. En qEEG, los espectros de registro de EEG registrados en el cuero cabelludo de un probando se comparan con los espectros normativos por medio de un procedimiento de mapeo paramétrico estadístico. Estos

---

<sup>50</sup> VALDES-SOSA, P., GALAN, L., BOSCH-BAYARD, J., BRINGAS VEGA, M., AUBERT VAZQUEZ, E., DAS, S., VALES-SOSA, M. (2020). *The Cuban Human Brain Mapping Project population based normative EEG, MRI, and Cognition dataset*. *bioRxiv*, 2. [consulta: 5 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.07.08.194290v1.full.pdf+html>

<sup>51</sup> El electroencefalograma cuantitativo (QEEG) o mapeo cerebral es aquella técnica que nos permite registrar los diferentes patrones eléctricos cerebrales a través de la colocación de electrodos en el cuero cabelludo colocados de manera estandarizada según el sistema internacional 10-20. Estos electrodos nos permiten registrar patrones de comunicación cerebral que se establecen a partir de la medición de la actividad bioeléctrica generada principalmente por potenciales postsinápticos de las neuronas piramidales del córtex cerebral. Esta actividad cerebral se registra a modo de ondas, las cuales son la expresión temporal de las diferentes oscilaciones que se producen por diferentes conjuntos neuronales en las distintas áreas cerebrales. Existen 5 tipos diferentes de ondas cerebrales, cada una de las cuales se caracteriza por su frecuencia (número de ondas por segundo) medida en Hz y por su amplitud. Además, cada tipo de ondas llevan un tipo de actividad cerebral asociado (Arango & Pardo, 2002).

espectros normativos se obtienen como medias dependientes de la edad y desviaciones estándar de los espectros de registro de EEG de una muestra grande de participantes sanos. Las normas dependientes de la edad son regresiones de espectros logarítmicos en un amplio rango de edad. Por lo tanto, una base de datos normativa de EEG es un requisito previo para qEEG.

La necesidad de una base de datos normativa cubana para qEEG impulsó así la primera ola del CHBMP, iniciada en 1988. Esta primera base de datos incluyó a 211 personas sanas de 5 a 97 años. Los participantes fueron seleccionados al azar de la población cubana y examinados por el sistema *Family Doctor* para incluir solo participantes sanos. Esta base de datos se utilizó para desarrollar un qEEG de alta resolución validado por el sistema de Salud cubano. También impulsó el desarrollo de qEEG para fuentes (qEEGt). Debido a la falta de disponibilidad de resonancia magnética en Cuba durante la primera ola CHBM, se basó un "qEEGt aproximado" en el modelo de cabeza promedio desarrollado por el consorcio ICBM. Este conjunto de datos de EEG de la primera onda se ha enviado por separado en Fronteras. Los procedimientos para aplicar qEEG y procesamiento de qEEGt basados en este conjunto de datos se han integrado en CBRAIN<sup>52</sup>.

Al final de la primera ola del CHBMP, se reconoció que qEEGt como en, basado en resonancias magnéticas individuales es importante, no solo para validar qEEG aproximado, sino también como base para estudios de neuroimagen multimodal de la función cerebral normal y patológica. Por lo tanto, la necesidad de una base de datos de neuroimagen multimodal se consideró esencial y se planeó para el momento en que la resonancia magnética estuviera disponible en Cuba. Esta fue la motivación de la segunda ola del CHBMP, entre 2004 y 2008 como uno de los proyectos del Programa Nacional para la Discapacidad llevado a cabo en ese momento por el gobierno cubano. Como en la primera ola del CHBMP, los participantes fueron reclutados de la población general con un muestreo aleatorio estratificado de la población. Esto arrojó 2.019 candidatos, que luego fueron evaluados, inicialmente por las enfermeras y médicos de familia, y luego por extensos estudios clínicos, neurológicos, psicológicos, y evaluaciones de neuroimagen para excluir participantes con trastornos cerebrales,

---

<sup>52</sup> CBRAIN es un software basado en la web que permite a los investigadores de neuroimágenes realizar análisis de datos computacionalmente intensivos conectándolos a instalaciones de computación de alto rendimiento (HPC) en Canadá y en todo el mundo. CBRAIN conecta a los investigadores con las herramientas y el poder de procesamiento necesarios para manejar los grandes conjuntos de datos de neuroimagen que se han convertido en la norma en el campo. Lo hace al mismo tiempo que reduce la experiencia técnica necesaria para utilizar estos recursos. No se requieren conocimientos de programación informática y no es necesario instalar ningún software. Todo lo que se requiere es un navegador web moderno de cualquier tipo. Hay disponible una variedad de herramientas de análisis de neuroimagen, así como visualización en tiempo real 2D y 3D de vanguardia para ver los datos de imágenes cerebrales. CBRAIN es un proyecto de software de código abierto alojado en [GitHub](https://mcin.ca/technology/cbrain/). (Véase, <https://mcin.ca/technology/cbrain/>)

hábitos adictivos o mala salud. Esto resultó en una muestra final de 282 participantes "funcionalmente sanos". El protocolo de registro incluyó EEG de alta resolución, resonancia magnética T1 y T2, DWI y pruebas psicológicas como MMSE, *Wechsler Adult Intelligence Scale* (WAIS III), tiempo de reacción computarizado, así como la recolección de muestras de sangre para un estudio de asociación del genoma completo (GWAS) que se describirá en una publicación adicional por separado.

Cabe señalar que la tercera ola del Proyecto Cerebro Humano Cubano se lanzó en 2019 y será un gran estudio de sujetos de edad avanzada que incluye un seguimiento de 10 años de la muestra de CHBMP de la segunda ola.

#### *4.5 Human Brain Project, "HBP" (European Union, EU)*

El Proyecto Cerebro Humano (HBP, por sus siglas en inglés) es uno de los tres proyectos emblemáticos FET (*Future and Emerging Technology*). Iniciado en 2013, es uno de los proyectos de investigación más grandes del mundo. Más de 500 científicos e ingenieros de más de 140 universidades, hospitales docentes y centros de investigación de toda Europa se unen para abordar uno de los objetivos de investigación más desafiantes: el cerebro humano<sup>53</sup>.

El HBP es un proyecto médico-científico y tecnológico financiado por la Unión Europea y dirigido por *HENRY MAKRAM*, que tiene como fin reproducir tecnológicamente las características del cerebro humano, y de esta forma conseguir avances en el campo de la medicina y la neurociencia. Para que este proyecto pueda desarrollarse es necesaria la investigación en nuevas tecnologías, o tecnologías de supercomputación avanzadas que permitan asociar y utilizar la información integrada en modelos informáticos y simulaciones del cerebro que identifiquen patrones, principios organizativos y posibles carencias que puedan ser subsanadas con nuevos experimentos.

Para domar la complejidad del cerebro, el proyecto ha construido una infraestructura de investigación para ayudar a avanzar en la neurociencia, la medicina, la informática y las tecnologías inspiradas en el cerebro: EBRAINS. El HBP ha desarrollado EBRAINS para crear plataformas de investigación duraderas que beneficien a la comunidad en general. Así, se han desarrollado distintas plataformas:

- Plataforma Neuroinformática: reúne datos y conocimiento de neurocientíficos de todo el mundo, poniéndolos a disposición de la comunidad científica.

---

<sup>53</sup> Véase HUMAN BRAIN PROJECT. (2013). [consulta: 06 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.humanbrainproject.eu/en/>

- Plataforma de Simulación del Cerebro: integra esta información en modelos informáticos unificados, haciendo posible identificar los datos que faltan y permitiendo experimentos in silico, imposibles de realizar en el laboratorio.
- Plataforma de Computación de Alto Rendimiento: suministra la tecnología de supercomputación interactiva que los neurocientíficos necesitan para el modelado y simulación de datos.
- Plataforma de Informática Médica: integra datos clínicos de todo el mundo, aportando a los investigadores nuevas herramientas matemáticas para buscar las firmas biológicas de las enfermedades.
- Plataforma de Computación Neuromórfica: transforma los modelos del cerebro en una nueva clase de dispositivos “hardware” testando sus aplicaciones.
- Plataforma de Neurorobotica: permite a los investigadores en neurociencia y en la industria experimentar con robots virtuales controlados por modelos cerebrales desarrollados en el proyecto.

Los científicos del HBP han realizado estudios experimentales específicos y han desarrollado teorías y modelos para arrojar luz sobre el conectoma humano, abordando los mecanismos que subyacen al procesamiento de la información, desde la molécula hasta la señalización celular y las redes a gran escala.

Los equipos del proyecto transfieren los conocimientos adquiridos para tener un impacto en la salud y la innovación: los conocimientos de la investigación básica se traducen en aplicaciones médicas, para preparar el terreno para nuevos diagnósticos y terapias. Los descubrimientos sobre el aprendizaje y los mecanismos de plasticidad cerebral se utilizan para inspirar el progreso tecnológico, por ejemplo, en inteligencia artificial. Además, el proyecto estudia las implicaciones éticas y sociales del avance de la neurociencia y campos relacionados.

En su fase final (abril de 2020 - marzo de 2023), el enfoque de HBP fue avanzar en tres áreas científicas centrales: redes cerebrales, su papel en la conciencia y redes neuronales artificiales, mientras expande aún más EBRAINS.

Desde su inicio en 2013, el HBP ha aportado avances científicos impresionantes a la neurociencia. Por ejemplo, ha proporcionado el atlas más detallado del cerebro humano hasta la fecha, ha contribuido a medir la conciencia en sí mismo, ha avanzado en el conocimiento de los mecanismos neuronales subyacentes a la visión y la memoria, ha mejorado la cirugía de epilepsia con modelos cerebrales digitales, ha desarrollado un implante cerebral para ayudar a las personas ciegas a ver y ha desarrollado tecnologías neuroderivadas para hacer que las máquinas sean más inteligentes.

El HBP ha sido pionero en el uso de macrodatos y supercomputación para simular funciones complicadas del cerebro, comparándolas con las teorías neurocientíficas más

recientes. Hoy en día, el HBP está construyendo el primer gemelo digital del cerebro humano y ha contribuido significativamente a nuestra comprensión de cómo funciona el cerebro.

Uno de los principales resultados del proyecto de cerebro humano es la capacidad de personalizar y personalizar los modelos cerebrales. El poder predictivo de estos modelos ha ido aumentando gradualmente y puede resultar muy beneficioso para el descubrimiento de biomarcadores tempranos para enfermedades como la enfermedad de Alzheimer.

Sobre la base de los éxitos del proyecto de cerebro humano, la Comisión está trabajando ahora con los Estados miembros en una iniciativa más amplia. En particular, los Estados miembros han pedido más colaboraciones y coordinación para la investigación sobre la salud cerebral a través de una asociación estratégica que sin duda reforzaría la posición de Europa en la escena mundial de la investigación cerebral. *Digital Brain Research* y desempeñará un papel importante en el contexto de dicha asociación.

#### *4.6 Israel Brain Technologies (Israel)*

Concebida en el año 2011 por el difunto presidente *SHIMON PERES*, *Israel Brain Technologies (IBT)* es una iniciativa sin fines de lucro cuya misión es acelerar la comercialización de la innovación relacionada con el cerebro de Israel y establecer a Israel como un centro internacional líder en tecnología cerebral<sup>54</sup>.

IBT sirve como un centro internacional para el ecosistema de tecnología cerebral. IBT opera varios programas emblemáticos, incluida la conferencia internacional *BrainTech* en Tel Aviv, *Brainnovations*, una plataforma de lanzamiento de startups de *braintech*, y *Braingels*, una red internacional de inversores en *braintech*.

#### *4.7 Latin American Brain Mapping Network (LABMAN)*

El 8 de marzo de 2008 en La Habana, Cuba se creó la Red Latinoamericana de Mapeo Cerebral (LABMAN) con participantes de Argentina, Brasil, Colombia, Cuba y México<sup>55</sup>. El enfoque de LABMAN es promover la neuroimagen y la neurociencia de sistemas en la región a través de la implementación de programas de capacitación e intercambio, y aumentar la conciencia pública sobre el potencial latinoamericano para contribuir a la investigación básica y aplicada en el mapeo del cerebro del ser humano.

---

<sup>54</sup> Véase ISRAEL BRAIN TECHNOLOGIES. (2011). [consulta: 6 de febrero 2024]. Disponible en: <https://israelbrain.org/>

<sup>55</sup> Véase ORGANIZATION FOR HUMAN BRAIN MAPPING. (2008). [consulta: 8 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.humanbrainmapping.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=3827>

El objetivo principal de LABMAN es promover la aplicación de cerebro-cartografía en América Latina. La iniciativa LABMAN se basará en el intercambio coordinado de software, datos, personal, formación y proyectos conjuntos.

La primera reunión de LABMAN se inició con una conferencia del *DR. ALAN EVANS*, del Centro de Imágenes Cerebrales (BIC) del Instituto Neurológico de Montreal, sobre el proyecto internacional de mapeo del cerebro humano (HBM), con énfasis en la creación de atlas multimodales para resonancia magnética y la cuantificación de desarrollo cerebral. Luego, cada país latinoamericano participante presentó un informe de estado sobre los esfuerzos de neuroimagen. El taller incluyó una visita a uno de los sitios comunitarios del Proyecto Cubano de Mapeo Cerebral, enfatizando la importancia de traducir los avances en la investigación del mapeo cerebral al entorno clínico.

Los objetivos inmediatos de LABMAN son, por lo tanto:

- Formar especialistas en todas las principales técnicas de imagen;
- Agilizar la transferencia de nuevos conocimientos científicos y técnicos desde el exterior;
- Incrementar la productividad científica de la región;
- Aumentar drásticamente la conciencia de los gobiernos locales, las organizaciones internacionales y el público en general sobre los resultados del mapeo cerebral;
- Organizar proyectos multinacionales en áreas de especial relevancia para la región, ej. nutrición, desarrollo pediátrico, neurodegeneración.

Para coordinar estos esfuerzos, se estableció un consejo provisional con representantes de cada país participante. También se decidió estimular la creación de grupos tipo consorcio para el mapeo cerebral por parte de todos los países latinoamericanos. El Dr. Pedro Valdés-Sosa, vicedirector del Centro de Neurociencias de Cuba, fue elegido como Presidente del LABMAN.

#### *4.8 Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies, "Brain/MINDS" (Japan)*

En 2014, Japón inició un proyecto de mapeo cerebral llamado *Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies (Brain/MINDS)*. *Brain/MINDS* tiene como objetivo mapear la estructura y la función de los circuitos neuronales para comprender en última instancia la gran complejidad del cerebro humano, y aprovecha un modelo animal primate no humano único, el tití común (*Callithrix jacchus*)<sup>56</sup>. En

---

<sup>56</sup> OKANO, H., SASAKI, E., YAMAMORI, T., IRIKI, A., SHIMOGORI, T., YAMAGUCHI, Y., MIYAWAKI, A. (2016). *Brain/MINDS: A Japanese National Brain Project for Marmoset Neuroscience*. *Neuron*, vol.(92), pp.582-590.

*Brain/MINDS*, el *RIKEN Brain Science Institute* actúa como instituto central. Los objetivos de *Brain/MINDS* se pueden categorizar en las siguientes cuatro áreas temáticas principales cada una desarrollada por cuatro grupos de investigadores diferentes:

- A. Estructura y mapeo funcional de un cerebro de primate no humano (el cerebro de tití);
- B. Desarrollo de neurotecnologías innovadoras para el mapeo cerebral;
- C. Mapeo del cerebro humano; e investigación clínica
- D. Tecnologías avanzadas y desarrollo de aplicaciones

Los investigadores de *Brain/MINDS* están muy motivados para identificar los circuitos neuronales responsables del fenotipo de los trastornos neurológicos y psiquiátricos, y para comprender el desarrollo de estos devastadores trastornos a través de la integración de estas áreas temáticas.

Esta estructura está diseñada para que cada grupo sirva como un centro de investigación virtual para la colaboración tanto dentro del proyecto como con socios externos. El Grupo A está construyendo un mapa estructural integrado del cerebro del tití en las escalas macro, meso y microespacial, como una plantilla fundamental para superponer datos de mapeo funcional derivados principalmente de tecnologías de imágenes cerebrales que incluyen fMRI, imágenes PET, imágenes de calcio y en expresión génica in situ. Los objetivos adicionales del Grupo A incluyen el desarrollo de ensayos de comportamiento y sistemas analíticos de titíes y la generación de modelos de enfermedades de titíes modificados genéticamente.

El Grupo B participa en el desarrollo de tecnologías innovadoras para el mapeo cerebral de titíes en los institutos de investigación centrales del proyecto *Brain/MINDS*, incluidas técnicas de limpieza, etiquetado y microscopía de tejidos, y la generación de bases de datos integradas de titíes.

El grupo D compuesto por laboratorios a lo largo Japón, ayudará a ampliar la caja de herramientas de tecnologías afiliadas para el mapeo cerebral y estudios funcionales en conjunto con el grupo B.

El Grupo C utilizará imágenes funcionales humanas para mapear grandes cohortes de cerebros normales y de pacientes. Este grupo, compuesto por tres equipos de investigación clínica para trastornos neuropsiquiátricos, enfermedades cerebrovasculares y enfermedades neurodegenerativas, creará una base de datos multicéntrica de imágenes derivadas de pacientes y otros biomarcadores traducibles para el diagnóstico y tratamiento clínicos y la aplicación inversa a los estudios de enfermedades en titíes en curso.

La investigación sobre el cerebro de los primates no humanos es esencial para comprender el cerebro humano y desarrollar estrategias basadas en el conocimiento para el diagnóstico y tratamiento de trastornos psiquiátricos y neurológicos. Por estas razones, una de las características importantes de Brain/MINDS es dedicar un esfuerzo considerable a mapear el cerebro de un pequeño mono del Nuevo Mundo, el tití común (*Callithrix jacchus*).

La justificación para usar un modelo de tití en lugar de otro modelo animal, incluido otro modelo de primate no humano, para la ciencia del cerebro humano era séptuple:

- i. Como primate, el cerebro del tití comparte algunos aspectos del proceso de desarrollo y la estructura anatómica del cerebro humano;
- ii. El tití tiene comportamientos sociales similares a los humanos, incluyendo particularmente una fuerte relación entre padres e hijos;
- iii. El tití tiene una comunicación vocal social única y es probable que haya una evolución convergente en esta característica;
- iv. Hay modelos de enfermedades neurológicas del tití que son comparativos con enfermedades humanas;
- v. Algunas de las tareas cognitivas superiores en los titíes son equivalentes a las que se encuentran en los macacos;
- vi. El tití se puede manejar con relativa facilidad debido a su pequeño tamaño corporal; y
- vii. El tití tiene una fuerte eficiencia reproductiva.

Además, el tití común tiene las siguientes ventajas para el mapeo cerebral:

- i. Su lóbulo frontal está más desarrollado y es más similar al de los humanos que el de otros animales de uso común, incluidos los roedores, que tienen limitaciones al tratar de comprender el cerebro humano debido a diferencias en la estructura de la neocorteza y circuitos neuronales y paradigmas de comportamiento;
- ii. El cerebro es compacto (aproximadamente 8 g) y es adecuado para el análisis completo de los circuitos neuronales;
- iii. Los titíes son casi lisencefálicos, lo que facilita la resonancia magnética funcional (fMRI), la imagen óptica, la inyección de trazador y los experimentos electrofisiológicos; y
- iv. Los titíes pueden modificarse y manipularse genéticamente

Para contribuir al progreso global en la investigación del cerebro, Brain/MINDS participará activamente en proyectos mundiales de mapeo del cerebro y su coordinación, y está preparado para transferir tecnologías de titíes, líneas GM y datos de investigación a la comunidad de investigación global.

#### **4.9 Korea Brain Initiative (Korea)**

La *Korean Brain Initiative* (KBI) se centra en estudios básicos para descifrar los mecanismos que subyacen a la toma de decisiones, estudios clínicos sobre enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de *Alzheimer* (EA) y la enfermedad de *Parkinson* (EP), y el desarrollo de nuevas neurotecnologías para aplicar a la salud básica y clínica<sup>57</sup>.

KBI está dirigido por tres entidades de investigación, incluido el Instituto de Investigación del Cerebro de Corea (KBRI), el Instituto de Ciencias del Cerebro (BSI) del Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea (KIST) y el grupo de desarrollo de herramientas neurológicas compuesto por muchos científicos individuales de varias universidades.

KBI tiene como objetivo construir mapas del cerebro a múltiples escalas basados en la red estructural y funcional en la corteza prefrontal (PFC) y los ganglios basales. El mapeo a nano y mesoescala y el análisis del transcriptoma de una sola célula se adaptarán a múltiples escalas y se integrarán para crear un conectoma cerebral más detallado y sofisticado. Este proyecto también utiliza el modelo de ratón y se extenderá a los cerebros humanos en la última etapa del proyecto.

Los estudios clínicos de enfermedades neurodegenerativas dentro de la iniciativa tienen como objetivo comprender la progresión de los trastornos neurológicos basados en el mapeo funcional utilizando fMRI y estimulación cerebral profunda. Además del mapeo cerebral, el desarrollo de neuroherramientas para el mapeo cerebral multiescala incluirá innovaciones en la interfaz cerebro-máquina (BMI) y dispositivos neuronales combinados con tecnologías de inteligencia artificial (IA).

La Iniciativa del Cerebro de Corea es un proyecto nacional del cerebro de Corea bajo la Innovación del Cerebro de Corea 2030 y la Ley de Promoción del Cerebro de Corea. Desde que se lanzó la Iniciativa Cerebral de Corea en 2017, se ha organizado el Grupo de Investigación en Neuroética (NRG) multidisciplinario y se están considerando los establecimientos del Comité Nacional de Neuroética y el Centro de Políticas de Investigación en Neuroética. Las principales estrategias y planes de acción se centran en la educación del público en general, la formación de científicos y el fortalecimiento de la cooperación internacional.

#### **4.10 Blue Brain Project (Switzerland)**

El *Proyecto Blue Brain de EPFL* es una iniciativa suiza de investigación del cerebro dirigida por el fundador y director, el profesor *HENRY MARKRAM*. El objetivo de *Blue Brain*

---

<sup>57</sup> SUNG-JIN, J., IN YOUNG, L., BANG, O., YOUNG-JOON, R., JEONG-WOO, S., SUNG-PHIL, K., PANN-GHILL, S. (2019). *Korea Brain Initiative: Emerging Issues and Institutionalization of Neuroethics*. *Neuron*, vol.101(3), pp.390-393.

es obtener una comprensión completa del cerebro y permitir un desarrollo mejor y más rápido de tratamientos para enfermedades cerebrales<sup>58</sup>.

La investigación consiste en estudiar rebanadas de tejido cerebral vivo utilizando microscopios y electrodos de pinza de parche. Se recopilan datos sobre todos los diferentes tipos de neuronas. Estos datos se utilizan para construir modelos biológicamente realistas de neuronas y redes de neuronas en la corteza cerebral. Las simulaciones se llevan a cabo en una supercomputadora Blue Gene construida por IBM. De ahí el nombre de "cerebro azul". El software de simulación se basa en NEURON de Michael Hines, junto con otros componentes hechos a la medida. En agosto de 2012, las simulaciones más grandes son microcircuitos que contienen alrededor de 100 columnas corticales. Tales simulaciones involucran aproximadamente 1 millón de neuronas y 1 billón de sinapsis. Esta es aproximadamente la misma escala que la del cerebro de una abeja.

El *Blue Brain Project* fundado en 2005 plantó las semillas del Human Brain Project (HBP), que tuvo el apoyo definitivo en 2013, cuando la Comisión Europea consideró al HBP y la investigación del grafeno como proyectos emblemáticos ganadores de su primer concurso de Tecnologías Futuras y Emergentes (FET). Así el HBP se garantizó una financiación millonaria durante una década que ha estado impregnada de hitos científicos.

#### *4.11 Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, "BRAIN Initiative" (United States)*

La llamada Iniciativa BRAIN, también referida como *Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies* o *Brain Activity Map Project* (en español: *Investigación del cerebro a través del avance de las neurotecnologías innovativas* o *Proyecto de mapeo de la actividad cerebral*), es una iniciativa de investigación colaborativa ideada por el neurobiólogo Español Rafael Yuste y anunciada por la administración Obama el 2 de abril de 2013, con el objetivo de trazar un mapa de la actividad de cada neurona en el cerebro humano y desarrollar tecnologías innovadoras para interrogar cómo interactúan las células y los circuitos del cerebro a la velocidad del pensamiento y, en última instancia, revelar los vínculos complejos. entre la función cerebral y el comportamiento<sup>59</sup>.

Basado en el éxito del Proyecto de Genoma Humano (*HGP* por su sigla en inglés), la iniciativa planea asignar más de 300 millones de dólares por año durante diez años.

---

<sup>58</sup> LOSHIMA, L. (2015). *Blue Brain – The Future Generation. International Journal Of Engineering Research & Technology (Ijert)*, vol.3(30), pp.1-5.

<sup>59</sup> RAMOS, K. M., GRADY, C., GREELY, H., CHIONG, W., EBERWINE, J., FARAHANY, N., KOROSHETZ, W. (2019). *The NIH BRAIN Initiative: Integrating Neuroethics and Neuroscience. Neuron*, vol.101(3), pp.394-398.

La Iniciativa BRAIN señala un cambio de paradigma para la neurociencia, ya que requiere que la comunidad científica trabaje en conjunto hacia una comprensión de la red neuronal del cerebro.

Para ayudar a guiar el esfuerzo de la Iniciativa BRAIN, los Institutos Nacionales de Salud (NIH) primero establecieron un grupo de trabajo de alto nivel del Comité Asesor del Director (ACD) para desarrollar una hoja de ruta. Su informe, *BRAIN 2025: A Scientific Vision*, proporcionó un marco para un conjunto de oportunidades de financiación audaces descritas en un plan científico reflexivo de varios años para la Iniciativa NIH BRAIN.

El plan enfatiza acelerar el desarrollo de tecnología para la neurociencia y aplicar estas nuevas herramientas y tecnologías para comprender cómo los patrones dinámicos de actividad en los circuitos neuronales se transforman en percepción, emoción, cognición y comportamiento en la salud y la enfermedad. Al ingresar al quinto año de la Iniciativa, NIH ha invertido más de \$950 millones para financiar más de 550 proyectos en instituciones y centros de investigación en todo el país hasta el año fiscal 2018. Esta cantidad representa aproximadamente el 20 % del presupuesto de la Iniciativa proyectado hasta 2026.

Si bien los enfoques anteriores en neurociencia a menudo se han centrado en el funcionamiento de tipos de células específicas o regiones cerebrales de forma aislada, *BRAIN 2025* tiene como objetivo fomentar la innovación mediante la investigación de las interrelaciones dinámicas de estos componentes variados dentro de los circuitos. *BRAIN 2025* se enfoca en los circuitos neuronales no solo por su papel crítico en la función cerebral, sino también porque la disfunción del circuito es la base de los síntomas y la discapacidad en muchos trastornos neurológicos, mentales y por uso de sustancias. En muchos de estos trastornos (incluidos el uso de sustancias y el dolor crónico), no hay una patología o lesión cerebral evidente que pueda explicar la grave discapacidad que experimentan las personas afectadas. Es probable que el progreso en el tratamiento de estas afecciones requiera una comprensión más completa de la función de los circuitos cerebrales. Incluso en el caso de condiciones como el accidente cerebrovascular, donde se conocen patologías discretas, el tratamiento está limitado por nuestra capacidad para monitorear y modular con precisión la función del circuito cerebral.

Además, desde sus inicios, los NIH han estado trabajando activamente para integrar las consideraciones éticas en la investigación de la Iniciativa BRAIN. *BRAIN 2025* describió los objetivos de la neuroética, incluida la provisión de recursos para recopilar y difundir las mejores prácticas para la realización de investigaciones científicas éticas, en particular para la realización de investigaciones clínicas.

El campo de la neurotecnología se encuentra en una etapa incipiente y sus impactos son aún más prospectivos que reales. Pero en general, las nuevas tecnologías tienen el potencial de, entre otras cosas, promover una mejor comprensión de los procesos naturales del cerebro humano; estudiar, prevenir y tratar trastornos y lesiones neurológicas para avanzar en la terapia psicológica basada en la evidencia y para restaurar y mejorar (aumentar) las capacidades cognitivas<sup>60</sup>.

## **5. Las interfaces cerebro – computadora: el elemento común de las principales iniciativas de investigación cerebral**

### *5.1 Consideraciones previas*

En la historia del BCI los primeros registros electroencefalográficos fueron realizados en monos y conejos por *RICHARD CATON* en 1875. Sin embargo, fue en 1920 cuando el psiquiatra australiano Hans Berger empezó a estudiar el electroencefalograma humano demostrando por primera vez, en 1929, que la actividad eléctrica del cerebro estaba relacionada con el estado de actividad del individuo. Sus primeros estudios concluyeron que cuando una persona se encontraba en estado relajado, las señales eléctricas predominantes consistían en una onda cíclica de unos 10 Hz y con una amplitud de unos 50 microvoltios, a la cual llamó onda *Alfa*. Por otro lado, cuando esa persona estaba realizando algún tipo de actividad cognitiva o “mental”, mostraba una onda de mayor frecuencia y menor amplitud que la Alfa, la cual denominó onda *Beta*. Estos descubrimientos marcarían el origen del principio básico de los BCI. Las interfaces cerebro-computadora se basan en el análisis de las señales procedentes de la actividad eléctrica del cerebro, especialmente de las señales electroencefalografías (señales EEG), las cuales pueden ser modificadas de forma intencionada por el usuario.

Los primeros intentos originales para proporcionar a los usuarios *feedback* derivados de sus propias señales EEG se hicieron en la década de los 60 y 70. Principalmente, fueron intentos destinados a permitir que los participantes humanos lograsen el control voluntario sobre los ritmos cerebrales. En *NOWLIS Y KAMIYA*<sup>61</sup>, los autores afirmaban que después del entrenamiento de *biofeedback*, los usuarios humanos habían adquirido una capacidad para detectar sus propios ritmos alfa, y esta afirmación fue posteriormente corroborada por *PLOTKIN*<sup>62</sup>. *STERMAN*, llegó a conclusiones

---

<sup>60</sup> OECD. (2017). *Neurotechnology and Society Strengthening Responsible Innovation in Brain Science*. OECD Science, Technology and Innovation Policy Papers (46), pp.1-65.

<sup>61</sup> NOWLIS, D.P. & KAMIYA, J. (1970). *The control of electroencephalographic alpha rhythms through auditory feedback and the associated mental activity*. *Psychophysiology*, vol.6(4), pp.476–484

<sup>62</sup> PLOTKIN, W.B. (1976). *On the self-regulation of the occipital alpha rhythm: control strategies, states of consciousness, and the role of physiological feedback*. *Journal of Experimental Psychology. General*, vol.105(1), pp.66–99

similares analizando los ritmos sensoriomotores en los gatos<sup>63</sup> y posteriormente en humanos<sup>64</sup>.

Las tecnologías de los sistemas BCI constituyen un área de investigación relativamente joven. No fue hasta la década de los 70 cuando comenzaron a surgir diferentes programas de investigación en torno a sistemas BCI, motivados entre otras razones por la observación científica de la correlación entre las señales EEG y los movimientos reales (e incluso imaginados) de los usuarios, así como determinadas actividades cognitivas de éstos. El término *Brain Computer Interface* (BCI) ha sido introducido por primera vez en 1973 por Jaques Vidal en su artículo "*Toward direct brain-computer communication*" en que concluye que es posible la comunicación humana a través de la señal EEG.<sup>65</sup> Desde entonces esa tecnología empieza a desarrollarse conforme avanza también la tecnología informática y electrónica.

En 1988, FARWELL Y DONCHIN demostraron cómo el potencial relacionado con eventos del P300 podría usarse para permitir a voluntarios normales deletrear palabras en una pantalla de computadora<sup>66</sup>.

Ya a finales de 1990, los científicos demostraron el control neurológico de los movimientos de un dispositivo simple en ratas, y poco después, de un brazo robótico en monos<sup>67</sup>.

---

<sup>63</sup> STERMAN, M.B. *et al.* (1974). *Biofeedback training of the sensorimotor electroencephalogram rhythm in man: effects on epilepsy*. *Epilepsia*, vol.15(3), pp.395–416.

<sup>64</sup> WYRICKA, W. & STERMAN, M. (1968). *Instrumental conditioning of sensorimotor cortex EEG spindles in the waking cat*. *Physiology & Behavior*, vol.3(5), pp.703–707

<sup>65</sup> VIDAL J. J. (1973). *Toward direct brain-computer communication*. *Annual Review of Biophysic*, vol.2, pp. 157–80

<sup>66</sup> FARWELL, L. A. & DONCHIN E. (1988). *Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials*. *Electroencefalograma Clin Neurofisiol*, vol.70(6), pp.510–523.

<sup>67</sup> LEBEDEV, M. A. & NICOLELIS, M. A. (2006). *Brain-machine interfaces: past, present and future*. *Trends in Neuroscience*, vol.29(9), pp.536–546.

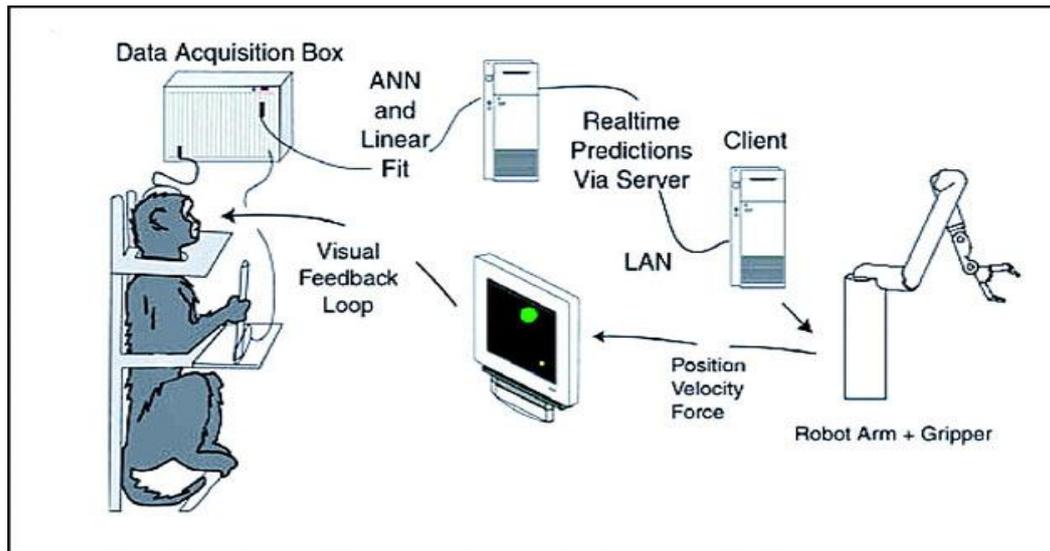


Imagen 17. Registro de la señal EEG del mono

En la imagen 17 se observa el protocolo experimental del estudio realizado por J.M CARMENA<sup>68</sup>. En este experimento tomaba el registro de la señal EEG del mono, mientras éste manejaba un mando que movía un cursor en la pantalla, en cada movimiento correcto el mono recibía un refuerzo positivo (comida). Posteriormente realizaba esta misma tarea con el mando, pero manejando un brazo robótico para coger el alimento. Pasados numerosos ensayos se quitó la conexión del mando y las órdenes al cursor eran pasadas solamente a través de la señal EEG del mono al brazo robótico. La activación neuronal de mover el brazo para llevar el cursor por la pantalla y mover el brazo robótico era ya entonces suficiente para manejarlo.

En 2006, se implantó una matriz de microelectrodos en la corteza motora primaria de un hombre joven con tetraplejía completa después de una lesión cervical C3-C4. Usando las señales obtenidas de este conjunto de electrodos, un sistema BCI permitió al paciente abrir un correo electrónico simulado, operar un televisor, abrir y cerrar una prótesis de mano y realizar acciones rudimentarias con un brazo robótico<sup>69</sup>.

En 2011, KRUSIENSKI Y SHIH demostraron que las señales registradas directamente desde la superficie cortical (electrocorticografía [ECoG]) pueden ser traducidas por un BCI para permitir que una persona escriba palabras con precisión en la pantalla de una computadora<sup>70</sup>.

<sup>68</sup> CARMENA, J.M., LEBEDEV, M.A., CRIST, R.E., O'DOHERTY, J.E., SANTUCCI, D.M., DIMITROV, D.F., PATIL, P.G., HENRIQUEZ, C.S., NICOLELIS, M.A.L. (2003) *Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates. PLoS Biology*, vol.1(2), pp. 193-208.

<sup>69</sup> HOCHBERG, L. R., SERRUYA, M.D., & FRIEHS, G.M. (2006). *Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. Nature*, vol.442(7099) pp.164–171.

<sup>70</sup> KRUSIENSKI, D.J., & SHIH, J.J. (2011). *Control of a Visual Keyboard Using an Electrocorticographic Brain-Computer Interface. Neurorehabil Neural Repair*, vol.25(4), pp.323–331.

Traducir potenciales bioeléctricos del cerebro y generar comandos para un ordenador son los principios básicos de una interfaz cerebro computadora (BCI). Las señales EEG en el sistema BCI pueden ser obtenidas a través de la realización de distintas tareas cognitivas, bien imaginando actividades, movimientos o situaciones determinadas<sup>71</sup>. En suma, los sistemas BCI son sistemas que posibilitan la interacción directa entre el cerebro y un ordenador, sin que haya respuestas motoras que realicen esa acción. Estos sistemas BCI proporcionan al usuario un alfabeto de comunicación mínima, esencialmente como la activación/desactivación de un conjunto de neuronas. El usuario, al recibir el estímulo modula una o más tareas cognitivas según las instrucciones que se le hayan dado, interactuando con el ordenador solo con su actividad cerebral<sup>72</sup>.

### *5.2 Concepto de BCI*

Como seres vivos, las personas deben ser capaces de responder a los estímulos del ambiente para poder subsistir. En la vida diaria, esta respuesta se logra a través de dos vías esenciales: modificando el entorno en forma directa a través de los mecanismos musculares, o manifestando su pensamiento (comunicación), ya sea expresando sus sentimientos, deseos y/o ideas. No obstante, en algunos casos las funciones motrices se ven comprometidas debido a enfermedades como las lesiones medulares, infarto cerebral, esclerosis lateral amiotrófica, esclerosis múltiple, distrofia muscular, tumores o accidentes; por lo que sufren daños parciales o totales en subsistemas del cuerpo, lo que provoca pérdida de la capacidad de respuesta natural (parcial o total) al entorno. Este tipo de discapacidad dio lugar al desarrollo de las tecnologías de Interfaz cerebro computadora<sup>73</sup>.

La Interfaz Cerebro Computadora es una interfaz asistida por computador que permite la interacción directa entre el cerebro y el entorno de un sujeto, a través de actuadores enlazados al computador. Este tipo de interfaz surge de la necesidad de establecer un nuevo canal de comunicación entre un sujeto y su entorno; que no dependa de sus vías nerviosas o musculares.

La manera de establecer dicho canal de comunicación entre el cerebro humano y la computadora, es haciendo uso de las ondas electroencefalográficas que el cerebro emite como resultado de la actividad sináptica cerebral.

---

<sup>71</sup> NEUPER, C., SCHERER, R., WRIESSNEGGER, S., & PFURTSCHELLER, G. (2009). *Motor imagery and action observation: Modulation of sensorimotor brain rhythms during mental control of a brain-computer interface. Clinical Neurophysiology*, vol.120(2), pp.239-247.

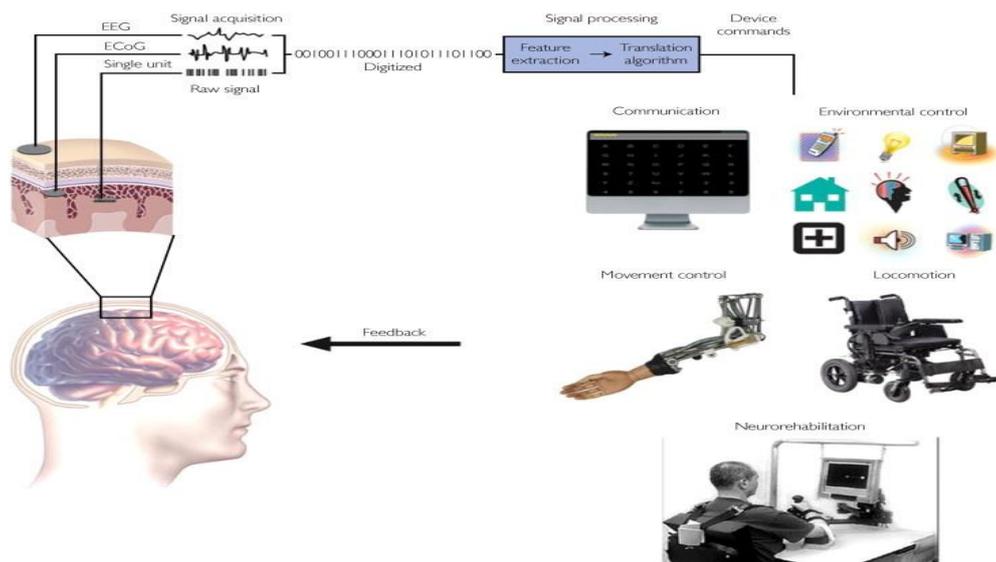
<sup>72</sup> BIRBAUMER, N. (2006). *Breaking the silence: brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control. Psychophysiology*, vol.46(6), pp.517- 532.

<sup>73</sup> MORENO, I., SERRACÍN, J., SERRACÍN, S., & QUINTERO, J. (2019). Los sistemas de interfaz cerebro-computadora basado en EEG: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico*, vol.15(2), p.13.

Por lo tanto, las BCI no utilizan las vías de salida normales del cerebro de los nervios y músculos periféricos. Esta definición limita estrictamente el término *BCI* a sistemas que miden y utilizan señales producidas por el sistema nervioso central (SNC). Así, por ejemplo, un sistema de comunicación activado por voz o activado por músculos no es una BCI. Además, una máquina de electroencefalograma (EEG) por sí sola no es una BCI porque solo registra señales cerebrales pero no genera una salida que actúe en el entorno del usuario.

### 5.3 Componentes de un sistema BCI

El propósito de una BCI es detectar y cuantificar las características de las señales cerebrales que indican las intenciones del usuario y traducir estas características en tiempo real en comandos del dispositivo que logran la intención del usuario (figura 8). Para lograr esto, un sistema BCI consta de los siguientes componentes secuenciales<sup>74</sup>: (a) Electrodo o sensor, (b) sistema de adquisición de señales, (c) software de captura de señales, (d) dispositivo o actuador y (e) usuario. Estos componentes están controlados por un protocolo operativo que define el inicio y el momento de la operación, los detalles del procesamiento de la señal, la naturaleza de los comandos del dispositivo y la supervisión del rendimiento. Un protocolo operativo efectivo permite que un sistema BCI sea flexible y atienda las necesidades específicas de cada usuario.



*Imagen 18. Componentes de un sistema BCI*

*Las señales eléctricas de la actividad cerebral se detectan registrando electrodos ubicados en el cuero cabelludo, en la superficie cortical o dentro del cerebro. Las señales cerebrales se amplifican y digitalizan. Las características de las señales pertinentes se extraen y luego se traducen en comandos que controlan un dispositivo de salida, como un programa de ortografía, una silla de ruedas motorizada o una prótesis. La retroalimentación del dispositivo permite al usuario modificar las señales cerebrales para mantener un rendimiento efectivo del dispositivo.*

*Fuente: IEEE Rev Biomed Eng*

<sup>74</sup> WOLPAW, J.R., BIRBAUMER N., MCFARLAND D.J, PFURTSCHELLER G., & VAUGHAN T.M. (2002). *Brain-computer interfaces for communication and control. Clin Neurophysiol*, vol.113 (6), pp.767–791.

### a) Los electrodos o sensores

Los electrodos que se usan para la extracción de ondas EEG no son muy diferentes a otros tipos de electrodos que se usan para señales biomédicas (ECG por ejemplo), no obstante, la diferencia está en la forma de colocarlos. Para esto, se ha desarrollado un sistema internacional denominado 10-20 System. Este sistema está basado en la relación que existe entre la posición de un electrodo y el área situada por debajo de la corteza cerebral. El nombre, 10-20 se refiere al hecho de que actualmente las distancias entre los electrodos adyacentes son 10% o 20% del total de la distancia entre la parte frontal y la parte trasera del cráneo, o bien, la distancia entre el lado derecho e izquierdo del mismo. En este sistema, cada electrodo tiene una letra que identifica el lóbulo y un número para identificar la posición en el hemisferio. Las letras F, T, C, P y O se refieren a su posición sobre el cráneo, que son: Frontal, Temporal, Central, Parietal y Occipital. Médicamente hablando, no existe el lóbulo central (C), sin embargo, esta colocado solo como referencia. Los electrodos marcados con z se refieren a que están colocados en el centro de ambos hemisferios y los números pares se refieren al hemisferio derecho y los impares al hemisferio izquierdo. A1 y A2 son puntos de referencia que normalmente se colocan en las orejas.

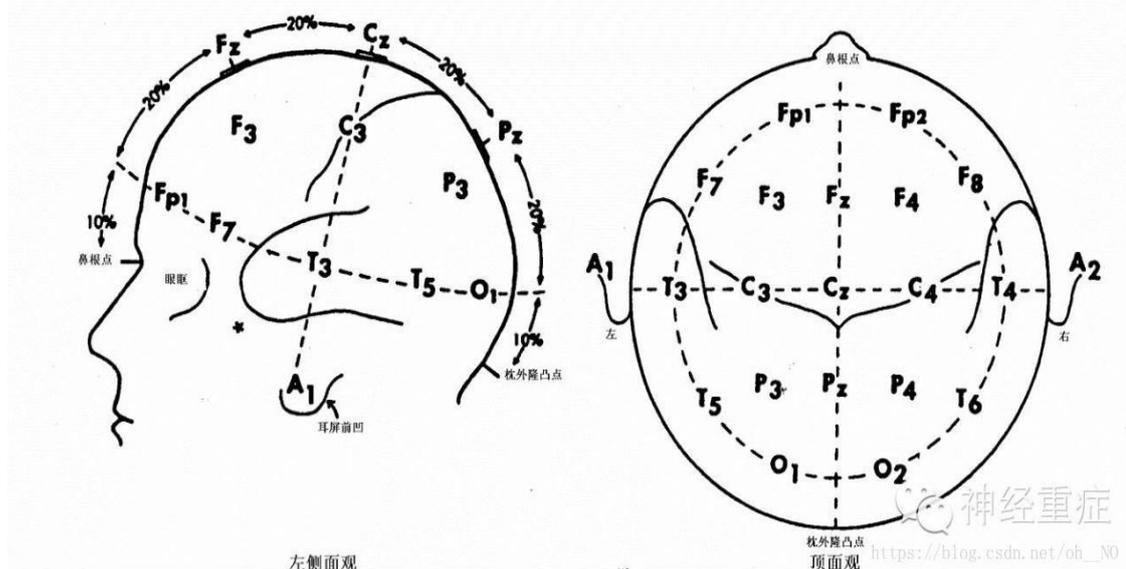


Imagen 19. Posiciones estándares de los electrodos, Sistema Internacional 10-20

Acotaciones de las etiquetas de los canales: fp- pre-frontal, ffrontal, p- parietal, c- central, o- occipital, t- temporal, z- línea media, a-auricular; los números impares están sobre el lado izquierdo y, los números pares están sobre el lado derecho del individuo.

Fuente: [www.sanitas.es](http://www.sanitas.es)

Es por esta razón que existen en el mercado gorras con electrodos ya posicionados que facilitan la colocación de los mismos y así mejorar la calidad de la obtención de las señales.

Otro punto necesario a mencionar es el uso de un gel reductor de impedancia para así mejorar la calidad de las señales y asegurar el contacto entre el cuero cabelludo y el electrodo. De esta forma, las personas a las que se les coloca los electrodos no necesitan de ningún tipo de preparación más que colocar el gel entre el electrodo y su cuero cabelludo.

*b) Sistema de adquisición de señales EEG*

La adquisición de señales es la medición de señales cerebrales utilizando una modalidad de sensor particular (p. ej., electrodos en el cuero cabelludo o intracraneales para actividad electrofisiológica, fMRI para actividad metabólica). Las señales se amplifican a niveles adecuados para el procesamiento electrónico (y también se pueden filtrar para eliminar el ruido eléctrico u otras características de señal no deseadas, como la interferencia de la línea de alimentación de 60 Hz). Luego, las señales se digitalizan y se transmiten a una computadora.

Las ondas electroencefalográficas, son el resultado de la actividad de millones de neuronas en un solo instante. Para entender de manera más clara el proceso de adquisición de las señales EEG es necesario entender cómo se originan las mismas:

i. Origen fisiológico de las señales

Al momento de estudiar la actividad cerebral de los usuarios hay que tener en consideración que existen dos tipos principales de señales que pueden ser monitorizadas:

- Señales electrofisiológicas: Esta acción es creada por transmisores electroquímicos que tratan la información entre neuronas. Las neuronas generan corrientes iónicas que se propagan a través de uniones neuronales. Algunas de estas señales se forjan de forma continua en el cerebro sin relación aparente con estímulos exteriores a la persona. Sin embargo, hay otras señales que surgen a partir de alguna estimulación exterior, fenómeno que es comúnmente utilizado para la realización de interfaces hombre-máquina. Este tipo de actividad puede ser medida mediante electroencefalografía, electrocorticografía, magnetoencefalografía.
- Señales hemodinámicas: Cuando se origina una activación mental, el metabolismo neurológico ha de ser apoyado por una respuesta vascular local que lleve consigo sangre rica en oxígeno a la zona activa. Las zonas inactivas, por otro lado, no contarán con esta respuesta vascular y no contarán con tal cantidad de sangre rica en oxígeno. Estas respuestas hemodinámicas pueden ser cuantificadas mediante resonancias magnéticas y espectroscopia del

infrarrojo cercano y permiten identificar zonas activas de zonas inactivas, pudiendo utilizar esta información para el desarrollo de interfaces.

ii. Señales endógenas o exógenas

De la característica a tomar en cuenta sobre los fenómenos neurológicos de interés para crear interfaces cerebro-máquina es el origen de las señales deseadas y producto de una estimulación externa o bien de una actividad inherente al propio individuo. Esto deriva en dos aproximaciones a la hora de diseñar un BCI:

- Señales evocadas o exógenas: Las señales exógenas o evocadas son aquellas que se genera mediante una estimulación exterior. Estas señales son comúnmente utilizadas a la hora de realizar interfaces cerebro-máquina que depende de estímulos visuales exteriores. La estimulación exterior no tiene por qué ser solo visual, también puede implicar alguna otra actividad sensorial como la auditiva.
- Señales no evocadas o endógenas: Las señales evocadas o endógenas en oposición a las señales exógenas, son aquellas que se forman en el interior del cerebro sin necesidad de estimulación externa. Dependen de la destreza del usuario para controlar su actividad electrofisiológica.

iii. Señales comúnmente utilizadas

Algunas de las señales y fenómenos psicológicos más utilizados para la creación de interfaces son los siguientes:

- Potenciales visuales evocados: También conocidos como VEPs (Visual Evoked Potentials), son potenciales que ocurren en la corteza visual, en la parte occipital del cráneo<sup>75</sup>. Este tipo de variaciones son fáciles de detectar ya que la amplitud de las mismas depende de lo centrado que esté el estímulo dentro del campo visual. Se suelen utilizar estímulos visuales procedentes de puntos de luz LED o pantallas, tratándose por tanto de potenciales de tipo exógeno, y pueden llegar a ofrecer unas tasas de información relativamente elevadas con muy buena fiabilidad. Este tipo de señales son generadas en base a diferentes criterios:

---

<sup>75</sup> HERRMANN, C.S. (2001). "Human EEG Responses to 1-100 Hz Flicker: Resonance Phenomena in Visual Cortex and Their Potential Correlation to Cognitive Phenomena." *Experimental Brain Research*, vol. 137 (3-4), pp. 346-53.

- **Morfología del estímulo visual:** Según este criterio, los potenciales visuales evocados pueden ser debidos a imágenes parpadeantes o patrones de imágenes de diversa naturaleza.
  - **Frecuencia del estímulo visual:** En función de la frecuencia los potenciales evocados pueden clasificarse como transitorios (TVEPs – Transient VEPs) o como de estado continuo (SSVEPs – Steady State VEPs). Si el estímulo visual tiene una frecuencia por debajo de los 6Hz, el potencial evocado se considera TVEP, mientras que para una frecuencia más elevada se consideran como SSVEPs.
  - **Área del estímulo:** En función de si el estímulo visual ocupa parcial o totalmente la pantalla y el campo visual del individuo se pueden distinguir estímulos de campo completo, medio campo y campo parcial.
- 
- **Potenciales corticales lentos:** Los potenciales corticales lentos (SCPs – Slow Cortical Potentials) corresponden a cambios lentos de tensión en la actividad encefalográfica de origen endógeno que pueden durar uno o varios segundos, teniendo por tanto una frecuencia de variación por debajo de 1Hz<sup>76</sup>. Están asociadas con cambios en los niveles de actividad cortical. Un nivel negativo de SCPs correspondería a un incremento de la actividad neuronal en esa zona y están típicamente relacionados con el movimiento y otras funciones, mientras que un valor positivo coincide con un decrecimiento de la actividad. Este tipo de señales tienen una gran dependencia respecto del estado emocional del usuario, además de otros factores como el sueño, dolor. Se ha demostrado que las personas pueden aprender a controlar estos potenciales<sup>77</sup> llegando a obtener sistemas fiables en un 70% u 80%. Las interfaces que hacen uso de ellos, no obstante, precisan de un gran entrenamiento y la tasa de información que pueden entregar es baja debido a su frecuencia de variación.
  - **Potenciales P300:** Se trata de picos positivos en el análisis electroencefalográfico debido a la percepción por parte del usuario de eventos infrecuentes ya sean estos de tipo auditivo, visual o somatosensorial, tratándose por tanto de potenciales evocados y señales de tipo exógenas. Este tipo de potenciales suelen presentarse en torno a 300 milisegundos después de recibir el estímulo, derivando de ahí su nombre<sup>78</sup>. Sin embargo,

---

<sup>76</sup> MCFARLAND, D.J, & WOLPAW, J.R. (2011). “Brain-Computer Interfaces for Communication and Control.” *Communications of the ACM*. doi:10.1145/1941487.1941506.

<sup>77</sup> HORNERO, R., CORRALEJO, R., & ÁLVAREZ, D. (2012). “Brain-Computer Interface (bCI) Aplicado Al Entrenamiento Cognitivo Y Control Domótico Para Prevenir Los Efectos Del Envejecimiento.” *Lychnos*, pp.29-34.

<sup>78</sup> ELSHOUT, J.A. (2009). “Review of Brain-Computer Interfaces Based on the P300 Evoked Potential”.

la correcta interpretación de estas señales no es trivial; la atención por parte del usuario, la probabilidad del suceso, el tiempo entre estímulos, la dificultad de la tarea, la habituación del usuario al estímulo, son factores que juegan en contra de una correcta interpretación<sup>79</sup>. Debido a la latencia de estos potenciales, las tasas de transferencia de datos que se pueden alcanzar oscilan entre los 10 y los 25 bits por minuto.

- Ritmos sensoriomotores o imágenes motoras: El hecho de realizar determinadas tareas mentales, como la realización de cálculos aritméticos, imaginar la rotación de un cubo o pensar en la ejecución de determinadas tareas motoras, como el movimiento de extremidades, produce cambios en la amplitud de los ritmos sensoriomotores. Estas oscilaciones en la actividad cerebral están localizadas en la banda  $\mu$  (7-13Hz) y la banda  $\beta$  (13-30Hz). Los ritmos sensoriomotores comprenden, además, dos tipos de variaciones en amplitud, las de tipo ERD (Event-Related Desynchronization) y las ERS (Event-Related Synchronization). Las variaciones de tipo ERD implican una atenuación de la amplitud de los ritmos, mientras que las variaciones de tipo ERS implican un aumento de la amplitud de los mismos. El hecho de que se pueda o no producir movimiento articular al pensar en el movimiento de alguna extremidad no afecta a la amplitud observada en estos ritmos. Esto implica que los ritmos sensoriomotores están relacionados con la imaginación y la intención de realizar un movimiento, independientemente del movimiento en sí mismo. Sin embargo, esto añade una serie de dificultades a la hora de utilizar estas señales dado que muchas personas tienen grandes dificultades con la imaginación e intencionalidad de realizar movimientos, siendo por tanto necesario un buen entrenamiento.

En principio, cualquier tipo de señal cerebral podría usarse para controlar un sistema BCI. Las señales más comúnmente estudiadas son las señales eléctricas producidas principalmente por los cambios de polaridad de la membrana postsináptica neuronal que ocurren debido a la activación de canales dependientes de voltaje o ionizados. El EEG del cuero cabelludo, descrito por primera vez por Hans Berger en 1929, es en gran medida una medida de estas señales<sup>80</sup>. La mayor parte del trabajo inicial de BCI utilizó señales de EEG registradas en el cuero cabelludo, que tienen la ventaja de ser fáciles, seguras y económicas de adquirir. La principal desventaja de los registros del cuero cabelludo es que las señales eléctricas se atenúan significativamente en el proceso

---

<sup>79</sup> GUGER, C., DABAN, S., SELLERS, E., HOLZNER, C., KRAUSZ, G., CARABALONA, R., GRAMATICA, F., & EDLINGER, G. (2009). "How Many People Are Able to Control a P300-Based Brain-Computer Interface (BCI)?" *Neuroscience Letters*, vol.462(1), pp.94-98.

<sup>80</sup> BERGER, H. (1929). *Über das electrenkephalogramm des menchen*. *Arch Psychiatr Nervenkr*, vol.87, pp.527-570.

de pasar a través de la duramadre, el cráneo y el cuero cabelludo<sup>81</sup>. Por lo tanto, se puede perder información importante. El problema no es simplemente teórico: los epileptólogos saben desde hace tiempo que algunas convulsiones que son claramente identificables durante los registros intracraneales no se ven en el EEG del cuero cabelludo. Dada esta posible limitación, el trabajo reciente de BCI también ha explorado formas de registro intracraneal.

Se pueden incrustar en la corteza pequeños microarrays intracorticales. Estos sistemas de micromatrices intracorticales pueden registrar los potenciales de acción de neuronas individuales y los potenciales de campo locales (esencialmente un micro-EEG) producidos por una población relativamente limitada de neuronas y sinapsis cercanas. Las desventajas de tales implantes son el grado de invasividad, con la necesidad de craneotomía e implantación neuroquirúrgica, el área restringida de registro y la cuestión aún sin respuesta de la estabilidad funcional a largo plazo de los electrodos de registro. Además del EEG del cuero cabelludo y las BCI intracorticales, las BCI basadas en electrocorticografía (ECoG) utilizan otro enfoque para registrar las señales cerebrales. Estos BCI usan señales adquiridas por electrodos de rejilla o tira en la superficie cortical, o macroelectrodos de profundidad estereotáctica que registran intraparenquimatosamente<sup>82</sup> o desde dentro de los ventrículos<sup>83</sup>. Estos arreglos de electrodos tienen la ventaja de registrar intracranealmente y pueden registrar desde áreas más grandes del cerebro que los microarrays intracorticales. Sin embargo, estos electrodos también necesitan implantación neuroquirúrgica, y la cuestión de la estabilidad del registro de la señal del electrodo a largo plazo aún no ha sido respondida. Cada uno de estos métodos tiene sus propias fortalezas y debilidades. Queda por ver cuáles son mejores para qué propósitos y qué poblaciones de usuarios. A medida que las BCI entran en uso clínico, es probable que la elección del método de registro dependa en gran medida de las necesidades del usuario individual de BCI y del soporte tecnológico y los recursos disponibles.

#### iv. Tipos de dispositivos según el método de obtención de la señal

Las BCI pueden clasificarse en 3 grandes categorías: dispositivos invasivos, dispositivos parcialmente invasivos, y dispositivos no invasivos.

- Dispositivos invasivos: La medición se realiza directamente desde el cerebro del usuario, con lo que es necesario realizar una intervención quirúrgica. El

---

<sup>81</sup> AKHTARI, M., BRYANT, H.C., & MAMELAK, A.N. (2000). *Conductividades del cráneo humano de tres capas. Cerebro Topogr*, vol.13 (1), pp.29–42.

<sup>82</sup> KRUSIENSKI, D.J., & SHIH, J.J. (2011), *Op. Cit.* pp.323-331.

<sup>83</sup> SHIH, J.J., & KRUSIENSKI, D.J. (2012). *Signals from Intraventricular Depth Electrodes Can Control a Brain-Computer Interface. J Neurosci Methods*, vol.203(2), pp.311–314

sensor puede penetrar la corteza cerebral de forma que mide la actividad eléctrica de neuronas individuales, o bien, puede colocarse en la superficie del córtex para medir la actividad eléctrica de grupos de neuronas, a este procedimiento quirúrgico se le denomina craneotomía que consiste en la apertura del cráneo. Existen métodos todavía más invasivos, como puede ser el caso de las grabaciones intraparenquimales o intracorticales. En estos casos se pueden llegar a colocar numerosos electrodos incluso dentro de la materia gris del cerebro. La calidad de las señales será por tanto altísima con una gran resolución espacial. Mediante los métodos invasivos se obtiene unas comunicaciones más rápidas y precisas a la hora de desarrollar un BCI pero sobrelleva un riesgo alto para la salud del usuario, dado que requiere cirugía intracraneal. Esto además se traduce en que la experimentación de esta alternativa de toma de datos no ha podido ser probada extensamente en humanos.

Un ejemplo de este tipo de dispositivo lo encontramos en *Telepathy* de *NEURALINK* de *ELON MUSK*. Un chip que inserta una serie de electrodos en el cerebro para crear 1024 caminos de ida y vuelta entre el chip que puede transmitir los datos de manera inalámbrica a un computador desde el cerebro.

El día lunes 29 de enero de 2024, *ELON MUSK*, a través de una publicación en la red social X, confirmó que se insertó exitosamente el primer implante cerebral de *Neuralink* en seres humanos. Sin dar más detalles del paciente receptor, *MUSK* aseguró que se estaba "recuperando bien" y que los resultados iniciales mostraban una detección de picos neuronales "prometedora".

Este hito se da luego de que el 25 de mayo de 2023, *NEURALINK* confirmó que la FDA de Estados Unidos le otorgó los permisos para poder realizar pruebas con seres humanos.

El dispositivo está diseñado específicamente para personas que sufren de cuadriplejía y tiene como fin permitirles controlar dispositivos digitales únicamente a través del pensamiento, sin necesidad de interacción física.



*Imagen 20. Chip Telepathy  
Fuente: <https://neuralink.com/>*

Ahora bien, debemos aclarar que los chips de BCI existen hace más de una década, en 2008 la Universidad de Pittsburg logró que dos monos controlaran y manipularan un brazo biónico y se alimentasen, usando tan solo la energía de su pensamiento, se les insertaron unos microelectrodos en la corteza motora de su cerebro, que es donde se genera el movimiento voluntario.

Estos receptores, situados en las vías neuronales del córtex, se encargaron de enviar la información sobre las conexiones neuronales a un programa informático diseñado para traducirlas. En última instancia, este 'software' fue el responsable de transmitir las señales necesarias para mover la prótesis.

Para lograr esta conexión entre el cerebro y la tecnología, los expertos diseñaron un algoritmo matemático -que es la base del citado programa-. Éste capta la información de un centenar de neuronas implicadas en el movimiento y la traduce a un 'idioma' comprensible por el brazo biónico. Es decir, la prótesis se movió porque los monos pensaron en hacerlo, pero también gracias al dispositivo que se encargó de traducir esta idea en impulsos eléctricos.



*Imagen 21. Brazo robótico dirigido por mono  
Un mono llamado Arthur mueve un brazo robótico en un experimento llevado a cabo por un equipo de científicos de la Universidad de Pittsburgh (EE UU).  
Fuente: <https://cadenaser.com/>*

Pero esto no es tan simple de lograr, requiere de una fase previa de entrenamiento, tanto para los monos como para el mismo sistema informático. Así, como primera fase del experimento los monos visualizaron el movimiento que posteriormente debían realizar y probaron a mover la prótesis usando un joystick. "Aprenden primero viendo el movimiento, lo que activa las células cerebrales como si realmente lo estuvieran haciendo".

- Dispositivos parcialmente invasivos: Los dispositivos BCI parcialmente invasivos se implantan dentro del cráneo pero descansan fuera del cerebro en lugar de dentro de la materia gris. Producen señales de mejor resolución que las BCI no invasivas en las que el tejido óseo del cráneo desvía y deforma las señales y tienen un menor riesgo de formar tejido cicatricial en el cerebro que las BCI completamente invasivas. Ha habido una demostración preclínica de BCI intracorticales de la corteza perilesional del accidente cerebrovascular<sup>84</sup>.

---

<sup>84</sup> GULATI, T., WON, S.J., RAMANATHAN, D.S., WONG, C.C, BODEPUDI, A., SWANSON, R.A., GANGULY, K. (2015). *Robust Neuroprosthetic Control from the Stroke Perilesional Cortex. J Neurosci*, vol.35 (22), pp. 8653–8661

En los últimos años, el mayor avance en BCI parcialmente invasivas ha surgido en el área de la neurología intervencionista<sup>85</sup>. En 2010, investigadores afiliados a la *Universidad de Melbourne* habían comenzado a desarrollar un BCI que podía insertarse a través del sistema vascular. El neurólogo australiano *THOMAS OXLEY (Hospital Mount Sinai)* concibió la idea de este BCI, llamado *Stentrode*, que ha recibido financiación de DARPA. Los estudios preclínicos evaluaron la tecnología en ovejas.

El *Stentrode*, un conjunto de electrodos de stent monolítico, está diseñado para administrarse a través de un catéter intravenoso guiado por imágenes al seno sagital superior, en la región que se encuentra adyacente a la corteza motora<sup>86</sup>. Esta proximidad a la corteza motora es la base de la capacidad del *Stentrode* para medir la actividad neuronal. El procedimiento es muy similar a cómo se colocan los stents del seno venoso para el tratamiento de la hipertensión intracraneal idiopática<sup>87</sup>. El *Stentrode* comunica la actividad neuronal a una unidad de telemetría sin batería implantada en el pecho, que se comunica de forma inalámbrica con una unidad de telemetría externa capaz de transferir energía y datos. Si bien una BCI endovascular se beneficia al evitar la craneotomía para la inserción, existen riesgos como la coagulación y la trombosis venosa. En estudios preclínicos en animales implantados con *Stentrode*, veinte animales no mostraron evidencia de formación de trombos después de 190 días, posiblemente debido a la incorporación endotelial del *Stentrode* en la pared del vaso.

Se están realizando las primeras pruebas en humanos con el *Stentrode*. En noviembre de 2020, dos participantes que sufrían de esclerosis lateral amiotrófica pudieron controlar de forma inalámbrica un sistema operativo para enviar mensajes de texto, enviar correos electrónicos, comprar y realizar operaciones bancarias utilizando el pensamiento directo a través de la interfaz cerebro-computadora *Stentrode*, marcando la primera vez se implantó una interfaz cerebro-computadora a través de los vasos sanguíneos del paciente, eliminando la necesidad de una cirugía cerebral abierta.

---

<sup>85</sup> MICHAEL, L., MARTINI, B.A., ERIC KARL O., NICHOLAS L., FEDOR P., THOMAS O., & KURT, Y. (2020). *Sensor Modalities for Brain-Computer Interface Technology: A Comprehensive Literature Review. Neurosurgery*, vol.86 (2), pp.E108–E117

<sup>86</sup> OPIE, N. (2021). "El sistema de interfaz neuronal Stentrode™". En Guger C., Allison B.Z., Tangermann M. (eds.). *"The Stentrode™ Neural Interface System"*. In Guger C., Allison B.Z., Tangermann M. (eds.). *Brain-Computer Interface Research: A Cutting-Edge Overview. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering*. Cham: Springer International Publishing, pp.127–132

<sup>87</sup> TELEB, M.S., CZIEP, M.E., LAZZARO, M.A., GHEITH, A., ASIF, K., REMLER, B., & ZAIDAT, O.O. (2014). *Idiopathic Intracranial Hypertension. A Systematic Analysis of Transverse Sinus Stenting. Interv Neurol*, vol.2 (3), pp. 132–143.

La electrocorticografía (ECoG) mide la actividad eléctrica del cerebro tomada debajo del cráneo de manera similar a la electroencefalografía no invasiva, pero los electrodos están incrustados en una almohadilla plástica delgada que se coloca sobre la corteza, debajo de la duramadre<sup>88</sup>. Las tecnologías ECoG fueron probadas por primera vez en humanos en 2004 por *ERIC LEUTHARDT* Y *DANIEL MORAN* de la Universidad de Washington en St Louis . En una prueba posterior, los investigadores permitieron que un adolescente jugara *Space Invaders* usando su implante ECoG. Esta investigación indica que el control es rápido, requiere un entrenamiento mínimo y puede ser una compensación ideal con respecto a la fidelidad de la señal y el nivel de invasividad.

Las señales pueden ser subdurales o epidurales, pero no se toman del interior del propio parénquima cerebral. No se ha estudiado extensamente hasta hace poco debido al acceso limitado de los sujetos. Actualmente, la única forma de adquirir la señal para estudio es mediante el uso de pacientes que requieren monitorización invasiva para la localización y resección de un foco epileptógeno.

ECoG es una modalidad BCI intermedia muy prometedora porque tiene una resolución espacial más alta, una mejor relación señal-ruido, un rango de frecuencia más amplio y menos requisitos de entrenamiento que el EEG registrado en el cuero cabelludo y, al mismo tiempo, tiene una dificultad técnica más baja y un riesgo clínico más bajo, y puede tener una estabilidad superior a largo plazo que el registro intracortical de una sola neurona<sup>89</sup>. Este perfil de características y la evidencia reciente del alto nivel de control con requisitos mínimos de capacitación muestran potencial para la aplicación en el mundo real para personas con discapacidades motoras. Los dispositivos BCI de imágenes reactivas a la luz aún se encuentran en el ámbito de la teoría.

Un trabajo reciente publicado por Edward Chang y Joseph Makin de UCSF reveló que las señales ECoG podrían usarse para decodificar el habla de pacientes con epilepsia implantados con matrices ECoG de alta densidad sobre las cortezas peri-Sylvian<sup>90</sup>. Su estudio logró tasas de error de palabras

---

<sup>88</sup> SERRUYA, M.D, & DONOGHUE, J.P. (2003). "Capítulo III: Principios de diseño de una prótesis neuromotora". En Horch KW, Dhillon GS (eds.). Neuroprótesis: teoría y práctica. Prensa del Colegio Imperial.

<sup>89</sup> NICOLÁS-ALONSO, L.F, & GÓMEZ-GIL, J. (2012). "Interfaces cerebro computadora, una revisión" . Sensores, vol.12 (2), pp.1211–1279.

<sup>90</sup> MAKIN., J.G, MOISÉS, D.A., & CHANG, E.F. (2021). "Descodificación de voz como traducción automática". En Guger, C., Allison, B.Z., Gunduz, A. (eds.). Investigación de la interfaz cerebro-computadora: un resumen

del 3 % (una notable mejora con respecto a publicaciones anteriores) utilizando una red neuronal codificadora-descodificadora, que tradujo datos ECoG en una de cincuenta oraciones compuestas por 250 palabras únicas.

- **Dispositivos no invasivos:** Este método no invasivo consiste en ubicar los electrodos en la superficie de la corteza cerebral, sin la necesidad de una intervención quirúrgica evitando posibles lesiones cerebrales o infecciones que afectarían al usuario. Los métodos no invasivos más utilizados para la implementación de interfaces cerebro-maquina es la electroencefalografía.

Otro método no invasivo y de gran interés es la imagen por resonancia magnética funcional (*fMRI - Functional Magnetic Resonance Imaging*), que permite solventar alguna de las carencias de la electroencefalografía; permite una mayor resolución espacial y acceder a estructuras internas del cerebro en lugar de analizar solo diferencias de tensión superficiales<sup>91</sup>. Su funcionamiento se basa en el análisis de los cambios que se producen en el flujo de la sangre en el cerebro, teniendo siempre presente que el comportamiento de este flujo está ligado a la actividad cerebral. Para ello, se evalúa el diferente comportamiento magnético entre la sangre rica en oxígeno y la sangre pobre en oxígeno y volumen de sangre en ciertas zonas del cerebro. Para poder realizar estos análisis se hace uso de los escáneres basados en las propiedades de la resonancia magnética nuclear.

También cabe destacar como alternativa no invasiva la magnetoencefalografía, consistente en el análisis de la actividad magnética del cerebro a partir del fenómeno de la inducción magnética. Los procesos neurofisiológicos que producen las señales analizables mediante MEG son los mismos que permiten un análisis mediante EEG, a diferencia de las imágenes por resonancia magnética, que tienen su origen en procesos de tipo vascular. Las ventajas de MEG respecto de EEG se deben a que los campos magnéticos son menos afectados por el cuero cabelludo y hueso que los campos eléctricos, produciendo una mejor resolución tanto espacial como temporal. Sin embargo, el uso de MEG es poco viable debido al equipamiento electrónico necesario.

---

de vanguardia 10. SpringerBriefs en Ingeniería Eléctrica e Informática. Cham: Springer International Publishing. pp. 23–33

<sup>91</sup> SULZER, J., HALLER, S., SCHARNOWSKI, L., WEISKOPF, N., BIRBAUMER, N., BLEFARI, M.L., BRUEHL, B., *et al.* (2013). *Real-Time fMRI Neurofeedback: Progress and Challenges. NeuroImage*, vol.76, pp. 386–99.

*c) Computadora y software de captura de señales EEG*

Para poder obtener las muestras del equipo de adquisición es necesario una computadora que sea capaz de soportar los algoritmos de filtrado y procesamiento de la señal que son requeridos para extraer los componentes que se requieran de la señal, con un software de captura que pueda almacenar grandes cantidades de datos. El software de captura y procesamiento también incluye un sistema de clasificación y detección en las señales EEG para que de esta forma se pueda ofrecer la retroalimentación al usuario. Asimismo, incluye un traductor de señales, una interfaz de control y un controlador de dispositivo.

Es a partir de la existencia de ambos elementos que se puede proceder al procesamiento de la señal EEG.

El objetivo de procesar la señal es extraer las características de la señal deseada para facilitar la clasificación y evaluación para convertir en comandos del sistema. El procesamiento de la señal EEG consta de cuatro etapas<sup>92</sup>:

- i. Pre procesamiento: Eliminación del ruido y limpieza de la señal, utilizando filtro pasa banda digital, el uso de filtros nos ayuda a muestrear la señal EEG sin pérdida de información, ayudando que el sistema sea rápido.
- ii. Extracción de características: La extracción de características es el proceso de analizar las señales digitales para distinguir las características pertinentes de la señal (es decir, características de la señal relacionadas con la intención de la persona) del contenido extraño y representarlas en una forma compacta adecuada para traducirlas en comandos de salida. Estas características deberían tener fuertes correlaciones con la intención del usuario. Debido a que gran parte de la actividad cerebral relevante (es decir, la más fuertemente correlacionada) es transitoria u oscilatoria, las características de la señal extraídas con más frecuencia en los sistemas BCI actuales son amplitudes y latencias de respuesta de EEG o ECoG activadas por tiempo, potencia dentro de bandas de frecuencia específicas de EEG o ECoG, o tasas de activación de neuronas corticales individuales.

---

<sup>92</sup> JERRY, S., KRUSIENSKI, D., & WOLPAW, J. (2012). *Brain-Computer Interfaces in Medicine. Mayo Clinic*, vol. 87(3), pp.268-279.

- iii. Traducción y clasificación de características: Las características de la señal resultante luego se pasan al algoritmo de traducción de características, que convierte las características en los comandos apropiados para el dispositivo de salida (es decir, comandos que logran la intención del usuario). Por ejemplo, una disminución de potencia en una banda de frecuencia dada podría traducirse en un desplazamiento hacia arriba del cursor de una computadora, o un potencial P300 podría traducirse en la selección de la letra que lo evocó. El algoritmo de traducción debe ser dinámico para acomodar y adaptarse a cambios espontáneos o aprendidos en las características de la señal y para garantizar que el rango posible de valores de características del usuario cubra el rango completo de control del dispositivo.

La detección de estados mentales específicos, tiene su base de éxito en la apropiada elección de los parámetros que caracterizan la señal, por la efectividad de los algoritmos de clasificación y capacidad de la persona para producir o controlar las características.

- iv. Entrenamiento: Se entrena el sistema con un usuario específico, ya que cada usuario tiene patrones EEG distintos. Los comandos del algoritmo de traducción de características operan el dispositivo externo y proporcionan funciones como la selección de letras, el control del cursor, la operación del brazo robótico, etc. La operación del dispositivo proporciona retroalimentación al usuario, cerrando así el ciclo de control.

#### *d) Dispositivo o actuador*

Existe un rango ilimitado de dispositivos que pueden ser utilizados en una BCI, los investigadores han utilizado, procesadores de palabras, sintetizadores de voz, prótesis neurales, sillas de ruedas y exoesqueletos, entre otros.

#### *e) Usuario*

La persona que controla el dispositivo conectado a la interfaz cerebro computadora, quien modifica intencionalmente su estado cerebral con el objetivo de generar una señal de control que opera el sistema.

### *5.4 Objetivo, funcionamiento y medida de una BCI*

El objetivo básico de una BCI es medir la actividad cerebral, procesarla para obtener las características de interés de la señal, y una vez obtenidas, usarlas para interactuar con el entorno de la forma deseada por el usuario.

Es importante señalar que, una interfaz cerebro-computadora utiliza para su funcionamiento únicamente información obtenida del sistema nervioso central y en particular del cerebro, limitándose a la actividad puramente cerebral. Por tanto, quedan excluidas todas las interfaces que utilicen de forma implícita o explícita información eléctrica resultante del movimiento muscular (que usualmente se denominan artefactos en el entorno de EEG). Un aspecto fundamental entonces es entender la generación del proceso de actividad cerebral y la modalidad elegida para medirla<sup>93</sup>.

De forma general, el sistema nervioso es una red compleja de estructuras especializadas cuya función es la de captar y procesar rápidamente las señales ejerciendo control y coordinación sobre los demás órganos y sistemas, para lograr una oportuna y eficaz interacción con el medio ambiente cambiante<sup>94</sup>. El sistema nervioso está organizado para detectar cambios en el medio interno y externo, evaluar esta información y responder ocasionando cambios en músculos o glándulas.

El sistema nervioso está dividido en el sistema nervioso central y el sistema nervioso periférico<sup>95</sup>. El sistema nervioso central está formado por el encéfalo y la médula espinal. El encéfalo es la parte del sistema que está protegida por los huesos del cráneo y lo forman el cerebro, el cerebelo y el tronco del encéfalo; mientras que la médula espinal es la prolongación del encéfalo que se encuentra protegida por la columna vertebral.

El sistema nervioso periférico está formado por nervios y neuronas que residen o se extienden fuera del sistema nervioso central hacia los miembros y órganos. La diferencia con el sistema nervioso central es que el sistema nervioso periférico no está protegido por huesos o por barrera hematoencefálica, permitiendo su exposición a toxinas y a daños mecánicos<sup>96</sup>.

La unidad básica del sistema nervioso son las neuronas, las cuales tienen la capacidad de comunicarse con precisión, rapidez y a larga distancia con otras células, ya sean nerviosas, musculares o glandulares. La información viaja entre neuronas por medio de impulsos eléctricos que se transmiten de unas neuronas a otras. Estos impulsos se reciben de otras neuronas en las dendritas, pasan por toda la neurona hasta ser conducidas por el axón a los botones terminales, los cuales pueden conectar con

---

<sup>93</sup> MINGUEZ, J. (s.f.). Tecnología de interfaz cerebro-computador. *Departamento de informática e ingeniería de sistemas*, Universidad de Zaragoza, España. p.3. [consulta: 2 de enero 2024]. Disponible en: [https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001\\_UJI.pdf](https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001_UJI.pdf)

<sup>94</sup> RUDOMÍN, P. (1980). El sistema nervioso: maravilla que empezamos a descifrar. *Salud mental*, vol.3 (1), pp.6-25

<sup>95</sup> TREVIÑO, MA. & JARAMILLO, F. (2005). El Sistema Nervioso y su Relación con el Sistema Inmunológico. *Investigación y Ciencia*, vol. 13(33), pp. 14-21

<sup>96</sup> MONTALVO, C. (2019). Tejido y sistema nervioso. *Departamento de biología celular y tisular*. Universidad Nacional Autónoma de México, pp.1-49

otra neurona, fibras musculares o glándulas. Las neuronas conforman e interconectan los tres componentes del sistema nervioso: sensitivo, integrador o mixto y motor<sup>97</sup>.

Generalmente, una respuesta a un estímulo exterior sigue el siguiente proceso: el estímulo que es recibido en alguna región sensorial que capta determinada información, la cual es transportada por el sistema nervioso (a través de las neuronas) hasta un componente integrador en donde se analiza. Este componente elabora la respuesta que es conducida a través de las neuronas hacia fibras musculares (respuesta motora) o hacia glándulas (secreción glandular).

La actividad cerebral es la actividad funcional del conjunto de neuronas del sistema nervioso central localizadas en el cerebro<sup>98</sup>. Se estima que el cerebro humano posee aproximadamente unos cien mil millones de neuronas. Las neuronas transmiten ondas de naturaleza eléctrica cuyo proceso de transmisión está basado en una despolarización incremental de la neurona debido a los potenciales procedentes de los axones de otras células (recibidos en las dendritas). Cuando la despolarización alcanza un determinado umbral se produce un potencial de acción, que es un cambio de potencial de negativo a positivo y vuelta a negativo que dura milisegundos y se transmite por el axon hacia otras neuronas<sup>99</sup>. La actividad cerebral puede ser descrita en diferentes escalas que varían desde la actividad de una neurona particular, hasta conjuntos de actividad síncrona de millones de neuronas en grandes volúmenes cerebrales.

Al igual que cualquier otra célula viva las neuronas necesitan aporte energético. Existen diferentes niveles de necesidades energéticas: para sobrevivir y mantener su estructura; para mantenerse en condiciones de realizar su función; y para realizarla (que es el tipo de aporte energético relativo a la actividad cerebral cuando se ejecuta una tarea)<sup>100</sup>. El sistema nervioso difiere del resto de los tejidos en lo referente a su metabolismo energético, dado que, aunque el peso del cerebro es solamente el 2 % del peso total del cuerpo, recibe el 15 % del flujo cardíaco utilizando el 20 % del oxígeno que consume el cuerpo. La energía le es suministrada en su totalidad por el metabolismo de la glucosa, sin embargo, la capacidad del cerebro de almacenar glucosa y glucógeno es reducida ya que es capaz de cubrir los requerimientos energéticos cerebrales solamente durante un minuto.

Los dispositivos de medida de la actividad cerebral son los usualmente utilizados en tareas clínicas y miden uno de los dos procesos previos (cambios

---

<sup>97</sup> CONTRERAS, N. (2019). Comprendiendo el Código Neuronal: un análisis de cuatro perspectivas. *Revista Chilena de Neuropsicología*, vol.14(1), pp.30-35

<sup>98</sup> *Ibidem*, p.4

<sup>99</sup> ALCÁZAR-FABRA, M. (2012). El potencial de acción. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, n°5, pp.166-170

<sup>100</sup> LAREO, L. (2006). Costo energético de procesos cerebrales con especial énfasis en aprendizaje y memoria. *Universitas Scientiarum*, vol.11(2), pp.77-84

eléctricos/magnéticos o cambios el aporte energético)<sup>101</sup>. El primer tipo de dispositivos utiliza técnicas que miden la actividad directa de las neuronas ya que miden procesos electromagnéticos. El segundo tipo mide la actividad cerebral indirecta, dado que detecta cambios de diferente origen en el torrente sanguíneo. Esta diferencia es importante dado que el primer método de medida mide los procesos primarios de la actividad, mientras que el segundo de ellos mide el resultado de la misma (que es la necesidad de realizar aporte energético más intenso para que las neuronas de una zona realicen su función). Como consecuencia, las técnicas que miden la actividad cerebral directa tienen una gran resolución temporal y mala espacial, mientras que las segundas son a la inversa. Por ejemplo, el electroencefalograma es una técnica que mide actividad eléctrica y se utiliza de forma clínica para estudiar la tipología de las ondas en zonas del cerebro en detección de patologías como la epilepsia. Por otro lado, la imagen por resonancia magnética funcional mide cambios en la oxigenación de la sangre, y se utiliza para detectar con precisión las áreas específicas en planificación neuroquirúrgica (por ejemplo, para eliminación de focos epilépticos sin dañar las zonas del lenguaje y motoras), pero necesita tiempos de exposición del orden de segundos para obtener una imagen.

La mayoría de las BCI utilizan dispositivos que miden procesos eléctricos dado que uno de los aspectos fundamentales de diseño es maximizar la transferencia de información del cerebro a la máquina.

### *5.5 Las BCI híbridas: el uso conjunto de diversas alternativas*

#### *a) El concepto de BCI híbrido*

Para intentar mejorar la fiabilidad que puedan tener las interfaces cerebro-máquina, especialmente aquellas que cuenten con un método de adquisición de señales no invasiva que necesite mejorar sus prestaciones, se puede utilizar un uso conjunto de diversas señales o, directamente, combinarlo con distintas técnicas que involucren otras disciplinas, como otros análisis biométricos, *eye-gaze*. En función de cómo se realice la implementación de las distintas técnicas o análisis a realizar se pueden distinguir dos tipos de interfaces:

- **Secuenciales:** Interfaces organizadas de tal forma que inicialmente se hace uso de uno de los análisis y posteriormente se refuerza con otro.
- **Simultánea:** Los distintos análisis y mediciones que se realizan sobre el usuario se realizan en paralelo y a la vez.

---

<sup>101</sup> MINGUEZ, J. (s.f.). Tecnología de interfaz cerebro-computador. *Op. Cit.* p.3

El estudio de estos BCI híbridos es un campo de investigación en auge en la actualidad, indicación de que las esperanzas de mejorar las prestaciones de estas interfaces están puestas en esta dirección.

*PFURTSCHELLER* explica que un sistema híbrido de interfaz cerebro-computadora (hBCI) es similar a un BCI simple pero que, además, debe cumplir con los siguientes cuatro criterios<sup>102</sup>: (i) la actividad debe adquirirse directamente del cerebro; (ii) debe emplearse al menos una de las múltiples modalidades de adquisición de señales cerebrales para adquirir tal actividad, que puede ser en forma de potencial eléctrico, campo magnético o cambio hemodinámico; (iii) las señales deben ser procesadas en tiempo real/en línea para establecer comunicación entre el cerebro y una computadora para la generación de comandos de control; y (iv) se debe proporcionar retroalimentación que describa los resultados de la actividad cerebral para la comunicación y el control.

Los hBCI recientes basados en estos criterios se han centrado en mejorar la precisión de la detección de actividad y aumentar la cantidad de comandos de control para lograr una mejor comunicación y control para sujetos sanos y pacientes. Esto es especialmente cierto considerando el hecho de que un hBCI consta de al menos dos modalidades (una de las cuales es una señal basada en el cerebro) que trabajan en conjunto para producir una mejor funcionalidad de BCI.

Se deben considerar seis aspectos (hardware, procesamiento de señales, actividad cerebral, extracción de características, clasificación y retroalimentación) al desarrollar un hBCI: (i) el hardware debe consistir en al menos una modalidad de adquisición de señales cerebrales; (ii) el sistema híbrido debe detectar y procesar diferentes señales fisiológicas simultáneamente; (iii) el paradigma debería poder adquirir múltiples actividades cerebrales simultáneamente usando múltiples modalidades; (iv) una serie de características para la clasificación deben adquirirse en tiempo real/en línea tanto para mejorar la precisión como para generar control-mando adicional; (v) la salida clasificada debe tener un potencial para interactuar con dispositivos externos (por ejemplo, sillas de ruedas y robots); y (vi) también debe proporcionar retroalimentación al usuario para fines de rehabilitación y control.<sup>103104</sup>

La figura 12 proporciona un ejemplo de un esquema hBCI. Indica las dos cosas siguientes: (i) se requieren múltiples actividades para hBCI y (ii) se describe una combinación de modalidades de adquisición de señales cerebrales y no

---

<sup>102</sup> PFURTSCHELLER, G., ALLISON, B.Z, BRUNNER, C., BAUERNEFIND, G., SOLIS-ESCALANTE, T., SCHERER, R., *et al.* (2010). *The hybrid BCI. Front Neurosci*, vol.4, p.30

<sup>103</sup> NICOLÁS-ALONSO, L.F & GÓMEZ-GIL, J. (2012). *Brain computer interfaces, a review... Op. Cit.* pp.1211–1279.

<sup>104</sup> RAMADAN, R.A., & VASILAKOS, A.V. (2017). *Brain computer interface: control signals review. Neurocomputing*, vol.223, pp.26–44.

cerebrales. Después de la detección, las actividades se procesan simultáneamente para la extracción y clasificación de características; luego, los resultados clasificados se utilizan como retroalimentación para las aplicaciones de control y rehabilitación del usuario.

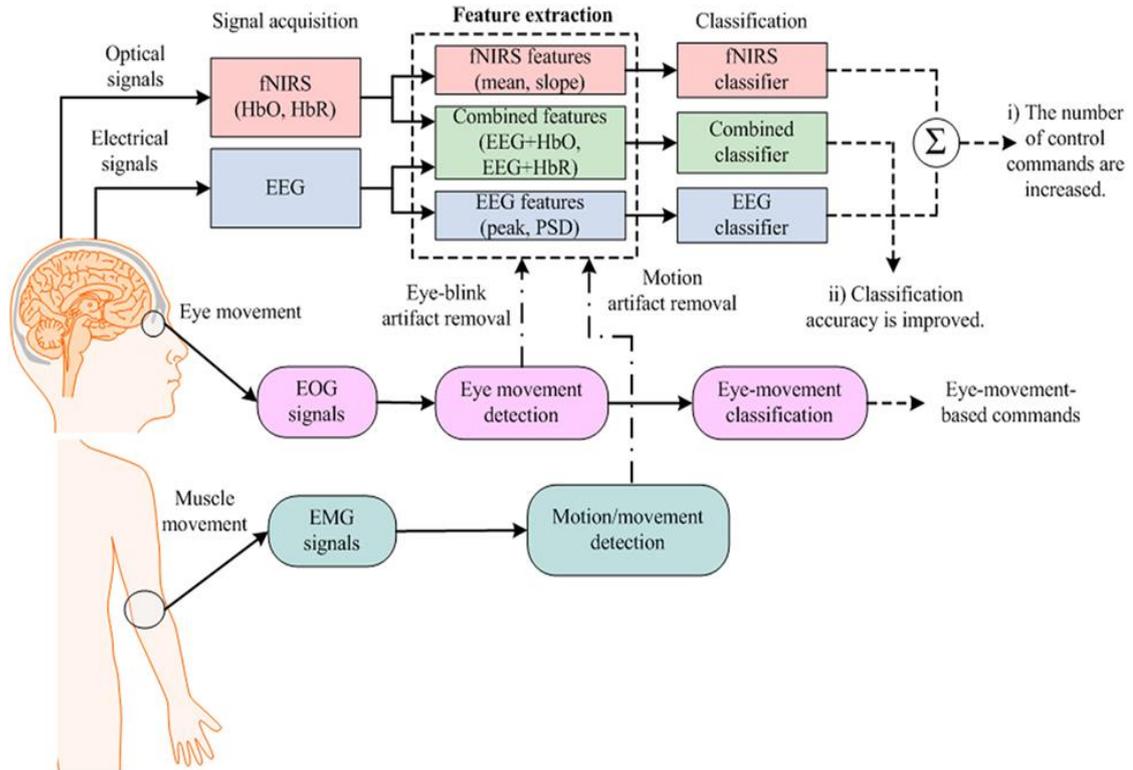


Imagen 22. Propósitos de una interfaz híbrida cerebro-computadora

(i) aumentar el número de comandos de control mediante la combinación de electroencefalografía (EEG) con espectroscopia de infrarrojo cercano funcional (fNIRS) [más electrooculografía (EOG)] y (ii) mejorar la precisión de la clasificación mediante la eliminación de artefactos de movimiento.

Fuente: [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

### b) Combinación de Hardware

El hardware de interfaz híbrida cerebro-computadora se puede configurar de las siguientes dos maneras: (i) combinación de una modalidad de adquisición de señales cerebrales con una modalidad de adquisición de señales no cerebrales<sup>105</sup>; y (ii) combinación de una modalidad de adquisición de señales cerebrales con otra modalidad de adquisición de señales cerebrales<sup>106</sup>.

<sup>105</sup> FATOURECHI, M., BASHASHATI, A., WARD, R.K., & BIRCH, G.E. (2007). *EMG and EOG artifacts in brain computer interface systems: A survey*. *Clinical Neurophysiology*, vol.118, pp.480–494.

<sup>106</sup> KAISER, V., BAUERNEFIND, G., KREILINGER, A., KAUFMANN, T., KUBLER, A., NEUPER, C., et al. (2014). *Cortical effects of user training in a motor imagery based brain-computer interface measured by fNIRS and EEG*. *Neuroimage*, vol.85, pp.432–444.

Las modalidades de adquisición de señales cerebrales y no cerebrales se combinan para eliminar los artefactos de movimiento o para aumentar el número de comandos en un sistema BCI. Se combinan dos modalidades de adquisición de señales cerebrales y se colocan sobre la misma región del cerebro para mejorar la precisión de la clasificación, o se colocan en diferentes regiones para aumentar el número de comandos de control. En el caso de dispositivos portátiles, se utilizan las siguientes señales:

- i. Señales neuronales: Estos se miden como una diferencia de voltaje entre dos ubicaciones cerebrales diferentes a lo largo del tiempo. La señal es registrada por electrodos de EEG colocados en el cuero cabelludo. La diferencia de potencial registrada se refleja como el potencial postsináptico en las membranas celulares de las neuronas corticales<sup>107</sup>. Estas señales son más efectivas para BCI, ya que se detectan inmediatamente (p. ej., las señales P300 se detectan 300 ms después de que se dan los estímulos). Estas señales también contribuyen en la detección del estado de somnolencia cerebral<sup>108</sup>.
- ii. Señales hemodinámicas: La respuesta hemodinámica es un proceso en el que la sangre libera glucosa a las neuronas activas a un ritmo mayor que las inactivas. La glucosa con oxígeno suministrada a través del torrente sanguíneo da como resultado un exceso de HbO en las venas del área activa, así como un cambio apreciable de la proporción de HbO local a HbR. Estos cambios se detectan mediante resonancia magnética funcional (fMRI) y fNIRS<sup>109</sup>. Estas señales tienen un retraso inherente en la generación de la respuesta hemodinámica. Sin embargo, el descubrimiento más reciente sobre las caídas iniciales hace que las señales de HbO sean un candidato viable para BCI<sup>110</sup>.
- iii. Señales de parpadeo: El ojo se puede modelar como un dipolo, con su polo positivo en la córnea y su polo negativo en la retina. Suponiendo una diferencia de potencial córneo-retiniana estable, el ojo es el origen de un campo de potencial eléctrico constante. Las señales eléctricas generadas a partir de este

---

<sup>107</sup> NGUYEN, L.H., & HONG, K.S. (2013). *Adaptive synchronization of two coupled chaotic Hindmarsh–Rose neurons by controlling the membrane potential of a slave neuron. Applied Mathematical Modelling*, vol.37(4), pp.2460–2468.

<sup>108</sup> QIAN, D., WANG, B., QING, X.Y., ZHANG, T., ZHANG, Y., WANG, X.Y., et al. (2017). *Drowsiness Detection by Bayesian-Copula Discriminant Classifier Based on EEG Signals During Daytime Short Nap. Trans. IEEE. biomedicin Ing.* Vol.64(4), pp.743–754

<sup>109</sup> BOAS, D.A, ELWELL, CE, FERRARI, M. & TAGA, G. (2014). *Twenty years of functional near-infrared spectroscopy: introduction for the special issue. Neuroimagen*, vol.85(1), pp.1–5.

<sup>110</sup> ZAFAR, A. & HONG, K.-S. (2017). *Detection and classification of three-class initial dips from prefrontal cortex. Biomed Opt Express.* vol.8(1), pp.367–383

campo son medidas por EOG<sup>111</sup>. A veces, también se usa un rastreador ocular para la detección de movimientos oculares. En su mayoría, estas señales se utilizan para la investigación de actividades de vigilancia y somnolencia.

- iv. Señales EMG: Estas señales son un indicador de la actividad eléctrica de los músculos, que surge siempre que existe una contracción voluntaria o involuntaria<sup>112</sup>. Estas señales son registradas por electrodos EMG, que son los más utilizados en neuroprótesis<sup>113</sup>.
- v. EEG + EOG: Las BCI basadas en EOG son útiles para las personas que tienen control sobre los movimientos de sus ojos, ya que de esta manera se pueden generar múltiples comandos simultáneamente. Las combinaciones de señales de movimiento ocular (parpadeo, guiño, ceño fruncido, etc.) con señales neuronales generalmente se utilizan para BCI híbridos basados en EEG-EOG<sup>114</sup>. En esta sección, también incluimos estudios híbridos que han utilizado seguimiento ocular con EEG para desarrollar sistemas híbridos para BCI. Discutimos juntos los estudios basados en EOG y *eye tracker*, ya que ambos usan movimientos oculares para la clasificación. Para la generación de comandos, las señales se decodifican simultáneamente y, para el control de un sistema BCI, se fusionan mediante un clasificador combinado<sup>115</sup>. Aunque EOG se usa para eliminar artefactos oculares de los datos de EEG<sup>116</sup>, la detección de somnolencia<sup>117</sup>, y el control de sillas de ruedas<sup>118</sup>, también se encuentran entre las aplicaciones más comunes de los sistemas basados en EEG-EOG. La figura 13 muestra el método utilizado para adquirir datos de EEG y EOG simultáneos para su análisis.

---

<sup>111</sup> BULLING, A., WARD, J.A., GELLERSEN, H. & TROESTER, G. (2011). *Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.33(4), pp.741–753.

<sup>112</sup> PATIL, S.M., & PATIL, C.G. (2014). *An Approach for Human Machine Interaction Using Electromyography*. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, vol.4(1), pp.71–75

<sup>113</sup> CHEN, B.J., FENG, Y.G., & WANG, Q.N. (2016). *Combining Vibrotactile Feedback with Volitional Myoelectric Control for Robotic Transtibial Prostheses*. *Front neurorobot*, vol.10(8), p.1-14

<sup>114</sup> MA, J.X., ZHANG, Y., CICHOCKI, A. & MATSUNO, F. (2015). *A Novel EOG/EEG Hybrid Human–Machine Interface Adopting Eye Movements and ERPs: Application to Robot Control*. *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol.62(3), pp.876–889.

<sup>115</sup> JIANG, J., ZHOU, Z.T., YIN, EW, YU, Y. & HU, D.W. (2014). *Hybrid Brain-Computer Interface (BCI) based on the EEG and EOG signals*. *BioMed. Mate. Ing.*, vol.24(6), pp.2919–2925

<sup>116</sup> LI, M.G., GUO, S.D., ZUO, G.Y., SUN, Y.J., & YANG, J.F. (2015). *Removing ocular artifacts from mixed EEG signals with FastKICA and DWT*. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol.28(6), pp.2851–2861.

<sup>117</sup> KHUSHABA, R.N., KODAGODA, S., LAL, S. & DISSANAYAKE, G. (2011). *Driver drowsiness classification using fuzzy wavelet-packet-based feature-extraction algorithm*. *IEEE Trans. biomed Eng.* vol.58(1), pp.121–131.

<sup>118</sup> RAMLI, R., AROF, H., IBRAHIM, F., MOKHTAR, N. & IDRIS, MYI. (2015). *Using finite state machine and a hybrid of EEG signal and EOG artifacts for an asynchronous wheelchair navigation*. *Expert Systems with Applications* 42(5), pp.2451–2463.

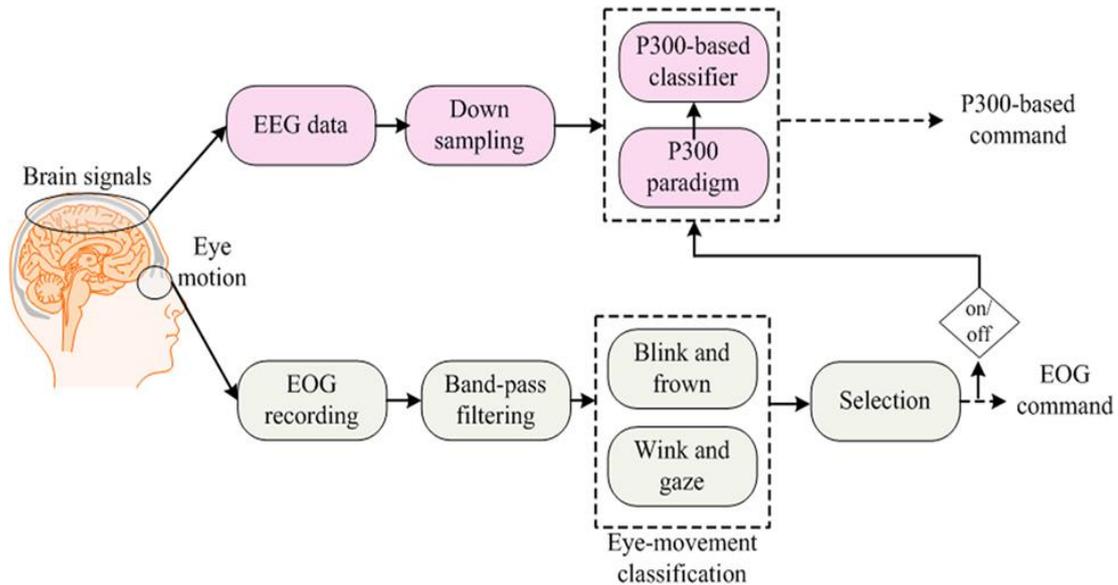


Imagen 23. BCI EEG-electrooculografía (EOG)

Interfaz cerebro-computadora basada en electroencefalografía (EEG)-electrooculografía (EOG): las señales de parpadeo se utilizan para cambiar entre la generación de comandos basada en EEG y EOG, en la que EEG y EOG generan comandos basados en P300 y fruncir el ceño-guñar-mirar. comandos basados, respectivamente.

Fuente: [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

- vi. EEG + EMG: Las señales de electromiografía se generan y detectan como resultado del movimiento muscular<sup>119</sup>. Estos actúan como un artefacto en las señales de EEG, lo que resulta en la detección falsa de señales cerebrales<sup>120</sup>. El propósito detrás de un hBCI híbrido basado en EEG-EMG es combinar señales de EEG y EMG en hBCI. Esta incorporación de señales EMG es específica del usuario y depende de la actividad o tarea realizada por ese usuario<sup>121</sup>. Las aplicaciones de los enfoques híbridos varían desde una simple aplicación de control de juegos para una persona sin discapacidad hasta una aplicación de control de prótesis de brazo para una persona amputada. Figura 14 muestra una estrategia típica utilizada para incorporar señales de EEG y EMG en un sistema hBCI.

<sup>119</sup> CLER, M.J., & STEPP, C.E. (2015). *Discrete vs. Continuous Mapping of Facial Electromyography for Human-Machine-Interface Control: Performance and Training Effects*. *IEEE Trans neural Syst Rehabil Eng.*, vol.23(4), pp.572–580.

<sup>120</sup> FATOURECHI, M., BASHASHATI, A., WARD, R.K., & BIRCH, G.E. (2007). *Op. Cit.* pp.480–494

<sup>121</sup> BHATTACHARYYA, S., BISWAS, A., MUKHERJEE, J., MAJUMDAR, AK, MAJUMDAR, B., MUKHERJEE, S., et al. (2013). *Detection of artifacts from high energy bursts in neonatal EEG*. *Comput Biol. Med.*, vol.43(11), pp.1804–1814.

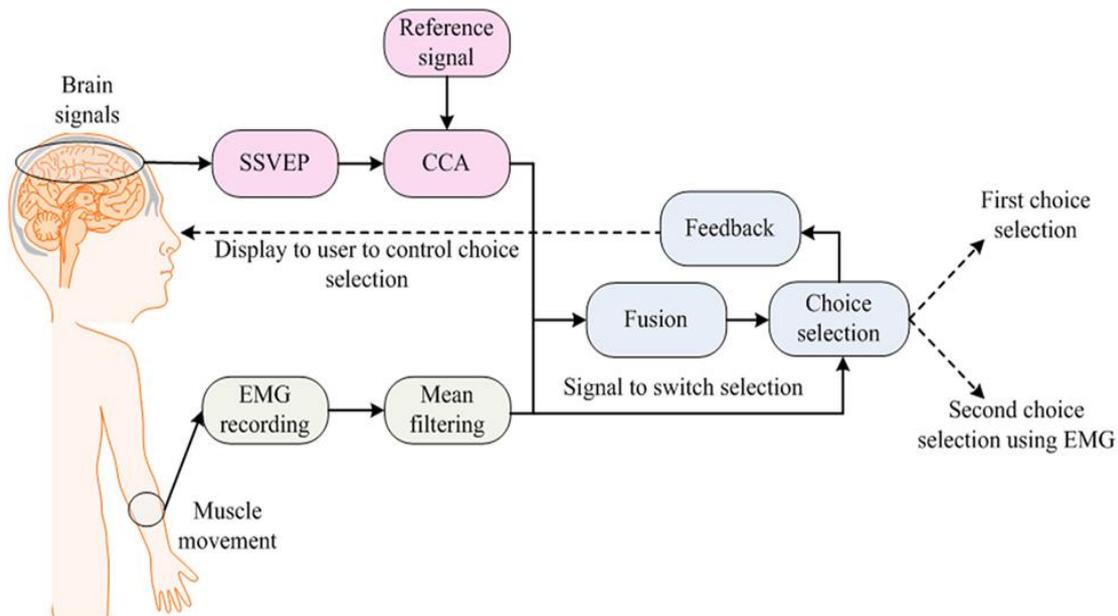


Imagen 24. BCI electroencefalografía-electromiografía (EMG)

Interfaz cerebro-computadora basada en electroencefalografía-electromiografía (EMG): se selecciona una opción usando el potencial evocado visual de estado estacionario (SSVEP) y se usa el movimiento muscular para cambiar la opción seleccionada.

Fuente: [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

- vii. EEG + fNIRS: La investigación realizada sobre el híbrido EEG-fNIRS es aún muy limitada. Esta tecnología se utiliza principalmente para mejorar la precisión de la clasificación<sup>122</sup> o aumentar el número de comandos de control<sup>123</sup> en un sistema BCI. Aunque la investigación ha mostrado buenos resultados para la combinación de fNIRS con bioseñales<sup>124</sup>, el EEG-NIRS híbrido ha mostrado los mejores resultados hasta ahora para BCI. En este caso, se combinan dos modalidades de adquisición de señales cerebrales mediante señales neuronales (registradas mediante EEG) y señales hemodinámicas (registradas mediante NIRS). Sin embargo, una desventaja importante del uso de la hemodinámica (ya sea fMRI o fNIRS) es el retraso inherente en la respuesta<sup>125</sup>, lo que hace que la generación de comandos sea lenta en comparación con EEG. Sin embargo, en el caso de EEG-fNIRS combinado, este tipo de desventaja puede eliminarse. Además, la detección del descenso inicial (es decir, el fenómeno de

<sup>122</sup> FAZLI, S., MEHNERT, J., STEINBRINK, J., CURIO, G., VILLRINGER, A., MULLER, KR, *et al.* (2012). *Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface*. *Neuroimage*, vol. 59(1), pp.519–529

<sup>123</sup> KHAN, M.J., HONG, M.J., & HONG, K.-S. (2014). *Decoding of four movement directions using hybrid NIRS-EEG brain-computer interface*. *Front Hum Neurosci.*, vol.8, pp.1-10.

<sup>124</sup> ZIMMERMANN, R., MARCHAL-CRESPO, L., EDELMANN, J., LAMBERCY, O., FLUET, MC, RIENER, R., *et al.* (2013). *Detection of motor execution using a hybrid fNIRS-biosignal BCI: a feasibility study*. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol.10(4) pp.1-15

<sup>125</sup> HUPPERT, T.J., SCHMIDT, B., BELUK, N., FURMAN, J. & SPARTO, P. (2013). *Measurement of brain activation during an upright stepping reaction task using functional near-infrared spectroscopy*. *Hum Brain Mapp.*, vol.34(11) pp. 2817–2828.

que la HbO disminuye y la HbR aumenta con el disparo neural) en lugar de la hemodinámica podría conducir a una mejor selección de la ventana de tiempo para las modalidades combinadas. La Figura 15 muestra un enfoque utilizado para combinar las modalidades EEG-NIRS para BCI.

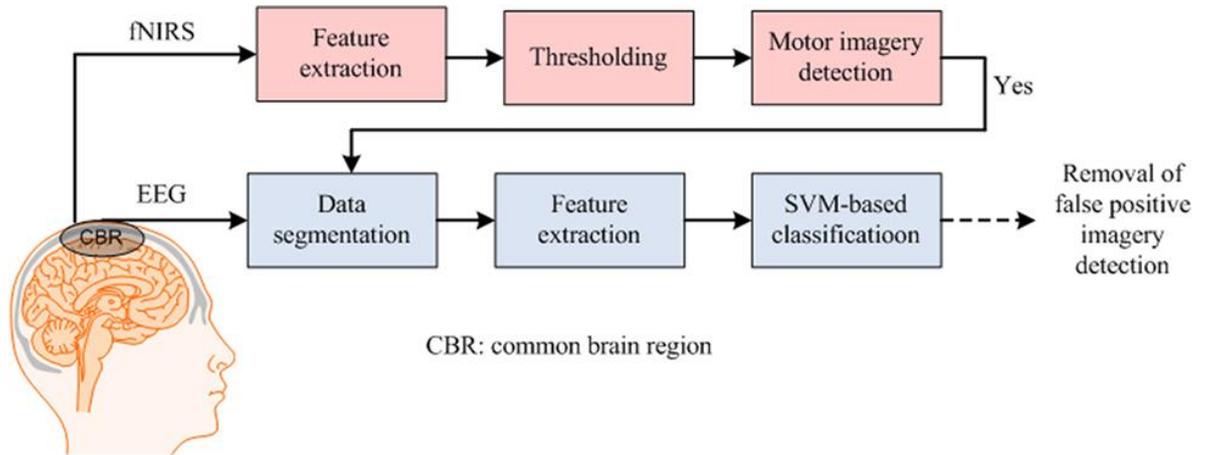


Imagen 25. BCI electroencefalografía (EEG-NIRS)  
Interfaz cerebro-computadora basada en electroencefalografía (EEG)-NIRS: la figura muestra un método de eliminación de señales de imágenes motoras falsas positivas en datos de EEG utilizando espectroscopia funcional de infrarrojo cercano (fNIRS) (decisión retrasada).  
Fuente: [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)

### c) Combinación de señales cerebrales

El criterio de selección de paradigma para un sistema hBCI depende del tipo de actividades detectadas. Las tareas de BCI se clasifican en tipos activos, pasivos y reactivos. Los respectivos criterios de selección para estas tareas se basan únicamente en el paradigma diseñado. En el caso de la multimodalidad, el paradigma suele consistir en la decodificación de una sola actividad de la misma región cerebral.

Algunos hBCI están diseñados mediante la decodificación de múltiples tareas utilizando una única modalidad. Para este propósito, normalmente SSVEP se combina con tareas basadas en MI o P300 que usan detección de señal basada en EEG. Un estudio de ZHANG Y OTROS ha demostrado una combinación de señales potenciales positivas de ERP, N170 y vértice para BCI basado en EEG<sup>126</sup>. Las tareas basadas en ERP y las tareas de potenciales evocados son reactivas, ya que requieren estimulación externa para generar la actividad cerebral<sup>127</sup>. Las tareas basadas en MI y MA se consideran activas, ya que el usuario genera actividad cerebral con actividades cerebrales internas. En este artículo se incluyen brevemente los casos en los que se detectan múltiples tareas simultáneamente utilizando una única modalidad, aunque no se utiliza el término

<sup>126</sup> ZHANG, Y., ZHAO, Q.B., JIN, J., WANG, X.Y., & CICHOCKI, A. (2012). A novel BCI based on ERP components sensitive to configural processing of human faces. *J. Neural Eng.*, vol.9(2), pp.1-23.

<sup>127</sup> ZANDER, T.O., & KOTHE, C. (2011). Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general. *J. Neural Eng.*, vol.8(2), pp.1-20.

“híbrido”. Esto se ha hecho en estudios recientes sobre fNIRS, en los que se combinaron tareas de MI y MA para la generación de múltiples comandos BCI<sup>128</sup>. Las diversas señales utilizadas en hBCI se analizan a continuación:

- i. Señales basadas en estimulación auditiva y visual: Estas señales reactivas se generan desde el área del cerebro occipital o del área del cerebro temporal mediante la provisión de estímulos visuales o estímulos auditivos<sup>129</sup>. Aunque la mayoría de estas estimulaciones están destinadas a la generación de actividad cerebral desde los lóbulos correspondientes, algunos audio/video se dan estímulos para generar señales P300. Para individuos saludables, estas estimulaciones pueden ser efectivas para generar múltiples comandos. Sin embargo, también pueden ser beneficiosos para pacientes sin movimientos motores ni oculares<sup>130</sup>.
- ii. Señales SSVEP: Estas señales se detectan principalmente en la región occipital del cerebro. Se generan al observar un estímulo, lo que provoca un aumento de la actividad neuronal en el cerebro. Los VEP son provocados por estímulos visuales repentinos, cuya repetición conduce a un patrón de oscilación de voltaje estable en el EEG que se conoce como SSVEP. El estímulo utilizado para estas señales es la luz que parpadea a diferentes frecuencias (a veces en el patrón de "tablero de ajedrez" con colores cambiantes). Usando señales SSVEP, se pueden generar múltiples comandos reactivos. El inconveniente de esta actividad es la necesidad de un enfoque continuo en la luz intermitente, lo que podría no ser posible o un enfoque ineficaz para algunos pacientes<sup>131</sup>. El tiempo de detección de señal para estas señales se ha reducido a menos de 1 s utilizando características espacio-temporales con un número reducido de canales<sup>132</sup>.
- iii. Señales P300: Esta señal se detecta principalmente en la región parietal del cerebro. Son los ERP que indican las respuestas a eventos cognitivos, sensoriales o motores específicos. La presentación de un estímulo en un paradigma extraño puede producir un pico positivo en las señales de EEG. Este pico aparece 300 ms después del inicio del estímulo. El estímulo puede ser visual, auditivo o somatosensorial. Esta respuesta evocada en EEG es el componente P300 de ERP. Estos, más utilizados en aplicaciones de ortografía, también pueden generar

---

<sup>128</sup> HONG, K.-S., NASEER, N. & KIM, YH (2015). *Classification of prefrontal and motor cortex signals for three-class fNIRS-BCI*. *Neurosci. Lett.*, vol.587, pp.87–92.

<sup>129</sup> LIU, X. & HONG, K.-S. (2017). *Detection of primary RGB colors projected on a screen using fNIRS*. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, vol.10(3), p.6

<sup>130</sup> RUTKOWSKI, T.M. (2016). *Robotic and Virtual Reality BCIs Using Spatial Tactile and Auditory Oddball Paradigms*. *Frontier In neurorobotics*, vol.10, p.20.

<sup>131</sup> MULLER-PUTZ, G.R., SCHERER, R., BRAUNEIS, C., & PFURTSCHELLER, G. (2005). *Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: 77mpacto f harmonic frequency components*. *Journal of Neural Engineering*, vol.2(4), pp.123–130.

<sup>132</sup> CHANG, M.H., LEE, J.S., HEO, J. & PARK, K.S. (2016). *Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI*. *J. Neurosci. Methods*, vol.258, pp.104–113.

múltiples comandos para BCI. Sin embargo, al ser reactivas, estas señales se utilizan principalmente solo para sujetos sanos<sup>133</sup>.

- iv. Señales prefrontales: Estas señales se detectan desde las regiones cerebrales prefrontal y prefrontal dorsolateral. Son una buena opción para BCI, ya que requieren menos esfuerzo de entrenamiento. En el caso de fNIRS, son especialmente adecuados porque generan menos artefactos de movimiento y menos atenuación de la señal debido al deslizamiento del detector en el cabello. Además, dada su no utilización de actividades motoras, son más efectivos en pacientes con discapacidades motoras severas. MA, el conteo mental y otras tareas pueden detectarse como señales cerebrales de tipo activo para BCI. La actividad pasiva de la somnolencia también se puede detectar desde esta corteza. Otra investigación ha informado sobre la detección de imágenes musicales, imágenes, generación de palabras, etc., desde la corteza prefrontal. La tarea más común utilizada para propósitos de BCI es MA<sup>134</sup>.
- v. Señales motoras: Estas señales se detectan principalmente desde las regiones cerebrales primarias y centrales (principalmente la corteza motora). Son las más adecuadas para aplicaciones BCI activas, ya que son medios naturales para proporcionar control BCI sobre dispositivos externos. Estas señales también están destinadas a la investigación de la recuperación motora o la neurorrehabilitación. Tienen amplias aplicaciones en sistemas BCI basados en EEG y fNIRS. Dos tipos diferentes de señales cerebrales detectadas desde la corteza motora son la ejecución motora y la MI. La ejecución motora se realiza mediante el movimiento de los músculos (principalmente en manos o pies). Además, algunas actividades relacionadas con el movimiento ocular estimulan la región motora. Algunas BCI usan la ejecución del motor para la generación de comandos, mientras que en otros casos, estas señales se eliminan de las señales de EEG usando EMG/EOG para una mejor detección de MI. La imagen motora se puede definir como un proceso cognitivo encubierto de imaginación cinestésica del movimiento del propio cuerpo sin la participación de tensión, contracción o flexión muscular. La señal MI es débil en relación con la tarea de ejecución motora. Además, no todos los sujetos pueden realizar esta actividad para BCI. De hecho, dado que esta actividad es generada por la imaginación de movimientos de manos o pies, es más adecuada para BCI de tipo activo<sup>135</sup>.

---

<sup>133</sup> TURNIP, A. & HONG, K.-S. (2012). *Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI*. *J. Neurosci Methods*, vol.258, pp.104-113.

<sup>134</sup> MA, T., LI, H., DENG, L., YANG, H., LV, X., LI, P., *et al.* (2017). *The hybrid BCI system for movement control by combining motor imagery and moving onset visual evoked potential*. *J. Neural. Eng.*, vol.14(2), pp.1-18.

<sup>135</sup> NASEER, N., & HONG, K.-S. (2015b). *fNIRS-based brain-computer interfaces: a review*. *Front Hum Neurosci.*, vol.9, pp.1-15.

- vi. Señales SSVEP y MI: La decodificación simultánea de señales SSVEP y MI constituye un sistema híbrido que consiste en comandos activos (basados en MI) y reactivos (basados en SSVEP). Aunque solo han aparecido unos pocos estudios relevantes, han demostrado con éxito la importancia del paradigma híbrido para aplicaciones de control y rehabilitación<sup>136</sup>.
- vii. Señales SSVEP y P300: La combinación de señales SSVEP y P300 da como resultado un hBCI reactivo. Estas actividades cerebrales se registran simultáneamente desde las áreas cerebrales occipital y parietal. Este paradigma se usa repetidamente en varias aplicaciones de control y rehabilitación.
- viii. Señales MI y P300: Las tareas relacionadas con MI y P300 han sido ampliamente diseñadas para aplicaciones en entornos del mundo real (por ejemplo, control de un cursor en la pantalla utilizando SVM como clasificador (90,75% de precisión promedio)). Las señales correspondientes se obtienen colocando electrodos alrededor de las regiones motora y parietal del cerebro<sup>137</sup>.

La investigación sobre hBCI ha comenzado a aumentar en los últimos años. Aunque el esquema hBCI surgió antes de 2010, solo en los 2 años anteriores se ha observado una aceleración importante en la derivación de estrategias de desarrollo. La mayoría de las estrategias de hibridación que se han introducido son aplicables a la BCI basada en EEG; sin embargo, se necesita una mayor mejora de los sistemas BCI basados en fNIRS.

El mayor énfasis en hBCI es el hBCI basado en EEG-EOG. La mayoría de estos estudios han combinado, o están combinando, dos modalidades para la eliminación de artefactos de movimiento ocular y comandos BCI adicionales. Los hBCI basados en EEG-EMG tienen aplicaciones limitadas y se usan solo en la eliminación de artefactos musculares de los datos del cerebro para mejorar la precisión de la clasificación. Mientras tanto, solo se ha realizado una investigación muy limitada sobre las aplicaciones BCI basadas en EEG-fNIRS. Además, los trabajos realizados se han centrado principalmente en una mejora de la precisión de la clasificación, y se ha prestado muy poca atención al problema del aumento del número de comandos.

La mayor parte del trabajo sobre la combinación de actividad cerebral hBCI se ha basado en paradigmas basados en SSVEP y P300. Aunque ambas son tareas reactivas, las aplicaciones más ampliamente observadas han sido en el área de ortografía y control de sillas de ruedas. En relación con la combinación de MI con P300 o SSVEP, las aplicaciones son ampliamente utilizadas en entornos de control y rehabilitación

---

<sup>136</sup> CAO, L., LI, J., JI, HF & JIANG, C.J. (2014). *A hybrid brain computer interface system based on the neurophysiological protocol and brain-actuated switch for wheelchair control*. *J. Neurosci. Methods*, vol.229, pp. 33–43

<sup>137</sup> LI, Y.Q., LONG, J.Y., YU, T.Y., YU, Z.L., WANG, C.C., ZHANG, H.H, *et al.* (2010). *An EEG-based BCI system for 2-D cursor control by combining Mu/Beta rhythm and P300 potential*. *IEEE Trans biomed Eng.* vol.57, pp.2495–2505.

neuroológica. Solo una parte muy pequeña de la investigación de hBCI se ha centrado en hBCI prefrontal y motora. Esta estrategia es útil para aumentar el número de comandos tanto para fNIRS solo como para EEG-fNIRS combinados.

#### *d) Ventajas de hBCI*

Aunque la combinación de dos modalidades aumenta el costo del sistema, su eficiencia mejora significativamente. Dado que la mayoría de los sistemas BCI están diseñados con el propósito de rehabilitación o conmutación (de pacientes), hBCI es un mejor medio para lograr este objetivo. Aún no se ha diseñado un BCI completo que pueda ser utilizado por los pacientes. Sin embargo, la combinación de las modalidades puede proporcionar el primer paso hacia la meta. Cada hBCI tiene diferentes ventajas y aplicaciones. El uso de los sistemas EEG-EOG y EEG-EMG, por ejemplo, es viable para pacientes capaces de movimientos oculares y musculares menores, mientras que se requiere un enfoque diferente para pacientes completamente bloqueados. En este sentido, el EEG-fNIRS híbrido podría proporcionar mejores resultados.

En otras palabras, mientras que las ventajas de hBCI varían con la combinación de modalidades, el objetivo principal sigue siendo el mismo solo que ahora unido a la minimización de la detección de señales falsas, y a una mayor idoneidad.

El hBCI puede mejorar la precisión de la clasificación y aumentar el número de comandos de un sistema BCI sin influir en ninguno de esos dos factores. La tendencia en hBCI sugiere el alto potencial de investigación en este campo. Aunque los primeros problemas de BCI (es decir, modalidad única) se abordaron mediante la combinación de modalidades, todavía hay varios temas de investigación que permanecen intactos.

#### *5.6 BCI y hBCI: Aplicaciones*

Es importante distinguir entre una BCI y sus aplicaciones. El término “BCI” se refiere al sistema que registra, analiza y traduce la entrada (es decir, las señales del cerebro del usuario) en comandos del dispositivo. Por el contrario, el término “aplicación” se refiere a los fines o dispositivos específicos a los que se aplican los comandos de salida. El enfoque reciente en las aplicaciones del mundo real de la tecnología BCI está acelerando la transición de la investigación BCI del laboratorio a productos clínicos útiles en la vida cotidiana.

Las primeras aplicaciones BCI tenían como objetivo proporcionar un canal de comunicación alternativo para usuarios discapacitados que tenían problemas de movilidad o del habla. Pero hoy, las BCI también han entrado en el mundo de las personas sanas. Ahora funciona como una herramienta de medición fisiológica que recupera y utiliza información sobre el estado cognitivo, emocional o de efectividad de un individuo.

Actualmente, las aplicaciones de BCI se extienden a través de múltiples y diversos campos, incluyen, entre otros, medicina, neuroergonomía, entorno inteligente, educación y autorregulación, neuromarketing y publicidad, juegos y entretenimiento, seguridad, identificación y autenticación, ingeniería militar, procedimientos judiciales, etc. Solo en el campo de la atención médica, la BCI se puede emplear para prevenir, detectar y diagnosticar, rehabilitar y recuperarse de una enfermedad.

A continuación, analizaremos con más detalle algunas de sus aplicaciones:

*a) Aplicación clínica*

La tecnología de interfaz cerebro-computadora (BCI) es un campo de interés creciente con aplicaciones médicas que van desde la prevención, detección y diagnóstico hasta restauración y rehabilitación.

➤ BCI para la prevención, detección y diagnóstico de enfermedades

El electroencefalograma (EEG) es un método que se puede utilizar para analizar la señal de ondas cerebrales humanas. Cada onda cerebral de EEG es única y tiene su propio patrón basado en el comportamiento o el estado emocional de uno. Así, por ejemplo, la adicción es un estado mental conductual, por lo que tendría una señal de ondas cerebrales<sup>138</sup>. La adicción al alcohol, la adicción a las drogas y la adicción al tabaco producen un patrón de EEG único. La importancia de este tipo de estudios para la prevención médica radica en la posible pérdida de función y disminución del nivel de alerta del individuo resultante del tabaquismo, de beber alcohol, o del consumo de drogas, cuestión que podría decantar en diversos escenarios, el más común, ser el protagonista de un accidente de tráfico<sup>139</sup>.

La función de monitoreo del estado mental de los sistemas BCI también ha contribuido a pronosticar y detectar problemas de salud como estructuras cerebrales anormales (como un tumor cerebral), trastornos convulsivos (como la epilepsia), trastornos del sueño (como la narcolepsia) e inflamación cerebral (como encefalitis). El tumor, que se genera a partir de la autodivisión descontrolada de las células, podría descubrirse utilizando EEG como una alternativa secundaria barata para MRI y CT-SCAN. Los sistemas de detección de tumores cerebrales y de identificación de cáncer de mamas basados en EEG han sido el tema principal de investigación en las últimas

---

<sup>138</sup> HANAFIAH, M., TAIB, M.N., & HAMID, N. (2010). *EEG pattern of smokers for Theta, Alpha and Beta band frequencies. IEEE Student Conference on. IEEE.* pp.320–23.

<sup>139</sup> SHRI, P., & SRIRAAM, N. (2012). *Eeg based detection of alcoholics using spectral entropy with neural network classifiers. In: Biomedical Engineering (ICoBE), International Conference on. IEEE;* pp. 89–93.

décadas<sup>140</sup>. Asimismo, se han propuesto sistemas que reconocen anomalías en el EEG asociadas con tumores cerebrales y ataques de epilepsia<sup>141</sup>.

La dislexia, uno de los trastornos cerebrales, se puede diagnosticar midiendo el comportamiento cerebral. Influye en la capacidad de lectura y aprendizaje. Su descubrimiento en una etapa temprana salva a los niños de problemas de autoestima y confianza en sí mismos y les permite adquirir sus habilidades y conocimientos básicos<sup>142</sup>.

Los trastornos del sueño se pueden detectar con la ayuda de BCI. Se han demostrado algunos métodos para implementar señales de EEG en la detección del trastorno de conducta del sueño (iRBD) idiopático de movimiento ocular rápido (REM), ya que se ha descubierto que iRBD es un fuerte predictor temprano de la enfermedad de Parkinson (EP).

Wei y otros investigadores han confirmado experimentalmente la relación entre el ciclo de la marcha humana y las señales de EEG mediante el uso de un sistema de medición de la presión plantar. Esta relación ayuda a predecir enfermedades como la discinesia, la neuropatía periférica y la enfermedad musculoesquelética<sup>143</sup>.

Recientemente, un número cada vez mayor de investigadores se ha esforzado por desarrollar herramientas prácticas para diagnosticar pacientes con esquizofrenia utilizando técnicas de aprendizaje automático aplicadas a biomarcadores de EEG. Aunque varios estudios muestran que las funciones de EEG a nivel de fuente se pueden aplicar potencialmente al diagnóstico diferencial de la esquizofrenia, la mayoría de los estudios han utilizado solo funciones de EEG a nivel de sensor, como la amplitud máxima de ERP y el espectro de potencia, para el diagnóstico de esquizofrenia basado en el aprendizaje automático<sup>144</sup>.

#### ➤ BCI para la restauración y rehabilitación

La mayoría de las integraciones e investigaciones de BCI se han centrado en aplicaciones médicas, con muchas BCI destinadas a reemplazar o restaurar el

---

<sup>140</sup> SELVAM, V.S., & SHENBAGADEVI, S. (2011). *Brain tumor detection using modified wavelet-ica scalp EEG and multilayer feed-forward neural network*. In: *Society for Engineering in Medicine and Biology, EMBC, IEEE Annual International Conference*. pp. 6104–09.

<sup>141</sup> SHARANREDDY, M., & KULKARNI, P. (2013). *Automated EEG signal analysis for identification of epilepsy seizures and brain tumour*. *J Med Eng Technol.*, vol.37( 8 ), pp. 511 – 519.

<sup>142</sup> FADZAL, C., MANSOR, W., & KHUAN, L. (2011). *Review of brain computer interface application in diagnosing dyslexia*. In: *Systems and Control Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, IEEE. pp.124–28.

<sup>143</sup> WEI, L., HONG, Q., YUE, H., & XI, C. (2010). *The research in a plantar pressure measuring system connected with eeg*. In: *Signal Processing (ICSP), IEEE 10th International Conference on*. pp. 434–37.

<sup>144</sup> CUÑA, M., HWANG, H.J., KIM, W., LEE, S.H., & IM, C.H. (2016). *Machine-learning-based diagnosis of schizophrenia using combined sensor-level and source-level EEG features*. *Esquifozfr. Res.*, vol.176, pp. 314–319.

funcionamiento del Sistema Nervioso Central (SNC) perdido por enfermedad o accidente.

Esta sustitución significa que puede reparar o reemplazar el funcionamiento del SNC perdido debido a enfermedades como parálisis y lesión de la médula espinal debido a un accidente cerebrovascular o traumatismo. La mioelectricidad, conocida como potencial de acción motora, que captura impulsos eléctricos en los músculos, ahora se usa en varias prótesis robóticas. *BOUSSETA Y OTROS* investigadores proporcionaron una tecnología experimental para controlar el movimiento de un brazo protésico robótico con imágenes mentales y mediante tareas cognitivas, que puede moverse en cuatro direcciones, como izquierda, derecha, arriba y abajo<sup>145</sup>.

Las personas que están gravemente discapacitadas por trastornos como parálisis cerebral, accidente cerebrovascular del tronco encefálico, lesiones de la médula espinal, distrofias musculares o neuropatías periféricas crónicas pueden beneficiarse de las BCI. Para ayudar a determinar el valor de las BCI para diferentes individuos, *WOLPAW Y OTROS* investigadores sugirieron que los posibles usuarios de BCI se clasifiquen según la extensión, en lugar de la etiología, de su discapacidad<sup>146</sup>. Evaluados de esta manera, los usuarios potenciales de BCI se dividen en tres grupos razonablemente distintos: 1) personas que no tienen un control neuromuscular útil detectable restante y, por lo tanto, están totalmente bloqueados; 2) personas que conservan solo una capacidad muy limitada de control neuromuscular, como movimientos oculares débiles o una ligera contracción muscular; y 3) personas que aún retienen un control neuromuscular sustancial y pueden usar fácilmente la tecnología de comunicación asistida convencional basada en músculos.

Todavía no está claro hasta qué punto las BCI pueden ayudar a las personas del primer grupo, aquellas que están totalmente bloqueadas (p. ej., con esclerosis lateral amiotrófica (ELA) en etapa avanzada o parálisis cerebral grave). La resolución de este problema requiere una evaluación extensa y prolongada de cada individuo para resolver problemas básicos de alerta, atención, capacidades visuales o auditivas y función cortical superior. Si bien se ha planteado la hipótesis de que el estado totalmente bloqueado constituye una condición única resistente a BCI<sup>147</sup>, el problema sigue sin resolverse en la actualidad. Vale la pena mencionar que los investigadores han

---

<sup>145</sup> BOUSSETA, R., EL OUAKOUAK, I., GHARBI, M., & REGRAGUI, F. (2018). *EEG Based Brain Computer Interface for Controlling a Robot Arm Movement Through Thought*. *IRBM*, vol.39, pp.129–135.

<sup>146</sup> WOLPAW, J.R., LOEB, G.E., ALLISON, B.Z., DONCHIN, E., HEETDERKS, W.J., *et al.*, (2006). *BCI meeting 2005-workshop on signals and recording methods*. *IEEE Trans. Sistema neural. rehabilitación Ing.*, vol.14, pp. 138-141

<sup>147</sup> BIRBAUMER, N. (2006). *Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control*, *Psychophysiology*, vol.43(6),pp.517-532

especulado que las personas de este grupo podrían retener la capacidad de uso de BCI si comienzan antes de quedar totalmente bloqueados<sup>148</sup>.

En la actualidad, las personas del segundo grupo constituyen la principal población de usuarios potenciales de los sistemas BCI actuales. Este grupo, que supera en número al primer grupo, incluye personas con pacientes con ELA en etapa avanzada que dependen de la ventilación artificial a medida que avanza su enfermedad, personas con accidentes cerebrovasculares del tronco encefálico y personas con parálisis cerebral grave. Por lo general, solo retienen movimientos oculares muy limitados, que se fatigan fácilmente y/o poco confiables u otra función muscular mínima y, por lo tanto, no pueden ser atendidos adecuadamente por la tecnología de comunicación asistida convencional basada en músculos. Para las personas de este grupo, los sistemas BCI pueden proporcionar comunicación y control básicos que son más convenientes y confiables que los proporcionados por la tecnología convencional<sup>149</sup>.

El tercer y más grande grupo de usuarios potenciales de BCI consiste en personas que retienen un control neuromuscular sustancial. Para la mayoría de este grupo, los sistemas BCI actuales, con sus capacidades limitadas, tienen poco que ofrecer. Estas personas suelen estar mucho mejor atendidas por la tecnología convencional. Sin embargo, algunos en este grupo, como aquellos con lesiones cervicales altas de la médula espinal, pueden preferir un BCI a los dispositivos de asistencia convencionales que cooptan el control muscular voluntario restante (p. ej., sistemas que dependen de la dirección de la mirada o EMG de los músculos faciales). En el futuro, a medida que las capacidades, la confiabilidad y la conveniencia de los sistemas BCI continúen mejorando, más personas en este grupo podrían encontrarlos valiosos y la cantidad de personas que usan BCI podría aumentar sustancialmente.

Las diferentes condiciones mencionadas anteriormente afectan el SNC de diferentes maneras, y las diferentes BCI dependen de diferentes aspectos de la actividad cerebral. Por lo tanto, algunas personas pueden estar mejor atendidas por una BCI que por otra. Por ejemplo, es posible que las personas que tienen un deterioro de la corteza sensoriomotora debido a una parálisis cerebral grave no puedan usar las BCI basadas en el EEG o en la actividad de una sola neurona de estas áreas corticales. En tales personas, los sistemas BCI que utilizan otros componentes EEG (p. ej. P300) o la actividad neuronal de otras regiones del cerebro podrían ser buenas alternativas.

De tal manera que, los posibles usos clínicos de las BCI se pueden clasificar en 1) control directo de las tecnologías de asistencia y 2) neurorrehabilitación. Dado que la BCI sirve como reemplazo de las vías neuromusculares normales, las aplicaciones de la BCI más obvias son aquellas que activan y controlan las tecnologías de asistencia que ya

---

<sup>148</sup> WOLPAW, J. et. al. (2006). *BCI meeting... Op. Cit. pp.138-141*

<sup>149</sup> *Ídem*

existen para permitir la comunicación y el control del entorno. Estas aplicaciones de BCI a la tecnología de asistencia abarcan las áreas de comunicación, control de movimiento, control ambiental y locomoción. Los posibles usos de las BCI en neurorehabilitación acaban de empezar a explorarse.

La *comunicación* para las personas que están "bloqueadas" probablemente representa el área más apremiante que necesita intervención con la tecnología BCI. Aunque se están desarrollando otras aplicaciones, restaurar la comunicación ha sido el enfoque principal de la comunidad de investigación de BCI hasta la fecha<sup>150</sup>.

Distinguidos unos de otros por las características electrofisiológicas específicas medidas, se han probado tres tipos de sistemas BCI basados en EEG en sujetos humanos con fines de comunicación, específicamente, aquellos basados en 1) potenciales corticales lentos (SCP), 2) evento P300- potenciales relacionados, y 3) ritmos sensoriomotores (SMR). Tanto el SCP BCI como el SMR BCI requieren una capacitación significativa de los usuarios para obtener un control suficiente de su actividad cerebral para producir señales que se puedan aplicar de manera efectiva al uso de BCI. Por el contrario, un BCI P300 mide la respuesta del cerebro a estímulos (visuales o auditivos) de especial importancia y requiere una formación mínima del usuario.

Los ritmos sensoriomotores, también registrados por EEG, también han demostrado proporcionar características adecuadas para la comunicación habilitada por BCI y han sido utilizados con éxito por varios grupos de investigación<sup>151</sup>.

El tercer tipo principal de comunicación BCI basada en EEG utiliza el potencial cerebral parejo P300 bien estudiado para indicar la respuesta a un estímulo destacado o infrecuente dentro de una corriente de estímulos estándar frecuentes.

La *restauración del control motor* en pacientes paralizados es otra aplicación clave de BCI y es el objetivo principal de muchos investigadores en el campo. La investigación en esta aplicación clínica es escasa y ha utilizado principalmente sistemas basados en SMR. *WOLPAW* ha demostrado un control de cursor de una, dos e incluso tridimensional utilizando un sistema SMR y ha realizado experimentos preliminares con el control SMR de un brazo robótico<sup>152</sup>. Estos experimentos indican que los sistemas SMR BCI podrían admitir el control multidimensional del movimiento de neuroprótesis motoras o un dispositivo ortopédico, como un brazo robótico. *PFURTSCHELLER* y sus

---

<sup>150</sup> NEUPER, C., MULLER, G.R., KUBLER, A., BIRBAUMER, N., & PFURTSCHELLER, G. (2003). *Clinical application of an EEG-based brain-computer interface: a case study in a patient with severe motor impairment*, *Clin. Neurophysiol*, vol.114(3), pp. 399-409.

<sup>151</sup> PFURTSCHELLER, G., MULLER-PUTZ, G.R., SCHLOGL, A., GRAIMANN, B., SCHERER, R., LEEB, R., *et al.* (2006). *15 years of BCI research at Graz University of Technology: current projects*, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol.14, pp. 205-210

<sup>152</sup> MCFARLAND, D.J., & WOLPAW, J.R. (2008). *Brain-Computer Interface Operation of Robotic and Prosthetic Devices*, *Computer*, vol.41(10), pp. 52-56

colegas probaron un BCI basado en SMR para la restauración del control motor en pacientes paralizados. Se entrenó a un paciente tetrapléjico para controlar una órtesis de mano accionada eléctricamente con señales de EEG registradas en la corteza sensoriomotora. Al aprender a generar tareas de imágenes motoras separables, este paciente pudo abrir y cerrar su mano paralizada con la órtesis de mano<sup>153</sup>.

La estimulación eléctrica funcional (FES) también se puede utilizar para restaurar la función motora en pacientes paralizados con la neurona motora inferior intacta y la función nerviosa periférica. Con el objetivo de mejorar aún más la restauración motora en pacientes paralizados, *PFURTSCHELLER* y sus colegas combinaron el SMR BCI con los sistemas FES y probaron el sistema combinado en dos pacientes con lesión de la médula espinal alta<sup>154</sup>.

El *control ambiental basado en BCI* podría mejorar en gran medida la calidad de vida de las personas con discapacidades graves. Las personas con discapacidades motoras severas a menudo están confinadas en sus hogares. Los medios efectivos para controlar sus entornos (p. ej., controlar la temperatura ambiente, la luz, las camas eléctricas, la televisión, etc.) aumentarían su bienestar y sentido de independencia. Un estudio piloto reciente de *CINCOTTI* intentó integrar la tecnología BCI en un sistema de control ambiental doméstico<sup>155</sup>. Con el control unificado a través de la tecnología BCI basada en EEG, el usuario puede operar de forma remota dispositivos domésticos como luces y bombillas de neón, televisores y equipos estéreo, una cama motorizada, una alarma acústica, un abridor de puertas y un teléfono, así como para monitorear el entorno circundante a través de cámaras inalámbricas. La validación clínica del prototipo del sistema tuvo lugar en un entorno doméstico simulado en un departamento de terapia ocupacional. Se probaron catorce sujetos normales sanos y cuatro sujetos que padecían atrofia muscular espinal tipo II (SMA II) o distrofia muscular de *Duchenne* (DMD). Los pacientes pudieron controlar el sistema con una precisión promedio de 60 a 75 % durante las últimas tres sesiones de prueba (8 a 12 sesiones en total). Los hallazgos preliminares de este estudio sugirieron que el autocontrol del entorno doméstico realizado con la tecnología BCI aumentó el sentido de independencia del paciente. Además, los cuidadores podrían aliviarse hasta cierto punto de la necesidad de estar continuamente presentes.

La *restauración de la locomoción independiente* es otro tema importante para las personas paralizadas. A la luz de esto, varios grupos de investigación de BCI han intentado desarrollar sillas de ruedas impulsadas por BCI para restaurar alguna forma

---

<sup>153</sup> *PFURTSCHELLER, G. et al. (2006). Op. cit.*

<sup>154</sup> *COYLE, S.T., WARD, E., & MARKHAM, C.M. (2007). Brain-computer interface using a simplified functional near-infrared spectroscopy system. J. Neural Eng., vol.4(3), pp. 219-226*

<sup>155</sup> *CINCOTTI, F., MATTIA, D., ALOISE, F., BUFALARI, S., SCHALK, G., ORIOLO, G., et al. (2008). Non-invasive brain-computer interface system: towards its application as assistive technology, Brain Res. Toro., vol.75(6), pp. 796-803*

de movilidad. Tanaka desarrolló una silla de ruedas eléctrica controlada por EEG<sup>156</sup>. Los comandos direccionales fueron detectados por EEG y luego se aplicaron al control directo de la silla de ruedas.

Además de sus usos para la comunicación y el control, los sistemas BCI también tienen el potencial de servir como herramientas terapéuticas para ayudar a las personas cuya función neuromuscular se ha visto afectada por un trauma o enfermedad a volver a aprender una función motora útil. La *neurorrehabilitación con sistemas BCI* promueve la recuperación funcional y puede mejorar la calidad de vida<sup>157</sup>. Esta aplicación específica de los sistemas BCI busca aumentar las terapias de rehabilitación actuales al reforzar y, por lo tanto, aumentar el uso efectivo de las áreas y conexiones cerebrales dañadas<sup>158</sup>. Este enfoque de rehabilitación se evaluó por primera vez con señales MEG en personas con accidentes cerebrovasculares y encontró una reorganización cortical después del entrenamiento basado en BCI.

En una revisión reciente, DALY Y WOLPAW clasificaron las posibles estrategias de aprendizaje motor basadas en BCI en dos categorías<sup>159</sup>. En el primero, se entrena a los pacientes para producir una actividad cerebral más normal para controlar la función motora. Esta estrategia se basa en la idea de que una actividad más normal dará como resultado una función del SNC más normal y, por lo tanto, mejorará el control motor. Dado que los resultados preliminares en pacientes con accidente cerebrovascular demuestran que pueden obtener el control de patrones específicos de actividad cerebral, se podría usar un BCI para mejorar este control midiendo y extrayendo características de EEG que se pueden traducir en retroalimentación para el usuario. Daly midió la actividad EEG de pacientes con accidente cerebrovascular antes y después de esta neurorehabilitación basada en EEG. Después de la intervención de reaprendizaje motor, se encontró que las características del EEG cambiaban en paralelo con la mejora de la función motora. Además, un estudio reciente de ENZINGER informó que la rehabilitación sensoriomotora mediante entrenamiento BCI e imágenes motoras mejoró la función motora después de una lesión del SNC<sup>160</sup>.

La segunda estrategia para producir un control motor mejorado es usar la salida de un BCI para activar un dispositivo que ayuda al movimiento. Este enfoque se basa en

---

<sup>156</sup> TANAKA, K., MATSUNAGA, K., & WANG, H.O. (2005). *Electroencephalogram-Based Control of an Electric Wheelchair*, *IEEE Trans. Robot.*, vol.21(4), pp. 762-766

<sup>157</sup> DOBKIN, B.H. (2007). *Brain-computer interface technology as a tool to augment plasticity and outcomes for neurological rehabilitation*, *J. Physiol.*, vol.579(3), pp.637-642

<sup>158</sup> MURASE, N., DUQUE, J., MAZZOCCHIO, R., & COHEN, L.G. (2004). *Influence of interhemispheric interactions on motor function in chronic stroke*, *Ann. Neurol.*, vol.55(3), pp. 400-409

<sup>159</sup> DALY, J.J., & WOLPAW, J.R. (2008). *Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation*, *Lancet Neurol.*, vol.7(11), pp. 1032-1043

<sup>160</sup> ENZINGER, C., ROPELE, S., FAZEKAS, F., LOITFELDER, M., GORANI, F., SEIFERT, T., *et al.*, (2008). *Brain motor system function in a patient with complete spinal cord injury following extensive brain-computer interface training*, *Exp. Res. cerebral.*, vol.190(2), pp. 215-223

la hipótesis de que la plasticidad del SNC inducida por la entrada sensorial producida durante la función motora mejorada proporcionada por el dispositivo conducirá a un control motor mejorado. En estudios anteriores, el entrenamiento de neurorehabilitación con dispositivos robóticos que asistieron el movimiento ha sido eficaz en pacientes con accidente cerebrovascular. Daly han realizado un trabajo preliminar prometedor que combina BCI con FES o robótica de asistencia para el reaprendizaje motor en pacientes con accidente cerebrovascular. La terapia basada en BCI podría proporcionar un complemento útil a los métodos estándar de neurorehabilitación y podría reducir los costos al reducir la necesidad de la presencia constante de un terapeuta de rehabilitación<sup>161</sup>.

### *b) Neuroergonomía*

La Neuroergonomía es una disciplina que nace de la integración entre la neurociencia y la ergonomía. La Ergonomía (tradicionalmente denominada “Factores Humanos” en Estados Unidos, abreviada como “HF/E” –*human factors/ergonomics*– es una disciplina científica que se ocupa de la comprensión de las interacciones entre los humanos y los demás elementos de un sistema. Por otra parte, la Asociación Internacional de Ergonomía (*International Ergonomics Association*) enfatiza su carácter aplicado y profesional añadiendo en su definición lo siguiente: “profesión que aplica teoría, principios, datos y métodos al diseño con objeto de optimizar el bienestar humano y el rendimiento global de un sistema”.

El psicólogo israelí *DANIEL KAHNEMAN* estableció los cimientos de la neuroergonomía con sus estudios sobre la dilatación de la pupila como índice de la sobrecarga mental de un individuo mientras desempeña una tarea cognitiva compleja<sup>162</sup>. La neuroergonomía utiliza los conocimientos sobre el cerebro para mejorar la interacción hombre-máquina, con énfasis en el diseño de dispositivos de vigilancia continua de variables psicofisiológicas (tasa cardíaca y respiratoria, sudoración, frecuencia de parpadeo, actividad muscular y cerebral) para predecir en los trabajadores estados cognitivos específicos (somnolencia, fatiga, baja alerta, falta de atención o emociones negativas) que resultan incompatibles con el desempeño de actividades de alto riesgo como el pilotaje de vehículos, el control aéreo o la supervisión de centrales nucleares.

Así, la neuroergonomía decanta en el estudio del cerebro humano en relación con el rendimiento en el trabajo y en el entorno cotidiano. El EEG se usa más ampliamente para medir los estados pasivos del cerebro. Más recientemente, fNIRS

---

<sup>161</sup> DALY, J.J., HOGAN, N., PEREPEZKO, E.M., KREBS, H.I., ROGERS, J.M., GOYAL, S., *et al.* (2005). *Response to upper-limb robotics and functional neuromuscular stimulation following stroke*, *J. Rehab. Res. Dev*, vol.42(6), pp.723-735

<sup>162</sup> KAHNEMAN, D. (1973). *Attention and effort*. London: Prentice Hall. Versión traducida al castellano: Kahneman, D. (1997). *Atención y esfuerzo*. Madrid: Biblioteca Nueva.

también ha demostrado ser un candidato viable para la detección de actividades cerebrales pasivas. Los sistemas BCI híbridos pueden brindar mejor información sobre la fatiga física, las funciones cognitivas, la carga de trabajo mental, la vigilancia y la fatiga mental de una persona. Esto puede ser útil para que la persona evite cargas de trabajo extremas y pérdida de vigilancia.

*c) Entornos inteligentes*

Como se mencionó anteriormente, el despliegue de señales cerebrales no es exclusivo del campo médico. Los entornos inteligentes, como las casas inteligentes, los lugares de trabajo o los medios de transporte, también podrían explotar las interfaces cerebro-computadora para ofrecer más seguridad, lujo y control fisiológico a la vida diaria de los humanos.

Actualmente, se está realizando mucha investigación en lo que se ha denominado los ambientes inteligentes. Estos involucran una inteligencia empotrada en el mismo entorno capaz de interactuar con el usuario de una manera autónoma, con el fin de facilitar la vida a las personas en diferentes campos. Uno de los aspectos clave de esta interacción son las interfaces hombre máquina que incluyen dispositivos vestibles o presentes en el propio entorno, y que miden aspectos que después se reflejan en la adaptabilidad del mismo entorno. Entre ellos se incluyen modificar la iluminación, calefacción, alarmas o subir/bajar persianas, etc. La BCI en este contexto proporciona un canal de comunicación directo con el ambiente para realizar órdenes de control sobre el mismo, y a su vez podría proporcionar información sobre el estado cognitivo y emocional de los usuarios, con lo que el entorno podría tomar decisiones más inteligentes adecuadas a cada persona. Este tipo de dispositivos están muy enfocados hacia la domótica, pero también hacia las personas con discapacidad, en donde el uso de este canal de comunicación con la vivienda es más necesario<sup>163</sup>.

Lin ha propuesto un sistema de control cognitivo llamado Sistema de control de ajuste automático ambiental de vida inteligente (BSLEACS, por sus siglas en inglés) basado en la interfaz de la computadora del cerebro. Supervisa el estado mental del usuario y adapta los componentes circundantes en consecuencia. Ha ampliado su funcionalidad con la participación de la red doméstica universal *plug and play* (UPnP). Por otro lado, se ha considerado la contribución ambiental circundante en la mejora de las aplicaciones domésticas basadas en BCI a través de la conciencia del contexto<sup>164</sup>.

---

<sup>163</sup> GARIPPELLI, G., GALAN, F., CHAVARRIAGA, R., FERREZ, P., LEW, E., & MILLAN, J. (2008). *The use of brain-computer interfacing for ambient intelligence*. LNCS, Springer Verlag.

<sup>164</sup> OU, C.Z., LIN, B.S., CHANG, C.J., & LIN, C.T. (2012). *Brain computer interface-based smart environmental control system*. In: *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP)*, Eighth International Conference on. IEEE; pp. 281–84.

El estudio de las ventajas de las BCI en entornos inteligentes está directamente relacionado con la neuroergonomía. Así, por ejemplo, el campo del transporte inteligente también se ha beneficiado de la función BCI de monitoreo del estado cognitivo. El comportamiento del conductor ha sido estudiado y se ha encontrado que la distracción y la fatiga son dos fuentes principales de la falta de atención del conductor, que se considera una causa importante de la mayoría de los accidentes de tráfico<sup>165</sup>. Kim ha presentado el reconocimiento de contexto multimodal para el sistema de conducción inteligente para predecir la concentración y el estrés mediante el análisis de las señales de ECG y EEG y el control de la velocidad del automóvil por el valor de concentración de las señales cerebrales<sup>166</sup>.

#### *d) Educación y autorregulación*

El *Neurofeedback* es un enfoque prometedor para mejorar el rendimiento del cerebro a través de la modulación de la actividad del cerebro humano. Invade los sistemas educativos, que utilizan señales eléctricas cerebrales para determinar el grado de claridad de la información estudiada. La interacción personalizada con cada alumno se establece de acuerdo con la respuesta resultante experimentada<sup>167</sup>.

Los fundamentos del *neurofeedback* están en la neurociencia básica y aplicada, y en la práctica clínica. El principio básico que rige esta aplicación es el de medir la actividad cerebral e identificar, gracias a un procesado del EEG, los patrones a potenciar del usuario. Si los patrones que reflejan la actividad cerebral son los adecuados, al individuo se le da un *feedback* positivo (visual, auditivo o somatosensorial), mientras que si no son los adecuados el *feedback* positivo se inhibe. De esta forma, por aprendizaje condicionado, se entrena el cambio en la actividad cerebral en la dirección que desea el terapeuta. El objetivo final es que los cambios en los patrones de actividad cerebral se reflejen en una mejora del comportamiento (en el caso de trastornos neurológicos) o una mejora de las capacidades personales (en el caso de *neurofeedback* dirigido a personas sanas). El principio básico del *neurofeedback* fue revelado a finales de los años sesenta por el Prof. STERMAN con su investigación en gatos<sup>168</sup>.

En este contexto hay dos grandes ramas de aplicación. En primera instancia está la dirigida al tratamiento de enfermedades neurológicas, en la cual se han tratado trastornos como el déficit de atención, la epilepsia, el autismo, el daño cerebral traumático; aunque solo los tratamientos para el déficit de atención y de la epilepsia

---

<sup>165</sup> DONG, Y., HU, Z., UCHIMURA, K., & MURAYAMA, N. (2011). *Driver Inattention Monitoring System for Intelligent Vehicles: A Review*. *Conference: Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, vol.12(2), pp. 596 - 614

<sup>166</sup> KIM, T., KIM, S., SHIN, D., SHIN, D. (2011). *Design and implementation of smart driving system using context recognition system*. In: *Computers & Informatics (ISCI), 2011 IEEE Symposium on*. IEEE, pp. 84–89.

<sup>167</sup> SORUDEYKIN KA. (2010). Una interfaz educativa cerebro-computadora. preimpresión de arXiv:1003.2660

<sup>168</sup> STERMAN, M.B. (1996). *Physiological origins and functional correlates of eeg rhythmic activities: implications for selfregulation*. *Biofeedback Self Regulation*, vol.21(1), pp.3–33.

han mostrado mejoras en el comportamiento de los pacientes con consolidación de las mismas a largo plazo. Aun así, dado el diseño intrínseco que tienen todos estos estudios, su aceptación médica se enfrenta a la gran dificultad de pasar los *tests* de placebo y los estudios *double-blind*, lo que hace difícil que estas terapias suban en las escalas de tratamiento médico. Recientemente se ha publicado un estudio en la revista de mayor factor en psicología y psiquiatría infantil que demuestra la efectividad del *neurofeedback* como tratamiento del déficit de atención en niños, superando uno de estos escollos<sup>169</sup>. En segunda instancia, se están utilizando estas estrategias para mejorar las capacidades de personas sanas en el desempeño de tareas. En este caso se trabajan aspectos como la ejecución más eficiente, el autocontrol, el mantenimiento de estados de gran concentración o foco, etc). Estos tratamientos están dirigidos a personas como atletas de elite y se han denominado de *peak performance*<sup>170</sup>.

Así, se ha estudiado el aprendizaje de la autorregulación a través de BCI no invasiva para mejorar los enfoques terapéuticos cognitivos, analizando la viabilidad de la resonancia magnética funcional para la regulación emocional, y el uso de BCI híbrido rtfMRI-EEG para combatir el sentimiento de depresión, así como otros trastornos neuropsiquiátricos a través de sesiones de entrenamiento. Además, la inteligencia emocional basada en EEG se ha aplicado en competiciones deportivas para controlar el estrés que las acompaña<sup>171</sup>.

#### *e) Neuromarketing y neuropolítica*

La neurociencia cognitiva, el marketing, el *marketing mix* y el *neuromarketing* son disciplinas que convergen para proporcionar una mirada específica y detallada del comportamiento humano a la hora de comprar. Por un lado, el marketing hace referencia al conjunto de técnicas y pasos, que parten del conocimiento de un producto o un servicio, y de su usuario; con el fin de poner a disposición de los compradores el producto en tiempo, manera, forma y precio<sup>172</sup>.

Del mismo modo, las empresas aplican la estrategia del *marketing mix* con el fin de posicionarse, analizando cuatro variables básicas: producto, precio, distribución y promoción. Finalmente, el neuromarketing aplicando las técnicas de las neurociencias,

---

<sup>169</sup> GEVENSLEBEN, B., HOLL, B., ALBRECHT C., VOGEL D., SCHLAMP O., KRATZ P., STUDER A., ROTHENBERGER G.H., & MOLL H. HEINRICH (2009). *Physiological origins and functional correlates of eeg rhythmic activities: implications for self-regulation*. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol.50(7), pp. 780–789

<sup>170</sup> VERNON, D. (2005). *Can neurofeedback training enhance performance? an evaluation of the evidence with implications for future research*, n°4, p.347

<sup>171</sup> MARQUEZ, B.Y., ALANIS, A., LOPEZ, M.A., & MAGDALENO-PALENCIA, J.S. (2012). *Sport education based technology: Stress measurement in competence*. In: *e-Learning and e-Technologies in Education (ICEEE), 2012 International Conference on*. IEEE; pp. 247–52.

<sup>172</sup> GUIU, D. (2016) Definición de marketing, sinónimos de marketing, tipos de marketing y aplicaciones de marketing. [consulta: 5 enero de 2024]. Disponible en <http://www.socialetic.com/definicion-de-marketing.html>.

estudia los efectos de la publicidad en el cerebro y en qué medida esto afecta a la conducta de los posibles clientes<sup>173</sup>.

Las neurociencias entienden el comportamiento a partir de la relación entre el cerebro y la conducta mientras que el marketing se centra en la satisfacción de necesidades desde las lógicas del consumo. Como se afirmó anteriormente, la unión de estas dos áreas permitió que el neuromarketing emergiera dentro de la sociedad actual como una estrategia sutil y certera para influenciar o determinar la toma de decisiones de compra de cualquier individuo, como resultado de la manipulación consciente y deliberada de determinados procesos senso-perceptuales, psicofisiológicos, neurofisiológicos, y neuropsicológicos o neurocognitivos de distinto orden<sup>174</sup>.

De este modo el neuromarketing conoce y opera con precisión los procesos cerebrales comprometidos en el comportamiento y en la toma de decisiones de los sujetos.

Ahora bien, cabe mencionar que la publicidad es uno de los componentes más importantes del Marketing y es por ello que se ha constituido en un área de estudio que ha ido adquiriendo gran importancia en los últimos años, ya que es por medio de esta que se empieza a promover una sociedad de consumo desaforado a partir de necesidades irreales tales como la inclusión a través del prestigio que otorga el uso de ciertas marcas y la imitación de “modelos”.

Así, la persuasión publicitaria es uno de los conceptos que más interés despierta cuando se sopesa la ética del neuromarketing, así como la evolución de las múltiples estrategias que se utilizan para alcanzar sus objetivos.

Algunas de las técnicas utilizadas por el neuromarketing para indagar los sentimientos y creencias de los consumidores de forma inconsciente son las entrevistas basadas en la generación de imágenes y metáforas, mapas de inteligencia, estudio de latencias de respuesta y la *neuroimaging*, cuestión esta última que es de gran relevancia por su directa relación con la BCI.

Como ya hemos visto sucintamente, los estudios de neuroimagen mediante tomografía por emisión de positrones o de fotones simples y la imagen de resonancia magnética (PET, SPECT, MRI) o *neuroimaging*, se refiere a las herramientas que utilizan las neurociencias, a partir de la aplicación de tecnologías para identificar las zonas activadas en el cerebro tras la exposición a diferentes estímulos tales como una publicidad. Las técnicas de neuroimagen, permiten estudiar la correlación entre una determinada actividad cognitiva y la activación de determinados sistemas neurales, lo

---

<sup>173</sup> CORTINA, A. (2011). *Neuroética y Neuropolítica. Sugerencias para la educación moral*. Madrid: Tecnos.

<sup>174</sup> KOLB, B., & WHISHAW, I. (2006). *Neuropsicología humana*. Ed. Médica Panamericana

que facilita la identificación de estructuras cerebrales que subyacen a determinadas capacidades o funciones cognitivas.

La imagen de resonancia magnética funcional (RMf), detecta las zonas del cerebro que se activan ante cada estímulo para luego localizar y cuantificar actividades mentales.

Adicionalmente, se presentan técnicas de estimulación multimodal o transmodal, relacionadas con el uso de aromas, colores y sonidos, para asociarlos tanto con sensaciones y motivaciones como con productos, con el mensaje que transmiten los anuncios publicitarios, y con la posibilidad de medir los efectos generados a partir de olores, sonidos, sabores e imágenes por medio de gestos faciales (*neuroscint, neurolinguistics, sensometrics*, respectivamente). Un claro ejemplo de la obtención de imágenes funcionales por resonancia magnética es el experimento de *MC CLURE Y READ MONTAGUE*. Éstos aplicaron el sistema RMf a participantes que probaban Pepsi-Cola y Coca-Cola, dando como resultado una preferencia a nivel sensorial por Pepsi pero una mayor activación de zonas cerebrales asociadas con los juicios morales al probar Coca-Cola<sup>175</sup>.

En las últimas décadas, varios autores han investigado la capacidad de los sujetos para memorizar y recuperar información “comercial” sensible observada durante un spot televisivo<sup>176</sup>. Por otro lado, un número creciente de laboratorios de investigación se dedican a reconocer las áreas cerebrales que se activan durante la observación de figuras y videos de políticos, campo que la mayoría denomina Neuropolítica<sup>177</sup>. Este intenso movimiento científico ha animado a algunas empresas y universidades a interesarse seriamente por la actividad cerebral durante la realización de imágenes de políticos y comerciales de televisión.

#### *f) Juegos y entretenimiento*

La investigación de la interfaz cerebro-computadora ha estado motivada durante años por el deseo de proporcionar a las personas paralizadas nuevas habilidades motoras y de comunicación, para que puedan interactuar nuevamente con el mundo exterior. Durante los últimos años, la investigación de BCI se ha estado moviendo hacia aplicaciones para personas sanas. Las razones de su rango van desde proporcionar aplicaciones para aumentar la calidad de vida hasta los beneficios comerciales de un grupo objetivo tan grande como el de los juegos. En especial, este grupo recibe mucho interés, ya que los jugadores suelen estar entre los primeros en adoptar cualquier nueva

---

<sup>175</sup> UFRE, E. (2009). Neuroimágenes en la investigación de mercados. *Revista científica pensamiento y gestión*, n°26, pp.73-93.

<sup>176</sup> IOANNIDES, A.A., LIU, L., THEOFILOU, D., DAMMERS, J., *et al.* (2000). *Real Time Processing of Affective and Cognitive Stimuli in the Human Brain Extracted from MEG Signals*. *Brain Top*, vol.13, pp.1-19

<sup>177</sup> "Centro de Neuropolítica". [consulta: 05 de enero de 2024]. Disponible: <http://www.neuropolicy.emorv.edu/>

tecnología y están dispuestos a esforzarse en aprender a trabajar con ella, si eventualmente puede proporcionar alguna ventaja<sup>178</sup>. Además, gran parte de la población en general juega, por poco que sea.

Así, el salto cualitativo obtenido por el uso de la BCI en estas tecnologías es enorme, por lo que se espera un gran retorno por el volumen de negocio que maneja este mercado. Además, los estudios de mercado señalan que este será el canal por el que primero se introduciría esta tecnología.

La combinación de las características de los juegos existentes con las capacidades de control del cerebro ha sido objeto de muchas investigaciones, que tienden a proporcionar una experiencia de entretenimiento multicerebro.

*GABE NEWELL*, gerente de la empresa estadounidense de juegos *Valve Corporation* ha manifestado que Valve está trabajando actualmente en un proyecto de software BCI de código abierto, que permite a los desarrolladores comenzar a interpretar las señales que se leen de los cerebros de las personas usando hardware como cascos VR (realidad virtual) modificados<sup>179</sup>.

*Valve* ha estado trabajando con auriculares *OpenBCI*. *OpenBCI* dio a conocer un diseño de auriculares en noviembre llamado *Galea*, diseñado para funcionar junto con auriculares VR como *Valve's Index*.

Los datos útiles a los que se puede tener acceso mediante estas tecnologías combinadas consisten en lecturas del cuerpo y el cerebro del jugador, que pueden usarse para saber si el jugador está emocionado, sorprendido, triste, aburrido, divertido y asustado, entre otras emociones.

Los desarrolladores pueden usar las lecturas para mejorar la inmersión y personalizar lo que sucede durante los juegos, como aumentar un poco la dificultad si el sistema se da cuenta de que el jugador se está aburriendo.

Además de solo leer las señales cerebrales de las personas, *NEWELL* también discutió la realidad del futuro cercano de poder escribir señales en la mente de las personas, para cambiar cómo se sienten o brindar imágenes mejores que las reales en los juegos. Por el momento, las personas aceptan que sus sentimientos son exactamente como se sienten, pero *Newell* dice que las BCI pronto permitirán la edición digital de estos sentimientos, lo que podría ser tan fácil como usar una aplicación.

---

<sup>178</sup> NIJHOLT, A. (2008). *Bci for games: A 'state of the art' survey*. *Lecture Notes in Computer Science*.

<sup>179</sup> APPLEBY, L. (24 de enero de 2021). *New Zealand*. Disponible en <https://www.1news.co.nz/2021/01/25/gabe-newell-says-brain-computer-interface-tech-will-allow-video-games-far-beyond-what-human-meat-peripherals-can-comprehend/> [consulta: 8 de mayo 2022]

En el mismo sentido, NIJHOLT, asevera que, hay dos áreas principales relevantes para el desarrollo de BCI en juegos y entretenimiento<sup>180</sup>:

1. para recopilar información de la actividad cerebral que nos informe sobre el estado cognitivo del usuario [...]
2. desarrollar aplicaciones donde la información derivada de la actividad cerebral nos permita controlar una aplicación.

El primero es particularmente interesante en el contexto de la computación afectiva, es decir, ajustar los procesos informáticos al estado emocional del usuario. De esa forma, es posible una adaptación personalizada de un juego o una interfaz al usuario para, por ejemplo, aumentar o disminuir la dificultad de una tarea en un juego. El segundo el área de aplicación brinda al jugador oportunidades de control de juego novedosas y únicas. Debido al mercado altamente competitivo, la industria de los juegos y el entretenimiento da la bienvenida a tecnologías innovadoras e incluso aparentemente inusuales, como la tecnología de captura de movimiento que ingresó con éxito al mercado masivo con la plataforma de juegos Wii de Nintendo en 2006.

Ya existen varios prototipos impresionantes que permiten a los usuarios navegar en escenas virtuales o manipular objetos virtuales únicamente por medio de su actividad cerebral, registrada en el cuero cabelludo a través de electrodos de electroencefalografía (EEG). Mientras tanto, las tecnologías de realidad virtual (VR) brindan condiciones motivadoras, seguras y controladas que permiten mejorar el aprendizaje de BCI, así como la investigación de las respuestas cerebrales y los procesos neuronales involucrados.

Las tecnologías de realidad virtual y los videojuegos pueden ser poderosos compañeros de BCI. Los investigadores han demostrado que las BCI proporcionan dispositivos de interacción adecuados para aplicaciones de realidad virtual y videojuegos<sup>181</sup>. Por otro lado, la comunidad ahora acepta ampliamente que la realidad virtual es un medio prometedor y eficiente para estudiar y mejorar los sistemas BCI.

Así, investigadores del *University College Dublin* y *MediaLabEurope* han creado *MindBalance*, un videojuego que utiliza BCI para interactuar con mundos virtuales. Como muestra la Figura 16, el juego consiste en mover un personaje animado en 3D dentro de un entorno virtual. El objetivo es obtener un control unidimensional del equilibrio del personaje en la cuerda floja utilizando solo el EEG del jugador. El BCI desarrollado utiliza el SSVEP generado en respuesta a patrones de tablero de ajedrez de

---

<sup>180</sup> NIJHOLT, A. (2009). *BCI for Games: A 'State of the Art' Survey*. In: *Entertainment Computing - ICEC 2008*, edited by S.M. Stevens and S.J. Saldamarco. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp.225-228

<sup>181</sup> KREPKE, R., et al., (2007). "The Berlin Brain-Computer Interface (BBCI): Towards a New Communication Channel for Online Control in Gaming Applications," *J. Multimedia Tools and Applications*, vol.33(1), pp. 73-90

inversión de fase. El SSVEP simplifica drásticamente los métodos de procesamiento de señales para que los usuarios requieran poca o ninguna capacitación<sup>182</sup>.



*Imagen 26. Mindbalance videojuego  
Fuente: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)*

El juego coloca un tablero de ajedrez a cada lado del personaje. Estos tableros de ajedrez tienen inversión de fase a 17 y 20 Hz. Cada juego comienza con un breve período de calibración. Esto requiere que el sujeto preste atención a los tableros de ajedrez izquierdo y derecho, como lo indican las flechas, durante 15 segundos cada uno. El sistema utiliza los datos registrados para calibrar el BCI y adaptar sus parámetros al EEG del jugador actual. Este proceso se repite tres veces.

INRIA, que ofrece aplicaciones de entretenimiento y neuroretroalimentación mejorada en realidad virtual, ha diseñado varios sistemas BCI que brindan interacción con aplicaciones de realidad virtual. Uno, llamado "usar la fuerza", se inspiró en una secuencia en *Star Wars*. Se pidió a los participantes en el experimento INRIA que controlaran el despegue de una nave espacial virtual utilizando movimientos reales o imaginarios de los pies. El sistema se basó en un BCI simple pero asíncrono. Los investigadores realizaron un estudio a gran escala y evaluó esta aplicación con 21 sujetos ingenuos. Estudiaron tanto el rendimiento como las preferencias de los sujetos en una situación desafiante: una primera sesión, utilizando un solo electrodo de EEG, sin aprendizaje humano o automático y durante una exhibición pública<sup>183</sup>.

<sup>182</sup> LALOR, E., *et al.* (2005). "Steady-State VEP-Based Brain Computer Interface Control in an Immersive 3-D Gaming Environment," *EURASIP J. Applied Signal Processing*, vol.19, pp. 3156-3164.

<sup>183</sup> LOTTE, L., RENARD, Y., & LÉCUYER, A. (2008). "Self-Paced BrainComputer Interaction with Virtual Worlds: A Quantitative and Qualitative Study 'Out-Of-The-Lab,'" *Proc. 4th Int'l Brain-Computer Interface Workshop and Training Course*, to appear.

Actualmente, los primeros prototipos comerciales que están persiguiendo de manera muy agresiva el mercado de los videojuegos son *Emotiv Epoc* y *Neurosky*.

*Emotiv Epoc* de *Emotiv Systems* es una interfaz cerebro computadora que permite la detección de señales neuronales en una frecuencia determinada mediante la utilización de sensores para la detección de señales bioeléctricas producidas por el cerebro permitiendo la identificación de pensamientos, sentimientos y expresiones. El *Emotiv Epoc* está diseñado para la investigación escalable y contextual del cerebro, registrando y midiendo las ondas cerebrales de un individuo en tiempo real<sup>184</sup>.

El *Emotiv Epoc* es una BCI con 14 canales (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4) y dos referencias (CMS/DRL) como alternativas de procesamiento izquierdo/derecho. Sus sensores están compuestos por almohadillas de fieltro empapadas con solución salina, la conectividad es inalámbrica y contiene un receptor USB que sirve para cambiar la configuración de los auriculares con una banda de 2.4 GHz.

En cuanto a las señales EEG el hardware utiliza un método de muestreo secuencial simple con convertidores de analógico a digital (ADCs) en el que se tienen 2048 muestreos internos a 128 SPS o 256 SPS que puede configurar el usuario. Además, la resolución es de 14 bits y el ancho de la banda va de 0.16 a 43 Hz; por otro lado, el hardware contiene un filtrado de 5to orden y la entrada referida es de 8400 $\mu$ V (pp).

*Emotiv Epoc* es capaz de detectar sensaciones de emoción, compromiso (*engagement*), relajación, interés, estrés y enfoque y algunas expresiones faciales como parpadeo, guiño, sorpresa, fruncimiento del seño, sonrisas, entre otros. El sistema también incluye un giroscopio electrónico capaz de detectar con mucha precisión los movimientos de la cabeza del usuario y traducirlos a movimientos del mouse en la pantalla.

El programa se inicia en el *EPOC Control Panel*, el cual consta de dos partes. En la parte superior se encuentra el *EmoEngine Status Panel* donde se muestra el estado de la conexión inalámbrica al *EPOC Neuroheadset*, nivel de la batería del transmisor y el nombre del usuario activo. La parte inferior contiene el monitor de calidad de contacto de los sensores donde se detalla visualmente el estado actual de cada uno de los electrodos. Una vez el usuario ha logrado obtener señales apropiadas de la mayor

---

<sup>184</sup> EMOTIV EPOC (2020). Disponible en <https://www.emotiv.com/epoc/#tab-description>

cantidad de sensores posibles, entonces puede pasar a la configuración de acciones expresivas en el *EPOC Expressiv™ Suite* y cognitivas en el *EPOC Cognitiv™ Suite*.

En el panel *Expressiv™ Suite*, el usuario para sus gestos faciales a una representación virtual por medio de un avatar (ente virtual). Acciones como mirar a un lado, pestañear, guiñar un ojo, levantar las cejas, apretar los dientes y sonreír activan la representación de la misma acción en el avatar. En el *Expressiv™ Suite* el sistema interpreta las señales electroencefalográficas (EEG) generadas al realizar un gesto facial (ej. sonreír) e identifica esas señales en una base de datos de EEGs. Al lograr un pareo apropiado, el programa activa en el avatar la representación de un gesto facial correspondiente. El sistema también permite enlazar acciones de teclado a la detección de los gestos faciales por medio de la aplicación *EmoKey* (ej. sonreír puede enviar al teclado la secuencia :) o mirar hacia el lado derecho puede presionar la flecha direccional derecha en el teclado).

El panel *Cognitiv™ Suite*, mide la actividad cerebral del usuario en tiempo real para detectar un intento consciente de ejecutar una acción física particular en un objeto real o virtual. El sistema es capaz de reconocer hasta 13 acciones diferentes: 6 movimientos direccionales, 6 rotaciones y la acción de “desaparecer”. El usuario puede elegir hasta 4 acciones para ser reconocidas simultáneamente además de la acción “neutral” (no acción) que es obligatoria. Inicialmente el sistema es adiestrado al analizar las ondas cerebrales del usuario y crea una firma particular para cada una de las acciones (neutral y 4 acciones elegidas). La primera acción a adiestrar es la “neutral” y consiste sólo en relejarse y poner la mente en blanco. Luego, si la persona selecciona por ejemplo la función de empujar (*push*), el adiestramiento consiste en imaginar o visualizar la acción consciente de empujar un cubo virtual que aparece en la pantalla. Aumentar el número de funciones adiestradas aumenta exponencialmente la complejidad de mantener control consciente de las acciones. Al igual que en el *Expressiv™ Suite*, el *EmoKey* puede ser asociado a acciones mentales (ej. el imaginar “arriba” puede activar la tecla direccional de arriba en el teclado).

El sistema incluye además otras dos aplicaciones: el *Affectiv™ Suite* y el *Mouse Emulator*. El *Affectiv™ Suite* es un tipo de *neuro-feedback* que mide y representa gráficamente diversas respuestas emocionales (ej. excitación/calma, interés/desinterés, meditación). Esta aplicación no provee ninguna función de control y sólo sirve para monitorear estados mentales. Por último, la aplicación *Mouse Emulator* hace uso de un giroscopio integrado al *EPOC Neuroheadset* para permitir control del mouse de la computadora mediante los movimientos de la cabeza del usuario.

*SON OF NOR* y *WORLD OF WARCRAFT*, son unos de los videojuegos configurables para ser compatible con los auriculares Emotiv EPOC. Usando el EPOC, los jugadores de

*Son of Nor* pueden configurar ciertas ondas cerebrales para activar ciertos ataques y hechizos mágicos, permitiendo, así, el control de la telequinesis y terraformación. Además, el videojuego el visor Oculus Rift VR y la tecnología de seguimiento ocular Tobii Eye X que trabaja con los ojos de un usuario para permitir que los objetos sean manipulados con la mirada humana, al mismo tiempo que apunta a los enemigos con solo una mirada.



Imagen 27. *Son of Nor*  
Fuente: [www.gamestar.de](http://www.gamestar.de)

Asimismo, Con una *interfaz* de EEG y unas pequeñas modificaciones del programa, ya es posible controlar mentalmente el avatar de *World of Warcraft*, un conocido videojuego de rol *online* de gran éxito comercial.

De tal manera que, *Emotiv Epoc* puede ser configurable en cualquier tipo de juego de roles. Está disponible en su página web por un valor de 849 dólares<sup>185</sup>, y está siendo ampliamente adquirido y utilizado en investigaciones y proyectos universitarios a nivel mundial.

En 2007, *NeuroSky* lanzó el primer EEG asequible para el consumidor junto con el juego *NeuroBoy*. Este fue también el primer dispositivo EEG a gran escala en utilizar tecnología de sensor seco. *Neuroboy* usa los poderes telequinéticos especiales de los jugadores para empujar, jalar, levantar o quemar objetos. Los diferentes objetos en el mundo pesan cantidades diferentes, por lo que se deberá perfeccionar el músculo mental para recoger los artículos más pesados.

---

<sup>185</sup> Véase <https://www.emotiv.com/product/emotiv-epoc-x-14-channel-mobile-brainwear/>



*Imagen 28. Auriculares Mindware Mobile NeuroSky  
Fuente: [www.amazon.com](http://www.amazon.com)*

Las familias de productos *NeuroSky*<sup>®</sup> constan de componentes de *hardware* y *software* para una integración sencilla de esta tecnología de biosensor en aplicaciones finales industriales y de consumo.

Este dispositivo de interfaz cerebro-computadora convierte las ondas cerebrales en acciones, desbloqueando nuevos mundos de interactividad. *MindWave Mobile* informa el estado mental del usuario en forma de algoritmos *eSense™* de atención y meditación patentados por *NeuroSky*, junto con ondas sin procesar e información sobre las bandas de frecuencia de ondas cerebrales. *NeuroSky MindWave Mobile* se puede utilizar con videojuegos compatibles, software de investigación o una serie de otras aplicaciones para mejorar la experiencia del usuario<sup>186</sup>.

En 2020, *NextMind* lanzó un kit de desarrollo que incluye un auricular EEG con electrodos secos a \$399 (dólares)<sup>187</sup>. Este pequeño dispositivo funciona en conjunto con los sistemas de realidad virtual existentes, uniéndose a las correas situadas en la parte posterior del casco de los usuarios y agregando muy poco peso a los auriculares de realidad virtual. Y aunque es completamente no invasivo, todavía tiene una gran cantidad de sensores de electrodos secos altamente sensibles que leen la actividad de su cerebro y, usando inteligencia artificial, los traduce en comandos digitales dentro del mundo VR.

---

<sup>186</sup> NEUROSKY, (2021). Disponible en <https://manuals.plus/es/neurosky/neurosky-mindwave-mobile-user-guide#axzz7TDZua4bc> [consulta: 09 de mayo 2022]

<sup>187</sup> "*NextMind envía su kit de desarrollo de interfaz de computadora cerebral en tiempo real por \$ 399*". *VentureBeat*. 8 de diciembre de 2020. [consulta: 8 de mayo 2022].



*Imagen 29. Dispositivo Nextmind  
Fuente: [www.tecnoneo.com](http://www.tecnoneo.com)*

El dispositivo se puede jugar con algunas aplicaciones de demostración o los desarrolladores pueden crear sus propios casos de uso utilizando el kit de desarrollo de software provisto.

Por otro lado, algunos juegos serios de EEG se han empleado para el control emocional y/o la rehabilitación neuroprotésica. Contienen una nueva idea de juego o una modificada. TAN Y NIJHOLT describieron el juego *Brainball* que pretende reducir el nivel de estrés. Los usuarios solo pueden mover la pelota relajándose; por lo tanto, es más probable que el jugador más tranquilo sea el ganador y, por lo tanto, aprendería a controlar su estrés mientras se divierte<sup>188</sup>.

Hoy en día, los sistemas de desarrollo para videojuegos, la realidad virtual y la realidad aumentada se utilizan para crear aplicaciones sofisticadas con un esfuerzo relativamente pequeño, ya que incluyen una gran cantidad de componentes listos para ser usados junto con una metodología de desarrollo bien probada.

---

<sup>188</sup> TAN, D.S., & NIJHOLT, A. (2010). *Brain-computer interfaces: applying our minds to human-computer interaction* Springer.

*g) Seguridad, identificación y autenticación*

La biometría es el estudio de métodos automáticos para el reconocimiento único de humanos basados en uno o más rasgos conductuales o físicos intrínsecos, es decir identificación. En un contexto informático, se realiza mediante la aplicación de técnicas matemáticas y estadísticas sobre los rasgos físicos o de conducta de un individuo, para verificar identidades o para identificar individuos. Dentro de las características están las físicas (las huellas dactilares, las retinas, el iris, los patrones faciales, de venas de la mano o la geometría de la palma de la mano, la estructura cerebral) y las de comportamiento (la firma o el paso).

Los desarrollos en tecnología video digital, infrarrojos, rayos X, tecnologías inalámbricas, ADN, dotan al sistema con nuevos métodos para buscar e investigar bastas bases de datos individuales y colectivas de información sobre la población en general. Una de las nuevas técnicas es la identificación y uso de las ondas cerebrales por medio de una BCI para reconocimiento único de rasgos humanos, un nuevo método para identificar individuos usando señales del cerebro<sup>189</sup>.

El uso del electroencefalograma (EEG) como biométrico es relativamente nuevo en comparación con otros biométricos. *POULUS* propuso un método que utiliza el modelado autorregresivo de las señales de EEG y la cuantificación de vector lineal (LVQ) NN para clasificar a un individuo como distinto de otros individuos con 72-80% de éxito<sup>190</sup>. Pero no se intentó el método para reconocer a cada individuo en un grupo. *PARANJAPE* usó modelos AR de EEG con análisis discriminante para identificar individuos con una precisión de clasificación que oscila entre el 49 y el 85 %<sup>191</sup>. Los métodos utilizaron señales de EEG registradas mientras los sujetos descansaban con los ojos cerrados y con los ojos cerrados o abiertos.

Muy relacionado con este aspecto esta la seguridad y almacenamiento de la información cuyo acceso se realiza previa autenticación (mucho de la información que manejamos diariamente está protegida con una contraseña). Una aplicación de la BCI que se ha comenzado a explorar recientemente es la autenticación de individuos por medio de una contraseña personal que consiste en un conjunto de pensamientos<sup>192</sup>.

---

<sup>189</sup> POULOS, M., RANGOSSI, M., CHRISSICOPOULOS, V., & EVANGELOU, A. (1999). *Person identification based on parametric processing on the eeg. Proceedings of the Sixth International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, pp. 283-286

<sup>190</sup> *Ídem*

<sup>191</sup> R. B. PARANJAPE, J. MAHOVSKY, L. BENEDICENTI, & KOLES, Z. (2001). "The Electroencephalogram as a Biometric," *Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol.2, pp. 1363-1366

<sup>192</sup> MARCEL, S., & MILLAN, J.R. (2007). *Person authentication using brainwaves (EEG) and maximum a posteriori model adaptation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - Special Issue on Biometrics*.

Se ha demostrado en estudios previos que el patrón de ondas cerebrales de cada individuo es único y que el electroencefalograma (EEG) se puede utilizar para la identificación biométrica<sup>193</sup>. Sin embargo, la BCI también abre la puerta a las investigaciones sobre su utilización para la autenticación de personas.

La autenticación de personas tiene como objetivo aceptar o rechazar a una persona que reclama una identidad, es decir, comparar datos biométricos con una plantilla, mientras que el objetivo de la identificación de personas es comparar los datos biométricos con todos los registros de una base de datos.

Los sistemas de seguridad involucran autenticación basada en conocimiento, basada en objetos y/o basada en biometría. Han demostrado ser vulnerables a varios inconvenientes, como una contraseña simple e insegura, navegación por el hombro, delitos de robo y datos biométricos cancelables<sup>194</sup>. La biometría cognitiva o la electrofisiología –donde solo las modalidades que utilizan bioseñales (como las señales cerebrales) se utilizan como fuentes de información de identidad– brinda una solución para esas vulnerabilidades<sup>195</sup>. La motivación detrás de explorar la viabilidad de la electrofisiología es que las bioseñales no pueden ser adquiridas casualmente por observadores externos. También pueden ser de gran valor para pacientes discapacitados o usuarios a los que les falta el rasgo físico asociado<sup>196</sup>. Esto hace que dichas señales sean difíciles de sintetizar y, por lo tanto, mejora la resistencia de los sistemas biométricos a los ataques de suplantación de identidad. Además, el electroencefalograma (EEG), como modalidad biométrica, podría usarse para enviar advertencias encubiertas cuando el usuario autorizado se encuentra bajo condiciones de forzamiento externo<sup>197</sup>.

#### *h) Ingeniería militar*

Los avances continuos en la tecnología BCI son especialmente pertinentes en el entorno militar, dado el potencial de las aplicaciones terapéuticas para restaurar la función después de una lesión en combate y para el uso en evolución de dispositivos BCI en operaciones militares y mejora del rendimiento.

---

<sup>193</sup> PALANIAPPAN, R., & RAVI, K. (2003). *A new method to identify individuals using signals from the brain. Proceedings of the 4th International Conference on Information Communications and Signal Processing* p. 15.

<sup>194</sup> KHALIFA, W., SALEM, A., ROUSHDY, M., & REVETT, K. (2012). *A survey of EEG based user authentication schemes. In: Informatics and Systems (INFOS), 8th International Conference on. IEEE; p. BIO–55.*

<sup>195</sup> SVOGOR, I., & KISASONDI, T. (2012). *Two factor authentication using eeg augmented passwords. In: Information Technology Interfaces (ITI), Proceedings of the ITI 34th International Conference on. IEEE; pp. 373–78.*

<sup>196</sup> REVETT K., DRAVI, F., & SURLANTZIS, K. (2010). *Biosignals for user authentication-towards cognitive biometrics? In: Emerging Security Technologies (EST), International Conference on. IEEE; p. 71–76.*

<sup>197</sup> SU, F., ZHOU, H., FENG, Z., & MA, J. (2012). *A biometric-based covert warning system using EEG. In: Biometrics (ICB), 5th IAPR International Conference on. IEEE; p. 342–47.*

La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de los Estados Unidos (DARPA), ha financiado una serie de proyectos BCI desde principios de 1970. Estos proyectos están orientados en dos direcciones, por un lado, el desarrollo de aplicaciones con orientación clínica; y por otro, aplicaciones orientadas a la mejora de las operaciones militares<sup>198</sup>.

Se ha utilizado esta tecnología para desarrollar ayudas técnicas a soldados que han sufrido lesiones muy graves en el combate. Esta circunstancia se ha acrecentado con las últimas guerras de Afganistán e Iraq, donde las lesiones de las extremidades constituyen la principal causade discapacidad. Por tanto, el uso de ayudas técnicas con BCI puede ayudar a mejorar la calidad de vida de los heridos en combate y, en último término, reducir el impacto individual y social de la discapacidad. Cabe destacar que la agencia DARPA pretende desarrollar prótesis de miembro superior usando tecnología BCI de tipo invasiva, en concreto, interfaces basados en implantes cocleares y electrocorticografía (ECoG).

La interfaz cerebro-ordenador, también tiene aplicaciones militares de un gran potencial más allá del campo de la robótica, siendo la mejora de las comunicaciones una prioridad en la lista de utilizaciones. Un claro ejemplo es el proyecto *“Advanced Speech Encoding Program”*<sup>199</sup> de la agencia (DARPA), cuyo objetivo es desarrollar sensores nano-acústicos para la codificación del habla en ambientes acústicamente hostiles, como en el interior de un vehículo militar o en un entorno urbano. Dentro de este proyecto, se está desarrollando el programa *“SilentTalk”* con el fin de conseguir sistemas de comunicación entre combatientes a través de las señales de EEG asociadas a la generación de un mensaje, pero sin realizar la vocalización o gestos corporales. Su primer objetivo es identificar los patrones EEG asociados a un conjunto de 100 palabras más utilizadas en un entorno bélico. Otro proyecto reciente de la agencia DARPA es *“Cognitive Technology Threat WarningSystem”*. Este proyecto pretende desarrollar neuroimplantes visuales y auditivos de alta resolución (rangosde hasta 10 Km) para que los combatientes puedan reaccionar subscientemente al detectar automáticamente un objetivo o una amenaza antes de que el cerebro procese la información.

Para finalizar, uno de los objetivos a largo plazo es conseguir aplicar la tecnología BCI para el control de exoesqueletos que aumenten las capacidades del combatiente de manera muy significativa. Sin embargo, según la agencia, los equipos utilizados en la actualidad para interactuar con los ordenadores son “extremadamente lentos”. Por

---

<sup>198</sup> KOTCHETKOV, I. S., HWANG, B. Y., APPELBOOM, G., KELLNER C. P., & CONNOLLY JR, E. S. (2010). *Brain-computer interfaces: military, neurosurgical, and ethical perspective*, *Neurosurgical Focus*, vol.28(5), E25, pp.1-6

<sup>199</sup>DENBY B., SCHULTZ T., HONDA K., HUEBER T., GILBERT JM & BRUMBERG J.S. (2009). *Silent speech interfaces*. *Speech Communication*, vol.52, pp.270–287

este motivo, desde DARPA esperan conseguir un dispositivo más “eficaz, que emita más señales y más claras” para interpretar mejor los datos.

*i) Procedimientos judiciales*

Los adelantos científicos han ocasionado el surgimiento de todo un género de nuevos medios probatorios que pueden ser aducidos al proceso judicial. Una hipótesis que ha tenido gran acogida es aquella que contempla la eventual utilización probatoria de técnicas neurocientíficas, tales como, la tomografía por emisión de positrones (PET), la tomografía axial computarizada (TAC), la magnetoencefalografía (MEG), la resonancia magnética funcional o nuclear (fMRI), Pletismógrafo del pene, P300, etc.

Así, los neurocientíficos consideran que, a través de las técnicas que se relacionaron anteriormente, se puede demostrar, entre otras cosas, lo siguiente: por una parte, se puede establecer si una persona dice la verdad o no. Se trata de algo parecido al famoso detector de mentiras, pero su funcionamiento depende de técnicas neurocientíficas, en las que se controlan las variaciones de los flujos sanguíneos en el cerebro de la persona examinada. Por otro lado, a través de las tomografías por emisión de positrones (TEP) del metabolismo cerebral y las RM de estructuras o funciones anormales del cerebro se puede establecer la existencia de una alteración cerebral que repercutiría en el comportamiento de un acusado y, por lo tanto, disminuiría su culpabilidad o grado de responsabilidad en la comisión del delito. Asimismo, estas técnicas neurocientíficas permitirían determinar el grado de capacidad o discapacidad de un individuo de cara a determinar el grado de responsabilidad civil que le correspondería ante un incumplimiento contractual<sup>200</sup>.

El caso que en EEUU ha supuesto un punto de inflexión en esta materia ha sido el de *Roper vs. Simmons*<sup>201</sup>, en el que se solicitó ante la Corte Suprema de Missouri que no se impusiera a *Christopher Simmons* la pena de muerte a la que había sido condenado por un asesinato aduciendo que tenía 17 años cuando lo cometió. La Corte Suprema de Missouri accedió y conmutó la pena de muerte por cadena perpetua, fallo que fue recurrido ante la Corte Suprema de Estados Unidos, que lo confirmó. Lo significativo de este caso es que la petición que se hizo ante la Corte Suprema de Missouri fue acompañada por informes de diferentes asociaciones de medicina, psiquiatría y psicología, en los que se invocaba, entre otros argumentos, la menor madurez que presentaba el cerebro de los adolescentes a la luz de las recientes investigaciones en materia de Neurociencia.

---

<sup>200</sup> BANDES A., (2010). “*The promise and Pitfalls of Neuroscience for Criminal Law and Procedure*”, *Ohio State Journal of Criminal Law*, vol.8, p. 120. MORENO, Joelle Anne, “*The Future of Neuroimaged Lie Detection and the Law*”, *Akron Law Review*, vol.42, 3, p. 723.

<sup>201</sup> *Roper vs. Simmons* (543 U.S. 551, 2005).

En defensa de la petición de Christopher Simmons se emitieron dos informes: el primero fue elaborado conjuntamente por un extenso grupo de entidades: la Asociación Médica Americana, la Asociación Psiquiátrica Americana, la Sociedad Americana de Psiquiatría Adolescente, la Academia Americana de Psiquiatría Infantil y Adolescente, la Academia Americana de Psiquiatría y Derecho, la Asociación Nacional de Trabajadores Sociales, la Sección de Missouri de la Asociación Nacional de Trabajadores Sociales y la Asociación Nacional de Salud Mental<sup>202</sup>. El segundo informe fue emitido por la Asociación Americana de Psicología y por la Asociación de Psicología de Missouri<sup>203</sup>.

Ambos informes de manera general arrojaron conclusiones similares: los adolescentes, como grupo, “son más impulsivos que los adultos”, “subestiman los riesgos y sobrevaloran los beneficios a corto plazo”, “son más susceptibles al stress, más volátiles emocionalmente y menos capaces de controlar sus emociones que los adultos”, de modo que “del adolescente medio no cabe esperar que actúe con el mismo control o previsión que un adulto maduro”.

Son conclusiones, como indica el informe, que ya habían sido observadas por los científicos del comportamiento. Pero a ellas se unen las aportaciones de las investigaciones neurocientíficas, que no sólo han permitido a los científicos confirmar aquello que ya conocían o intuían, sino que les ha provisto de nuevas pruebas que han cambiado el modo en el que los científicos comprenden el desarrollo del cerebro humano y su progreso desde la infancia hasta la adolescencia y la edad adulta. Así, se señala que la inmadurez de la conducta de los adolescentes refleja la inmadurez anatómica de sus cerebros<sup>204</sup>.

El ponente en este caso, el Juez Kennedy, trasladó los argumentos invocados en el caso *Atkins vs. Virginia* (donde se decidió que la imposición de la pena de muerte a las personas que padecían una discapacidad psíquica contradecía la Octava Enmienda) a la pena de muerte para menores de edad<sup>205</sup>. En aquella sentencia se invocaron los estándares de decencia que habían de caracterizar el progreso de una sociedad madura, tal y como se acuñó en 1958 en el caso *Trop vs. Dulles*<sup>206</sup>; en *Roper vs. Simmons* el Juez Kennedy afirmó que la investigación acerca de la evolución de los estándares de decencia no terminaba en el caso de los discapacitados psíquicos, puesto que dichos estándares también podían ser invocados en el caso de la imposición de pena de muerte a quienes cometieron el delito siendo menores de 18 años<sup>207</sup>. En estos casos cabía

---

<sup>202</sup> Informe de la Asociación Médica Americana, la Asociación Psiquiátrica Americana (et. al.), como amici curiae en apoyo del demandado en el caso *Roper vs. Simmons*, 543 U.S. 551 (2005), Nº 03-633

<sup>203</sup> Informe de la Asociación Americana de Psicología y por la Asociación de Psicología de Missouri, como amici curiae en apoyo del demandado en el caso *Roper vs. Simmons*, 543 U.S. 551 (2005), Nº 03-633.

<sup>204</sup> Informe de la Asociación Médica Americana, la Asociación Psiquiátrica Americana (et. al.), *Op. Cit.* p. 10.

<sup>205</sup> *Atkins vs. Virginia*, (536 U.S. 304, 2002).

<sup>206</sup> *Trop vs. Dulles* (356 U.S. 86, 1958)

<sup>207</sup> *Roper vs. Simmons*, (543 U.S. 551, 2005), pp. 8-10.

afirmar, como en el caso *Atkins vs. Virginia*, indicios objetivos de un consenso sobre el rechazo a la pena de muerte para delincuentes juveniles en la mayoría de los estados de Estados Unidos, de su uso infrecuente incluso en los casos en los que está vigente, así como la consistencia de la tendencia hacia la abolición de esta práctica. Entendió esta sentencia que el consenso sobre estos tres puntos aportaba suficientes pruebas de que actualmente la sociedad estadounidense contemplaba a los menores de edad, tal y como se señalaba en *Atkins vs. Virginia*, “categóricamente menos culpables que el delincuente medio”, afirmando la “menor culpabilidad de los infractores menores de 16 años”.

El Juez Kennedy, remitiéndose a estudios científicos y sociológicos, invocó asimismo que las diferencias entre delincuentes menores y adultos estaban demasiado marcadas y bien comprendidas como para arriesgarse a permitir que a una persona joven se le condenase a muerte a pesar de su insuficiente culpabilidad.

## CAPÍTULO II

### NEUROCIENCIAS, NEUROTECNOLOGÍAS Y DERECHO: DESDE LOS DATOS CEREBRALES HASTA LOS NEURODERECHOS HUMANOS

#### 1. El dato cerebral o neurodato: una breve mirada desde las neurociencias

##### 1.1 El concepto de dato cerebral o neurodato

En el área de la neurociencia, el neurobiólogo español *RAFAEL YUSTE* se ha referido a los neurodatos como “otro órgano del cuerpo, no físico, sino que mental y sería el más importante de todos los órganos porque es el cual nos define como somos”, enfatiza<sup>208</sup>.

Para Yuste, los datos neuronales son una clase de datos particularmente sensibles debido a su vínculo causal más directo con los procesos mentales, su mayor elusividad al control consciente, y su capacidad para predecir el estado de salud y el comportamiento presente y futuro de una persona.

En biología, un órgano (del latín "*organum*", que significa un instrumento o herramienta) es una colección de tejidos que estructuralmente forman una unidad funcional diferenciada y especializada para realizar una función determinada. Su corazón, los riñones y los pulmones son ejemplos de órganos<sup>209</sup>.

Los órganos generalmente funcionan dentro de sistemas o aparatos, es decir, compenetrados con otros órganos para la realización de una función. Así, en el aparato digestivo tenemos el hígado, el estómago o el intestino, a cada uno de los cuales corresponde una función.

Un sistema es un conjunto de órganos y estructuras que trabajan en conjunto para cumplir alguna función fisiológica en un ser vivo. El cuerpo humano posee más de cincuenta billones de células. Estas se agrupan en tejidos, los cuales se organizan en órganos y estos en aparatos o sistemas. Dentro de estos sistemas encontramos el sistema nervioso<sup>210</sup>.

La función del sistema nervioso consiste en recibir los estímulos que le llegan tanto del medio externo como interno del organismo, organizar esta información y hacer que se produzca la respuesta adecuada. Los estímulos procedentes del medio externo son recibidos por los receptores situados en la piel, destinados a captar sensaciones generales como el dolor, tacto, presión y temperatura, y por los receptores que captan sensaciones especiales como el gusto, la vista, el olfato, el oído, la posición

---

<sup>208</sup> SENADO DE CHILE. (2019). Inteligencia Artificial y neuroderechos: la protección de nuestro cerebro podría quedar consagrado en la Constitución.

<sup>209</sup> AMAT, A., MARTÍ, J., & DARNÉ, I. (2018). Investigamos cómo funciona el cuerpo humano. *Petit Talent Científics*, pp.63-70.

<sup>210</sup> *Ídem*.

y el movimiento. Las señales (o impulsos) que llegan al sistema nervioso periférico, se transmiten a partir de estos receptores al sistema nervioso central, donde la información es registrada y procesada convenientemente. Una vez registradas y procesadas, las señales son enviadas desde el sistema nervioso central a los distintos órganos a fin de proporcionar las respuestas adecuadas. Desde un punto de vista funcional el sistema nervioso se divide en tres partes, sistema nervioso central, sistema nervioso periférico, y sistema nervioso autónomo<sup>211</sup>.

Una enfermedad del sistema nervioso central puede afectar la médula espinal (mielopatía) o bien el cerebro (encefalopatía), los cuales son parte del sistema nervioso central. Cualquier enfermedad o lesión que afecte la médula espinal, desde la vértebra dorsal hacia abajo, puede causar una paraplejía, ya que esta estructura transmite las "instrucciones" del movimiento desde el cerebro a los órganos efectores y las sensaciones en sentido opuesto (temperatura, dolor, posición de los miembros, sensibilidad, etc.). Mientras que algunas personas que padecen de paraplejía pueden caminar hasta cierto punto, la mayoría dependen de una silla de ruedas, prótesis o de otros dispositivos para disponer de movilidad<sup>212</sup>.

La ciencia y la tecnología van avanzando con descubrimientos que permiten hacer cosas que antes eran inimaginables. Su aplicación al cuerpo humano está modificando la forma en que entendemos y valoramos el cuerpo humano.

Nuestro cerebro produce impulsos eléctricos (potenciales de acción) que viajan a través de nuestras neuronas. Estos impulsos eléctricos producen ritmos que son conocidos como ondas cerebrales. Los impulsos eléctricos son información que viaja de neurona a neurona haciendo uso de cientos de miles de ellas para lograr transportarse y ejecutar una función determinada. La actividad de las ondas cerebrales puede ser observada a través de un EEG<sup>213</sup>.

Las Interfaces Cerebro-Computadora intentan proveer al cerebro de un nuevo canal, no muscular, de comunicación y control para transmitir mensajes y comandos al mundo exterior.

De forma general, como ya hemos adelantado en el capítulo anterior, una BCI puede ser vista como un sistema de reconocimiento de patrones, donde el EEG es utilizado como la fuente primaria de información. Los algoritmos de aprendizaje computacional son utilizados para aprender una función de inferencia a partir de dicha información, y los algoritmos ya entrenados pueden decodificar las señales de EEG en comandos a ejecutar por un dispositivo electro-mecánico. Algunas de las aplicaciones

---

<sup>211</sup> *Ídem.*

<sup>212</sup> NIETO-SANPEDRO, M., GUDIÑO-CABRERA, G., TAYLOR, J., & VERDÚ, E. (2002). Trauma en el sistema nervioso central y su reparación. Revisión en Neurociencia, pp.34-35.

<sup>213</sup> AZNAR CASANOVA, J. A. (2017). ub.edu. [en línea] Recuperado el 31 de octubre de 2020.

más comunes de la investigación en BCI están dirigidas a asistir a las personas con discapacidad motriz severa.

En este nuevo contexto “cuerpo humano-tecnología”, el cuerpo humano ya no estaría compuesto tan solo de órganos biológicos tangibles, sino que formarían parte de él las diferentes técnicas de captación de señales neurofisiológicas (EEG / MEG / fMRI / ECoG / SUA) y un órgano mental, intangible, los “neurodatos” o impulsos eléctricos procesados y decodificados a través de una BCI. Dando origen de esta manera a un nuevo tipo de sistema nervioso, el “sistema neuro-tecnológico humano” el cual tiene como función sustituir las funciones desarrolladas por un órgano del sistema nervioso central y que han desaparecido producto de un daño o lesión.

Así, los "datos cerebrales", son el resultado de mediciones directas de la estructura, función y actividad del cerebro (humano). Hay muchas formas de datos que reflejan los procesos del cerebro. En este concepto estamos considerando específicamente datos provenientes del monitoreo directo de la función del cerebro mismo, refiriéndonos a ellos como “neurodatos”.

Luego, es necesario realizar una precisión, los “neurodatos” en sentido estricto, son toda información relacionada con el funcionamiento del cerebro, en tanto, que cuando se hace referencia a “datos cerebrales”, conviene destacar que se utiliza un concepto amplio referido a la información que se encuentra relacionada con la estructura, funcionamiento y actividad del cerebro.

De tal manera que, habría una relación de género a especie, en donde los datos cerebrales constituirían el género, y los neurodatos, la especie. En tanto que, en un sentido amplio los datos cerebrales estarían compuestos tanto por información relacionada con la estructura o anatomía del cerebro, como por toda información relacionada con el funcionamiento del mismo (neurodatos).

Esta información que permite a quien la posee, escudriñar los procesos del cerebro humano, tendría un valor significativo en una pluralidad de contextos en los que una parte busca influencia o conocimiento sobre otra, especialmente cuando permitiría una comprensión y predicción más completas de las acciones de uno, o un grupo, de individuos.

### ***1.2 Características de los datos cerebrales o neurodatos: parámetros para determinar “la novedad”***

Los datos cerebrales o neurodatos muestran ciertas características novedosas en comparación con las formas convencionales de datos:

- a) La información del cerebro es única y personal: Así como la composición genética de cada persona es única, también lo es el cerebro considerado un “órgano de la

individualidad”<sup>214</sup>. Cada cerebro humano es único y permite la identificación personal a través de la anatomía de las regiones cerebrales. Esta característica individual de cada cerebro es el resultado de las propiedades genéticas de cada persona combinadas con su experiencia de vida. Eso significa que el análisis del cerebro de una persona permite conocer no sólo su trayectoria de vida, sino también su identidad, ya que no hay dos cerebros iguales en la anatomía humana. El cerebro es una señal de identidad tan inconfundible como la huella dactilar, que permite, mediante la impresión de las crestas capilares de un dedo sobre una superficie, identificar a una persona<sup>215</sup>.

Se espera que las técnicas neurocientíficas, como el escaneo cerebral, proporcionen, de manera análoga a las pruebas de ADN, información objetiva y confiable sobre una persona individual. Será un identificador tan único como una huella dactilar o un genoma. Así, los neurodatos también adquieren una calidad "objetiva" única, que deriva del carácter exclusivo y único del cerebro respecto de cada individuo, no necesariamente en relación con la precisión de la interpretación, sino con la certeza y la franqueza de la conexión con el individuo, lo que plantea más cuestiones sobre cómo se procesan los datos vistos por quienes lo evalúan, independientemente de su precisión.

- b) Los neurodatos pueden permitir una profundidad y una forma únicas de comprensión del individuo: Por un lado, los neurodatos pueden revelar información que el individuo no conoce o información que puede estar fuera del control del individuo. Por otra parte, los neurodatos también podrían usarse de manera predictiva, para descubrir características o predisposiciones que no solo pueden no ser conocidas por el individuo, sino que, de hecho, es posible que nunca se manifiesten<sup>216</sup>.

Los neurodatos también abren un nuevo potencial en las posibles representaciones del individuo a través de datos. Permite la traducción a forma de datos de aspectos únicos y previamente imposibles de registrar del individuo. En este sentido, los neurodatos pueden permitir conocer los procesos cerebrales en "tiempo real", lo que permite el registro directo de procesos asociados con la personalidad, el estado de ánimo, los comportamientos, los pensamientos o los sentimientos. También han mostrado potencial no solo para predecir predisposiciones a enfermedades mentales y físicas, sino también potencialmente hacia diferentes tipos de

---

<sup>214</sup> COMMITTEE ON SCIENCE AND LAW. (2005). *Are your thoughts your own?: Neuroprivacy and the legal implications of brain imaging*.

<sup>215</sup> ABOLFAZL, S., LIEM, F., MÉRILLAT, S., HÄNGGI, J., & JÄNCKE, L. (2018). *Identification of individual subjects on the basis of their brain anatomical features*. *Scientific Reports*, vol.8(5611), pp.1-9

<sup>216</sup> COMMITTEE ON SCIENCE AND LAW. (2005). *Are your... Op. Cit.*, pp.11-12

comportamiento y personalidad<sup>217</sup>. Podría decirse que estas características hacen que los neurodatos sean íntimos de una manera muy diferente a otras formas de datos. *KENNEDY* afirma: "Ya no quiero que mi empleador o mi compañía de seguros conozcan mi genoma. En cuanto a mi cerebro, no quiero que nadie lo sepa por ningún motivo. Es... mi identidad más íntima"<sup>218</sup>.

También es necesario señalar que solo los neurodatos de complejidad "suficiente" proporcionarán un medio de identificación único. sin embargo, el umbral de suficiencia dependerá de las tecnologías de interpretación utilizadas. A medida que avanza la tecnología, podemos esperar ver un cambio en el nivel de suficiencia. Los neurodatos que no se consideran identificadores únicos hoy, pueden serlo mañana.

- c) La obtención de neurodatos impide la comprensión exacta de lo que se ha recopilado: los procesos de recopilación no solo tienen una capacidad limitada para restringir la información que se puede recopilar, sino que los avances adicionales en la ciencia cognitiva, que proporciona el marco para la interpretación de los neurodatos, o una mayor investigación de los datos recopilados, pueden revelar significativamente más información que el controlador de datos inicialmente puede haber deseado o querido coleccionar<sup>219</sup>.

## **2. El valor de los neurodatos: hacia una nueva configuración de los Derechos Humanos**

### ***2.1 Los Neuroderechos Humanos como instrumento de protección ante los avances de la neurotecnología***

A medida que la ciencia cognitiva proporciona nuevas teorías de la cognición y la comprensión del cerebro como un sistema o conjunto de sistemas, proporciona plantillas a través de las cuales se puede extraer la relevancia y el conocimiento de los neurodatos relacionados con los individuos. En consecuencia, su relevancia se extiende más allá de los límites de ser una disciplina académica aislada o una rama de la medicina para tener relevancia para todas las disciplinas y áreas de estudio en las que la acción del individuo es relevante. Como ejemplo de esto, se puede considerar, como ya hemos visto, en el desarrollo de los campos de la neuroeconomía, el neuromarketing, videojuegos y entretenimiento, seguridad y autenticación, etc.

Así, el valor de los neurodatos, inicialmente encontró aplicación en el campo médico para el diagnóstico y en el desarrollo de aplicaciones con función paliativa, sin

---

<sup>217</sup> FARAH, M.J., E.M. SMITH, C. GAWUGA, D. LINDSELL AND D. FOSTER. (2012). *Brain imaging and brain privacy: A realistic concern?* *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol.21(1), pp.119-127.

<sup>218</sup> HAMILTON, J. O'C. (2004). *If They Could Read Your Mind*. *Stanford Magazine*.

<sup>219</sup> COMMITTEE ON SCIENCE AND LAW. (2005). *Are your... Op. Cit.*, p.12

embargo, las perspectivas de uso se han ampliado desde entonces y ahora se ha comenzado a reconocer el potencial de las aplicaciones basadas en neurodatos fuera del ámbito clínico.

Existe una amplia gama de técnicas de neuroimagen tanto estructurales como funcionales; tales como tomografía computarizada (CT), tomografía por emisión de positrones (PET), tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT), sistemas funcionales de infrarrojo cercano (fNIR), tomografía óptica difusa (DOT), magnetoencefalografía (MEG) y óptica relacionada con eventos señal (EROS). Sin embargo, las más destacadas en los campos de la medicina, el neuromarketing, los videojuegos, entre otros, son la resonancia magnética funcional (fMRI) y la electroencefalografía (EEG). La primera se basa en técnicas basadas en la hemodinámica: medir y deducir la actividad cerebral del flujo sanguíneo cerebral. La última se basa en métodos electromagnéticos: recopila datos sobre la actividad electromagnética del cerebro<sup>220</sup>.

A diferencia de la resonancia magnética funcional, la tecnología EEG es barata, portátil y relativamente fácil de usar. Esto hace que el número de áreas en las que podría aplicarse sean más numerosas y, en consecuencia, la perspectiva de que tales datos sean recopilados y difundidos. Por su parte, la fMRI apunta específicamente a la recopilación de neurodatos como propósito principal (por ejemplo, en neuromarketing), mientras que EEG puede usarse para interacciones hombre-máquina que dependen de neurodatos para sus operaciones, pero cuyo objetivo no es específicamente la recopilación de neurodatos. No obstante, cuando los datos se recopilan para un propósito, aún pueden usarse para otras finalidades compatibles o incluso diferentes.

Proteger a las personas de los abusos que se pudieran realizar con la utilización de las nuevas técnicas de neurotecnología e inteligencia artificial es fundamental para la preservación de la dignidad humana y el libre desarrollo de la personalidad. Con el fin de ir resolviendo los neurodesafíos normativos se ha acuñado por la ciencia una nueva categoría de derechos humanos: los neuroderechos humanos<sup>221</sup>.

Los neuroderechos son nuevos derechos humanos que han sido propuestos precisamente en anticipación a riesgos que como ya hemos visto se empiezan a vislumbrar en el mundo de la neurotecnología.

Hay dos corrientes principales:

- La primera de ellas es la defendida por *MARCELO IENCA*, filósofo italiano, investigador principal de la Facultad de Humanidades de la Escuela Politécnica

---

<sup>220</sup> HORWITZ, B., & POEPEL, D. (2002). *How Can Eeg/Meg and Fmri/Pet Data Be Combined? Human Brain Mapping*, vol.17(1), pp.1-3

<sup>221</sup> YUSTE, R. (2019). Las nuevas neurotecnologías y su impacto en la ciencia, medicina y sociedad. La Lección Cajal, p.37.

Federal de Lausana; y *ROBERTO ANDORNO*, filósofo y jurista argentino, investigador asociado y coordinador del programa de doctorado en Ética y Derecho biomédico en el Instituto de Ética Biomédica e Historia de la Medicina de la Universidad de Zurich.

- Una segunda, propuesta por *RAFAEL YUSTE*, neurobiólogo, director del Centro de Neurotecnología de la Universidad de Columbia. En 2019 el Centro de Neurotecnología crea la iniciativa de los Neuroderechos (NRI).

*a) La propuesta de neuroderechos humanos de MARCELO IENCA y ROBERTO ANDORNO*

Según *MARCELO IENCA*, el término neuroderechos fue introducido por primera vez en un trabajo publicado por él junto a R. Andorno en 2017, titulado “*A New Category of Human Rights: Neurorights*”<sup>222</sup>. En este trabajo, Ienca y Andorno, después de analizar las principales normas de derechos humanos concluyeron con que estas no eran suficientes para protegernos frente a la neurotecnología, por lo que era necesario adaptar los derechos existentes e incluso crear nuevos derechos. Más adelante, en otro trabajo<sup>223</sup>, estos mismos autores identificaron cuatro nuevos derechos, llamados neuroderechos: el derecho a la libertad cognitiva, el derecho a la privacidad mental, el derecho a la integridad mental y el derecho a la continuidad psicológica.

Veremos cada uno de ellos a continuación:

*i. Derecho a la Libertad Cognitiva*

Este derecho es el único de los cuatro que no es nuevo que ellos rescatan de pensadores anteriores<sup>224</sup>, y que se podría definir como “la autodeterminación mental”, pues asume la libertad de conciencia y la libertad de pensamiento, esta última en un sentido amplio, incluyendo la propia libertad física de pensar, que nadie nos impida manipulando nuestro cerebro que seamos capaces de pensar lo que queremos pensar.

Algunos autores como *CHRISTOPH BUBLITZ*, han definido este derecho como “el derecho a alterar los estados mentales propios con la ayuda de neuroherramientas, así como el derecho a rechazar a hacerlo”.

De esta definición *IENCA Y ANDORNO* se quedan con la última parte y aceptan que este derecho establece una protección contra el uso coercitivo de los neurodispositivos.

---

<sup>222</sup> IENCA, M. (2021). “On neurorights. *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.15, pp.1-11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.701258>).

<sup>223</sup> IENCA, M. & ANDORNO, R. (2021). Hacia nuevos derechos humanos en la era de la neurociencia y la neurotecnología. *Análisis Filosófico*, vol.41(1), pp.141-185.

<sup>224</sup> BUBLITZ, C. (2013). My mind is mine!? Cognitive Liberty as a legal concept. En E. Hildt & A. Franke (Eds.), *Cognitive enhancement: An interdisciplinary perspective*, pp.233-264. Springer.

BUBLITZ incluso ve el derecho a la libertad cognitiva como el prerequisite legal del resto de neuroderechos. Como un “derecho humano fundamental”, como “un principio jurídico central que guíe la regulación de las neurotecnologías”.

La razón de su función fundamental se deriva del hecho de que “el derecho y la libertad de controlar la propia conciencia y los propios procesos electroquímicos de pensamiento son el sustrato necesario para cualquier otra libertad”<sup>225</sup>.

## *ii. Derechos a la privacidad mental*

MARCELO IENCA Y ROBERTO ANDORNO manifiestan que el derecho a la privacidad mental es el derecho a proteger la información mental que pueda extraerse de los datos cerebrales. Es un derecho a determinar cuándo, cómo y en qué medida se pueden difundir estos datos o informaciones<sup>226</sup>.

Los autores, además, advierten que se debe tener en cuenta que las normativas que protegen la privacidad del usuario frente a las tecnologías, están basadas en garantizar los derechos del titular de los datos (acceso, rectificación, eliminación o supresión, oposición, portabilidad). Sin embargo, existen características de los neurodatos que hacen que ejercer estos derechos sea muy complicado, principalmente, porque los neurodatos son fácilmente mezclables con datos de distintos usuarios; y porque los neurodatos son datos reinterpretables, es decir, datos que hoy no son sensibles en términos de la normativa, podrían llegar a serlo con el avance de las neurotecnologías.

En consecuencia, los autores basándose en estos desafíos específicos, sostienen que los derechos actuales sobre privacidad y protección de datos son insuficientes para hacer frente a los escenarios neurotecnológicos emergentes, por lo que sugieren el reconocimiento formal del derecho a la privacidad mental, que tiene como objetivo proteger cualquier bit o conjunto de información cerebral sobre un individuo registrado por un dispositivo neurológico y compartido a través del ecosistema digital.

## *iii. Derecho a la integridad mental*

El *derecho a la integridad mental*, que ya está reconocido por el derecho internacional (artículo 3 de la Carta de los Derechos Fundamentales de la UE) en lo que respecta a la promoción de la salud mental, sin embargo, los investigadores aseguran que este derecho debería ampliarse para proteger también contra manipulaciones ilícitas y nocivas de la actividad mental de las personas facilitadas por neurotecnologías<sup>227</sup>. Las nuevas formas de amenazas a *la integridad mental* habilitadas

---

<sup>225</sup> SENTENTIA, W. (2004). Neuroethical considerations: Cognitive Liberty and converging technologies form improving human cognition. *Ann NY Acad Sci*, vol.1013(1), pp.221-228.

<sup>226</sup> IENCA, M. & ANDORNO, R. (2021). Hacia nuevos derechos humanos... *Op. Cit.* pp.158-164.

<sup>227</sup> *Ibidem*, pp.168-162.

por la neurotecnología pueden incluir neuroestimulación no deseada, *neurohacking* malicioso y manipulación de la memoria potencialmente dañina.

Este derecho es particularmente relevante en el contexto de la seguridad nacional, donde intervenciones –mediante utilización de neurocomputación– potencialmente dañinas para las personas, podrían justificarse a la luz de objetivos estratégicos más amplios.

*iv. Derecho a la continuidad psicológica (identidad)*

Finalmente, el *derecho a la continuidad psicológica* pretende preservar la identidad personal de las personas y la continuidad de su vida mental frente a alteraciones externas no consentidas por parte de terceros<sup>228</sup>.

A diferencia del derecho a la integridad mental, este derecho se aplica también a las intervenciones no consentidas para cambiar la personalidad que no implican daño físico o psicológico directo a la víctima. Además de las intervenciones ilícitas, el derecho a la continuidad psicológica es particularmente relevante también en relación con las estrategias de marketing invasivas, como aquellas en las que la publicidad está diseñada intencionalmente para eludir las defensas racionales de una persona y alterar sus preferencias o comportamiento.

En consecuencia, es menester mencionar que la anterior clasificación de estos nuevos derechos humanos era la primera propuesta sobre neuroderechos, que puede ser revisada en un artículo de *MARCELO IENCA Y ROBERTO ANDORNO*, traducido por el doctor *ABEL WAJNERMAN*, y que se titula “Hacia nuevos derechos humanos en la era de la neurociencia y la neurotecnología”.

Desde el punto de vista académico este artículo se considera como el acto fundacional de los neuroderechos humanos.

*b) La propuesta de neuroderechos humanos de RAFAEL YUSTE*

La tecnología en principio es neutra, se puede utilizar para bien o para mal. Según *RAFAEL YUSTE*<sup>229</sup>:

Los métodos de neurotecnología que tienen que ver con la lectura y el cambio de la actividad cerebral, en realidad nos llevan a la manipulación de la esencia del ser humano. Nosotros somos una especie definida por la mente y esta surge del cerebro, entonces si cambias el cerebro estarías cambiando la mente y la base de lo que es ese ser.

*RAFAEL YUSTE*, neurocientífico y catedrático de la Universidad de Columbia es el impulsor de *Brain Research Through Advancing Innovative Neurotechnologies*, iniciativa

---

<sup>228</sup> *Ibidem*, pp.172-177.

<sup>229</sup> *Ibidem*, p.25.

de investigación colaborativa que nació en Estados Unidos durante el gobierno del expresidente *BARACK OBAMA*. En un lapso de 15 años, y con un método de trabajo similar al utilizado en el Proyecto de Genoma Humano, investigadores de diferentes lugares del mundo están desarrollando técnicas para registrar y también manipular la actividad cerebral.

Por esta razón, *RAFAEL YUSTE* firmó en 2017 junto a otros 25 destacados científicos un artículo en la Revista *Nature* titulado “Cuatro prioridades éticas para las neurotecnologías e Inteligencia Artificial”. En dicho artículo proponen una modificación a la Declaración Universal de los Derechos Humanos de 1948 y la incorporación de los nuevos neuroderechos humanos, como un resguardo ante la mala utilización de los avances científicos y tecnológicos.

Cuando se adoptó la Declaración Universal de Derechos Humanos en 1948, los retos futuros de la Neurotecnología y la Inteligencia Artificial apenas podían imaginarse. En consecuencia, no existen disposiciones en el documento de derechos humanos para abordar los nuevos riesgos producidos por las innovaciones tecnológicas. Derechos que antes se daban por sentados, como la privacidad mental o la autonomía cognitiva, han caído en peligro con el advenimiento de las neurotecnologías.

Así, los neuroderechos humanos se concentrarían en 4 categorías: derecho a la privacidad y al consentimiento; derecho a la identidad y a la toma de decisiones (agencia); derecho al aumento cognitivo justo y equitativo; y derecho a la ausencia de sesgos<sup>230</sup>.

*i. Derecho a la privacidad mental y al consentimiento*

La confidencialidad es un principio bioético central que rige la relación proveedor-paciente. Desde Hipócrates, las nuevas leyes lo han interpretado para la era de la medicina de precisión y los registros médicos electrónicos. Más allá del deber moral reconocido de proteger la información médica de los pacientes, los médicos y científicos deberían ahora defender un derecho básico a la privacidad como un medio para salvaguardar los datos cerebrales de los pacientes con el fin de prevenir su uso abusivo y comercial<sup>231</sup>.

Esta protección debería cubrir cualquier tipo de información obtenida del cerebro por medio de las neurotecnologías y distribuida por medios digitales. En esta línea, Rafael Yuste señala que:

Todos tenemos muy presente el problema que existe con la privacidad de los datos (por ejemplo, en nuestros teléfonos móviles). Antes o después vamos a descifrar

---

<sup>230</sup> *Ídem*

<sup>231</sup> ABOUJAOUDE, E. (2019). Protecting privacy to protect mental health: the new ethical imperative. *Journal of Medical Ethics*, vol.45(9), pp.604-607.

los patrones cerebrales y vamos a poder entender el pensamiento de las personas. Esto no es ciencia ficción, es algo que se empieza a hacer ya. De hecho, las compañías tecnológicas están muy interesadas en utilizar estas tecnologías.

Los algoritmos utilizados por el mejor buscador del mundo son primitivos comparados con nuestro cerebro. Entender cómo pensamos sería un paso de gigante, y tal vez definitivo, para el desarrollo de la inteligencia artificial. Por ejemplo, Facebook tiene un programa de unos cuarenta millones de dólares para conseguir con electrodos no invasivos convertir en texto lo que está pensando una persona, para no tener que utilizar los dedos. Pero eso significa que se podría descifrar lo que uno está pensando, y eso implica una privacidad mucho mayor que la privacidad de los datos, porque los pensamientos, la actividad mental, define quiénes somos. Esto es la máxima privacidad que existe, quiénes somos. El problema es aún peor, porque se puede llegar a descifrar lo que tenemos dentro, el subconsciente, y lo que no sabemos que pensamos. Esta es una situación que debe tener su propio Derecho Humano Universal: el derecho a la privacidad mental, el derecho a que no se pueda comerciar con los datos mentales. Que haya una barrera, que todo lo que tenga que ver con la privacidad mental sea intocable.

En este sentido, el derecho a la privacidad mental y al consentimiento se traduce, por una parte, en proteger a las personas frente al uso ilegítimo y no consentido de su información cerebral o actividad neuronal (su mente y sus pensamientos), implementando todas las medidas técnicas y organizativas destinadas a evitar posibles brechas de seguridad o filtraciones de estos datos. Y, por otra parte, en garantizar a la persona un poder de control sobre sus neurodatos o información cerebral, sobre sus usos y destinos, con el propósito de impedir su tráfico ilícito y lesivo para la dignidad y demás derechos del afectado.

*ii. Derecho a la identidad y a la toma de decisiones (agencia)*

La omnipresencia de las tecnologías de la información y de la comunicación y la digitalización junto con el creciente desarrollo de la biotecnología, y la automatización y la robótica, en nuestra sociedad, comportan un impacto directo en nuestra identidad. Las amenazas a nuestra identidad, sea por hackers o por errores humanos nos pueden desestabilizar, generando inseguridad y sentimiento de impotencia.

Aunque aún creamos que es ficción y que esto solo ocurre en la película “Matrix” ya en la actualidad numerosas partes de nuestro cuerpo pueden ser reemplazadas y funciones de nuestros órganos pueden ser externalizadas o incorporadas. Las neurotecnologías pueden ser utilizadas para monitorear las señales del cerebro, así como para estimular o modular las funciones cerebrales. El trasplante de órganos son ya un clásico, las prótesis, la bomba de insulina, la hemodiálisis, la mejora de la visión con chips implantados en el cerebro, o el exoesqueleto para pacientes con lesiones modulares, son unos ejemplos. La estimulación puede, como consecuencia, crear

cambios en los estados mentales críticos para la personalidad. En el futuro cercano habrá más tecnologías que permitirán mejorar determinadas limitaciones físicas mediante chips integrados en el cuerpo o elementos nanotecnológicos que podrán circular por nuestro cuerpo informando del estado de determinados procesos fisiológicos, generando un impacto en la continuidad psicológica de la persona y cómo la misma se perciba<sup>232</sup>.

*RAFAEL YUSTE* incluso señala que la Universidad de Washington ha ido más allá de los simples ejemplos anteriores:

Se ha conectado a tres personas con electrodos de superficie para que realicen juntos una tarea mental común. Estamos en una situación en la que es técnicamente posible conectar a personas, incluso gente que no está en la misma habitación. Puedes conectarte con una persona que está en la otra parte del mundo. Pero cuando estás conectado, ¿quién eres tú? Si fusionas tu cerebro con el cerebro de otra persona o con una máquina, pierdes la identidad personal.

De tal manera que, este derecho a la identidad personal implica la protección al concepto de continuidad psicológica, a la percepción del “yo” tal y como la persona se ha conocido y reconocido a lo largo de su vida, la protección de la continuidad del comportamiento personal y su rol en la sociedad, del cómo los demás le han percibido hasta hoy, frente a modificaciones no consensuadas por terceros. Por lo que, en palabras de Yuste “se vuelve un derecho intocable de la humanidad”.

De igual manera, las personas deben ostentar el poder en sus propias decisiones y ser libres para ejercitar dicho poder. Hoy el asunto se ha vuelto más relevante a partir del vertiginoso desarrollo que han alcanzado las nuevas tecnologías. Sabemos que nuestro libre albedrío está condicionado por nuestros genes y nuestros “memes” y hoy debemos añadirle los algoritmos<sup>233</sup>.

Al respecto *YUSTE* señala que:

Si en un futuro estamos conectados a computadoras a través de sistemas no invasivos, que no necesiten introducir electrodos dentro del cerebro, se podrá registrar la actividad mental. Actualmente hay docenas de compañías en Silicon Valley que están desarrollando estos sistemas. Los algoritmos podrán influir en la toma de decisión de las personas y, cuanto más conectados estemos, menos independientes seremos. Eso significa que el libre albedrío en la toma de decisiones nos va a venir de fuera, a través de un algoritmo de inteligencia

---

<sup>232</sup> CORNET I PRAT, J. (17 de diciembre de 2017). [en línea] Communityofinsurance.es.

<sup>233</sup> Respecto al término “meme”, este fue acuñado por Richard Dawkins, para referirse a nuestras unidades mínimas de herencia social o unidades de transmisión cultural.

artificial que puede controlar lo que hacemos. Podrá hacerlo igual o mejor que nosotros, pero ya no seremos nosotros [...]

Todo sistema normativo debe presuponer y garantizar la capacidad de los seres humanos de controlar voluntariamente su comportamiento o en cierta medida de influirlo, incluso cuando sea cuestionable la existencia de libre albedrío cuando aquello que la persona experimenta como una elección libre es el resultado de interacciones electroquímicas en el cerebro y una suerte de programa biológico para la toma de decisión modelada por la evolución.

*iii. Derecho al aumento cognitivo justo y equitativo:*

El desarrollo cognitivo es un campo de estudio de la neurociencia y la psicología que se centra en los procedimientos intelectuales y en las conductas que emanan de estos procesos. En otras palabras, el desarrollo cognitivo es el conjunto de transformaciones que se producen en las características y capacidades de pensar y comprender en el transcurso de la vida<sup>234</sup>.

Las investigaciones neurocientíficas han develado que es posible la creación de programas positivos y eficaces de entrenamiento cerebral personalizado a las necesidades de un individuo determinado. Un ejemplo lo encontramos en la innovadora tecnología desarrollada y patentada por *CogniFit*, empresa del sector de la salud e investigación, fundada en el año 1999 por el profesor *Shlomo Breznitz*. *CogniFit* automatiza la evaluación del perfil cognitivo de cada usuario y genera un programa de entrenamiento cerebral específico que está optimizado para adaptarse a ese perfil en concreto. El “Sistema de Entrenamiento Individualizado” (ITS™) es una patentada aplicación en tiempo real y tecnológicamente avanzada que gestiona la experiencia de cada usuario durante el entrenamiento. Utilizando sofisticados algoritmos en los datos proporcionados por la evaluación, configura un programa de entrenamiento individualizado con un equilibrio óptimo entre las tareas y los niveles de dificultad para que coincida con el perfil cognitivo del usuario, garantizando así su desarrollo cognitivo<sup>235</sup>.

Estas tecnologías en sí implican unos costos elevados, pensar que todas las personas podrán acceder a ellas no resulta lógico, por el contrario, los sectores más vulnerables de la población siguen siendo los más afectados y con menos posibilidad de acceso.

---

<sup>234</sup> ALBORNOZ ZAMORA, E. J., & GUZMÁN, M. (diciembre de 2016). Desarrollo cognitivo mediante estimulación en niños de 3 años. *Revista Científica Multidisciplinaria de la Universidad de Cienfuegos*, 8(4), pp.186-192.

<sup>235</sup> BREZNITZ, S. (2019). [en línea] [cognifit.com](http://cognifit.com).

En este aspecto, YUSTE coincide en que<sup>236</sup>:

[...] Tiene que haber un sistema justo y equitativo. Creemos que el derecho equitativo a la “aumentación” debe ser un derecho universal, que no provoque la creación de una sociedad en la que cierto grupo de personas se conviertan en una especie de superhumanos, que evidentemente tendrán muchísimas más oportunidades económicas y vitales, y que dejen atrás a otro tipo de población que no pueda permitirse el lujo de aumentarse cognitivamente.

Por esta razón, se vuelve fundamental establecer unos estándares o directrices tanto nacionales como internacionales que regulen el desarrollo y aplicaciones de estas neurotecnologías determinando sus objetivos y fines, límites y alcances. De manera que, se logre garantizar un acceso justo, equitativo, igualitario y no discriminatorio de toda la población (en cuanto sea de vital importancia para los interesados) a estos procedimientos.

*iv. Derecho a la ausencia de sesgos:*

Las neurotecnologías deben empoderar a todos e involucrar a la gente. Deben tratar a todas las personas de manera justa. Los sistemas de procesamiento de datos son puramente lógicos y, en teoría, no están sujetos a la conciencia o prejuicios inconscientes que inevitablemente influyen en la toma de decisiones. Sin embargo, debido a que los sistemas de procesamiento de datos, en general, basados en algoritmos de inteligencia artificial (en adelante IA) están diseñados por los seres humanos y los sistemas se entrenan utilizando datos que refleja el mundo imperfecto en el que vivimos, la IA puede operar injustamente sin una planificación cuidadosa<sup>237</sup>.

Cabe destacar, además, la existencia de algoritmos de IA que pueden mostrar la conciencia del usuario al confirmar o rechazar una acción y, según sea necesario, corregir la comprensión de la intención del usuario, reconociendo y ajustándose a las personas, lugares y eventos que son más importantes para los usuarios. Ante tal situación, es fundamental y debe convertirse en una obligación, proporcionar información que ayude a las personas a comprender qué inferencias el sistema está haciendo sobre ellos. Tal información hará más fácil identificar y crear conciencia sobre posibles sesgos, errores y resultados no deseados.

Respecto de la IA, YUSTE ha señalado que<sup>238</sup>:

La inteligencia artificial lleva en sus algoritmos unos sesgos que discriminan a ciertos grupos de la población (mujeres, minorías raciales, minorías religiosas o étnicas) porque los algoritmos no tienen ninguna ética, escogen entre

---

<sup>236</sup> YUSTE, R. (2019). Las nuevas neurotecnologías... *Op.Cit.* pp. 28-29.

<sup>237</sup> SMITH, B., & SHUM, H. (2018). *The Future Computed Artificial Intelligence and its role in society. Microsoft Corporation*, pp.57-73.

<sup>238</sup> YUSTE, R. (2019). Las nuevas neurotecnologías...*Op. Cit.* pp. 29-30.

probabilidades. Optimizan la solución del problema que se les propone y aumentan las tendencias que se observan en la base de datos que reflejan de una manera algo exagerada, igual que ocurre en el mundo. Y, en muchas ocasiones, esto provoca que los sesgos estén metidos en los algoritmos. Por esta razón, a pesar de nuestro ahínco para hacer una sociedad más equitativa y justa, con estas tecnologías estamos haciendo lo contrario. Tenemos una muestra de lo que puede venir en la utilización de las redes sociales, que, en vez de generar una sociedad más democrática, generan lo contrario. Estamos viendo cómo, a menudo, aumentan los sesgos y desequilibran la opinión pública de una manera que puede tener consecuencias políticas importantes [...]

Para asegurarnos de que las tecnologías involucradas en las neurotecnologías, en particular, la IA, beneficien y potencien a todos, deben incorporar y abordar una amplia gama de las necesidades y experiencias humanas. Las prácticas de diseño inclusivas ayudarán a los desarrolladores de sistemas a comprender y abordar barreras potenciales en un producto o entorno que podrían excluir involuntariamente a las personas. Esto significa que los sistemas neurotecnológicos basados en IA deben estar diseñados para comprender el contexto, las necesidades y expectativas de las personas que las utilizan.

Finalmente, además de las buenas prácticas y recomendaciones anteriores, se vuelve indispensable legislar estableciendo una capacidad de control de las personas respecto a la ausencia de sesgos.

Por el momento, esta propuesta de reconocimiento de los nuevos neuroderechos humanos abre un debate absolutamente necesario sobre el creciente papel de las neurotecnologías en nuestra sociedad y su enorme potencial disruptivo, hasta el punto de poder transformar la forma en que nos percibimos y cómo el mundo nos percibe e identifica. Parece prudente establecer salvaguardas básicas y universales, en términos de derechos humanos, que establezcan un marco normativo para estas tecnologías y que puedan ser incorporadas en los diferentes ordenamientos jurídicos en materia de derechos y garantías fundamentales.

## ***2.2 La especial consideración de la protección de datos como derecho fundamental, autónomo e independiente en la UE y España: un especial desafío para la regulación de los Neuroderechos Humanos***

Para conocer los orígenes de lo que hoy se entiende como privacidad, vale la pena remontarse a finales del siglo XIX, e introducirse en los eventos sociales de la época en Estados Unidos. Así, el origen del concepto de privacidad se suele situar en la publicación del artículo *“The Right to Privacy”*, suscrito por dos abogados

estadounidenses, *SAMUEL WARREN Y LOUIS BRANDEIS*, y publicado en 1890 en la *Harvard Law Review*<sup>239</sup>.

En este artículo, *WARREN Y BRANDEIS* examinan las respuestas que el derecho estadounidense ofrecía a la intrusión de los operadores de la prensa escrita en la vida privada de las personas. El periodismo comenzó a ganar gran popularidad debido a ciertas prácticas que hoy podrían calificarse de sensacionalistas. En particular, *WARREN Y BRANDEIS* se preguntaron qué respuestas daría la ley estadounidense a la perturbación causada por la publicación de fotografías conocidas como “instantáneas”.

Lo que *WARREN Y BRANDEIS* denominaban «fotografía instantánea» se refería, en realidad, al uso de cámaras capaces de tomar imágenes sin necesidad de que el personaje retratado permaneciera inmóvil, por lo que se puede deducir que quienes captaban las imágenes no tenían la necesidad de requerir el permiso de la persona que deseaban fotografiar, pues no necesitaban inmovilizarla.

Han pasado poco más de 133 años desde la publicación de este artículo y aún sigue siendo todo un clásico de la literatura jurídica. De hecho, no esperábamos tener que volver a referirnos a él cuando prácticamente en Europa y en particular, en España, la dependencia del derecho a la protección de datos con respecto al derecho a la privacidad e intimidad ya ha sido superada.

Sin ánimo de profundizar en lo que *WARREN Y BRANDEIS* llegaron a afirmar en su ensayo, ni de hacer un recorrido por la historia del origen del derecho fundamental a la protección de datos en Europa, pues ya bastante se ha escrito sobre aquello, la historia nos obliga a destacar la configuración que ambos juristas hicieron de un *right to privacy*, que describieron como un derecho amplio consistente en “poder disfrutar de la propia vida” (*the right to enjoy life*) ligado al *right to be let alone*, “o derecho a ser dejado en paz”. *WARREN Y BRANDEIS* modelaron este derecho como un derecho a la intimidad o a la vida privada, no desde el plano de la propiedad, sino anclándolo en el ámbito del derecho a la personalidad. En su opinión, era este *right to privacy* lo que amenazaban los “modernos ingenios” de la época y, por lo tanto, lo que el derecho debía reconocer y defender<sup>240</sup>.

La posición de *WARREN Y BRANDEIS* fue extremadamente influyente, en parte gracias a la importancia que adquiriría más tarde *BRANDEIS* como juez del Tribunal Supremo de los Estados Unidos.

---

<sup>239</sup> WARREN, S. & BRANDEIS, L. (1890). The Right to Privacy. *Harvard Law Review*, vol.15(5), pp.194-220.

<sup>240</sup> SALDAÑA, M. N. (2012). “The Right to Privacy”. La génesis de la protección de la privacidad en el sistema constitucional norteamericano: el centenario legado de Warren y Brandeis. *Revista de derecho público UNED*, n°85, pp.195-240.

Después del trabajo de *WARREN Y BRANDEIS*, quince tribunales estatales de EEUU comenzaron a reconocer un derecho consuetudinario a la privacidad<sup>241</sup>. Citaremos algunos casos, a modo de ejemplo:

El primero fue el Tribunal Supremo de Georgia en el caso *Pavesich v. New England Life Ins. Co.* de 1905<sup>242</sup>, en el que el Tribunal reconoció el derecho a la privacidad como un derecho legal, el cual había sido vulnerado por parte de la compañía *New England Mutual Life Insurance Company* (en la actualidad, MetLife), al publicar una imagen de Paolo Pavesich sin su consentimiento (con el propósito de aumentar las ganancias de la compañía).

Seguidamente, en el caso *Melvin v. Reid* de 1931, dictado por la Corte de Apelación de California<sup>243</sup>. El tribunal hizo una referencia expresa al artículo doctrinal “*The Right to Privacy*” de Warren y Brandeis, así como al caso *Pavesich v. New England Life Ins.* y resolvió que se había invadido la privacidad de la recurrente (Gabrielle Darley, esposa de Bernard Melvin), ya que, según el tribunal, existe un derecho a la privacidad, que, con independencia de si se le llama así o se le da otro nombre, es un derecho garantizado por la Constitución norteamericana, que no debe ser invadido por terceros.

Por su parte, la Corte Suprema de EE.UU, reconoció expresamente un derecho a la privacidad en el caso *Griswold v. Connecticut*, en 1965<sup>244</sup>. La Corte dictaminó que la prohibición estatal del uso de anticonceptivos por parte de parejas casadas vulneraba el derecho a la privacidad y, en especial, el derecho a la privacidad conyugal (*right to marital privacy*).

En todos estos casos, los Tribunales reconocieron el derecho de las personas a tener un ámbito de decisión sobre su vida privada, amparado en el derecho a la privacidad, un derecho sin reconocimiento constitucional.

Posteriormente, en el caso *Katz v. United States*, en 1967<sup>245</sup>, la Corte comenzó a unir el derecho a la privacidad a distintas enmiendas, como base jurídica para este derecho que no contaba con reconocimiento constitucional expreso. En este caso, la Corte extendió el derecho a la prohibición de registro e incautación (*searches and seizures*) de personas, domicilios, papeles y efectos de un individuo sin las garantías

---

<sup>241</sup> Los quince fueron: Alabama, Arizona, California, Carolina del Norte, Florida, Georgia, Illinois, Indiana, Kansas, Kentucky, Michigan, Misuri, Montana, Oregón y Pensilvania.

<sup>242</sup> Supreme Court of Georgia. Caso *Pavesich v. New England Life Ins. Co.*, 122 Ga. 190, 50 S.E. 68 (1905)

<sup>243</sup> Court of Appeal of California. Caso *Melvin v. Reid*, 112 Cal. App. 285, 297 P. 91 (Dist. Ct. App.) (Feb. 28, 1931)

<sup>244</sup> SCOTUS. *Griswold v. Connecticut*, 381 U.S. 479 (1965).

<sup>245</sup> SCOTUS. *Katz v. United States*, 389 U.S. 347 (1967).

correspondientes (reconocido por la IV Enmienda), para incluir como área protegida constitucionalmente lo que una persona busca preservar como privado, incluso en un área accesible al público (*seeks to preserve as private, even in an area accessible to the public*). Esta decisión de la Corte modificó su doctrina de sus decisiones anteriores; especialmente el caso *Olmstead v. United States* de 1928.

De igual modo, en el caso *Roe v. Wade* en 1973<sup>246</sup>, el derecho a la privacidad fue uno de los pilares sobre los que se basó la Corte para legalizar la interrupción voluntaria del embarazo, al considerar que interrumpir o no un embarazo es una cuestión que atañe a la privacidad (intimidad) de la mujer embarazada en cuestión. Así, el derecho a la privacidad protege ese ámbito de la vida privada en el que la persona puede tomar sus decisiones (privadas); en este caso preciso, la facultad de decidir si se termina anticipadamente o no el embarazo.

Con todas estas decisiones se fue construyendo el derecho a la intimidad (*right to privacy*) en la tradición estadounidense, un derecho sin reconocimiento en la Constitución Federal norteamericana ni en la Declaración de derechos.

De todo lo expuesto se concluye que, en la tradición estadounidense-anglosajona, para hacer referencia al “derecho a la intimidad” se hace uso de la acepción “derecho a la privacidad” o “privacidad” (*right to privacy*)<sup>247</sup>. Este derecho, que se ha ido construyendo paulatinamente con los pronunciamientos de la Corte Suprema de EEUU, engloba, entre otros: el ámbito privado libre de injerencias de terceros o del Estado (*Katz v. United States*), el área privada de la vida familiar y a la privacidad familiar (*Moore v. City of East Cleveland*), la privacidad sexual e intimidad de las relaciones íntimas (*Lawrence v. Texas*), la privacidad para decidir sobre un ámbito de la vida privada (*Griswold v. Connecticut* o *Roe v. Wade*), etc.

La noción de *privacy*, en cualquier caso, experimentó otra reconfiguración crucial en los años 60 del siglo XX. Poco a poco, la preocupación de la doctrina fue centrándose en los riesgos derivados de la creación de grandes bancos de datos electrónicos y, en general, en el posible impacto negativo del uso de la informática.

En este contexto, el jurista estadounidense ALAN F. WESTIN desarrolló un nuevo concepto de *privacy*, fundado en la visión de WARREN Y BRANDEIS y en su evolución posterior en la doctrina norteamericana<sup>248</sup>. Westin propuso definir el *right to*

---

<sup>246</sup> SCOTUS. *Roe v. Wade*, 410 U.S. 113 (1973)

<sup>247</sup> POLO, A. (2022). Privacidad, intimidad y protección de datos: una mirada estadounidense y europea. *Derechos y Libertades*, n°47, Época II, pp.307-338.

<sup>248</sup> STANLEY, L. JR. (1968). Westin: Privacy and Freedom. *Michigan Law Review*, vol.66 (5), pp.1064-1075.

*privacy* como el derecho de los individuos a controlar la información sobre ellos y a decidir cómo, cuándo y de qué manera se transmite esa información a terceros.

El derecho así delimitado y conceptualizado por WESTIN se puede denominar *informational privacy* o privacidad informativa, pero se dio a conocer más simplemente como *privacy*, o privacidad.

Esta concepción de la privacidad como derecho a controlar la información personal fue ampliamente desarrollada por la doctrina, y retomada en 1973 bajo un importante informe publicado por un comité consultivo, el *Secretary's Advisory Committee on Automated Personal Data Systems*, comité presidido por Willis H. Ware. El informe, titulado «*Records, Computers and the Rights of Citizens*» (Registros, Informática y los derechos de los ciudadanos), más conocido como el «Informe Ware»<sup>249</sup>, definió los principios básicos de lo que bautizó *Fair Information Practice* (FIP), dando luz a la primera manifestación de lo que la doctrina norteamericana suele denominar los *Fair Information Practice Principles* (FIPPs) o principios de tratamiento justo. Aunque han ido evolucionando a través de las décadas, en su primera versión los principios trataban sobre:

- Información/conocimiento: no pueden existir sistemas de información secretos que recopilen datos personales.
- Finalidad del tratamiento: las personas tienen que poder impedir que la información que se recopiló con un propósito se utilice o se ponga a disposición de terceros con otros fines sin su consentimiento.
- Acceso: los individuos tienen que poder saber qué información sobre ellos se ha recopilado y para qué se utiliza.
- Rectificación: también tienen que poder corregir dichas informaciones cuando sean incorrectas.
- Calidad y seguridad de los datos: toda organización que trate datos personales debe garantizar su fiabilidad y tomar las precauciones necesarias para prevenir un uso indebido de los mismos.

En 1974, coincidiendo con la dimisión del presidente Richard Nixon a raíz del escándalo de *Watergate* sobre un sistema de grabación y espionaje de conversaciones, el legislador estadounidense adoptó el *Privacy Act*<sup>250</sup>, ley destinada a evitar el uso indebido de información sobre los individuos por parte de las autoridades gubernamentales.

---

<sup>249</sup> Puede revisarse el informe completo aquí <https://www.justice.gov/opcl/docs/rec-com-rights.pdf>

<sup>250</sup> El documento y sus posteriores ediciones puede revisarse aquí <https://www.justice.gov/opcl/privacy-act-1974>

De todo lo examinado anteriormente, podemos concluir que la denominada privacidad de la información (*information privacy*), privacidad informacional (*informational privacy*) o privacidad de los datos (*data privacy*) se encuentra localizada dentro del concepto norteamericano de derecho a la intimidad (*right to privacy*).

Así las cosas, en EEUU, la privacidad de la información (*information privacy*) no es un derecho fundamental, Además, se confunde muchas veces con el derecho a la privacidad (intimidad) que sí ha sido reconocido como un derecho constitucional por la Corte Suprema.

A principios de los años 70 varios países europeos habían empezado a interesarse por la regulación del uso del tratamiento automatizado de datos sobre los individuos<sup>251</sup>. Así, es en Alemania, en el Estado federado de Hesse, donde ve la luz en 1970 la primera ley europea sobre protección de datos, o en su versión original, *Datenschutz*, La ley fue diseñada para acompañar el tratamiento automatizado de datos promovido por las autoridades públicas y facilitó la creación de un sistema de información para tal fin. En 1973, Suecia se convierte en el primer país europeo con una ley nacional en la materia, gracias a la adopción de su *Datalag*. Ya en 1977, Alemania aprueba su primera ley nacional de protección de datos, la *Bundesdatenschutzgesetz*<sup>252</sup>.

En 1983, el Tribunal Constitucional alemán (*Bundesverfassungsgericht*) bajo una sentencia de 15 de diciembre, mejor conocida como la Ley de Censo, afirmó la existencia de un derecho fundamental nuevo a la protección del individuo frente al tratamiento ilimitado de sus datos personales bajo el nombre de «derecho a la autodeterminación informativa» o «*informationelle Selbstbestimmung*». Fundado en el derecho general de la personalidad garantizado por la Ley Fundamental de Bonn, este nuevo derecho tuvo después gran influencia en Europa, contribuyendo al entendimiento del derecho a la protección de datos personales como un derecho autónomo.

A diferencia de la *Privacy Act* de EE.UU, que se centraba en regular el tratamiento de datos personales por parte de las autoridades públicas exclusivamente, en Europa la normativa emergente tendía a aplicarse tanto al sector público como al privado.

En algunos países europeos, como Portugal y España, la regulación del tratamiento de datos adquirió desde un primer momento rango constitucional.

---

<sup>251</sup> PIÑAR MAÑAS, J. (2005). El derecho fundamental a la protección de datos personales. Algunos retos de presente y futuro. *Revista parlamentaria de la Asamblea de Madrid*, n°13, pp.21-46.

<sup>252</sup> CAZURRO BARAHONA, V. (2020). Antecedentes y fundamentos del derecho a la protección de datos. Barcelona: Bosch.

Así, la Constitución Española de 1978, recogió este derecho -aunque con una denominación diferente a “protección de datos personales”- en la Sección 1ª del Capítulo Segundo del Título i, artículo 18 párrafo cuarto, tras consagrar los derechos a la intimidad, el honor, la propia imagen, la inviolabilidad del domicilio y el secreto de las comunicaciones, disponiendo que « la ley limitará el uso de la informática para garantizar el honor y la intimidad personal y familiar de los ciudadanos y el pleno ejercicio de sus derechos»<sup>253</sup>.

Dentro de este escenario regulatorio, el término estadounidense privacidad de la información (*information privacy*) sería el equivalente al término protección de datos (*data protection*) o autodeterminación informativa, que se emplea en Europa y en la Unión Europea; es decir, aquello relacionado con el tratamiento de información personal o datos personales.

En sus inicios, varios autores opinaban que el derecho a la privacidad de la información de EE.UU constituía un sinónimo del derecho a la autodeterminación informativa<sup>254</sup>. Sin embargo, como se ha analizado, la privacidad de la información no es un derecho en EEUU, y, en cambio, en la UE y en España la protección de datos es un derecho fundamental.

Por esta razón es que la doctrina considera que, en EE.UU la privacidad constituye el bien de la persona digno de tutela, y el derecho a la privacidad de la información (autodeterminación informativa o protección de datos en la UE) es la garantía que se establecen dentro del ordenamiento jurídico a fin de proteger ese bien.

No ha sido una cuestión pacífica el reconocimiento de un nuevo derecho fundamental a la protección de datos personales, hubo parte de la doctrina que rechazaba -incluso aún discrepan- la consideración del derecho a la autodeterminación informativa como derecho fundamental, argumentando que una reformulación del derecho a la intimidad hubiera bastado para ofrecer garantías individuales adecuadas<sup>255</sup>. No obstante, que es necesario reconocer que el derecho a la autodeterminación informativa nace justamente con el fin de proteger el ámbito íntimo de la persona, debe también entenderse que la evolución conceptual que los separa y la especial naturaleza del bien jurídico y de los instrumentos de defensa que reconocen al individuo a través del derecho a la autodeterminación informativa, no son elementos aplicables al derecho a la intimidad, ya que éste último es considerado dentro de un

---

<sup>253</sup> PIÑAR MAÑAS, J. (2005). El derecho fundamental a la ... *Op. Cit.* pp.25-28

<sup>254</sup> SALDAÑA, M. (2011). El derecho a la privacidad en los Estados Unidos: aproximación diacrónica de los intereses constitucionales en juego. *Teoría y realidad constitucional UNED*, nº28, pp.279-312.

<sup>255</sup> LÓPEZ, J.; MACAVILCA, Z.; SALON, J.; SÁNCHEZ, M.; SERRANO, C. & VALENZUELA, F. (2017). El derecho a la intimidad: nuevos y viejos debates. Madrid: Dykinson

sistema meramente indemnizatorio, es decir, prevé medidas de naturaleza puramente represivas, lo cual resulta insuficiente teniendo en cuenta el fundamento del derecho a la autodeterminación informativa, que se caracteriza por contar tanto con medidas de carácter preventivo como sancionador.

Sin embargo, el hito que rompe con toda especulación respecto a la fisonomía del derecho fundamental a la protección de datos, es la proclamación de “la Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea” (en adelante, la Carta), en la Cumbre de Niza de 7 de diciembre de 2000, que de forma directa dispone en su artículo 8, dentro del capítulo relativo a las libertades, que “Toda persona tiene Derecho a la protección de los datos de carácter personal que la conciernan”, sin hacer referencia alguna a la intimidad o privacidad o a la informática, en cuanto a considerarla como parte o garantía de alguna de ellas. Es más, en su artículo 7, la Carta, de forma separada, recoge el derecho a la vida privada y familiar, diferenciando, así, el derecho a la privacidad y el derecho a la protección de datos, mereciendo – ambos derechos- dos preceptos distintos<sup>256</sup>.

Este cambio de paradigma se manifiesta en el ordenamiento jurídico español, a través de la sentencia del Tribunal Constitucional (en adelante, STC) 254 de 20 de julio de 1993. En esta sentencia se reconoce por primera vez, y se otorga rango de derecho fundamental a la protección de datos personales, y esto es algo realmente sobresaliente si tenemos en cuenta que la protección de datos personales como tal no aparece reconocida en nuestra Constitución. La protección de datos personales es un derecho de decantación jurisprudencial. Mediante la STC 254 de 20 de julio de 1993, dicho órgano consideró que el artículo 18 en su numeral 4 no era meramente un instituto de garantía de otro derecho (como, por ejemplo, del derecho a la privacidad), sino que también, en ese artículo se contenía un derecho fundamental propio y específico con carta de naturaleza: “el derecho fundamental a la protección de datos personales”.

Esto supone un avance doctrinal importante, ya que establece los límites entre el derecho a la intimidad y la protección de datos y porque una vez decantado un derecho jurisprudencialmente nada impide que en el futuro otros derechos fundamentales sean definidos de esta forma<sup>257</sup>. Al no contar la CE con cláusulas equivalentes al artículo 17 de la Constitución Portuguesa<sup>258</sup> o a la IX enmienda de la Constitución Americana<sup>259</sup>, esta

---

<sup>256</sup> PIÑAR MAÑAS, J. (2005). El derecho fundamental a la... *Op. Cit.* p.25.

<sup>257</sup> STC 254/1993, de 20 de julio, fundamento jurídico 6º, (BOE núm.197, de 18 de agosto de 1993).

<sup>258</sup> Artículo 17, Constitución de la República Portuguesa, de 2 de abril de 1976: “*Sera aplicable el régimen de los derechos, libertades y garantías a los derechos que se enuncian en el título II, a los derechos fundamentales de los trabajadores y a las demás libertades, incluso a derechos de naturaleza análoga previstos en la Constitución y en la ley*”

<sup>259</sup> IX Enmienda, Constitución de los Estados Unidos, de 17 de septiembre de 1787: “*No por el hecho de que la Constitución enumera ciertos derechos ha de entenderse que niega o menosprecia otros que retiene el pueblo*”.

STC sienta unas bases formidables para el desarrollo del catálogo de derechos fundamentales.

La evolución jurisprudencial de este nuevo derecho tuvo un desarrollo paulatino, una vez sentada la referencia a la consagración del derecho a la protección de datos como derecho fundamental, el análisis de la jurisprudencia constitucional ha presentado tres fases de desarrollo: en un primer momento, la decantación y carta de naturaleza del derecho y el delineado de su contenido esencial por parte de TC. Una vez superada esta fase, se inicia una segunda fase con las SSTC. 290 y 292, dictadas en el año 2000<sup>260</sup>, donde la preocupación es enjuiciar a la luz de la Constitución la normativa de desarrollo y trasposición de la Directiva 95/46/CE del parlamento europeo y del consejo de 24 de octubre de 1995 relativa a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos, reclamando la inconstitucionalidad de algunos artículos de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal (en adelante LOPD)<sup>261</sup>. Y por último, una tercera fase que afecta a la resolución de conflictos entre derechos fundamentales, como ocurre cuando la protección de datos colisiona con la libertad de expresión y la libertad de información, que debemos advertir no son los únicos derechos que pueden verse enfrentados.

Para definir este nuevo derecho fundamental autónomo e independiente a la protección de datos personales, nos volvemos, nuevamente, a la jurisprudencia del Tribunal Constitucional. La STC 292/2000, de 30 de noviembre, establece una clara diferenciación entre el derecho a la intimidad y el derecho a la protección de datos personales. Dicha sentencia hace alusión a un contenido negativo y positivo del derecho fundamental a la protección de datos, mientras que reserva para el derecho a la intimidad solo un contenido negativo. De esta forma, en cuanto a la protección de datos, su contenido negativo, vendría dado por esa esfera de abstención que debe respetar el poder público, ese ámbito de libertad en el que el ciudadano no debe verse entrometido ni perturbado. Respecto de su contenido positivo, hace referencia a ese entorno en el que no hay una abstención si no que deben acontecer ciertas conductas, como la garantía y protección. Ambas aristas del contenido se han conocido como libertad informática o habeas data e incluso como derechos ARCO (hoy derechos del interesado) que hacen clara alusión a la disposición y control que se tiene sobre los datos personales<sup>262</sup>. Son precisamente estas características las que lo diferencian del derecho a la intimidad. La intimidad es un derecho de contenido meramente negativo, que promueve a la no intromisión en esa esfera propia donde el sujeto tiene la capacidad de

---

<sup>260</sup> STC 290/2000, de 30 de noviembre, fundamentos jurídicos 14 a 19, (BOE núm.4 de 4 de enero de 2001).

<sup>261</sup> STC 292/2000, de 30 de noviembre, fundamentos jurídicos 14 a 18, (BOE núm.4 de 4 de enero de 2001).

<sup>262</sup> STC 292/2000, de 30 de noviembre, fundamentos jurídicos 7º, (BOE núm.4 de 4 de enero de 2001).

excluir a terceros con los que no quiere compartir su vida íntima, porque considera que no merecen ser conocedores de aquello que les afecta.

Se consolida así la existencia y el concepto del derecho a la protección de datos como un derecho fundamental autónomo e independiente, sea del derecho a la privacidad, sea del derecho a la intimidad, o de ambos cuando sean vistos estos últimos como sinónimo.

En consecuencia, se deberá poner especial cuidado en la naturaleza jurídica que ostenta el derecho a la protección de datos en la normativa de la Unión Europea y en particular, en España, –e incluso en algunos países de latinoamerica, ya que estos han considerado al RGPD como un estándar internacional–, a la hora de definir el contenido del neuroderecho humano a la privacidad mental. Todo en consideración a que, en EE.UU, lugar donde se puede presumir inician las preocupaciones sobre los neuroderechos humanos, la privacidad de la información no es un derecho fundamental autónomo e independiente reconocido por la Constitución, lo que puede generar confusión en el debate internacional, respecto al régimen jurídico de garantías y protección (obligaciones) que deben aplicar los responsables o encargados cuando el tratamiento incluya datos cerebrales o neurodatos.

### **3. Los datos cerebrales o neurodatos merecen una especial protección: Del excepcionalismo genético al neuroexcepcionalismo**

A medida que los proyectos de neurociencia aumentan en escala y cruzan fronteras internacionales, aumentan también las posibilidades de desarrollo de nuevas técnicas y perfeccionamiento de las técnicas existentes de extracción de datos cerebrales.

Así, por ejemplo, el proyecto *BrainSTORMS* está desarrollando un sistema que usa nanopartículas y campos magnéticos para monitorizar y controlar las 80.000 millones de neuronas del cerebro<sup>263</sup>. *SAKHRAT KHIZROEV*, científico ruso que lidera este proyecto, lleva usando una tecnología denominada MENP –nanopartículas magneto eléctricas 2000 veces más finas que un cabello– desde 2010 para investigación médica; tales MENP son capaces de recibir y emitir campos magnéticos a la vez que interactúan eléctricamente con células humanas.

De tal manera que, las nanopartículas podrían unirse a todas las neuronas cerebrales para comunicarse de manera remota con una máquina.

---

<sup>263</sup> Información del proyecto disponible en: <https://www.brainstorm-project.eu/>

Las investigaciones del equipo de *KHIZROEV* han sido lo suficientemente exitosas como para llamar la atención de la agencia de investigación avanzada de proyectos del Pentágono de Estados Unidos (DARPA). Concretamente, la Agencia ha financiado al investigador para desarrollar una interfaz inalámbrica cerebro-computadora (usando nanopartículas MENP) que permitiría “una interacción manos libres rápida, efectiva e intuitiva” con sistemas militares por parte de miembros del servicio capacitados. Su objetivo final, es reducir el coste y la duración del aprendizaje en el departamento de defensa norteamericano y mejorar los resultados finales.

Según *KHIZROEV* “La electricidad es el lenguaje del cerebro y ahora podemos hablarle sin cables ni implantes. Las nanopartículas se pueden usar para estimular regiones del cerebro eléctricamente, abriendo nuevas formas de tratar enfermedades cerebrales. Incluso puede que algún día permita el intercambio rutinario de datos entre las computadoras y el cerebro”

El objetivo de *KHIZROEV* es construir un sistema que pueda visualizar la actividad cerebral y apuntar con precisión a los tratamientos médicos al mismo tiempo. Dado que las nanopartículas responden de manera diferente a diferentes frecuencias de campo magnético, se pueden ajustar para liberar fármacos.

Por otro lado, la aparición del Metaverso y otras aplicaciones virtuales con contenidos inmersivos nos sitúan ante el reto definitivo de proteger nuestra privacidad y, asociada a ella, el conjunto de la actividad cognitiva y los resortes psíquicos que hacen posible esta última.

Asimismo, un enfoque de *Big Data* para la neurociencia promete mejorar significativamente nuestra comprensión de la relación entre la actividad cerebral y el rendimiento. Investigadores del Laboratorio de Investigación del Ejército del Comando de Desarrollo de Capacidades de Combate de EE. UU. se asociaron con la Universidad de Texas en San Antonio e *Intheon Labs* para desarrollar el primer megaaanálisis de datos de imágenes cerebrales, en este caso, mediante electroencefalografía o EEG.

Escenarios como estos, que gracias a los avances tecnológicos ya están muy cercanos a nuestro continente, plantean la cuestión de si el RGPD se erige como un régimen de protección de datos adecuado para proteger los derechos y libertades de las personas, abarcando, además, los desarrollos impredecibles adicionales de la tecnología BCI. Considerando también que, la neurotecnología plantea desafíos no solo con los derechos existentes, sino que también introduce una posibilidad de creación de nuevos derechos, los neuroderechos humanos.

A diferencia de otro tipo de información, como, por ejemplo, la dirección de un usuario, los datos neurológicos extraídos de patrones de ondas cerebrales, recopilados por dispositivos BCI nunca serán idénticos para dos personas en ninguna circunstancia

dada. Además, con los estímulos externos y el mapeo cerebral correcto, estos neuropatrones se pueden decodificar para revelar información personal confidencial, como las preferencias personales, la religión y las tendencias políticas. En consecuencia, proteger dicha información a través de cualquier medio anónimo o disociativo regulado a través del marco normativo actual de protección de datos se convierte en una tarea bastante desafiante.

Por otra parte, a lo anterior, se une el hecho de que la tecnología BCI revela una gran cantidad de información involuntaria compleja que los usuarios no podrían ser capaces de comprender o incluso no ser conscientes para dar su consentimiento para la adquisición, el procesamiento y el análisis de datos por parte de las organizaciones. En pocas palabras, por su propia naturaleza, los neurodatos, también plantean desafíos al marco regulatorio actual en cuanto a la obtención del consentimiento y las posibles restricciones para adquirir información de los usuarios.

Asimismo, en el marco de protección de datos, la lógica detrás de la regulación de categorías especiales de datos de una manera diferente, se deriva de la presunción de que el uso indebido de estos datos podría tener consecuencias más graves en los derechos y libertades fundamentales de las personas. Evidentemente existe potencialmente un conjunto de intereses en juego en el procesamiento de neurodatos, que no se percibieron como relevantes en el momento de la construcción del marco actual de protección de datos, en su sistema clasificatorio de “sensible/no sensible”.

La mente y los conceptos concomitantes, como los pensamientos privados, los sentimientos, los estados mentales y la personalidad, se perciben como el núcleo de la esfera privada del individuo<sup>264</sup>. Este núcleo está inseparablemente conectado con la dignidad del individuo y los conceptos del individuo como una entidad autónoma. En consecuencia, tales conceptos deben gozar de un estándar único de protección en derechos humanos y fundamentales.

Hay puntos de referencia legales que uno puede mirar para considerar la santidad con la que se percibe la mente. Uno puede mirar, por ejemplo, el concepto de *forum internum*; una capa de la esfera privada que describe el mundo interior (mental) del individuo. En el derecho de los derechos humanos, el *forum internum* teóricamente goza de protección incondicional y absoluta<sup>265</sup>.

Este nivel de protección está reservado únicamente para el *forum internum*. Con ciertas condiciones adjuntas, se permite la infracción en todos los demás aspectos de la esfera privada. Si hacemos el argumento de que neurodata toca el foro interno,

---

<sup>264</sup> VERMEULEN, M. (2010). *Unilateral exceptions to fundamental rights in the use of detection technologies in the fight against terrorism: Permissible limitations to the right to privacy. DETECTER project*. D06, n°3. p.7

<sup>265</sup> TAYLOR, P.M. (2005). *UN and European Human Rights Law and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press. pp.115-202

podemos sugerir que los neurodatos son, de hecho, más sensibles que los datos que se consideran "sensibles" en el marco actual de protección de datos. Y este es el motivo principal por el que algunos investigadores han homologado la sensibilidad de los datos genéticos a los datos cerebrales. Por lo tanto, una opción es dar a los datos cerebrales una protección especial y excepcional similar a la de los datos genéticos, respecto de las demás categorías especiales de datos consideradas en el RGPD.

En términos más generales, las preocupaciones sobre la privacidad planteadas sobre la información genética se derivan de su calidad predictiva, su singularidad y estabilidad y el hecho de que proporciona información sobre más de un individuo (es decir, su naturaleza familiar)<sup>266</sup>. Algunas de estas cualidades son compartidas por la información extraída de imágenes cerebrales. La principal característica compartida de los datos genéticos y cerebrales es que ambos tipos de información ofrecen la promesa de la predicción. Mediante el análisis de genes y escáneres cerebrales, se espera que se puedan establecer las propensiones a la enfermedad y el comportamiento. Así como uno de los principales resultados del HGP es la capacidad de detectar enfermedades y afecciones genéticas, las imágenes del cerebro brindan una forma de ver la estructura y la función del cerebro. Se espera que las imágenes del flujo sanguíneo y la actividad neuronal se puede utilizar para mostrar la probabilidad futura de desarrollar ciertas enfermedades y anomalías mentales<sup>267</sup>. Eventualmente, los datos de innumerables estudios neurocientíficos se pueden integrar en bases de datos, similares a las bases de datos de secuencias de genes y proteínas, para proporcionar, entre otras cosas, modelos funcionales sobre cómo funciona el cerebro, "atlas cerebrales", que incluirá una distribución de probabilidad para diferentes características cerebrales y alguna indicación de actividad cerebral "normal".

Otra cualidad compartida de la información genética y cerebral es que ambos tipos de información exponen aspectos únicos y personales, y en gran medida, incontrolables, de una persona que antes eran inobservables. Así como la composición genética de cada persona es única, también lo es el cerebro considerado un "órgano de la individualidad". En ambos casos, la disponibilidad de este tipo de información única y personalizada es un fenómeno muy reciente. Se espera que las técnicas neurocientíficas, como el escaneo cerebral, proporcionen, de manera análoga a las pruebas de ADN, información objetiva y confiable sobre una persona individual. Será un identificador tan único como una huella dactilar o un genoma. Las preocupaciones que se han expresado sobre el uso de información genética como medio de identificación de un individuo también se aplicarían a la información de imágenes cerebrales. Así como se puede obtener fácilmente un mechón de cabello y usarlo para identificar de manera

---

<sup>266</sup> NEW YORK CITY BAR ASSOCIATION. (2005). *Are your thoughts your own? Neuroprivacy and the legal implications of brain imaging*. New York: The Committee on Science and Law

<sup>267</sup> *Ídem*

concluyente a un individuo, también se puede usar un cerebro escaneado momentáneamente para identificar al sujeto y revelar información personal detallada sobre él o ella.

Asimismo, tanto los procesos genéticos como los mentales son "multifactoriales". Así como diferentes factores genéticos y ambientales pueden coincidir para dar lugar a la expresión de una enfermedad genética para la que uno tiene una predisposición, varios factores, incluido el aprendizaje y otros estímulos externos e internos, influirán en el funcionamiento del cerebro.

Sin embargo, existen diferencias significativas en las preocupaciones de privacidad que surgen con respecto al cerebro y la información genética. Aunque ambos tipos de información son de naturaleza predictiva, difieren en lo que se considera predictivo. La información genética se discute en gran medida en la literatura como predictiva de enfermedades futuras; la información cerebral es potencialmente predictiva no solo de enfermedades sino también de comportamiento. La idea de que el comportamiento de las personas en una variedad de áreas podría predecirse tiene implicaciones de privacidad que son aún mayores que las que surgen con la información genética.

Otro aspecto único de las imágenes cerebrales es que eventualmente puede permitir ver lo que las personas realmente están pensando en tiempo real. A medida que avancen las tecnologías, estas implicaciones recibirán más atención. Dado que las protecciones de la privacidad genética no cubren tales preocupaciones, serían modelos menos útiles para proteger la neuroprivacidad y será necesario desarrollar otras protecciones.

Por otra parte, en términos de interpretación, la información genética—especialmente con respecto a los correlatos entre el genoma y la enfermedad—es más objetiva y, en gran parte, desprovista de emoción y subjetividad. Se observa una secuencia de ADN y aminoácidos. Sin embargo, la interpretación de las imágenes y comportamientos del cerebro es un proceso mucho más subjetivo, que deja más espacio para la interpretación, el sesgo, la variación y el error.

Sin embargo, reconociendo más similitudes que diferencias respecto de lo particular que resultan ambos tipos de datos personales, parece conveniente que el legislador europeo aplique un razonamiento análogo al realizado para establecer las protecciones legales de los datos genéticos de cara a la incorporación de los datos cerebrales como una categoría especial e incluso "especialísima" de datos de carácter personal en el RGPD.

En consecuencia, resulta conveniente aceptar que, así como existió una discrepancia entre los datos genéticos y el antiguo marco de protección de datos establecido en la derogada Directiva 95/46/CE, lo que dio lugar a llamamientos a favor

del "excepcionalismo genético" plasmado actualmente en el RGPD, a un argumento similar deberá seguir un llamado naciente "neuroexcepcionalismo".

### **CAPÍTULO III**

#### **ANÁLISIS JURÍDICO DE LOS DATOS CEREBRALES O NEURODATOS DESDE LA PERSPECTIVA DEL REGLAMENTO GENERAL DE PROTECCIÓN DE DATOS DE LA UNIÓN EUROPEA (RGPD)**

##### **1. Consideraciones previas: privacidad, protección de datos, y nuevas neurotecnologías**

Actualmente, se encuentra vigente desde el 25 de mayo de 2018, el Reglamento (UE) 2016/679 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de abril de 2016 relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos y por el que se deroga la Directiva 95/46/CE, Reglamento General de Protección de Datos (en adelante, RGPD).

El texto constituye el marco general de regulación del tratamiento de datos de carácter personal en la Unión Europea, indica, además, que cualquier referencia que se contenga a la citada Directiva que se deroga, se entenderá hecha a dicho RGPD. De la misma manera, cualquier referencia al Grupo de protección de las personas en lo que refiere al tratamiento de datos personales establecido por el artículo 29 de la Directiva 95/46/CE se tiene que entender hecha al Comité Europeo de Protección de Datos establecido por este RGPD.

En cuanto a los objetivos de la reforma, podemos desprenderlos del título del cuerpo normativo. Por un lado, la regulación del derecho fundamental a la protección de datos y por otro, garantizar la libre circulación de los datos. Y por otro, la homogeneización del nivel de protección de datos en los distintos Estados de la Unión y adaptar la normativa de protección de datos al nuevo entorno tecnológico determinado por la expansión de internet y las redes sociales.

Al tratarse de un Reglamento, esta norma es directamente aplicable y no precisa ni admite transposición por parte de los Estados Miembros. De la misma forma que la normativa anterior, este Reglamento es aplicable al tratamiento de datos de personas físicas, no jurídicas.

El gran reto que nos trae este cuerpo normativo será determinar si dentro de los grandes volúmenes de información obtenida o procesada a través de las nuevas neurotecnologías, se puede identificar a una persona; y, por ende, si se está ante un tratamiento de datos personales, actividad estrictamente regulada por el RGPD.

##### **2. Naturaleza jurídica de los datos cerebrales o neurodatos**

Para determinar si los datos cerebrales o neurodatos pueden ser considerados un dato de carácter personal en los términos descritos por el RGPD, centraremos el análisis sobre los datos aportados, a través de un par de ejemplos de neurotecnologías específicas.

En primer lugar, analizaremos los datos cerebrales que aportan las BCIs no invasivas. Es necesario señalar que, utilizaremos únicamente señales adquiridas mediante EEG, ya sea tomada de bases de datos preexistentes como tomando datos nuevos mediante un dispositivo adquirido.

Se ha optado por datos aportados por una BCI no invasiva, porque los resultados pueden ser extendidos a los datos que pudiera aportar una BCI invasiva, ya que estas últimas permiten obtener diagnósticos aún más precisos. Se ha elegido el EEG, porque es una técnica de exploración funcional del sistema nervioso central *ab antiquo*, mediante la cual se obtiene el registro de la actividad cerebral eléctrica en tiempo real<sup>268</sup>.

El EEG mide la actividad eléctrica del cerebro mediante la colocación de electrodos sobre la superficie del cuero cabelludo. El número de electrodos o canales del EEG puede ser variable, desde unos cuantos hasta 256 canales. Los electrodos se colocan sobre el cuero cabelludo en posiciones establecidas por la federación internacional de sociedades de electroencefalografía y neurofisiología clínica, de acuerdo al Sistema Internacional 10-20. El nombre 10-20 indica el hecho de que los electrodos son ubicados a lo largo de la línea media en 10, 20, 20, 20, 20, y 10 % del total de la distancia *nasión - inión* (el *nasión* es la unión de los huesos de la nariz y el frontal, y el *inión* es la parte más prominente del occipital). El EEG es diariamente utilizado para el diagnóstico médico de patologías (por ejemplo, la epilepsia), el reconocimiento de emociones; y la interacción con dispositivos<sup>269</sup>.

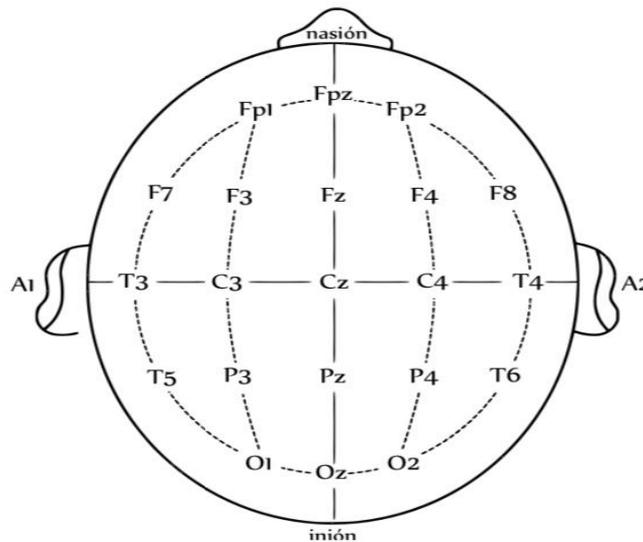
La señal del EEG es resultado de la interacción de un sinnúmero de procesos entre cientos de millones de neuronas organizadas en determinados grupos neuronales. Por ejemplo, procesos de control fisiológico, procesos de pensamiento y estímulos externos generan potenciales corticales en las correspondientes partes del cerebro que pueden ser registradas en el cuero cabelludo usando electrodos de superficie. Específicamente, los potenciales corticales son generados debido a potenciales post-sinápticos (excitatorios e inhibitorios) realizados por los cuerpos de célula y las dendritas de neuronas piramidales. De aquí que, el EEG sea un promedio de las múltiples actividades de muchas pequeñas zonas de la superficie cortical por debajo del electrodo; Las amplitudes de la señal del EEG están normalmente en un rango de 30 a 100  $\mu\text{V}$ . La actividad rítmica del cerebro en un sujeto sano está caracterizada principalmente por los siguientes tipos de onda: delta  $\delta$  (0-4 Hz.), theta  $\theta$  (4-8 Hz.), alfa  $\alpha$  (8-12 Hz.), beta  $\beta$  (12 a 30 Hz.), y gamma  $\gamma$  (30-60 Hz.). Además, las señales EEG están clasificadas como

---

<sup>268</sup> RAMOS ARGÜELLES, F., MORALES, G., EGOZCUE, S., PABÓN, R. M., & ALONSO, M. T. (2009). Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. *anales sistema sanitario navarra*, 32(supl.3), p.70.

<sup>269</sup> TORRES GARCÍA, A. (2016). Análisis y clasificación de electroencefalogramas (EEG) registrados durante el habla imaginada. (tesis doctoral) Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, pp.16-18.

no estacionarias, es decir, que son señales que presentan una frecuencia variable en el tiempo.



*Imagen 30. Posición estándar de los electrodos (10-20)*

*Posiciones estándares de los electrodos de acuerdo al Sistema Internacional 10-20. Acotaciones de las etiquetas de los canales: fp- pre-frontal, ffrontal, p- parietal, c- central, o- occipital, t- temporal, z- línea media, a-auricular; los números impares están sobre el lado izquierdo y, los números pares están sobre el lado derecho del individuo<sup>270</sup>.*

La actividad eléctrica, generada por el cerebro y que registra un EEG, varía dependiendo de diversos factores internos (edad, sexo, vigilia-sueño, estado psicoafectivo, factores metabólicos, patológicos) y externos (ambientales, toma de fármacos, procedimientos de activación, hiperventilación, estimulación luminosa), que actúan sobre una determinada base genética<sup>271</sup>.

De esta forma, el EEG del niño y del recién nacido difiere significativamente del EEG del adulto. El proceso de crecimiento, maduración y desarrollo cerebral desde el nacimiento hasta la edad adulta se acompaña de cambios progresivos en la actividad electroencefalográfica, por lo que la variabilidad de la actividad eléctrica cerebral en el niño es mayor que en el adulto. Así, por ejemplo, un EEG normal en la actividad de fondo en vigilia en un recién nacido a término, la actividad de fondo es predominantemente continua e irregular. Está constituida fundamentalmente por frecuencias theta y delta de amplitud variable. Pueden verse ondas agudas frontales bifásicas, en ocasiones asíncronas. La simetría interhemisférica alcanza aproximadamente el 80% a las 36 semanas y el 100% a las 43 semanas. En tanto que, en un adolescente de entre 13 a 19 años, el ritmo alfa está bien definido y alcanza una frecuencia de 9-11 Hz. Ocasionalmente la frecuencia del ritmo posterior puede alcanzar incluso los 12-13 Hz.

<sup>270</sup> GUTIERREZ, J. (2001). Análisis de señales en el neuromonitoreo. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, vol.22(2), pp.66-67.

<sup>271</sup> ALONSO, X. (2015). Encefalografía en el niño. [en línea] Recuperado el 31 de octubre de 2020.

Hay una disminución progresiva de la proporción de ondas lentas posteriores de la juventud. Es común la presencia de ritmo mu y ondas lambda. Desde un punto de vista técnico, el registro EEG del niño también difiere del registro EEG del adulto, ya que existen diferencias anatómicas, fisiológicas y de capacidad de colaboración<sup>272</sup>.

Además, existen enfermedades neurológicas específicas de la edad pediátrica que no están presentes en la edad adulta o enfermedades que solo puede padecer un género determinado. Ejemplo de esto último es el Síndrome de Rett, constituye una de las causas más frecuentes de retardo mental en mujeres. Es transmitida genéticamente, ligada al cromosoma "X" en forma dominante, y clínicamente asocia deterioro cognitivo progresivo, microcefalia adquirida y retardo mental severo con pérdida del uso pragmático de las manos y aparición de su signo más característico, que es el movimiento estereotipado en forma de "lavado de manos"<sup>273</sup>.

Como mencionábamos en el capítulo primero, en las BCIs basadas en EEG, a los mecanismos neurológicos o procesos empleados para generar las señales de control, se les denomina fuentes electrofisiológicas (neuromecanismo o estrategia mental). Las más utilizadas son, los potenciales corticales lentos, los potenciales P300, las imágenes motoras (ritmos sensoriales motrices mu y beta) y los potenciales evocados visuales. Para no profundizar en el tema, ya que no es el objetivo de este trabajo, solo mencionaremos un ejemplo de información neurofisiológica que nos puede aportar una de las tantas fuentes electrofisiológicas.

Los potenciales evocados visuales (PEV) son una fuente electrofisiológica, definida como la respuesta eléctrica generada por las células del córtex occipital ante un estímulo de la vía visual. La respuesta es registrada posicionando electrodos sobre el cráneo, y representa una medida objetiva y reproducible del funcionamiento de la vía visual completa, desde la mácula, los fotorreceptores, las células bipolares y ganglionares, hasta el córtex occipital. Comúnmente se realiza mediante la estimulación con damero del campo visual completo. La activación del estímulo puede ser de los tipos patrón-reverso (blanco-negro), patrón *ON/OFF* (blanco-gris-negro-gris) o *flash*. La característica principal de los PEV es que aporta datos fisiológicos cuantificables de latencia y amplitud. La duración típica de los registros es de 250 ms a partir del estímulo. Para cada tipo de estimulación, existe un patrón de respuesta definido por ondas positivas y negativas, de las cuales se mide su amplitud y su latencia. Estas características morfológicas permiten identificar determinadas disfunciones en la vía visual, orientando si predominan los fenómenos desmielinizantes, con retraso de los potenciales (aumento

---

<sup>272</sup> ALONSO, X. (2015), *Op. Cit.*

<sup>273</sup> Durante un tiempo se creyó que solamente se producía en mujeres. Sin embargo, ello no es así. Los casos de Síndrome de Rett en varones son escasos, mortal en la mayor parte antes de nacer o antes de cumplir el año de vida.

de latencia) o si predomina degeneración axonal en la vía visual (reducción de amplitud). Por otro lado, permiten realizar un seguimiento evolutivo, evaluando la posible eficacia de un tratamiento, o la progresión de una enfermedad<sup>274</sup>.

En segundo lugar, haremos referencia a los datos aportados por la Resonancia Magnética (RM) y la Resonancia Magnética Funcional (IRMf).

La RM (cerebral) es uno de los estudios más solicitados de imagenología médica. Permite a los médicos enfocarse en varias partes del encéfalo y examinar su anatomía e identificar alguna patología (como los accidentes cerebrovasculares y enfermedades desmielinizantes y neurodegenerativas), usando diferentes secuencias de RM, tales como T1, T2 o FLAIR<sup>275</sup>.

De tal manera que, la RM es el estudio imagenológico más sensible cuando se trata de examinar la estructura del cerebro y de la médula espinal. Funciona excitando los hidrógenos tisulares, los cuales a su vez emiten señales electromagnéticas de vuelta al resonador (equipo que realiza este tipo de exámenes). El resonador detecta su intensidad y la traduce a una imagen de resonancia magnética en escala de grises.

Se han realizado estudios donde se evalúan, por ejemplo, los cambios cerebrales a través de los volúmenes de las estructuras corticales o corteza cerebral (a nivel de lóbulos y hemisferios) y subcorticales (cuerpo calloso, tálamo, ganglios basales, amígdala, hipocampo, etc.) por medio de RM, no sólo en pacientes con enfermedades neurológicas como el Alzheimer, el Parkinson y el Trastorno Afectivo Bipolar, sino también en individuos infectados con Virus de la inmunodeficiencia humana (VIH).

Por su parte, la IRMf es una técnica de neuroimagen capaz de detectar los cambios fisiológicos ocurridos en el cerebro relacionados con procesos mentales, por ejemplo, durante la ejecución de una tarea determinada<sup>276</sup>. El procedimiento se realiza en el mismo resonador utilizado para obtener imágenes anatómicas por resonancia magnética para diagnóstico, pero con modificaciones especiales del software y del hardware. Para realizar una IRMf no se requiere necesariamente inyecciones de sustancia alguna ni radiación ionizante.

Mediante esta técnica se puede realizar, por ejemplo, una revisión de las estructuras cerebrales implicadas en el proceso de toma de decisiones de compra en

---

<sup>274</sup> DE SANTIAGO RODRIGO, L. (2016). Análisis avanzado de señales potenciales evocados multifocales aplicados al diagnóstico de neuropatías ópticas (tesis doctoral). Universidad de Alcalá, pp.18-19.

<sup>275</sup> CALVO-BETANCUR, V.; PINEDA-ZAPATA, J.; ARANGO-ZAPATA, A.; BUSTAMANTE-ARCILA, C.; VÉLEZ-ARANGO, J.; SÁNCHEZ-RAMÍREZ, M. & ROJAS-ARBELDEZ, C. (2015). Evaluación de estructuras cerebrales por resonancia magnética en personas infectadas con el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) y adherentes al tratamiento antirretroviral. *Medicina y Laboratorio*, vol.21(9-10), pp.465-479.

<sup>276</sup> ARMONY, J.; TREJO-MARTÍNEZ, D. & HERNÁNDEZ, D. (2012). Resonancia magnética funcional (RMf): principios y aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias cognitivas. *Neuropsicología Latinoamericana*, vol.4(2), pp.36-50.

mujeres y analizar si la implicación de estructuras cerebrales relacionadas con el procesamiento y regulación de las emociones en el proceso de la toma de decisiones de compra, puede alterarse con la modificación del tipo de producto a comprar<sup>277</sup>.

Asimismo, la IRMf, en particular el análisis de la señal por contraste dependiente del nivel de oxígeno en la sangre, o señal BOLD (por sus siglas en inglés: blood-oxygen-level-dependent), ha constituido un instrumento apreciable en estudios recientes sobre el TDA. Uno de los procesos cognitivos al que los pacientes con TDA son más susceptibles es la interferencia, es decir, la obstrucción de un proceso cognitivo debido a la aparición de un estímulo confuso. Esta interferencia puede reflejarse en la incapacidad para inhibir los elementos irrelevantes de un contexto o un evento, y por tanto interrumpir el proceso de atención. Uno de los diseños experimentales más utilizados para el estudio de la interferencia cognitiva es la Tarea *Stroop*. La versión clásica de esta tarea consiste en la presentación de una serie de palabras que denominan colores. Al momento de observar cada palabra, el participante debe indicar verbalmente el nombre del color de la tinta con que está escrita, haciendo caso omiso del significado de la palabra en sí misma. Algunas de las palabras se encuentran escritas en tintas de colores diferentes a los que denominan semánticamente, por ejemplo, la palabra “rojo” podría estar escrita en color “azul”; en este caso, el fenómeno de interferencia sucede cuando el participante debe mantener su atención en el color “azul” de la palabra, haciendo caso omiso de que su lectura refiere al significado «rojo». La aplicación de este paradigma en IRMf ha reportado que durante el proceso de interferencia predomina la actividad de la corteza anterior del cíngulo (CAC).

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, vamos a revisar lo que nos prescribe el RGPD respecto de lo que debemos entender por dato personal.

El artículo 4.1 del RGPD, define los “datos personales” como:

Toda información sobre una persona física identificada o identificable («el interesado»); se considerará persona física identificable toda persona cuya identidad pueda determinarse, directa o indirectamente, en particular mediante un identificador, como por ejemplo un nombre, un número de identificación, datos de localización, un identificador en línea o uno o varios elementos propios de la identidad física, fisiológica, genética, psíquica, económica, cultural o social de dicha persona;

De esta definición se desprende que se ha adoptado un concepto amplio de dato personal (“toda información”) y que para que un dato personal goce de protección jurídica es necesario, además de que se refiera a una persona física, que la identifique o la haga identificable. Por tanto, a los datos anónimos (cualquier información relativa a

---

<sup>277</sup> MOYA, I.; BLASCO, M. & MOLERO, V. (2016). El papel de las emociones en el proceso de toma de decisiones de compra en mujeres. Estudio realizado con resonancia magnética funcional-fMRI. Asociación de marketing de España, pp.1-17.

una persona física que no permita su identificación por el responsable del tratamiento de los datos o por cualquier otra persona, teniendo en cuenta el conjunto de medios que puedan razonablemente ser utilizados por el responsable del tratamiento o por cualquier otra persona, para identificar a dicha persona) y a los datos convertidos en anónimos (es decir, datos que anonimizados no permitan la reidentificación del interesado) no se les aplican los principios de la protección de datos personales<sup>278</sup>.

El Dictamen 4/2007 del Grupo de Trabajo del artículo 29 (actualmente, Comité Europeo de Protección de Datos), desglosó el concepto de datos de carácter personal que proporcionaba la Directiva en cuatro elementos: “toda información”, “sobre”, “persona física identificada o identificable” y “persona física”, y los analizó por separado<sup>279</sup>.

“Toda información”, es una expresión que requiere una interpretación en sentido amplio y que el GT29 analizó desde 3 puntos de vista distintos: (i) la naturaleza, (ii) el contenido y (iii) el formato o soporte.

- a Desde la naturaleza: la expresión incluye todo tipo de afirmaciones sobre una persona, ya sean objetivas (un dato fisiológico) o subjetiva (una opinión).
- b Desde el contenido: incluye todos los datos con independencia de su contenido. Por ejemplo, datos sensibles, personales *strictu sensu* y familiares o de vida privada.
- c Desde el formato o soporte: incluye la información disponible en cualquier forma, por ejemplo, alfabética, numérica, gráfica, fotográfica o sonora. Desde este punto de vista, el concepto incluye la información conservada en papel, así como la información almacenada en una memoria de ordenador, utilizando un código binario, o en una cinta de video, por ejemplo. En particular, los datos que consisten en sonidos e imágenes están calificados como datos personales desde este punto de vista, en la medida en que pueden contener información sobre una persona.

“Sobre”, por lo general, se entiende que la información versa sobre una persona cuando se refiere a ella, si bien la información también puede referirse a un objeto o a un proceso y solo indirectamente a una persona. Para el GT29, (actualmente, Comité Europeo de Protección de Datos (CEPD), una información se refiere a una persona cuando exista un elemento “contenido” o un elemento “finalidad” o un elemento “resultado”:

- Contenido: el elemento contenido está presente cuando se proporciona una información sobre una persona concreta, circunstancia que debe ser evaluada

---

<sup>278</sup> Considerando 26, del RGPD.

<sup>279</sup> Grupo del Trabajo del Artículo 29 [GT29], 2007, sobre el concepto de datos personales, pp. 6-26.

caso por caso y sin tener en consideración ni el propósito que pueda abrigar el responsable del tratamiento o un tercero, ni la repercusión que pueda tener sobre el interesado.

- Finalidad: Si el elemento “contenido” puede existir indistintamente del tratamiento que el responsable o el encargado pretenden realizar, no ocurre lo mismo con el elemento “finalidad”, que sí depende del tratamiento en cuestión, considerándose que existe *“cuando los datos se utilizan o es probable que se utilicen, teniendo en cuenta todas las circunstancias que rodean el caso concreto, con la finalidad de evaluar, tratar de determinada manera o influir en la situación o el comportamiento de una persona”*.
- Resultado: Finalmente, también debe entenderse que los datos versan “sobre” una persona en esas situaciones en que, *“teniendo en cuenta todas las circunstancias que rodean el caso concreto, es probable que su uso repercuta en los derechos y los intereses de determinada persona”*.

Los tres elementos son independientes, *ergo* para considerar que la información versa “sobre” una persona, no es necesario que concurren los tres elementos simultáneamente, sino que bastará con que exista uno de ellos. Además, es posible que una misma información se refiera al mismo tiempo a diversas personas, porque en esa información concorra más de un elemento y uno se refiera a una persona y otro a otra.

“Persona física identificada o identificable”, se considera que una persona física está “identificada” cuando, dentro de un grupo de personas, se la puede distinguir de los demás miembros del grupo. Por consiguiente, la persona física será “identificable” cuando, aunque no se la haya identificado todavía, sea posible hacerlo.

Por lo general, se entiende que una persona está directamente identificada cuando conoces su “nombre y apellidos”, pues es el identificador más común y al que a menudo nos referimos. No obstante, en ocasiones el nombre y apellidos pueden no ser suficiente para identificar a una persona y deberán de combinarse con otros datos, como una dirección, una foto de perfil o un número de teléfono, que permitan identificar a la persona indirectamente.

“Persona física”, el RGPD establece en el considerando 14 que «la protección otorgada por el presente Reglamento debe aplicarse a las personas físicas, independientemente de su nacionalidad o de su lugar de residencia, en relación con el tratamiento de sus datos personales». Se trata, por lo tanto, de un derecho universal de las personas físicas que no se circunscribe a los nacionales o residentes de un determinado país.

El RGPD limita su protección a las personas físicas vivas, excluyendo a las personas fallecidas<sup>280</sup>. Tampoco se aplicará el Reglamento a los datos relativos a las personas jurídicas<sup>281</sup>.

Ahora bien, el considerando 26 del RGPD al referirse al término «identificable» es decir, para determinar si una persona es identificable, señala que, hay que considerar el conjunto de los medios que puedan ser razonablemente utilizados por el responsable del tratamiento o por cualquier otra persona, para identificar a dicha persona. Esto significa que la mera e hipotética posibilidad de singularizar a un individuo no es suficiente para considerar a la persona como «identificable». Si, teniendo en cuenta «el conjunto de los medios que puedan ser razonablemente utilizados por el responsable del tratamiento o por cualquier otra persona», no existe esa posibilidad o es insignificante, la persona no debe ser considerada como «identificable» y la información no debe catalogarse como «datos personales»<sup>282</sup>.

Según el GT29, el criterio del «conjunto de los medios que puedan ser razonablemente utilizados por el responsable del tratamiento o por cualquier otra persona» debe tener especialmente en cuenta todos los factores en juego. Lo costoso de la identificación es un factor, pero no el único. La finalidad del tratamiento, la manera en que el tratamiento está estructurado, el rédito que espera obtener el responsable del tratamiento, los intereses individuales en juego, así como el riesgo de que se produzcan disfunciones organizativas (por ejemplo, un quebrantamiento del deber de confidencialidad) y los fracasos técnicos son todos ellos elementos que deben tenerse en cuenta.

Por otra parte, se desprende del RGPD que el tratamiento de los datos se refiere a cualquier operación o conjunto de operaciones efectuadas sobre datos personales o conjunto de datos personales, mediante procedimientos manuales o automatizados relacionadas con la recogida, el registro, la organización, la estructuración, la conservación, la adaptación o modificación, la extracción, la consulta, la utilización, la comunicación por transmisión, la difusión o cualquier otra forma de habilitación de acceso, cotejo o interconexión, limitación, supresión o destrucción<sup>283</sup>.

En consecuencia, en entornos BCI –dado como ejemplo– los impulsos eléctricos *per se* conocidos como ondas cerebrales no necesariamente recogen una información que, entendida en los términos del RGPD permita identificar indiscutiblemente a la persona física de donde surgen. Sin embargo, el GT29 ha señalado que, en particular, los datos que consisten en sonidos e imágenes –como en el caso de la RM y de la IRMf– están calificados como datos personales en la medida en que pueden contener

---

<sup>280</sup> Considerando 27, del RGPD.

<sup>281</sup> Considerando 14, del RGPD.

<sup>282</sup> GT29, *Op. Cit.* págs.16-17.

<sup>283</sup> Artículo 4.2 del RGPD.

información sobre una persona<sup>284</sup>. En este sentido, los datos aportados por técnicas de neuroimagen; los impulsos eléctricos registrados en un EEG (procesados y decodificados), se traducen en datos fisiológicos, que, unidos a otras características personales internas o externas como la edad, sexo, historial clínico, patologías, información relacionada con factores de carácter psicológico, información de ficheros automatizados o manuales, entre otros, permiten determinar la identidad del titular de los datos.

Por lo tanto, en todos esos casos en que los identificadores de que dispone el responsable del tratamiento o cualquier otra persona, que no permiten singularizar a una persona determinada, pero al combinarlos con otros datos (tanto se tenga conocimiento de su existencia como si no) es posible distinguir a la persona de otras, debe entenderse que la persona es identificable indirectamente. Por lo tanto, estamos frente a un dato personal cuyo tratamiento queda sometido a la normativa sobre protección de datos personales.

Con todo, es necesario destacar que este planteamiento no es aislado, recordemos un caso paradigmático llevado ante el TJUE. Traemos a este trabajo el caso *Digital Rights Ireland y Seitlinger y otros* del año 2014<sup>285</sup>. Esta resolución invalidó la Directiva de Conservación de Datos del año 2006<sup>286</sup> en su totalidad. No obstante, lo relevante a efectos de este análisis es la fundamentación jurídica del TJUE.

La sentencia que anulaba la mencionada Directiva, se basaba fundamentalmente en la vulneración de dos derechos fundamentales: el respeto de la vida privada y familiar y la protección de datos de carácter personal<sup>287</sup>.

En dicho pronunciamiento el TJUE estableció una doctrina de gran importancia que ha venido repitiendo:

Estos datos [datos de comunicaciones electrónicas], considerados en su conjunto, pueden permitir extraer conclusiones muy precisas sobre la vida privada de las personas cuyos datos se han conservado, como los hábitos de la vida cotidiana, los lugares de residencia permanentes o temporales, los

---

<sup>284</sup> GT29, *Op. Cit.* p.8.

<sup>285</sup> STJUE (Gran Sala) de 8 de abril de 2014, asuntos acumulados C-293/12 y C-594/12, *Digital Rights Ireland y Seitlinger y otros*.

<sup>286</sup> Directiva 2006/24/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, sobre la conservación de datos generados o tratados en relación con la prestación de servicios de comunicaciones electrónicas de acceso público o de redes públicas de comunicaciones y por la que se modifica la Directiva 2002/58/CE.

<sup>287</sup> Artículos 7 y 8, CDFUE

desplazamientos diarios u otros, las actividades realizadas, sus relaciones sociales y los círculos sociales que frecuentan<sup>288</sup>.

Ahí tenemos una idea de vital importancia respecto a la protección de datos: “considerados en su conjunto”.

Esta sentencia de 2014 versaba sobre los datos relativos a las comunicaciones (o metadatos); es decir, todos aquellos que nos encontraremos cada vez que se produzca una comunicación electrónica (una llamada telefónica, por ejemplo): fecha y hora de la comunicación, duración, destinatario, número marcado, lugar de la llamada, etc. Todos los que nos encontraremos en las comunicaciones encaminadas a través de una red de telecomunicaciones<sup>289</sup>.

En este caso preciso, la duración de una llamada telefónica (metadatos) es un “dato no personal”, ya que él solo, por sí mismo, ni identifica ni permite identificar a una persona física<sup>290</sup>.

Sin embargo —aquí es donde adquiere relevancia el pronunciamiento del TJUE— todos los datos de tráfico “considerados en su conjunto” constituyen un “dato personal”, ya que permiten identificar a una persona física.

De este modo, podemos estar ante un dato personal “simple” o “compuesto”: una dirección IP o número de teléfono (dato simple) que tiene un titular y sólo sería necesario comprobar quién es el titular —buscando el número de teléfono, por ejemplo, en los listines telefónicos o en buscadores—, con lo que estaríamos hablando de una persona física identificable; o bien, otros datos de tráfico que “considerados en su conjunto” (fecha y hora de la comunicación, duración, etc.), permiten identificar a una persona física (el dato personal es el derivado del conjunto de estos datos de tráfico, como un “perfil”)<sup>291</sup>.

Así, un sólo dato (duración de la llamada) no sería un dato personal (“dato no personal”) porque no permite identificar a una persona física, pero, “considerados en su

---

<sup>288</sup> STJUE (Gran Sala) de 8 de abril de 2014, asuntos acumulados C-293/12 y C-594/12 Digital Rights Ireland y Seitlinger y otros, ap. 27. También: STJUE (Gran Sala), de 21 de diciembre de 2016, asuntos acumulados C-203/15 y C-698/15, Tele2 Sverige AB y Secretary of State for the Home Department y otros, ap. 99.

<sup>289</sup> Son «datos de tráfico»: «cualquier dato tratado a efectos de la conducción de una comunicación a través de una red de comunicaciones electrónicas o a efectos de la facturación de la misma», art. 2 de la Directiva 2002/58/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de julio de 2002, relativa al tratamiento de los datos personales y a la protección de la intimidad en el sector de las comunicaciones electrónicas (Directiva sobre la privacidad y las comunicaciones electrónicas), modificada en 2009.

<sup>290</sup> un «dato no personal» es el que no identifica ni permite identificar a una persona física y que no está bajo la protección del RGPD ni del artículo 8 del CDFUE.

<sup>291</sup> Se parte de distintos «datos no personales» y conjuntamente conforman un «datos personal» que permite identificar a una persona física, y, además, conocer detalles muy precisos sobre la vida privada de la persona física en cuestión.

conjunto” (la fecha, más la hora, más la duración, más el lugar, etc.), estaríamos ante una información sobre una persona física identificable.

Por tanto, el “dato personal compuesto”, será aquel que está compuesto por varios “datos no personales” (ya que no identifican ni permiten identificar a una persona física), pero que al considerarlos en su conjunto conforman un dato personal.

Esto tiene una relevancia máxima en el ámbito de los datos personales, ya que pueden darse fraudes de ley al RGPD, en este aspecto, nos encontramos ante un vacío legal en el reglamento. Así, si un responsable del tratamiento procede a la fragmentación del dato compuesto y su conversión a datos no personales, al tratarse de “datos no personales” sería de aplicación el Reglamento (UE) 2018/1807, excluyendo el RGPD y su régimen mucho más exigente y garantista. Pero, en realidad, se estaría haciendo uso de datos personales.

De tal manera que, esta doctrina del TJUE abre la puerta a controlar dichas situaciones, para no dejar sin protección a la ciudadanía; en especial, para garantizarle a la persona el poder de controlar el flujo de informaciones (datos) que le concierne y de impedir su tráfico ilícito y lesivo para la dignidad y derecho del afectado.

### **3. La consideración de los datos mentales como datos cerebrales: aplicación del instituto de la *Fictio iuris***

La irrupción de las nuevas tecnologías ha causado un cambio sustancial en la forma de apreciar el derecho, y en particular, en la forma en que se desarrolla el pensamiento jurídico. Nos enfrentamos a diario a nuevos términos, relacionados con disciplinas científicas y técnicas, como las neurociencias y neurotecnologías que, ponen en jaque la funcionalidad y desarrollo del derecho cuya metodología parece indicar una incapacidad para regular nuevos supuestos que van surgiendo de forma repentina.

Las repercusiones de la ciencia y la tecnología en el derecho son cada vez más intensas, prevenir en todas ellas parece inviable. Así, el contenido que pretendemos reflejar a través de una norma, cualquiera sea nuestro esfuerzo, parece estar inevitablemente condenado a la obsolescencia.

Para dar respuestas a los desafíos que nos imponen las nuevas tecnologías, el pensamiento jurídico ha debido diseñar nuevos instrumentos que le permitieran analizar y crear marcos conceptuales *ad hoc* a las nuevas condiciones de desarrollo social. Aparece en este contexto el derecho informático, dando lugar a un conjunto de principios y normas destinadas a la regulación de las nuevas tecnologías de la información y comunicación<sup>292</sup>.

---

<sup>292</sup> ÁLVAREZ, M. (1998). Informática y Derecho en España. *Revista iberoamericana de derecho informático*, nº23-26, pp.1033-1044.

Lo propio se pretende hacer con los desafíos que nos imponen las neurociencias y las neurotecnologías. Para dar soluciones jurídicas a los problemas que subyacen del estudio del sistema nervioso en general, y del cerebro humano en particular, mediante la aplicación e interacción de tecnologías avanzadas, el pensamiento jurídico ha debido diseñar una nueva disciplina jurídica, el llamado “Neuroderecho”.

El neuroderecho, como disciplina que se aboca al estudio de las relaciones entre el derecho, la neurociencia y las neurotecnologías avanzadas, busca visibilizar un realismo jurídico que propone sentar las primeras bases para una regulación de los problemas y efectos que se desprenden del uso de las neurotecnologías e inteligencia artificial en los seres humanos<sup>293</sup>.

El neuroderecho es una disciplina inequívocamente científica en vías de desarrollo, aún no existe consenso en su contenido, definiciones y límites, ni mucho menos existe un catálogo de situaciones específicas reguladas por este. Y es esta justamente la tarea a la que somos llamados los juristas a través del razonamiento jurídico<sup>294</sup>, intentar construir esta nueva disciplina despejando dudas, desarrollando nuevos conceptos, estructurando definiciones y por sobre todo regulando situaciones y disponiendo soluciones jurídicas ante la posible vulneración de los derechos y libertades fundamentales de las personas.

Sin ánimo de realizar un análisis profundo de las respuestas que nos permite dar el derecho a través del razonamiento jurídico –ya que no es el objeto de este estudio– nos permitimos señalar que el razonamiento jurídico y, en consecuencia, el derecho, sea el consagrado en las leyes, el creado en las sentencias, o el estipulado por las partes en un contrato bajo el principio de la autonomía de la voluntad, se expresa siempre a través del lenguaje jurídico<sup>295</sup>.

El lenguaje jurídico no es sino un conjunto de expresiones formales y, por tanto, directamente propensas a la convencionalidad. Por eso, en las leyes, en las sentencias, los actos jurídicos, los contratos, libros de derecho y en los artículos científicos, se acude alternativamente a la síntesis y al análisis, al concepto y a la descripción, a las definiciones, a las interpretaciones restrictivas y extensivas, las expresiones descriptivas

---

<sup>293</sup> CÁCERES, E., & LÓPEZ, C. (2022). El neuroderecho como un nuevo ámbito de protección de los derechos humanos. *Cuestiones Constitucionales*, n°46, pp.65-92.

<sup>294</sup> ATIENZA, M. (2015). Razonamiento jurídico. En J. Fabra Zamora, & Á. Nuñez Vaquero, *Enciclopedia de filosofía y teoría del derecho*, vol. 2, pp.1419-1452. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>295</sup> Prieto, J. (1996). Lenguaje jurídico y estado de derecho. *Revista de administración pública*, n°140, pp.111-129.

coherentes, pero también contradictorias en sus términos, a las afirmaciones positivas o negativas, realistas, y a las figuraciones más o menos alejadas de la realidad.

Pero, además, a través del razonamiento jurídico se manifiesta la expresión máxima del derecho como un arte<sup>296</sup>, ese arte de los juristas que a menudo se propone modelar las relaciones sociales y la conducta humana mediante una observación en doble sentido, por un lado, considerando aquello material o sustantivo que aparece de inmediato ante los sentidos, y por otro, otorgándole un sentido formal a lo material o sustantivo a fin de darle un efecto jurídico. De tal manera que, esta observación del jurista en doble sentido, da lugar a dos representaciones de la realidad de las cosas: una de la realidad sustancial o subyacente, y otra, de la realidad jurídica, que justamente se conforma a través del arte de la creación de normas.

Entre las figuraciones más o menos alejadas de la realidad, a las que antes nos hemos referido, encontramos las “*ficciones jurídicas*”. Este procedimiento o técnica jurídica consistente en suponer un hecho o una situación diferente de la realidad con vistas a producir un efecto jurídico<sup>297</sup>. Es decir, figuraciones de un hecho contradictorio a la realidad, representándolo como existente si no existe o como no existente si existe, de modo que la ficción supone en un asunto determinado, la desnaturalización consciente del jurista constructor del derecho, de una realidad natural, por razones más o menos justificables de equidad, de utilidad o de conveniencia jurídica, dirigida a hacer posible la aplicación de una norma en otro caso no aplicable.

En este sentido *RENÉ DEKKERS*, entiende a la ficción jurídica como “un procedimiento técnico consistente en colocar intelectualmente un hecho, una cosa o una persona en una categoría jurídica conscientemente impropia para que, consiguientemente, pueda beneficiarse de la solución práctica de esta categoría”<sup>298</sup>.

La ficción, como expresión de la poderosa creatividad del jurista, sirve así para proponer lo desigual como igual, atribuyendo los mismos efectos jurídicos a dos hechos, situaciones o cosas diferentes y diversos.

Sin intención de extendernos en la materia, y tan solo con el ánimo de dar lucidez al legislador, en cuanto a las formas en cómo se expresan las ficciones jurídicas, es necesario conocer su clasificación<sup>299</sup>. Así, las ficciones pueden clasificarse, por su origen,

---

<sup>296</sup> PECES-BARBA, G., (2003). Derecho y arte. *Letra Internacional*, n°81, pp.34-36.

<sup>297</sup> LUNA, A. (2004). Las ficciones del derecho en el discurso de los juristas y en el sistema del ordenamiento. Discurso de ingreso de académico de número. Academia de jurisprudencia y legislación de Cataluña, pp.1-107.

<sup>298</sup> DEKKERS, R. (1935). *La fiction juridique: étude de droit romain et de droit comparé*. París: Sirey

<sup>299</sup> Luna, A. (2004). Las ficciones del derecho... *Op. Cit.* pp.31-32.

en doctrinales o dogmáticas, judiciales o, según algunos, jurisprudenciales, negociales y legales; por su objeto, las ficciones pueden catalogarse por su referencia, además de a situaciones o a circunstancias, a lugares, a personas y a cosas, a las que atribuyen alguna cualidad que no les es natural; por su modo, las ficciones pueden ser positivas, si consideran existente lo que no existe, o negativas, si consideran inexistente lo que existe; por su virtualidad, las ficciones pueden ser intelectuales o materiales, según que en ellas el derecho contradiga a la realidad o la realidad al derecho; y, finalmente, por su función, pueden distinguirse las ficciones en operativas, prácticas, constructivas o también llamadas, a veces, históricas, si alcanzan virtualidad normativa, y en dogmáticas o sistemáticas, también llamadas, en ocasiones, teóricas, que a menudo utilizan los juristas para la comprensión armoniosa del derecho como sistema jurídico.

Podemos encontrar la utilización del instituto de la ficción jurídica o *fictio iuris* alrededor de todo el ordenamiento jurídico. Así, por ejemplo, la consideración de cosas muebles como inmuebles; el derecho, de acuerdo con la realidad, divide el tiempo en días, pero luego distingue entre días hábiles e inhábiles; el tiempo no puede en la realidad dejar nunca de correr y, sin embargo, la prescripción extintiva, aunque por lo general ello sea excepcional, puede ser objeto de suspensión; y por supuesto, el caso más ilustre de las ficciones, y no menos discutido de la equiparación analógica a las personas físicas o naturales, de las personas jurídicas o morales.

Es así como el razonamiento jurídico nos ofrece este instituto de la *fictio iuris*, que de antaño ha venido a servir a la lógica jurídica para dar solución y regulación a realidades naturales o materiales—mediante realidades jurídicas o formales— cuya incorporación literal —en ocasiones, restrictiva— en el ordenamiento jurídico podría no alcanzar hechos, cosas o personas, despojándolas de una solución normativa, y por lo tanto, de una debida protección jurídica.

Tal es el caso, por ejemplo, en el que se discute si los datos mentales se identifican o no con los datos cerebrales, cuestión que emana del problema, dualismo mente—cerebro, en el que se discute si los procesos mentales (tal como los estudia la psicología cognitiva o la inteligencia artificial) se identifican o no con los procesos cerebrales (tal como los estudia la neurociencia)<sup>300</sup>. Así, se ha sostenido que los datos mentales deben distinguirse de los datos cerebrales por dos razones<sup>301</sup>: en primer lugar, no todos los datos mentales son datos cerebrales, ya que la información sobre estados y procesos mentales también se puede deducir de datos no neuronales, como los datos de comportamiento. Viceversa, no todos los datos cerebrales son datos mentales, ya que

---

<sup>300</sup> MARTÍNEZ-FREIRE, P. (1999). El debate mente-cerebro a la luz de las nuevas técnicas de exploración del cerebro. *Revista interdisciplinaria de filosofía*, vol.4, pp.65-75.

<sup>301</sup> WEXLER, A. (2019). Separating neuroethics from neurohype. *Nat Biotechnolog*, 37(9), pp.988-990.

los datos cerebrales pueden procesarse para inferir no solo estados mentales sino también anatomía y fisiología cerebrales básicas, sin revelar nada relacionado con estados y procesos mentales<sup>302</sup>.

Lo cierto es que, no se puede negar que, el dualismo mente–cerebro ha empezado a perder fuerza desde que las nuevas técnicas de exploración del cerebro parecen prometer la posibilidad de un estudio directo y positivo de los estados y procesos mentales. Así, por ejemplo, y como hemos visto en el primer capítulo, la IRMf es capaz de cartografiar el funcionamiento del cerebro y también su estructura<sup>303</sup>. Cuando entra en funcionamiento alguna parte del cerebro, el consumo de oxígeno del flujo sanguíneo se incrementa en esa zona. La IRMf mide los cambios en la oxigenación de la sangre de esa zona del cerebro, lo cual es posible porque la sangre desoxigenada responde al magnetismo con mayor fuerza que la sangre muy oxigenada. Las imágenes de IRMf muestran así los niveles de la actividad cerebral según distintos colores.

Asimismo, la tomografía por emisión de positrones (PET)<sup>304</sup>, localiza el aumento de flujo sanguíneo en alguna región cerebral cuando el cerebro emprende alguna tarea determinada. El aumento de flujo se detecta inyectando, junto a un análogo de glucosa, una sustancia radiactiva de muy corta vida (entre uno y dos minutos), por ejemplo, oxígeno 15, en la corriente sanguínea. Este compuesto inyectado viaja hasta el cerebro y se concentra en sus zonas más activas, ya que la actividad cerebral incrementada exige una mayor cantidad de sangre. Los átomos radiactivos pierden actividad y emiten positrones (esto es, electrones cargados positivamente) los cuales al chocar con electrones producen dos fotones en direcciones opuestas. Estos fotones son detectados mediante detectores situados alrededor de la cabeza del sujeto. Las áreas de mayor concentración de fotones indican niveles altos de la actividad mental. Las imágenes de PET tienen distintos colores según la mayor o menor actividad cerebral.

De tal manera que, mediante la utilización de estas técnicas de neuroimagen, algunos científicos sostienen que son capaces de una observación directa de los procesos mentales a través del estudio y análisis de los procesos cerebrales. Es decir, la observación del cerebro coincidiría con la observación de la mente, con lo que la identidad mente–cerebro quedaría establecida. Esto posibilita hablar de un dualismo mitigado, una relación bidireccional entre órgano y función, según el cual los procesos

---

<sup>302</sup> Todo a la luz de la limitada precisión y fiabilidad de los neurodispositivos disponibles en la actualidad.

<sup>303</sup> MARTÍNEZ-FREIRE, P. (1999). El debate mente-cerebro... *Op. Cit.* p.71. también *Vid.*, NOVOA, R., CERESSA, I., OLIVA, M., PÁEZ, P. (2023). Correlación entre estado emocional y activación funcional mediante resonancia magnética. *Revista argentina de radiología*, vol.87(2), pp.45-53.

<sup>304</sup> *Ibidem*, p.72. También *Vid.*, GARCÍA, M. & QUIZHPILEMA, J. (2021). Tomografía por emisión de positrones en diagnóstico oncológico. *Infoanalítica*, vol.9(2), pp.185-197.

mentales no pueden darse sin los procesos cerebrales, aunque no se reducen a estos, sino que son fenómenos o propiedades emergentes del cerebro.

Sea cual fuere la postura frente al problema mente–cerebro, lo cierto es que para ante el derecho no pueden quedar cuestiones sin resolver. El derecho, que se decanta en un sistema de normas, debe ser capaz de abarcar en ellas la mayor parte de los problemas jurídicos que se presentan ante el avance de las nuevas tecnologías, su propósito será, prevenir cualquier vulneración a los derechos y libertades fundamentales de las personas. Por tanto, parece indiscutible que, el concepto de datos cerebrales deba entenderse y consagrarse en la norma en el sentido más amplio que se merece –aplicando el instituto de la *fictio iuris*, con lo que se pretende dotar de verdadera eficacia jurídica a las normas que los regulen– comprendiendo, así, la estructura o anatomía cerebral, la actividad y funcionamiento del cerebro, y por supuesto, los datos mentales, entendidos estos como aquellos que emanan de los estados o procesos mentales.

#### **4. El dato cerebral o neurodato como dato de carácter personal: iniciativas, conceptos y definiciones internacionales, regionales y locales**

Los grandes avances actuales sobre las ciencias del cerebro permiten la posibilidad de analizar, registrar, alterar y /o manipular la actividad del cerebro. Es lo que científicamente se conoce como “neuromodulación”<sup>305</sup>. Si adicionalmente, se incluyen los avances en materia de sistemas y microcircuitos, surge la neurotecnología que, junto con la Inteligencia Artificial, ha demostrado que es posible acceder a parte de la información almacenada en el cerebro e incluso llegar a leer y escribir la actividad cerebral de las personas. Esto supone una revolución en materia de la Neurociencia y un nuevo horizonte por desarrollar para las compañías e instituciones.

Ante esta problemática, el derecho fundamental a la protección de datos personales busca evitar que cualquier dato obtenido del análisis y medición de la actividad neuronal, estructura o funcionamiento del cerebro, sea utilizado sin el consentimiento del individuo o cualquier otra base legal que legitime el tratamiento de datos personales.

Resulta esencial que se garantice la confidencialidad e integridad de los neurodatos del individuo. El objetivo de aplicar la legislación de datos personales a estos

---

<sup>305</sup> La Sociedad Internacional de Neuromodulación (International Neuromodulation Society) define a la neuromodulación como la alteración terapéutica de la actividad en el sistema nervioso central, periférico o autónomo, ya sea eléctrica o farmacológica, por medio de dispositivos implantables. El principio básico de la neuromodulación es cambiar la permeabilidad a iones de las neuronas, química o eléctricamente, aumentando o disminuyendo así la posibilidad de generarse un potencial de acción por tales neuronas. La aplicación de corriente eléctrica a baja frecuencia produce un efecto excitatorio, mientras que la estimulación a alta frecuencia produce inhibición neuronal.

nuevos desarrollos tecnológicos es impedir que la información disponible sobre el cerebro humano que permita la identificación directa o indirecta de un individuo, pueda ser utilizada con fines ilícitos que perjudiquen los derechos fundamentales del titular de datos personales.

Diversos actores gubernamentales, intergubernamentales y no gubernamentales están actualmente involucrados en la gobernanza de la neurotecnología.

Un paso importante tuvo lugar en 2019 con la *“Recomendación sobre Innovación Responsable en Neurotecnología”* adoptada por el Consejo de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que estableció el primer estándar internacional en este campo. Si bien la Recomendación de la OCDE se centra principalmente en la gobernanza responsable de los actores de la industria de la neurotecnología, también incluye disposiciones sobre la privacidad mental y la libertad cognitiva.

Según la Recomendación de la OCDE, los datos cerebrales son “datos relacionados con el funcionamiento o con la estructura del cerebro humano de un individuo identificado o identificable que incluye información única sobre su fisiología, salud o sus estados mentales”,<sup>306</sup>.

Otras organizaciones internacionales están poniendo los avances en neurotecnología en el centro de sus estrategias de gobernanza.

Así, por ejemplo, el Comité Jurídico Interamericano de la OEA (CJI) aprobó en agosto de 2021 la Declaración sobre *“Neurociencia, Neurotecnologías y Derechos Humanos: Nuevos desafíos jurídicos para las Américas”*. La Declaración destaca que<sup>307</sup>:

Los avances de la neurociencia y el desarrollo de las neurotecnologías, plantean importantes preocupaciones éticas y jurídicas sobre su impacto final en principios, derechos y libertades fundamentales como la dignidad humana, el libre desarrollo de la personalidad, la identidad y la autonomía, el derecho a la privacidad e intimidad, la libertad de pensamiento y de expresión, la integridad física y psíquica, el disfrute del más alto nivel posible de salud física y mental y el acceso a remedios, la igualdad ante la ley, así como a la protección judicial en caso de daños, entre otros.

De tal manera que, respecto de la privacidad mental y la protección de datos neuronales obtenidos a partir del uso de neurotecnologías, en la declaración se enfatiza que la protección de la privacidad se caracteriza por que las personas queden exentas e

---

<sup>306</sup> OCDE. Recommendation of the Council on Responsible Innovation in Neurotechnology. Recuperado de: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0457>

<sup>307</sup> OEA, (2021). Declaración sobre *“Neurociencia, Neurotecnologías y Derechos Humanos: Nuevos desafíos jurídicos para las Américas”*. Disponible en: [https://www.oas.org/es/sla/cji/temario\\_actual.asp](https://www.oas.org/es/sla/cji/temario_actual.asp)

inmunes a las invasiones o agresiones abusivas o arbitrarias por parte de terceros o del propio Estado.

La Declaración anticipa que el sistema interamericano de derechos humanos reconoce que este derecho implica una protección frente a interferencias en la esfera más íntima de las personas, abarca una serie de factores relacionados con la dignidad del individuo y ha alertado que ciertos progresos o el desarrollo de determinadas herramientas tecnológicas pueden poner en riesgo el derecho a la vida privada.

Seguidamente, en el marco de los avances que la neurociencia y el desarrollo de las neurotecnologías plantean, el Comité Jurídico Interamericano presenta la *“Declaración de Principios interamericanos en materia de neurociencias, neurotecnologías y derechos humanos”* de 9 marzo de 2023, cuyo precedente fue la Declaración del 2021, antes mencionada, como una directriz indispensable para los Estados<sup>308</sup>.

En cuanto a los datos neuronales, en la Declaración de principios se definen como:

Aquellos datos que derivan de la actividad propia del sistema nervioso de una persona y que constituyen datos personales altamente sensibles debido a que revelan aspectos de la actividad mental interna de un individuo. Esa actividad mental interna es la esencia de su personalidad por lo que la protección de ese fuero interno conforma una unidad inseparable con la protección a la dignidad humana y por ende también con los derechos humanos

Por su parte, el Parlamento Latinoamericano y Caribeño ha emitido La *“Declaración del Parlatino sobre Neuroderechos”*<sup>309</sup>, según la cual, describe como neuroderechos: la libertad cognitiva, la privacidad mental, la integridad mental, la continuidad psicológica (o la autopercepción identitaria), el acceso equitativo a la mejora cerebral, la protección contra sesgos, la autonomía de la voluntad y la autodeterminación personal, (...) concluyendo en la imperiosa necesidad de legislar sobre los denominados “neuroderechos” en las respectivas legislaciones. Además, se refiere a los datos neuronales como:

Dato cerebral o neurodato, es la información obtenida de la actividad de las neuronas que contienen una representación de la actividad cerebral. Se refiere a aquella información obtenida, directa o indirectamente, a través de los patrones de actividades de las neuronas, cuyo acceso está dado por

---

<sup>308</sup> OEA. (2023). Declaración de principios interamericanos en materia de neurociencias, neurotecnologías y derechos humanos. Disponible en: [https://www.oas.org/es/sla/cji/docs/CJI-RES\\_281\\_CII-O-23\\_corr1\\_ESP.pdf](https://www.oas.org/es/sla/cji/docs/CJI-RES_281_CII-O-23_corr1_ESP.pdf)

<sup>309</sup> PARLATINO. (2023). Declaración del Parlatino sobre neuroderechos. Disponible en: <https://parlatino.org/wp-content/uploads/2017/09/leym-neuroderechos-7-3-2023.pdf>

neurotecnología avanzada, incluyendo sistemas de registro cerebrales tanto invasivos como no invasivos. Estos datos contienen una representación de la actividad psíquica, tanto consciente como subconsciente, y que corresponden al más íntimo aspecto de la privacidad humana.

En ese sentido, podemos señalar que los datos cerebrales son datos personales, ya que permiten identificar o hacer identificable a una persona natural. Este tipo de datos personales caería en la definición de datos sensibles, pues son datos que corresponden a la esfera más íntima de la persona. Los datos cerebrales pueden conllevar a información sensible como datos biométricos, opiniones políticas, orientación sexual, entre otros; lo que plantea la pregunta sobre si resulta ético que una empresa pueda acceder a esa información.

A su vez, con fecha 25 de septiembre de 2023, con motivo del XX aniversario de la Red Iberoamericana de Protección de Datos (RIPD), las entidades integrantes de la RIPD, en el marco de la sesión cerrada del encuentro conmemorativo acordaron una “Declaración sobre neurodatos”<sup>310</sup>.

La declaración de la RIPD señala que:

[...] Conforme a lo que se ha señalado los neurodatos deben calificarse como categorías especiales de datos “per se” tanto por ser datos biométricos dirigidos a identificar de manera unívoca, como por ser datos relativos a la salud [...]

Cabe destacar que, la declaración de la RIPD ha sido adoptada de conformidad a la primera edición no publicada de este estudio, que le ha servido como guía y sustento jurídico, y cuyas actas fueron presentadas por la AEPD en la sesión cerrada del encuentro conmemorativo del XX aniversario de la RIPD.

De igual forma, el Consejo de Europa ha lanzado un Plan de Acción Estratégica quinquenal centrado en los derechos humanos y en nuevas tecnologías biomédicas, incluida la neurotecnología.

En octubre de 2023, los ministros de Telecomunicaciones y Asuntos Digitales europeos acordaron en la Reunión Informal de Ministros celebrada en León una Declaración<sup>311</sup> conjunta impulsada por la presidencia española del Consejo de la Unión Europea para el desarrollo de una neurotecnología humanista que proteja los

---

<sup>310</sup> RED IBEROAMERICANA DE PROTECCIÓN DE DATOS. (2023). Declaración sobre neurodatos de la Red Iberoamericana de Protección de Datos. Secretaría General Iberoamericana. Disponible en: <https://www.sic.gov.co/sites/default/files/boletin-juridico/declaracion-neurodatos-ripd.pdf>

<sup>311</sup> PRESIDENCIA ESPAÑOLA DEL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. (2023). Declaración de León, disponible en: <https://spanish-presidency.consilium.europa.eu/media/5azi0e2h/declaraci%C3%B3n-de-le%C3%B3n.pdf>

derechos fundamentales de las personas y contribuya a la competitividad y la autonomía estratégica abierta de Europa.

Con un enfoque centrado en lo humano y orientado a los derechos, los Estados miembros que respaldan esta declaración, en su compromiso por fortalecer la competitividad de la Unión Europea en el campo de la neurotecnología y su autonomía estratégica en el contexto de una transformación digital centrada en los derechos y en el individuo, solicitan una acción concreta para:

- i. Fomentar la cooperación entre los sectores público y privado.
- ii. Alimentar un ecosistema dinámico.
- iii. Considerar medidas de acompañamiento e inversión.
- iv. Que la Comisión Europea facilite debates especializados de expertos de alto nivel.
- v. Fomentar el diálogo con la Comisión Europea y entre los Estados miembros.
- vi. Obligar a los líderes en innovación en neurotecnología europeos.
- vii. La UE debe informar e implicar activamente al público.
- viii. Crear un ecosistema fiable, transparente y responsable.
- ix. La Comisión Europea colaborará con los organismos de normalización.

La “Declaración de León” impulsa el diálogo entre la Comisión Europea y los Estados miembros para mantener una posición común en los foros internacionales e insta a los innovadores europeos a proteger los derechos humanos en el desarrollo de sus productos.

Paralelamente, los legisladores nacionales también están activos en el área de la gobernanza de la tecnología.

El desarrollo político más importante en este ámbito es la reciente aprobación por parte del Senado chileno de una ley de reforma constitucional que defina la integridad mental como un derecho humano fundamental, y de una ley sobre neuroprotección que salvaguarde los datos cerebrales y aplique la ética médica existente, codificada en el actual código médico chileno, al uso de las neurotecnologías en poblaciones de no pacientes.

Chile es un país pionero en el mundo en consagrar la protección de los neuroderechos en un nivel supralegal, en la especie, a nivel constitucional, al modificar el artículo 19 N°1 de su Carta Magna. Efectivamente, en el año 2020 los senadores Guido Girardi, Carolina Goic, Francisco Chahuán, Juan Antonio Coloma y Alfonso De Urresti presentaron una moción de proyecto de reforma constitucional y además un proyecto de ley, actualmente en tramitación en el Congreso Nacional chileno, el cual posee un contenido mucho más detallado al discutirse altamente el impacto de un uso inapropiado de neurotecnologías en aspectos como la

responsabilidad, el consentimiento etc. Se trata de dos instrumentos jurídicos con jerarquías diferentes, con objetivos similares, pero con consecuencias jurídicas distintas.

Ambos proyectos fueron denominados coloquialmente “proyectos de neuroderechos”. La moción de reforma constitucional fue recientemente sancionada el 25 de octubre de 2021, convirtiéndose en la Ley Nº 21.383 que “Modifica la Carta Fundamental, para establecer el desarrollo científico y tecnológico al servicio de las personas”<sup>312</sup>. Tal ley consta de un artículo único que modifica el número 1 del artículo 19 de la Constitución Política de la República de Chile en la siguiente forma:

[...] El desarrollo científico y tecnológico estará al servicio de las personas y se llevará a cabo con respeto a la vida y a la integridad física y psíquica. La ley regulará los requisitos, condiciones y restricciones para su utilización en las personas, debiendo resguardar especialmente la actividad cerebral, así como la información proveniente de ella [...]

En tanto que, el artículo 2 del Proyecto de Ley Nº13828-19 aún pendiente de sanción por el Estado de Chile, define los datos neuronales como<sup>313</sup>:

Se considerará para efectos de esta ley [...] c) Datos neuronales: Aquella información obtenida, directa o indirectamente, a través de los patrones de actividades de las neuronas, cuyo acceso está dado por neurotecnología avanzada, incluyendo sistemas de registro cerebrales tanto invasivos como no invasivos. Estos datos contienen una representación de la actividad psíquica, tanto consciente como subconsciente, y que corresponden al más íntimo aspecto de la privacidad humana.

Por otra parte, la Secretaría de Estado española de Digitalización e Inteligencia Artificial ha publicado recientemente una Carta de Derechos Digitales que incorpora ya los neuroderechos como parte de los derechos de los ciudadanos de la nueva era digital<sup>314</sup>.

Asimismo, la Agencia Italiana Garante per la Protezione dei Dati Personali dedicó el Día de la Privacidad del año 2021 a la investigación de los neuroderechos, avalando la necesidad de abordar adecuadamente las implicaciones de la neurotecnología sobre los derechos humanos.

De igual manera, en Brasil se está discutiendo el Proyecto de Ley 1229/2021, en el que se define el dato neuronal como:

---

<sup>312</sup> LEY Nº 21.383 que “Modifica la Carta Fundamental, para establecer el desarrollo científico y tecnológico al servicio de las personas”. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1166983>

<sup>313</sup> PROYECTO DE LEY BOLETÍN Nº13.828-19, de 7 de octubre de 2020.

<sup>314</sup> GOBIERNO DE ESPAÑA (2021). Carta de derechos digitales. Disponible en: [https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/140721-Carta\\_Derechos\\_Digitales\\_RedEs.pdf](https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/140721-Carta_Derechos_Digitales_RedEs.pdf)

Cualquier información obtenida directa o indirectamente de la actividad del sistema nervioso central y cuyo acceso se realiza por medio de interfaces cerebro-ordenador, o cualquier otra tecnología, invasiva o no.

Este Proyecto de Ley modifica la Ley 13.709, de 14 de agosto de 2018, o Ley General de Protección de Datos Personales. Así, también, se debe destacar la propuesta de enmienda constitucional 29 de 2023 *“...para incluir, entre los derechos y garantías fundamentales, la protección a la integridad mental y a la transparencia algorítmica”*.

México se une a la tendencia internacional, la Carta de Derechos de la Persona en el Entorno Digital de México (2022)<sup>315</sup>, reconoce un conjunto de neuroderechos (identidad, datos neuronales, privacidad mental, libertad de pensamiento, mejora y equidad de acceso). La carta actúa como una guía para garantizar que las personas tengan control sobre sus datos personales, mantengan la privacidad y estén protegidas de cualquier posible daño que pueda surgir del uso de tecnologías digitales.

La Carta define la información neuronal como:

Aquella información obtenida directa o indirectamente a través de los patrones de actividades de las neuronas, cuyo acceso está dado por neurotecnologías avanzadas, incluyendo sistemas de registro cerebrales tanto invasivos como no invasivos.

De igual forma, en EE.UU un proyecto de ley bipartidista para proteger los datos biológicos y neuronales de los habitantes del Estado de Colorado pasó su audiencia inicial del comité el 30 de enero de 2024. El proyecto de ley 24-1058, titulado *“Protect Privacy of Biological Data”*, ampliaría el alcance de la *“Colorado Privacy Act”* para incluir datos biológicos y neuronales<sup>316</sup>.

A los efectos de la ley de privacidad de Colorado, el proyecto de ley amplía la definición de "datos sensibles" para incluir datos biológicos, que son datos que proporcionan una caracterización de las propiedades, composiciones o actividades biológicas, genéticas, bioquímicas o fisiológicas del cuerpo de un individuo. o funciones corporales. Los datos biológicos incluyen datos neuronales, los cuales han sido definidos como:

Datos neuronales significa información que se genera mediante la medición de la actividad de los sistemas nerviosos central o periférico de un individuo y que puede procesarse mediante o con la ayuda de un dispositivo.

---

<sup>315</sup> INFO CDMX. (2022). Carta de derechos de la persona en el entorno digital. Disponible en: [https://www.infocdmx.org.mx/doctos/2022/Carta\\_DDigitales.pdf](https://www.infocdmx.org.mx/doctos/2022/Carta_DDigitales.pdf)

<sup>316</sup> COLORADO GENERAL ASSEMBLY. HB24-1058 Protect Privacy of Biological Data. Disponible en: <https://leg.colorado.gov/bills/HB24-1058>

Pese a que, algunos neurocientíficos aún discuten sobre la separación entre la mente y el cerebro, órganos que dan vida a los datos mentales y cerebrales, respectivamente, como conceptos independientes uno del otro, también se ha incursionado en la materia desde la doctrina jurídica. En este sentido, para efectos de dar un concepto de dato cerebral que logre una protección eficaz, las nociones de dato cerebral han sido definidas en un sentido amplio, incluyendo al dato mental.

Así, se han definido los datos mentales “como cualquier dato que pueda organizarse y procesarse para hacer inferencias sobre los estados mentales de una persona, incluidos sus estados cognitivo, afectivo y conativo”<sup>317</sup>.

Se ha definido estado mental “como cualquier conglomerado de representaciones mentales y actitudes proposicionales que correspondan a la experiencia de pensar, recordar, planificar, percibir y sentir”<sup>318</sup>. En tal sentido, entonces los neurodatos satisfacen la definición de “Información personal”.

Finalmente, desde nuestra perspectiva jurídica y teniendo en consideración todos los antecedentes anteriormente estudiados, principalmente bajo el razonamiento jurídico de la *fictio iuris*, proponemos como concepto general –por ser este amplio y completo, abarcando a los neurodatos– a incluir en las legislaciones el de “dato cerebral”, cuya definición deberá abarcar los siguientes elementos:

#### *Datos Cerebrales*

*Datos personales relativos a la estructura, actividad o funcionamiento del cerebro de una persona física que permitan o confirmen la identificación única de dicha persona; captados directa o indirectamente, o incorporados al cerebro humano, a través de la utilización de técnicas de neuroimagen estructural o funcional, incluyendo las técnicas de captación de señales neurofisiológicas, tanto invasivas como no invasivas. Dicha información procesada, decodificada y organizada representa las características neuroanatómicas, o la actividad psíquica consciente o subconsciente del individuo en un contexto determinado, incluyendo sus estados y procesos cognitivos, afectivos y conativos, formando parte del aspecto más intrínseco de la persona humana, la privacidad mental.*

## **5. Variables y Clasificación de los datos cerebrales o neurodatos**

### **5.1 Variables que influyen en la clasificación de los datos cerebrales o neurodatos**

Como se explicó anteriormente, las neurotecnologías permiten recopilar y procesar información exploratoria sobre anatomía cerebral, estados mentales y

---

<sup>317</sup> LENA, M., & MALGIERI, G. (2021). Mental data protection and the GDPR. *Journal of Law and the Biosciences*, 9(1), pp.1-19.

<sup>318</sup> *Ídem*.

procesos cognitivos o afectivos, así como información sobre la neurofisiología y la neuropatología subyacentes de una persona.

Al mismo tiempo, en la era de los grandes datos y el análisis avanzado, estas piezas de información también pueden *inferirse* en lugar de *observarse* mediante el análisis de datos basado en la extracción de datos retrospectiva, el reconocimiento de patrones y la agregación de múltiples fuentes de datos o el análisis predictivo.

Para proceder a la clasificación de los datos cerebrales (o neurodatos) en alguna de las categorías de datos reguladas por el RGPD, es necesario considerar las siguientes variables: el contexto del tratamiento de datos cerebrales, la finalidad del mismo, y el riesgo que supone para los derechos y libertades fundamentales de las personas físicas.

a) *El contexto del tratamiento*

Relacionado con el cumplimiento del principio de finalidad, el contexto del tratamiento sitúa tanto al responsable del tratamiento como a la persona cuyos datos cerebrales se han de procesar en un ambiente (tiempo y espacio) determinado, bajo unas circunstancias y objetivos también determinados, que facilitan el desarrollo del tratamiento. Así las neurotecnologías son utilizadas en 3 escenarios diferentes<sup>319</sup>:

- **Monitorización:** abarca todo el abanico de aplicaciones relacionadas con recoger la actividad del cerebro de forma pasiva para identificar patrones relacionados con nuestra actividad cognitiva, emocional o motora. Así, las BCI pasivas, permiten una adaptación al entorno al considerar el estado mental o la percepción del usuario. Por ejemplo, los datos que estiman la carga de trabajo mental de los estudiantes mediante la monitorización de su EEG se pueden usar para optimizar el aprendizaje, ajustando el nivel de dificultad y repitiendo el contenido que puede no haberse entendido bien. Una de las aplicaciones más extendidas es el *Neurofeedback*. Este tipo de terapia permite a los intervinientes aprender a regular la actividad de ciertas ondas en su cerebro, mediante la retroalimentación basada en estímulos visuales, auditivos o táctiles. Así, se expone a la persona a una pantalla cuya imagen se nubla o aclara en función de la regulación que este haga de sus ondas cerebrales. De esta forma, se consigue un entrenamiento en el control de dichas ondas. Esta técnica se utiliza, por ejemplo, en entrenamientos por videojuegos.
- **Evaluación/Diagnóstico:** procesar la actividad cerebral para poder evaluar capacidades cognitivas o emocionales en base a patrones cerebrales. Además, también se pueden identificar patrones anormales relacionados con patologías

---

<sup>319</sup> BALLARIN USIETO, P., & MINGUEZ, J. (s.f.). *La importancia de la ciberseguridad en brain-computer interfaces*. Disponible en: <https://www.bitbrain.com/es/blog/ciberseguridad-cerebro-computadora>

mentales como puede ser la depresión o la epilepsia. Actualmente, existen sistemas de EEG Portátiles, que pueden grabar estudios hasta por meses.

- **Interacción/Intervención:** procesar la actividad cerebral en tiempo real para interactuar con un dispositivo como puede ser un teclado en la pantalla. Cuando esta interacción tiene un objetivo de rehabilitación se suele hablar de intervención.

#### *b) La finalidad del tratamiento*

Recogido en el artículo 5.1 letra b) del RGPD<sup>320</sup>, el principio de finalidad del tratamiento de los datos personales se refiere a los motivos, usos y objetivos que piensa aplicar el responsable o encargado del tratamiento, respecto a los datos personales recabados. La finalidad responde a una base legal para el tratamiento. Es decir, debe existir una finalidad recogida por el RGPD o la LOPDGDD que legitime el tratamiento de los datos cerebrales. Dicho de otro modo, el principio de finalidad del tratamiento de los datos personales define por qué y para qué se recaban los datos de los interesados.

La AEPD explica que, el principio de “finalidad” implica, por una parte, la obligación de que los datos sean tratados con una o varias finalidades determinadas, explícitas y legítimas y, por otra, que se prohíbe que los datos recogidos con unos fines determinados, explícitos y legítimos sean tratados posteriormente de una manera incompatible con esos fines.

Dentro de las finalidades de los responsables del tratamiento por conocer cómo funciona el cerebro humano, podemos encontrar las siguientes: diagnósticos de enfermedades o análisis de datos; mejorar el funcionamiento mental o mejorar el bienestar; intereses exclusivamente comerciales en explorar los sesgos cognitivos de los consumidores, etc.

Esta variable, como ya hemos adelantado, se encuentra relacionada con el principio de licitud del tratamiento de datos personales establecido en el artículo 5.1 letra a) del RGPD<sup>321</sup>. Así, el principio de licitud del tratamiento de datos personales cerebrales se traduce en la obligación de llevar a cabo el tratamiento, necesariamente, considerando alguna de las bases de legitimación expresamente establecidas en el artículo 6 del RGPD, o en el artículo 9 del mismo instrumento, considerando el contexto del tratamiento y la naturaleza jurídica de los datos obtenidos.

---

<sup>320</sup> Artículo 5.1 letra b), RGPD: Los datos personales serán: b) recogidos con fines determinados, explícitos y legítimos, y no serán tratados ulteriormente de manera incompatible con dichos fines; de acuerdo con el artículo 89, apartado 1, el tratamiento ulterior de los datos personales con fines de archivo en interés público, fines de investigación científica e histórica o fines estadísticos no se considerará incompatible con los fines iniciales («limitación de la finalidad»);

<sup>321</sup> Artículo 5.1 letra a): Los datos personales serán: a) tratados de manera lícita, leal y transparente en relación con el interesado («licitud, lealtad y transparencia»);

c) *El riesgo para los derechos y libertades fundamentales de las personas físicas*

La aproximación basada en el riesgo (*risk-based approach*) es clave en el RGPD. No obstante que, el Reglamento no ha definido qué debe entenderse por riesgo, el CEPD ha indicado que no es un concepto nuevo, ya que se encontraba ya en la Directiva 95/46/CE, derogada por el RGPD desde el 24 de mayo de 2018, y que va más allá de una aproximación que se limita a la basada en el daño (*harm-based-approach*) para considerar todo efecto adverso que el tratamiento de los datos personales pueda tener en los derechos y libertades fundamentales del interesado como consecuencia del tratamiento de sus datos personales.

En las Directrices sobre la evaluación de impacto relativa a la protección de datos (EIPD) y para determinar si el tratamiento entraña probablemente un alto riesgo a efectos del Reglamento<sup>322</sup>, el CEPD, indica que los responsables deben evaluar continuamente los riesgos creados por sus actividades de tratamiento a fin de identificar cuando es probable que un tipo de tratamiento entrañe “*un alto riesgo para los derechos y libertades de las personas físicas*”. El CEPD explica en estas directrices que un “*riesgo*” es un escenario que describe un acontecimiento y sus consecuencias, estimado en términos de gravedad y probabilidad.

En consecuencia, para clasificar y determinar a qué tipo de datos corresponden los datos cerebrales será necesario estimar el nivel de riesgos que supone el tratamiento de los mismos, teniendo en consideración las dos variables anteriores, es decir, el contexto y la finalidad. Tal y como explica el Considerando 76 del RGPD, “*la probabilidad y la gravedad del riesgo para los derechos y libertades del interesado debe determinarse con referencia a la naturaleza, el alcance, el contexto y los fines del tratamiento de datos. El riesgo debe ponderarse sobre la base de una evaluación objetiva mediante la cual se determine si las operaciones de tratamiento de datos suponen un riesgo o si el riesgo es alto*”.

De tal manera que, el nivel de riesgo asociado al tratamiento de los datos cerebrales, en consideración al contexto y los fines del mismo, nos permitirán determinar la categoría de datos a la cual pertenecen los datos cerebrales o neurodatos dentro de los diferentes tipos establecidos en el RGPD.

## **5.2 Clasificación de los datos cerebrales o neurodatos**

No cabe duda que, los datos cerebrales o neurodatos –en teoría– son datos personales altamente sensibles, nos atrevemos a decir, incluso, que se trata de una categoría especialmente sensible, considerando el nivel de intromisión –por parte de un tercero– en la esfera más íntima del ser humano, su privacidad mental. Sin embargo, para determinar si los datos cerebrales o neurodatos merecen la especial protección

---

<sup>322</sup> CEPD. (2017). Directrices sobre la evaluación de impacto relativa a la protección de datos [EIPD] y para determinar si el tratamiento “entraña probablemente un alto riesgo”. pp.7-9

que establece el artículo 9 del RGPD para la categoría especial de datos debemos tener en cuenta algunas precisiones.

Lo primero es tener en cuenta *¿qué se entiende por categoría especial de datos en el RGPD?*. El Convenio 108 del Consejo de Europa de 28 de enero de 1981, establece como una categoría específica de datos en su artículo 6, bajo la rúbrica “Categorías particulares de datos”, lo siguiente:

Los datos de carácter personal que revelen el origen racial, las opiniones políticas, las convicciones religiosas u otras convicciones, así como los datos de carácter personal relativos a la salud o a la vida sexual, no podrán tratarse automáticamente a menos que el derecho interno prevea garantías apropiadas. La misma norma regirá en el caso de datos de carácter personal referentes a condenas penales.

La derogada Directiva 95/46/CE siguiendo el mismo criterio que el Convenio 108, reguló dichos datos en el artículo 8 bajo el título “*Tratamiento de categorías especiales de datos*”, cuyo desarrollo legislativo y transposición en España, se plasmó en la derogada Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal ( en adelante, LOPD), en cuyo artículo 7 bajo la denominación de “*datos especialmente protegidos*”, hacía referencia a una categoría especial de datos personales dotándolos de una protección reforzada (consideraba como tales los de ideología, religión, creencias, origen racial, salud, vida sexual, comisión o infracciones penales o administrativas).

Dicho lo anterior, en la actualidad el artículo 9 RGPD establece la prohibición general de tratamiento de “*categorías especiales de datos personales*”, identifica cuáles son al indicar que:

Quedan prohibidos el tratamiento de datos personales que revelen el origen étnico o racial, las opiniones políticas, las convicciones religiosas o filosóficas, o la afiliación sindical, y el tratamiento de datos genéticos, datos biométricos dirigidos a identificar de manera unívoca a una persona física, datos relativos a la salud o datos relativos a la vida sexual o las orientaciones sexuales de una persona física.

Y en su apartado segundo recoge las excepciones a dicha prohibición para posibilitar su tratamiento.

Por su parte el Considerando 51 del RGPD, en relación con las categorías especiales de datos nos indica que:

Especial protección merecen los datos personales que, por su naturaleza, son particularmente sensibles en relación con los derechos y las libertades fundamentales, ya que el contexto de su tratamiento podría entrañar importantes riesgos para los derechos y las libertades fundamentales. Debe

incluirse entre tales datos personales los datos de carácter personal que revelen el origen racial o étnico, entendiéndose que el uso del término «origen racial» en el presente Reglamento no implica la aceptación por parte de la Unión de teorías que traten de determinar la existencia de razas humanas separadas. El tratamiento de fotografías no debe considerarse sistemáticamente tratamiento de categorías especiales de datos personales, pues únicamente se encuentran comprendidas en la definición de datos biométricos cuando el hecho de ser tratadas con medios técnicos específicos permita la identificación o la autenticación unívocas de una persona física. Tales datos personales no deben ser tratados, a menos que se permita su tratamiento en situaciones específicas contempladas en el presente Reglamento, habida cuenta de que los Estados miembros pueden establecer disposiciones específicas sobre protección de datos con objeto de adaptar la aplicación de las normas del presente Reglamento al cumplimiento de una obligación legal o al cumplimiento de una misión realizada en interés público o en el ejercicio de poderes públicos conferidos al responsable del tratamiento. Además de los requisitos específicos de ese tratamiento, deben aplicarse los principios generales y otras normas del presente Reglamento, sobre todo en lo que se refiere a las condiciones de licitud del tratamiento. Se deben establecer de forma explícita excepciones a la prohibición general de tratamiento de esas categorías especiales de datos personales, entre otras cosas cuando el interesado dé su consentimiento explícito o tratándose de necesidades específicas, en particular cuando el tratamiento sea realizado en el marco de actividades legítimas por determinadas asociaciones o fundaciones cuyo objetivo sea permitir el ejercicio de las libertades fundamentales [...]

De lo indicado hasta ahora se puede concluir que las categorías especiales de datos se han de considerar *numerus clausus*<sup>323</sup>, pues conforman un régimen especial de protección que supone una excepción que limita y circunscribe a unos supuestos específicos las posibilidades de tratamiento, por lo que la interpretación que se realice debe ser restrictiva.

De tal manera que, los datos cerebrales o neurodatos no se encuentran establecidos directamente dentro de las “categorías especiales de datos personales” como un tipo autónomo o independiente de los tipos regulados en dicha categoría. Por lo que, directamente, no han sido considerados como objeto de protección por el artículo 9 del RGPD.

Sin embargo, de conformidad al contenido de la información que nos aportan los datos cerebrales o neurodatos y a las variables –analizado el contexto, la finalidad, los riesgos y la afección a los derechos y libertades del titular de los datos– los datos cerebrales o neurodatos se corresponden con algunas de dichas categorías especiales

---

<sup>323</sup> Expresión utilizada para indicar que los supuestos para obtener una consecuencia jurídica son únicamente los establecidos y no pueden agregarse otros.

de datos personales, por lo que, se deberá otorgar la protección especial que se requiera en cada caso.

Así, los datos cerebrales o neurodatos –entendido en un sentido amplio, analizado con anterioridad– obedecerían a la siguiente clasificación:

*a) El dato cerebral o neurodato elevado a la categoría de datos relativos a la salud*

Dentro de los considerados datos sensibles o categorías especiales de datos establecidas en el artículo 9.1 del RGPD, encuentran especial atención los datos relativos a la salud.

El RGPD define en su artículo 4.15 como datos personales relacionados con la salud aquellos “relativos a la salud física o mental de una persona física, incluida la prestación de servicios de atención sanitaria, que revelen información sobre su estado de salud”.

Por su parte, el Considerando 35 del RGPD apostilla:

Entre los datos personales relativos a la salud se deben incluir todos los datos relativos al estado de salud del interesado que dan información sobre su estado de salud física o mental pasado, presente o futuro. Se incluye la información sobre la persona física recogida con ocasión de su inscripción a efectos de asistencia sanitaria, o con ocasión de la prestación de tal asistencia, de conformidad con la Directiva 2011/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo; todo número, símbolo o dato asignado a una persona física que la identifique de manera unívoca a efectos sanitarios; la información obtenida de pruebas o exámenes de una parte del cuerpo o de una sustancia corporal, incluida la procedente de datos genéticos y muestras biológicas, y cualquier información relativa, a título de ejemplo, a una enfermedad, una discapacidad, el riesgo de padecer enfermedades, el historial médico, el tratamiento clínico o el estado fisiológico o biomédico del interesado, independientemente de su fuente, por ejemplo un médico u otro profesional sanitario, un hospital, un dispositivo médico, o una prueba diagnóstica in vitro.

La definición de “datos de salud” se refiere a la información sobre la salud pasada, presente o futura de una persona sana o enferma, con enfermedades de carácter físico o psicológico, incluidas las adicciones en general y la información de los datos genéticos. Abarca, por tanto, los datos de carácter médico (aquellos que se refieran a enfermedades o problemas de salud, como aquellos datos que indiquen un buen nivel de salud) como aquellos otros que guarden relación con la salud (un tratamiento clínico o un historial médico)<sup>324</sup>.

La doctrina ha manifestado que la definición que ha hecho el RGPD es amplia porque se ha basado en la opinión del GT29 que ha analizado la información que captan o procesan distintos dispositivos móviles, que antes no eran tenidos en cuenta a nivel

---

<sup>324</sup> MURILLO DE LA CUEVA, P. L. (2000). La publicidad de los archivos judiciales y la confidencialidad de los datos sanitarios. VII Congreso Nacional de Derecho Sanitario. Madrid: Fundación Mapfre Medicina.

de salud, pero que registran nuestros pasos, nuestro ritmo cardíaco, las calorías consumidas, etc.

El GT29 determinó, en su documento de asesoramiento que, debido a la amplia gama de datos personales que pueden pertenecer a la categoría de datos de salud, esta categoría representa una de las áreas más complejas de datos y en el que los Estados miembros muestran una gran diversidad e inseguridad jurídica, por lo que ha determinado que han de tener consideración de datos de salud<sup>325</sup>:

- i. En este sentido los datos personales que se relacionan con la salud deberían incluir en particular todos los datos que pertenecen al estado de salud de un sujeto de datos, información sobre el registro de un individuo para la provisión de la Seguridad Social, información sobre pagos o elegibilidad para asistencia médica en lo que concierne al individuo, un número, símbolo en particular asignado a un individuo para únicamente identificar al individuo para objetivos de salud, cualquier información que sobre el individuo se reunió en el curso de la provisión de la Seguridad Social al individuo, la información sacada de las pruebas o exámenes del cuerpo o la sustancia corporal, incluyendo muestras biológicas, identificación de una persona como proveedor de asistencia médica al individuo, o cualquier información sobre, por ejemplo, una enfermedad, incapacidad, riesgo de enfermedad, HC, tratamiento clínico, o el estado real fisiológico o biomédico del sujeto de datos independiente de su fuente, como por ejemplo, de un médico o profesional de la salud, un hospital, un dispositivo médico, o una prueba in vitro diagnóstica.
- ii. Al respecto el GT29 señala que los datos de salud, abarcan un concepto mucho más amplio que el término médico. Asimismo, han concluido que la información como el hecho que una mujer ha roto su pierna (caso Lindqvist), que una persona lleva anteojos o lentes de contacto, datos sobre la capacidad intelectual o emocional de una persona, la información sobre los hábitos de fumar o consumo de alcohol, datos sobre alergias reveladas a entidades privadas (como las líneas aéreas) o a cuerpos públicos, constituyen todos ellos datos sobre la salud. datos sobre las condiciones de salud utilizado en una emergencia (por ejemplo, información de que un niño que participa en un campamento de verano o similar evento sufre de asma); membresía de un individuo en un grupo de apoyo para pacientes (por ejemplo, cáncer grupo de apoyo), Weight Watchers, Alcohólicos Anónimos u otros grupos de autoayuda y apoyo con un objetivo relacionado con la salud; y la mera mención del hecho de que alguien está enfermo en un empleo contexto son todos los datos relacionados con la salud de los interesados individuales. Conclusiones sobre el estado de salud o riesgo de salud de una persona -con independencia de que estas conclusiones resulten o no certeras, legítimas u oportunas-.

---

<sup>325</sup> GT29, 2015. ANNEX - Health data in apps and devices, pp. 1-2.

- iii. También el GT29, asume que hay una categoría de datos personales generados por el modo de vivir de la sociedad a través de la utilización de las apps y dispositivos en general, que no será considerado como dato de salud. Esto concierne a los datos de los cuales no pueden obtenerse conclusiones razonables sobre el estado de salud de una persona, por ejemplo, si una aplicación solo contaría el número de pasos durante una sola caminata, sin poder combinar esos datos con otros datos de y sobre el mismo interesado, y en ausencia de un contexto médico específico en qué datos de la aplicación se utilizarán, no es probable que los datos recopilados tengan un impacto significativo en el privacidad del interesado y no requieren la protección adicional de la categoría especial de salud datos. Son solo datos personales sin procesar (estilo de vida de impacto relativamente bajo) (siempre que la aplicación no procesar datos de ubicación), no información a partir de la cual el conocimiento sobre la salud de esa persona pueda ser inferido.

En general, en el ámbito de la salud, de acuerdo con PILA LEÓN SANZ, hay un solapamiento en cuanto al origen de los datos, y todos ellos pueden tener interés (en el ámbito sanitario) en función de la aplicación de los algoritmos que se utilicen para su análisis; unos proceden de la asistencia médica, otros de la investigación, otros del área de la salud pública, o del ámbito administrativo, o simplemente son incorporados como consecuencia del registro de actividades sociales<sup>326</sup>.

Como datos sensibles contienen todos los aspectos fisiológicos que nos conforman como seres humanos y que son el núcleo de la personalidad.

No todos los datos personales, tienen la categoría de sensibles. Serán considerados datos personales si se revelan aspecto de nuestra vida privada, pero, serán considerados datos sensibles si son datos que revelan aspectos íntimos de las personas.

El artículo 9.1 del RGPD califica como categorías especiales de datos personales aquellas que:

“revelen el origen étnico o racial, las opiniones políticas, las convicciones religiosas o filosóficas, o la afiliación sindical, y el tratamiento de datos genéticos, datos biométricos dirigidos a identificar de manera unívoca a una persona física, datos relativos a la salud o datos relativos a la vida sexual o las orientaciones sexuales de una persona física”.

Además, el GT29 ha señalado que:

Esta definición también se aplica a los datos personales cuando tienen una relación clara y estrecha con la descripción del estado de salud de una persona:

---

<sup>326</sup> LEÓN SANZ, P. (2016). Bioética y explotación de grandes conjuntos de datos. En A. Andérez Gonzales, J. Díaz García, F. Escolar Castellón, & P. León Sanz, La explotación de datos de salud. Retos, oportunidades y límites (p.25). Sociedad Española de Informática y Salud.

los datos sobre el consumo de medicamentos, alcohol o drogas, así como los datos genéticos, son sin duda “datos personales sobre la salud”, especialmente si están incluidos en un expediente médico. También habrá que considerar sensibles otros datos - por ejemplo, los datos administrativos (número de seguridad social, fecha de ingreso en un hospital, etc.) - contenidos en la documentación médica relativa al tratamiento de un paciente: si no fueran pertinentes en el contexto del tratamiento del paciente, no se habrían incluido, ni deberían haberse incluido, en un expediente médico.

Por consiguiente, indica el GT29, que todos los datos contenidos en documentos médicos, en historiales médicos y en sistemas de historial médico electrónico (HME) son datos personales sensibles.

El contexto y la finalidad en la que debemos situar esta clasificación de datos cerebrales o neurodatos, será entonces, en un escenario de evaluación o diagnóstico médico, con unas finalidades también relacionadas con el análisis de datos y el bienestar general del paciente/interesado.

En consecuencia, toda información que pueda revelar un estado mental patológico son datos sensibles porque deben entenderse incluidos en la definición de “datos relativos a la salud”. Esta definición no se refiere exclusivamente a estados patológicos, debemos inferir que también la información que revela un estado mental fisiológico (es decir, la ausencia de cualquier patología mental) puede considerarse información de salud. En otros términos, los parámetros biológicos que suelen ser necesarios para inferir enfermedades mentales son datos sensibles, aunque en un contexto específico no revelen ninguna enfermedad, sino sólo el correcto funcionamiento de la fisiología cerebral. Por lo tanto, la definición de salud mental debe considerarse de manera amplia y debe incluir también cualquier forma de procesos cognitivos y estados afectivos del interesado.

Aún más, cuando estamos frente a un dato cerebral o neuronal que ha sido recogido en un documento médico (por ejemplo, un EEG, TAC o IRMf) o en una historia clínica no automatizada o por un sistema HME, su tratamiento no solo está sujeto a todas las normas generales sobre protección de datos del RGPD, sino también a las normas particulares que rigen la protección de datos sensibles contenidas en el artículo 9 del RGPD.

*b) El dato cerebral o neurodato elevado a la categoría de dato biométrico*

Tal y como los define el RGPD en su artículo 4 número 14, los datos biométricos son:

Aquellos datos personales obtenidos a partir de un tratamiento técnico específico, relativos a las características físicas, fisiológicas o conductuales de una persona física que permitan o confirmen la identificación única de dicha persona, como imágenes faciales o datos dactiloscópicos.

Y, por otra parte, el artículo 9.1 RGPD, incluye entre los datos de categoría especial “datos biométricos dirigidos a identificar de manera unívoca a una persona física”.

Según la AEPD, en una interpretación conjunta de ambos preceptos parece dar a entender que los datos biométricos solo constituirían una categoría especial de datos en el caso de que se sometan a un tratamiento técnico específico dirigido a identificar de manera unívoca a una persona física y, en este sentido, igualmente se pronuncia el Considerando 51:

[...]El tratamiento de fotografías no debe considerarse sistemáticamente tratamiento de categorías especiales de datos personales, pues únicamente se encuentran comprendidas en la definición de datos biométricos cuando el hecho de ser tratadas con medios técnicos específicos permita la identificación o la autenticación unívocas de una persona física [...]

Con objeto de aclarar las dudas interpretativas, la AEPD, en algunos de sus informes<sup>327</sup> y resoluciones<sup>328</sup>, atiende al Dictamen 3/2012 sobre la evolución de las tecnologías biométricas del Grupo del Artículo 29<sup>329</sup>, así se distinguen a nivel jurídico los conceptos de “dato personal”, “dato biométrico” y “dato biométrico dirigido a identificar de manera unívoca a una persona”, que puestos en relación con las diferencias entre verificación o autenticación biométrica (uno-a-uno, 1:1) e identificación biométrica (uno-a-varios, 1:N), permiten concluir que únicamente el último grupo es considerado como “datos sensibles o de categoría especial”.

Con igual criterio, el Protocolo de enmienda al Convenio para la Protección de Individuos con respecto al procesamiento de datos personales, aprobada por el Comité de Ministros en su 128º período de sesiones en Elsinore el 18 de mayo de 2018 (Convenio 108+)<sup>330</sup> incluye únicamente como categorías especiales de datos, en su artículo 6.1 a los datos biométricos dirigidos a la identificación unívoca de una persona (“*biometric data uniquely identifying a person*”), sin incluir la referencia a la autenticación.

En este sentido, cabe distinguir los supuestos de identificación biométrica de los supuestos de verificación o autenticación biométrica. La identificación es el proceso de reconocer a un individuo particular entre un grupo, comparándose los datos del individuo a identificar con los datos de cada individuo en el grupo (uno-a-varios). La

---

<sup>327</sup> Gabinete jurídico AEPD. Informe N/REF: 0036/2020. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/2020-0036.pdf>. También Vid. Informe N/REF: 0047/2021. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/2021-0047.pdf>

<sup>328</sup> AEPD. Procedimiento N°: E/03925/2020. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/e-03925-2020.pdf>. Sobre esta cuestión, también Vid. Procedimiento N°: PS/00120/2021. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/ps-00120-2021.pdf>

<sup>329</sup> GT29. Dictamen 3/2012 sobre la evolución de las tecnologías biométricas. Disponible en: [https://www.aepd.es/documento/wp193\\_es.pdf](https://www.aepd.es/documento/wp193_es.pdf)

<sup>330</sup> 128º Session of the Committee of Ministers. Disponible en: <https://ccdcoe.org/uploads/2019/09/CoE-180518-Explanatory-Report-to-the-Protocol-amending-the-Convention-for-the-Protection-of-Individuals-with-regard-to-Automatic-Processing-of-Personal-Data.pdf>

verificación o autenticación es el proceso de probar que es cierta la identidad reclamada por un individuo, comparándose los datos del individuo únicamente con los datos asociados a la identidad reclamada (uno-a uno).

Esta clasificación, que tiene implicaciones sobre las medidas de seguridad y garantías que se deben implementar, está basada en la consideración del mayor riesgo que potencialmente podría entrañar un sistema de identificación biométrica frente a uno de verificación biométrica.

En consecuencia, sólo en los usos de identificación biométrica (1:N) se considera tratamiento de datos sensibles y habrá que cumplir con los requisitos adicionales que el RGPD y, en su caso, la regulación nacional, establece para estas categorías especiales.

Ahora bien, y en relación con la información cerebral, se ha llegado a determinar que, cada persona tiene una anatomía cerebral única, lo mismo que sucede con las huellas dactilares. Según algunos informes científicos esta singularidad es el resultado de una combinación de factores genéticos<sup>331</sup>, biológicos no genéticos<sup>332</sup> y ambientales<sup>333</sup>, influencias interactuando de una manera actualmente desconocida. Si la anatomía del cerebro depende de estas influencias individuales, debería ser posible identificar sujetos individuales sobre la base de características neuroanatómicas y neurofisiológicas utilizando procedimientos estadísticos sofisticados, mediante la aplicación de clasificaciones matemáticas y herramientas de identificación.

Para llegar a estas conclusiones los investigadores utilizaron un gran conjunto de datos de resonancias magnéticas cerebrales de tres bases de datos cerebrales públicas y un nuevo algoritmo matemático para el análisis de la forma de los datos anatómicos<sup>334</sup>. Con esta técnica, desarrollaron un canal de software (*BrainPrint*), con el que han podido clasificar a casi todos los sujetos (99,8 %) a partir de las imágenes de resonancia magnética. En su segundo artículo, los mismos autores ampliaron su enfoque y clasificaron muy bien la edad y el sexo sobre la base de *BrainPrint*<sup>335</sup>. Según sus resultados, los autores concluyen que las estructuras del cerebro humano son exclusivas de cada individuo y pueden utilizarse para la identificación de sujetos.

En el año 2018, LUTZ JÄNKE y su equipo, de la Universidad de Zúrich, publicaron un artículo en la revista *Scientific Reports* donde afirman que los factores genéticos y experiencias vitales moldearían la forma y estructura del encéfalo<sup>336</sup>.

---

<sup>331</sup> THOMPSON, P., CANNON, T., NARR, K., VAN ERP, T., POUTANEN, V., HUTTUNEN, M., *et al.* (2001). *Genetic influences on brain structure. Nat Neurosci.*, vol.4(12), pp.1253-1258

<sup>332</sup> HACKMAN, D.A., & FARAH, M.J. (2009). *Socioeconomic status and the developing brain. Trends Cogn Sci.*, vol.13(2), pp.65–73

<sup>333</sup> JANCKE, L. (2009). *Music drives brain plasticity. F1000 Biol Rep.*, vol.1, p.78

<sup>334</sup> WACHINGER, C., GOLLAND, P. & REUTER, M. (2014). *in Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI*, pp.41–48

<sup>335</sup> WACHINGER, C., GOLLAND, P., KREMEN, W., FISCHL, B. & REUTER, M. (2015). *BrainPrint: A discriminative characterization of brain morphology. NeuroImage*, vol.109, pp.232–248,

<sup>336</sup> ABOLFAZL, LIEM, MÉRILLAT, HÄNGGI, & JÄNCKE, (2018). *Op. Cit.*

Examinaron si es posible identificar sujetos individuales sobre la base de las características neuroanatómicas cuando se utilizan medidas anatómicas más estándar obtenidas de la herramienta *FreeSurfer*<sup>337</sup> ampliamente utilizada. Los autores se plantearon dos preguntas fundamentales en cuanto a las medidas cerebrales necesarias para una buena identificación de sujetos: por un lado, ¿es necesario utilizar toda la información anatómica (p. ej., grosor cortical, volumen y área) de todas las regiones anatómicas proporcionadas por la herramienta *FreeSurfer*? o ¿solo son necesarias algunas medidas compuestas para lograr resultados buenos o aceptables?

Durante 2 años, los científicos obtuvieron imágenes del cerebro de 100 hombres y 91 mujeres mediante 3 resonancias magnéticas realizadas al inicio, a mediados y a finales de la investigación. Las mediciones de resonancia magnética se realizaron una vez al año durante un período de dos años (t1: medición inicial; t2: 1 año después de la línea base; t3: 1 año después de t2). En el primer momento, los sujetos tenían entre 64 y 85 años (M = 70,1 años, SD = 4,8 años). Los participantes eran cognitivamente sanos, diestros (según lo confirmado por el *Annett Handedness Questionnaire*), no tenía antecedentes de trastornos neurológicos o psiquiátricos, y no sufría de migraña, diabetes o tinnitus. Ellos dieron su consentimiento informado por escrito antes de participar en el estudio. Además, todos los métodos se llevaron a cabo de acuerdo con las directrices y normativas pertinentes. Todos los protocolos experimentales fueron aprobados por el comité ético del cantón de Zúrich (KEK-ZH-Nr. 2010-0267).

El posterior análisis reveló que medidas simples como el grosor, la superficie (surcos, fisuras, giros o circunvoluciones) o el volumen de la corteza cerebral bastan para discriminar un sujeto de otro. Sorprendentemente, el volumen y la superficie total del cerebro, parámetros aún más generales, también resultaron específicos de cada individuo. Incluso estos elementos son diferentes en cada uno de los hemisferios del cerebro.

Demuestran la existencia de una “huella cerebral” que, al igual que las “huellas dactilares” permitiría identificar de forma inequívoca a un individuo, pues la anatomía del cerebro humano sería una característica única de cada persona. Esta característica individual de cada cerebro es el resultado de las propiedades genéticas de cada persona combinadas con su experiencia de vida. De tal manera que, estaríamos frente a un “dato

---

<sup>337</sup> *FreeSurfer* es un paquete de software de imágenes cerebrales desarrollado originalmente por Bruce Fischl, Anders Dale, Martin Sereno y Doug Greve. El desarrollo y mantenimiento de *FreeSurfer* es ahora responsabilidad principal del Laboratorio de Neuroimagen Computacional en el Centro Athinoula A. Martinos de Imagen Biomédica. *FreeSurfer* contiene un conjunto de programas con un enfoque común de análisis de imágenes de resonancia magnética (IRM) del tejido cerebral. Es una herramienta importante en el mapeo funcional del cerebro y contiene herramientas para realizar análisis tanto basados en el volumen como en la superficie. *FreeSurfer* incluye herramientas para la reconstrucción de modelos topológicamente correctos y geoméricamente precisos de las superficies gris/blanca y pial, para medir el grosor cortical, el área de la superficie y el pliegue, y para calcular el registro entre sujetos según el patrón de los pliegues corticales. (Información disponible en: <https://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/>)

cerebral” que permite la identificación de sujetos individuales sobre la base de sus características anatómicas cerebrales, y, por lo tanto, un dato de carácter personal, cuyo tratamiento se encuentra sometido a la regulación del RGPD.

Pero aquí no terminan de sorprendernos. Como ya hemos mencionado anteriormente (en el apartado sobre aplicaciones de las BCI), una de las nuevas técnicas es la identificación y uso de las ondas cerebrales por medio de una BCI para reconocimiento único de rasgos humanos, un nuevo método para identificar individuos usando señales del cerebro<sup>338</sup>.

Conforme a lo que se ha señalado los datos cerebrales o neurodatos deben calificarse como categorías especiales de datos “*per se*” tanto por ser datos biométricos dirigidos a identificar de manera unívoca, como por ser datos relativos a la salud.

### **5.3 El tratamiento de datos cerebrales o neurodatos como operación de alto riesgo**

Dado el grado de intrusión que pueden conseguir en la esfera más íntima de las personas, así como el potencial de manipulación de los individuos directamente con técnicas neurológicas, o indirectamente a partir de la información obtenida, los tratamientos basados en el proceso de dichos datos han de considerarse de alto riesgo.

Como ya adelantábamos en el apartado anterior, las categorías especiales de datos o datos sensibles de una persona son aquellos datos que están estrechamente relacionados con los derechos y las libertades fundamentales de las personas y cuyo tratamiento puede conllevar riesgos importantes para estos derechos y libertades.

La tecnología diseñada para decodificar y alterar la actividad cerebral tiene el potencial de afectar no solo nuestra noción actual de privacidad, sino también los derechos ligados a ella, tales como, la libertad de pensamiento, la libertad de expresión, la integridad corporal, el libre desarrollo de la personalidad, la dignidad de las personas, la no discriminación, la equidad y la justicia.

A esto debemos añadir, el potencial de afectación a los derechos particulares de los menores consagrados en el artículo 24 de la Carta de la UE y en la Convención sobre los Derechos del Niño de las Naciones Unidas, que se desarrollan en mayor profundidad en la observación general nº25 del Comité de los Derechos del Niño relativa a los derechos de los niños en relación con el entorno digital<sup>339</sup>.

---

<sup>338</sup> POULOS, M., RANGOSSI, M., CHRISSICOPOULOS, V., & EVANGELOU, A. (1999). *Person identification based on parametric processing on the eeg. Proceedings of the Sixth International Conference on Electronics, Circuits and Systems* p. 283-286

<sup>339</sup> NACIONES UNIDAS (2021). Observación general núm.25 relativa a los derechos de los niños en relación con el entorno digital. *Convención sobre los Derechos del Niño*. Disponible en: <https://www.ohchr.org/es/documents/general-comments-and-recommendations/general-comment-no-25-2021-childrens-rights-relation>

De tal manera que, los datos cerebrales adquieren autonomía tanto de los datos relativos a la salud, como de los datos biométricos, cuando son utilizados en un contexto y para fines no relacionados con la evaluación, diagnóstico médico e intervención, y en consecuencia, adquieren el potencial de modular a conveniencia el sentido y alcance de estos derechos y libertades fundamentales. Esta perspectiva es parte del enfoque basado en el riesgo que pregona el RGPD.

Así, por ejemplo, en el ámbito de los videojuegos los BCI aumentan las plataformas de juegos existentes y ofrecen a los jugadores nuevas formas de jugar utilizando dispositivos que registran e interpretan sus señales neuronales, interpretando sus emociones con el fin de provocar una sensación de satisfacción en el usuario.

En el área laboral, los BCI están siendo utilizadas para monitorear el compromiso de los trabajadores para mejorar la seguridad durante las tareas de alto riesgo, alertan a los trabajadores o supervisores de situaciones peligrosas, modulan la actividad cerebral de los trabajadores para mejorar el rendimiento y brindar herramientas para completar tareas de manera más eficiente.

En materia de educación, los BCI pueden rastrear la atención de los estudiantes, identificar las necesidades únicas de los estudiantes y alertar a los maestros y padres sobre el progreso del aprendizaje de los estudiantes.

En los entornos de ciudades inteligentes las BCI podrían proporcionar nuevas vías de comunicación para los equipos de construcción y los trabajadores de seguridad y habilitar nuevos métodos potenciales para el control de vehículos conectados.

En la esfera del neuromarketing los especialistas en marketing incorporan el uso de BCI para intuir el estado de ánimo de los consumidores y medir el interés por los productos y servicios. Combinando neurodatos con otra información personal pueden crear perfiles cada vez más granulares y sensibles sobre los usuarios para usos invasivos o explotadores, incluida la publicidad conductual.

En el contexto de las neurociencias y el derecho, en particular, los especialistas incorporan técnicas que ayudan a determinar la verdad de las declaraciones de los sujetos, mediante imagen por resonancia magnética funcional (fMRI).

En todos estos casos nos encontramos en escenarios de monitorización de la actividad cerebral donde el procesamiento de estos datos no está relacionado con la atención médica, así como tampoco con la identificación biométrica, y aunque podríamos llegar a la conclusión de que las emociones no patológicas, o la información relacionada con pensamientos, preferencias o recuerdos no son datos sensibles *per se*, sin embargo, su contenido, el contexto y el propósito del procesamiento está destinado a modificar nuestra forma natural, libre y espontánea de comportamiento y desarrollo intelectual, por lo que, la intromisión se sigue dando en la esfera más íntima y sensible del titular de esos datos, “el cerebro humano”, tornándose indispensable una regulación especial respecto de aquellos.

En consecuencia, de acuerdo con el enfoque contextual del RGPD, todos los datos personales deben evaluarse teniendo en cuenta el contexto que determina su procesamiento, determinado por factores, tales como: los intereses específicos del responsable del tratamiento, los posibles destinatarios de los datos, los objetivos para los que se recogen los datos, las condiciones del tratamiento y sus posibles consecuencias para las personas implicadas.

## **6. Bases de legitimación para el tratamiento de los datos cerebrales o neurodatos: en especial el consentimiento explícito**

Habiendo determinado que los diferentes tipos de datos cerebrales tienen una característica en común y es que “estamos frente a categorías especiales de datos personales” conforme al artículo 9 y Considerandos 51 a 56 del RGPD, corresponde determinar las condiciones necesarias de su tratamiento conforme a la normativa.

La regla general contemplada en el artículo 9.1 del Reglamento es la prohibición del tratamiento de categorías especiales de datos personales. No obstante, se recoge un amplio abanico de excepciones a esta regla general en el número 2 del mismo artículo, cuya aplicación haremos extensible a los supuestos de tratamiento de datos cerebrales o neurodatos en entornos BCI. Para tales efectos separaremos el estudio de las bases de legitimación del tratamiento de datos cerebrales en dos grupos. Por una parte, estudiaremos el “consentimiento explícito” como supuesto de tratamiento; y, por otro lado, abordaremos los supuestos de tratamiento que operan como excepción al consentimiento explícito.

### **6.1 El consentimiento explícito como supuesto de tratamiento de los neurodatos**

El primer supuesto que legitima el tratamiento de categorías especiales de datos personales es que el interesado haya dado “*su consentimiento explícito para el tratamiento de dichos datos personales con uno o más de los fines especificados*”<sup>340</sup>.

El artículo 4, apartado 11, del RGPD define el consentimiento como “toda manifestación de voluntad libre, específica, informada e inequívoca por la que el interesado acepta, ya sea mediante una declaración o una clara acción afirmativa, el tratamiento de datos personales que le conciernen”.

El artículo 7 del RGPD regula las condiciones para el consentimiento. Así, el numeral 1 del artículo 7 del RGPD señala que “cuando el tratamiento se base en el consentimiento de interesado, el responsable deberá ser capaz de demostrar que aquel consintió el tratamiento de sus datos personales”.

Seguidamente, el consentimiento debe ser libre de manera que el consentimiento no es una base jurídica válida cuando existe un desequilibrio entre el

---

<sup>340</sup> Artículo 9.2 letra a), RGPD.

interesado y el responsable del tratamiento. De tal manera, si el sujeto no es realmente libre para elegir, se siente obligado a dar su consentimiento o sufrirá consecuencias negativas si no lo da, entonces el consentimiento no puede considerarse válido. Si el consentimiento está incluido como una parte no negociable de las condiciones generales se asume que no se ha dado libremente. En consecuencia, no se considerará que el consentimiento se ha prestado libremente si el interesado no puede negar o retirar su consentimiento sin perjuicio<sup>341</sup>.

Que el consentimiento deba ser específico, quiere decir, que los datos se tratarán de modo leal y para fines concretos, distinguiendo el consentimiento otorgado para el tratamiento determinado de cualquier otra manifestación de voluntad destinada a otro asunto. En este sentido el artículo 7.2 del RGPD señala que “si el consentimiento del interesado se da en el contexto de una declaración escrita que también se refiera a otros asuntos, la solicitud del consentimiento se presentará de forma que se distinga claramente de los demás asuntos”. El requisito de que el consentimiento deba ser «específico» tiene por objeto garantizar un nivel de control y transparencia para el interesado<sup>342</sup>.

En la misma línea el Considerando 32 del RGPD prescribe que “el consentimiento debe darse para todas las actividades de tratamiento realizadas con el mismo o los mismos fines. Cuando el tratamiento tenga varios fines, debe darse el consentimiento para todos ellos”.

Además, el GT29, ha señalado que de conformidad con el artículo 5 del RGPD, el requisito de transparencia es uno de los principios fundamentales, estrechamente relacionado con los principios de lealtad y licitud. Facilitar información a los interesados antes de obtener su consentimiento es esencial para que puedan tomar decisiones informadas, comprender qué es lo que están autorizando y, por ejemplo, ejercer su derecho a retirar su consentimiento. Si el responsable no proporciona información accesible, el control del usuario será ilusorio y el consentimiento no constituirá una base válida para el tratamiento de los datos<sup>343</sup>.

Se deberá informar sobre:

---

<sup>341</sup> GT29, 2017. Directrices sobre el consentimiento en el sentido del Reglamento (UE) 2016/679, revisadas por última vez y adoptadas el 10 de abril de 2018, pp. 5-33.

<sup>342</sup> *Ídem*

<sup>343</sup> Artículos 13 y 14 del RGPD.

<ul style="list-style-type: none"><li>✓ La identidad y los datos de contacto del responsable y del delegado de protección de datos, si cabe.</li><li>✓ Los derechos de los interesados.</li><li>✓ El derecho del interesado a retirar su consentimiento.</li><li>✓ Los fines y la base jurídica del tratamiento de los datos.</li><li>✓ El interés legítimo del responsable.</li><li>✓ Los destinatarios de los datos personales.</li><li>✓ El derecho a presentar una reclamación.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Requisito legal o contractual que obliga a la comunicación de datos, y las consecuencias de no facilitar los datos pedidos.</li><li>✓ Si se va a proyectar un fin ulterior distinto del fin inicial, se informará antes del nuevo tratamiento.</li><li>✓ La transferencia de datos a un tercer país o a una organización internacional.</li><li>✓ El plazo de conservación de los datos personales.</li><li>✓ Decisiones automatizadas, como la elaboración de perfiles.</li></ul>
---	--

El RGPD establece claramente que el consentimiento debe ser inequívoco, es decir, requiere una declaración del interesado o una clara acción afirmativa, lo que significa que siempre debe darse el consentimiento mediante una acción o declaración. Debe resultar evidente que el interesado ha dado su consentimiento a una operación concreta de tratamiento de datos. El GT29 manifiesta que una “clara acción afirmativa” significa que el interesado debe haber actuado de forma deliberada para dar su consentimiento a ese tratamiento en particular y que, en cualquier caso, el consentimiento siempre debe obtenerse antes de que el responsable del tratamiento comience a tratar datos personales para los que se requiere consentimiento<sup>344</sup>.

Por otra parte, el artículo 7.2 del RGPD mandata que la solicitud de consentimiento se presentará “de forma inteligible y de fácil acceso y utilizando un lenguaje claro y sencillo”

Finalmente, dispone el numeral 3 del artículo 7 del RGPD “el interesado tendrá derecho a retirar su consentimiento en cualquier momento”. La retirada del consentimiento, por ejemplo, en el ámbito de la investigación no afectará a la licitud del tratamiento basado en el consentimiento hasta ese momento.

Estas condiciones, también deben entenderse aplicable al consentimiento explícito requerido en el tratamiento de categorías especiales de datos personales.

El “consentimiento explícito” como supuesto de legitimidad del tratamiento de categorías especiales de datos personales, está también previsto en la Carta de los Derechos fundamentales de la Unión Europea que señala que los datos se tratarán “sobre la base del consentimiento de la persona afectada”<sup>345</sup>.

---

<sup>344</sup> *Ídem*

<sup>345</sup> Artículo 8.2, CDFUE.

La diferencia con el consentimiento como criterio de licitud del tratamiento de las categorías generales de datos personales, es la exigencia añadida de que el consentimiento sea explícito. Por tanto, para que el tratamiento de categorías especiales de datos personales sea lícito, no es suficiente la obtención del consentimiento, entendido este último en los términos del artículo 4.11 del RGPD, es decir, “toda manifestación de voluntad libre, específica, informada e inequívoca por la que el interesado acepta, ya sea mediante una declaración o una clara acción afirmativa, el tratamiento de datos personales que le conciernen”, pues esta definición reconoce el consentimiento implícito como válido para las categorías generales de datos personales pero dicho consentimiento resulta insuficiente en el tratamiento de las categorías especiales de datos personales.

El consentimiento explícito que da el interesado es para el tratamiento de categorías especiales de datos personales “con uno o más de los fines especificados”. De forma que, cuando el tratamiento es para varios fines, debe darse el consentimiento explícito para todos ellos.

Según el GT29, el término explícito se refiere a la manera en que el interesado expresa el consentimiento. Significa que el interesado debe realizar una declaración expresa de consentimiento confirmando dicho consentimiento en una declaración escrita y firmada del interesado. Por lo tanto, el silencio, las casillas ya marcadas o la inacción no deben constituir consentimiento. En el entorno digital, un interesado puede emitir su consentimiento explícito, rellenando un impreso electrónico, enviando un correo electrónico, cargando un documento escaneado con su firma o utilizando una firma electrónica. También las declaraciones verbales pueden ser una forma lo suficientemente manifiesta de expresar el consentimiento explícito, sin embargo, puede resultar difícil para el responsable del tratamiento demostrar que se cumplieron todas las condiciones para el consentimiento explícito válido cuando se grabó la declaración<sup>346</sup>.

El consentimiento del menor para tratar datos personales, los consentimientos dados por pacientes que tengan 16 años, son plenamente válidos. No obstante, lo anterior, los Estados Miembros de la Unión Europea pueden establecer una edad inferior siempre que no sea inferior a 13 años<sup>347</sup>.

Además, el responsable deberá ser capaz de demostrar en todo momento que el titular de los datos otorgó en su momento el consentimiento de tratamiento de datos. Esta obligación implica conservar y/o registrar la cláusula informativa junto con la declaración afirmativa del titular (firma del documento físico o registro del clicado en la página web, por ejemplo).

---

<sup>346</sup> *Ídem*

<sup>347</sup> Artículo 8.1 del RGPD.

Ahora bien, el supuesto de legitimidad del tratamiento de categorías especiales de datos personales en virtud del consentimiento explícito contenida en el artículo 9.2 letra a) del RGPD no es una regla absoluta desde el momento en que la norma establece que este consentimiento explícito puede ser limitado en virtud del Derecho de la Unión o de los Estados miembros, que podrán prescribir, que la regla general de prohibición de tratamiento de categorías especiales de datos establecida en el artículo 9.1 del RGPD no pueda ser levantada por el consentimiento del interesado. Es el caso, por ejemplo, de España, que en el artículo 9.1 de la LOPDGDD establece:

1. A los efectos del artículo 9.2.a) del Reglamento (UE) 2016/679, a fin de evitar situaciones discriminatorias, el solo consentimiento del afectado no bastará para levantar la prohibición del tratamiento de datos cuya finalidad principal sea identificar su ideología, afiliación sindical, religión, orientación sexual, creencias u origen racial o étnico.

Lo dispuesto en el párrafo anterior no impedirá el tratamiento de dichos datos al amparo de los restantes supuestos contemplados en el artículo 9.2 del Reglamento (UE) 2016/679, cuando así proceda [...]

### ***6.2 Supuestos de licitud del tratamiento que operan como excepción al “consentimiento explícito”***

El art. 9.2 del RGPD contiene otros supuestos de licitud de los tratamientos de categorías especiales de datos personales sobre los cuales también se puede legitimar el tratamiento de los datos cerebrales. Sin embargo, por la condición que caracteriza a los datos cerebrales en cuanto permiten la neuromodulación, que a su vez permite modificar la actividad del sistema nervioso central, interviniendo directamente en la conducta del individuo, no todas estas bases de legitimación son invocables si las evaluamos desde el punto de vista de la necesidad y finalidad del tratamiento. De manera que, de forma excepcionalísima, los datos cerebrales solo deberían ser tratados bajo los siguientes supuestos:

- i. **9.2.e)** El tratamiento se refiere a datos personales que el interesado ha hecho manifiestamente públicos;
- ii. **9.2.f)** El tratamiento es necesario para la formulación, el ejercicio o la defensa de reclamaciones o cuando los tribunales actúen en ejercicio de su función judicial; Así, el RGPD permite el procesamiento de datos sensibles cuando es necesario para el establecimiento, ejercicio o defensa de reclamaciones legales o siempre que los tribunales actúen en su capacidad judicial. Podríamos considerar, por ejemplo, herramientas detectoras de mentiras en tribunales penales o civiles y, en particular, su capacidad de leer información mental para detectar cualquier omisión o declaración falsa de un testigo o de una persona.

- iii. **9.2.h)** Por razones médicas, si el tratamiento es necesario para fines de medicina preventiva o laboral, evaluación de la capacidad laboral del trabajador, diagnóstico médico, prestación de asistencia o tratamiento de tipo sanitario o social.
- iv. **9.2.i)** Por razones de salud pública, si el tratamiento es necesario por razones de interés público en el ámbito de la salud pública, como la protección frente a amenazas transfronterizas graves para la salud, o para garantizar elevados niveles de calidad y de seguridad de la asistencia sanitaria y de los medicamentos o productos sanitarios, sobre la base del Derecho de la Unión o de los Estados miembros que establezca medidas adecuadas y específicas para proteger los derechos y libertades del interesado, en particular el secreto profesional.
- v. **9.2.j)** Por razones de investigación científica o estadística, si el tratamiento es necesario con fines de archivo en interés público, fines de investigación científica o histórica o fines estadísticos, de conformidad con el artículo 89, apartado 1, sobre la base del Derecho de la Unión o de los Estados miembros, que debe ser proporcional al objetivo perseguido, respetar en lo esencial el derecho a la protección de datos y establecer medidas adecuadas y específicas para proteger los intereses y derechos fundamentales del interesado.

Como se puede apreciar, los supuestos de legitimación del tratamiento de datos cerebrales quedan circunscritos al ámbito de la salud, interés público y la justicia. Sin embargo, cómo hemos visto los datos cerebrales no solo son utilizados en estos contextos, por lo que será indispensable que de conformidad al numeral 4 del artículo 9 del RGPD, los Estados miembros introduzcan condiciones adicionales, inclusive limitaciones, con respecto al tratamiento de datos cerebrales.

Finalmente, el RGPD señala que el tratamiento de las categorías especiales de datos personales, como los datos de salud, debe ser realizado “por un profesional sujeto a la obligación de secreto profesional o bajo su responsabilidad”<sup>348</sup>, obligación que de suyo debe ser extendida al tratamiento de los datos cerebrales.

---

<sup>348</sup> Artículo 9.3 RGPD.

## CAPÍTULO IV

### RESPONSABILIDAD PROACTIVA (ACCOUNTABILITY) Y GESTIÓN DE RIESGOS EN EL TRATAMIENTO DE DATOS CEREBRALES O NEURODATOS

#### 1. El principio de responsabilidad proactiva o *Accountability*

Una de las novedades más relevantes del RGPD es la inclusión del principio de responsabilidad proactiva o *accountability*. Así, el apartado segundo del artículo 5 establece que “el responsable del tratamiento será responsable del cumplimiento de los principios relativos al mismo y capaz de demostrarlo”.

Este principio se encuentra desarrollado en el artículo 24 del RGPD al establecer la obligación general del responsable del tratamiento de aplicar las medidas técnicas y organizativas apropiadas a fin de garantizar y poder demostrar que el tratamiento es conforme con el reglamento, teniendo en cuenta la naturaleza, el ámbito, el contexto y los fines del tratamiento, así como los riesgos de diversa probabilidad y gravedad para los derechos y libertades de las personas físicas.

Este principio requiere que el responsable del tratamiento realice un análisis de los datos que trata y de las demás circunstancias que rodean el tratamiento para después adoptar las medidas reales y eficaces que garanticen que el mismo cumple los requisitos legales. Para ello deberá tener en cuenta “la naturaleza, el ámbito, el contexto y los fines del tratamiento, así como los riesgos de diversa probabilidad y gravedad para los derechos y libertades de las personas físicas”. estas medidas habrán de revisarse y actualizarse siempre que sea necesario.

Cabe indicar que el GT29 en su dictamen 3/2010 sobre el principio de responsabilidad explicaba su significado y alcance<sup>349</sup>.

El GT29 señalaba que “proviene del mundo anglosajón donde es de uso general y donde se da una comprensión ampliamente compartida de su significado, aunque la definición exacta de “responsabilidad” resulta compleja en la práctica”. Y también que “el término apunta sobre todo al modo en que se ejercen las competencias y al modo en que esto puede comprobarse”.

Así, al hablar de Responsabilidad proactiva o *accountability* debemos considerar dos elementos:

- a) La necesidad de que el responsable del tratamiento adopte medidas adecuadas y eficaces para aplicar los principios de protección de datos.

---

<sup>349</sup> GT 29, (2010). Opinión 3/2010 on the principle of accountability (WP 173).

- b) La necesidad de demostrar, si así se requiere, que se han adoptado las medidas adecuadas y eficaces.

El GT29 considera, por ejemplo, que se podrían aplicar medidas de revisión interna, evaluación, establecimiento de políticas escritas y vinculantes de protección de datos para asegurar el cumplimiento de los criterios de calidad de datos; establecimiento de procedimientos que garanticen la identificación correcta de todas las operaciones de tratamiento de datos y el mantenimiento de un inventario de operaciones de tratamiento; nombramiento de un responsable de protección de datos o delegado de protección de datos; realización de evaluaciones de impacto sobre la privacidad en circunstancias específicas; formación a los miembros del personal, en especial a los directores de recursos humanos y a los administradores de tecnologías de la información; establecimiento de un mecanismo interno de tratamiento de quejas; etc<sup>350</sup>

En este sentido el Considerando 74 del RGPD explica que:

Debe quedar establecida la responsabilidad del responsable del tratamiento por cualquier tratamiento de datos personales realizado por él mismo o por su cuenta. En particular, el responsable debe estar obligado a aplicar medidas oportunas y eficaces y ha de poder demostrar la conformidad de las actividades de tratamiento con el presente Reglamento, incluida la eficacia de las medidas. Dichas medidas deben tener en cuenta la naturaleza, el ámbito, el contexto y los fines del tratamiento, así como el riesgo para los derechos y libertades de las personas físicas.

De esta forma, el simple cumplimiento normativo es condición necesaria, pero no suficiente para entender un tratamiento de datos personales conforme a la normativa.

Así, por ejemplo, en el ámbito de la salud, será necesario garantizar la participación plena del paciente en la obtención del consentimiento para el tratamiento con una BCI, para luego poder demostrar que efectivamente se obtuvo el consentimiento informado. Muchos pacientes potenciales de BCI padecen enfermedades como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) o la enfermedad de Parkinson que, en algunos casos, son comórbidas con la demencia y otras deficiencias cognitivas; incluso si no tienen estos síntomas al inicio del tratamiento, pueden desarrollarlos durante el transcurso del tratamiento, lo que los hace incapaces de brindar un consentimiento continuo, por lo que la base primigenia de legitimación de dicho tratamiento de datos cerebrales (el consentimiento) podría derivar en inútil conforme avanza el tratamiento sanitario, de tal forma que, deberá analizarse con

---

<sup>350</sup> *Ídem.*

cautela cuál será la base de legitimación conforme al contexto, finalidad del tratamiento y las características particulares de los usuarios.

Además, implantar cualquier dispositivo en el cerebro tiene el potencial de alterar la identidad o el sentido de identidad de un individuo de formas impredecibles; esto se ha documentado en la estimulación cerebral profunda y, aunque parece menos probable que ocurra con un implante de corteza motora, siempre debe ser una consideración.

Asegurar la plena capacidad de toma de decisiones y confirmar el consentimiento en cada etapa del proceso de tratamiento, por ejemplo, en entornos de BCI, es fundamental para preservar la agencia, la autonomía de los usuarios y el cumplimiento efectivo de los principios de la protección de datos personales.

## **2. El enfoque de riesgo**

Para el cumplimiento del principio de *“Responsabilidad Proactiva”* el responsable y encargado de tratamiento deberán previamente realizar un análisis y estudio del cumplimiento en materia de protección de datos basado en el riesgo. Es decir, deberán analizar qué medidas de protección de datos son necesarias implantar para garantizar el cumplimiento del RGPD, en función de naturaleza, alcance, contexto y finalidades del tratamiento de datos que realicen, así como de los riesgos o probabilidades de intromisión en los Derechos y libertades de los interesados.

El enfoque de aproximación al Riesgo se recoge en el art. 24 y en los considerandos 75 a 77 del RGPD y se analiza detalladamente en las Directrices sobre evaluación de impacto relativa a la protección de datos<sup>351</sup>, y en la declaración sobre el Enfoque basado en el riesgo<sup>352</sup>, ambos documentos emitidos por el GT29. Además, la Agencia Española de Protección de Datos, aborda este enfoque en su Guía de Gestión del Riesgo y Evaluación de Impacto en tratamientos de Datos Personales<sup>353</sup>.

El riesgo es un elemento con el que convivimos habitualmente, cualquier actividad que realizamos tiene implícito un riesgo. Las modalidades del riesgo son tan variadas como nuestra propia actividad, algunos de los riesgos que habitualmente son analizados pueden ser: de negocio, laborales, corporativos, de salud, medioambientales, riesgos para la seguridad de la información, etc. A esta variedad de riesgos cabría añadir

---

<sup>351</sup> GT29, (2017). Directrices sobre la evaluación de impacto relativa a la protección de datos [EIPD] y para determinar si el tratamiento "entraña probablemente un alto riesgo" a efectos del Reglamento 2016/679. pp.1-26

<sup>352</sup> GT29, (2014). *Statement on the role of a risk-based approach in data protection legal frameworks*. pp.1-4

<sup>353</sup> AEPD, (2021). Guía de Gestión del Riesgo y Evaluación de Impacto en tratamientos de Datos Personales. pp.16-17

una nueva vertiente: los riesgos para los derechos y libertades de las personas derivados de los tratamientos de datos personales.

El artículo 24.1 del RGPD requiere que los responsables del tratamiento apliquen medidas adecuadas para garantizar y poder demostrar el cumplimiento de dicho reglamento, teniendo en cuenta entre otros “los riesgos de diversa probabilidad y gravedad para los derechos y libertades de las personas físicas”<sup>354</sup>.

No obstante, el GT29 en su declaración “*Statement on the role of a risk-based approach in data protection legal frameworks*”, adoptada en mayo de 2014, indica que, con la adopción de un enfoque basado en el riesgo, no se trata de que se debiliten los derechos de las personas con respecto a sus datos personales. Los derechos concedidos al interesado por la legislación de la UE deben respetarse independientemente del nivel de los riesgos en los que se incurra a través del tratamiento de datos en cuestión. Los derechos de acceso, rectificación, supresión, oposición, transparencia, derecho al olvido, derecho a la portabilidad de datos deben ser igual de sólidos incluso si el procesamiento en cuestión involucra relativamente un “riesgo bajo”.

Más bien, la escalabilidad de las obligaciones legales basadas en el riesgo aborda los mecanismos de cumplimiento. Esto significa que un responsable o encargado del tratamiento cuyo procesamiento es de riesgo relativamente bajo puede no tener que hacer tanto para cumplir con sus obligaciones legales como un responsable o encargado cuyo procesamiento es de alto riesgo. Sin embargo, los responsables del tratamiento siempre deben ser responsables del cumplimiento de las obligaciones de protección de datos, incluida la demostración del cumplimiento con respecto a cualquier procesamiento de datos, independientemente de la naturaleza, el alcance, el contexto, los propósitos del procesamiento y los riesgos para los interesados, y es por esta razón que se vuelve indispensable la obligación de documentación en cada proceso.

Así, la aproximación basada en el riesgo debe ir más allá de un enfoque limitado a reaccionar ante un perjuicio producido al interesado. La gestión del riesgo no se debe reducir a la mera gestión de las consecuencias que se han producido sobre el interesado, como en el caso de que exista una brecha de datos personales. La gestión del riesgo ha de incluir el enfoque preventivo.

Cuando los riesgos están relacionados con un posible impacto negativo en los derechos, libertades e intereses del interesado, el GT29 advierte que deben determinarse teniendo en cuenta criterios objetivos específicos, como la naturaleza de los datos personales (p. ej., sensibles o no), la categoría del interesado (ej., menor o no), el número de interesados afectados y la finalidad del tratamiento. La gravedad y la

---

<sup>354</sup> *Ídem* p.7.

probabilidad de los impactos sobre los derechos y libertades del interesado constituyen elementos a tener en cuenta para evaluar los riesgos para la privacidad de las personas.

En esta línea, el GT29 señala, además, que la referencia a “los derechos y libertades” de los interesados atañe principalmente a los derechos a la protección de datos y a la intimidad, pero también puede implicar otros derechos fundamentales como la libertad de expresión, la libertad de pensamiento, la libertad de circulación, la prohibición de discriminación, el derecho a la libertad y la libertad de conciencia y de religión.

El GT29 previene, también, que el enfoque basado en el riesgo va más allá de un estrecho “*enfoque basado en el daño*” que se concentra solo en el daño y debe tener en cuenta todos los efectos adversos potenciales y reales, evaluados en una escala muy amplia que va desde un impacto en la persona afectada por el procesamiento en cuestión a un impacto social general (por ejemplo, pérdida de confianza social).

En relación a lo expuesto anteriormente, la AEPD en su Guía de Gestión del Riesgo y Evaluación de Impacto en tratamientos de Datos Personales, concluye que no solo se deben gestionar los riesgos inherentes al sujeto considerado individualmente, el objetivo de la integración normativa del enfoque de riesgos, es la protección de las personas en su dimensión individual y social, y aunque el responsable o encargado del tratamiento cumple un rol fundamental como controlador y procesador respectivamente, la gestión de riesgos no está orientada a proteger los intereses de estos últimos, más bien, el enfoque de la protección tiene como destinatario final al sujeto de los datos (interesado) o afectado por el tratamiento, como a todos aquellos individuos afectados o colectivos de afectados por el tratamiento.

Por su parte, con el objeto de poder tener una idea aproximada de lo que debe de ser considerado como riesgo, el considerando 75 del RGPD enumera aquellos tratamientos de datos que pueden ser considerados de riesgo para los derechos y libertades de los interesados:

- i. Tratamiento que puede dar lugar problemas de discriminación, usurpación de identidad o fraude, pérdidas financieras, daño para la reputación, pérdida de confidencialidad de datos sujetos al secreto profesional, reversión no autorizada de la seudonimización o cualquier otro perjuicio económico o social significativo;
- ii. Tratamiento que pueda privar a los interesados de sus derechos y libertades o impedirles ejercer el control sobre sus datos personales;
- iii. Tratamiento de datos personales sensibles que revelen origen étnico o racial, las opiniones políticas, la religión o creencias filosóficas, la militancia en sindicatos y el tratamiento de datos genéticos, datos relativos a la salud o datos sobre la

vida sexual, o las condenas e infracciones penales o medidas de seguridad conexas;

- iv. Tratamiento en la elaboración de perfiles, en particular el análisis o la predicción de aspectos referidos al rendimiento en el trabajo, situación económica, salud, preferencias o intereses personales, fiabilidad o comportamiento, situación o movimientos, con el fin de crear o utilizar perfiles personales;
- v. Tratamiento de datos personales de personas físicas vulnerables, en particular de niños;
- vi. Tratamiento que implica una gran cantidad de datos personales y que afecta a un gran número de interesados.

Por otro lado, y según el considerando 76, dicho riesgo deberá ponderarse en algunos casos y evaluarse de forma objetiva en otros para determinar si existe un “riesgo” o un “riesgo alto”.

Dado que el RGPD puede introducir situaciones de indeterminación en cuanto al riesgo a considerar en el tratamiento de datos, el considerando 77 establece que podrá proporcionarse más orientación sobre la identificación y evaluación de los riesgos del tratamiento de datos, y sobre la identificación de enfoques de mejores prácticas para mitigar esos riesgos, a través de códigos de conducta, certificaciones y directrices aprobadas por Comité el Grupo de Trabajo del artículo 29, o incluso por el propio Delegado de Protección de Datos de la Organización.

El análisis de riesgos en sistemas de gestión de seguridad de la información, en concreto de los datos personales, nos permite el estudio y la evaluación del riesgo asociado a los activos de la organización en cuestión, se basa en el análisis de las vulnerabilidades en la gestión y tratamiento de datos personales, cuyos resultados le ayudarán al responsable del tratamiento a la toma de las mejores decisiones respecto de la seguridad en el tratamiento de datos personales.

Las normas ISO 31000 y 31010 han establecido que todas las actividades de una organización, implican un riesgo de todos los tipos y tamaños, tanto internos como externos, y en concreto la norma ISO 27001:2005 nos define “análisis de riesgo”, como la utilización sistemática de la información disponible para identificar peligros y estimar riesgos<sup>355</sup>.

A modo de ejemplo, la norma ISO 31000 define el proceso del análisis y la gestión de riesgos en cuatro fases:

- i. Diseño y definición del marco de trabajo

---

<sup>355</sup> ISO 31000. (2018). Gestión del riesgo. [en línea] Recuperado el 02 de noviembre de 2020.

- ii. Implementar y gestionar el riesgo
- iii. Verificar los resultados mediante procesos de auditoría
- iv. Añadir mejoras al marco inicial del trabajo

La propuesta de esta norma, similar a cualquier metodología de análisis y gestión del riesgo, se basa en un sistema de mejora continua de la calidad. Un sistema en permanente evolución que técnicamente se conoce como ciclo PDCA o ciclo de Deming<sup>356</sup>:

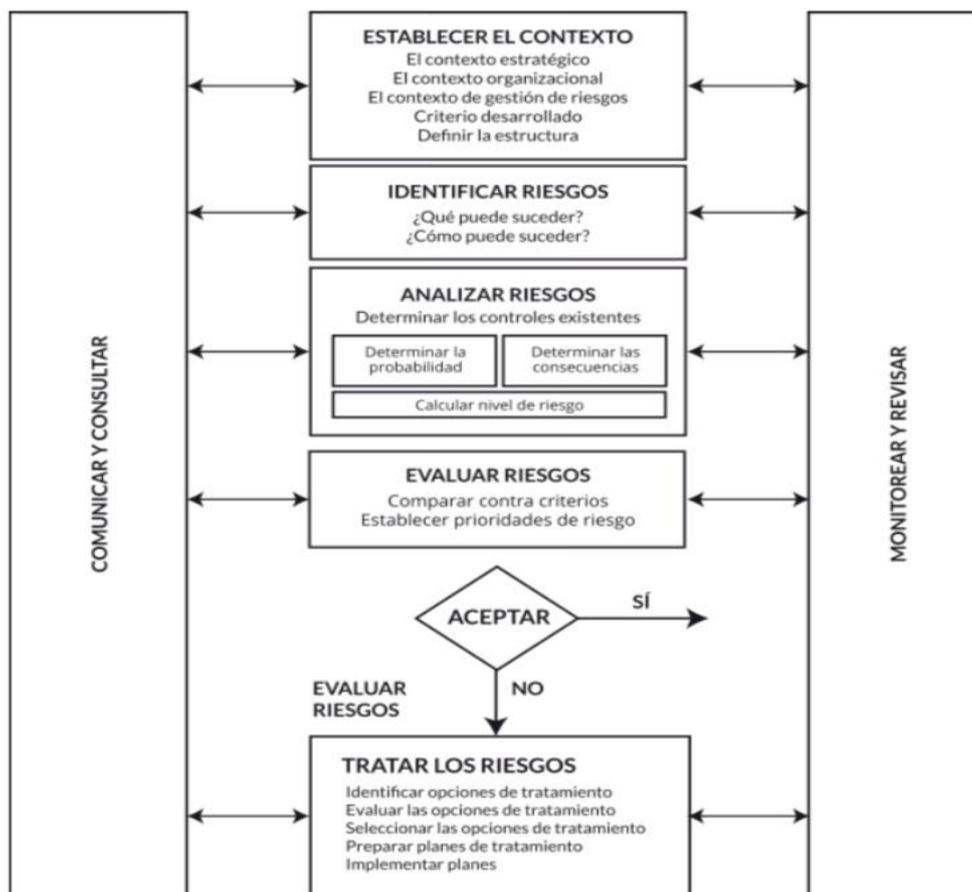


Imagen 31. Pasos básicos en la gestión de riesgos  
Fuente: [www.isotools.org](http://www.isotools.org)

En otros términos, podemos decir que el riesgo es cambiante según el entorno (marco físico, tecnológico, intervención humana, etc.) y la adecuación de las medidas

<sup>356</sup> El ciclo de Deming (de Edwards Deming), también conocido como ciclo PDCA (del inglés *Plan-Do-Check-Act*) o PHVA (de la traducción oficial al español como Planificar-Hacer-Verificar-Actuar) o *espiral de mejora continua*, es una estrategia basada en la mejora continua de la calidad, en cuatro pasos, según el concepto ideado por Walter A. Shewhart, amigo y mentor de William E. Deming que lo enseñó en el Japón de los años 1950. A veces también es, por ello, denominado *Ciclo Deming-Shewhart*. (Véase, [https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo\\_de\\_Deming](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Deming))

para paliar riesgos también debe de ser cambiante y en permanente adecuación y revisión. El proceso por el que se revisan las medidas para paliar los riesgos se denomina auditoría y es un mecanismo básico y necesario para garantizar la efectividad de las medidas para la seguridad de los tratamientos de datos y garantizar los derechos y libertades de las personas<sup>357</sup>.

Por otra parte, en agosto de 2019 se publicó la ISO 27701:2019, de Sistemas de Gestión de la Información de Privacidad (PIMS)<sup>358</sup>, una norma internacional certificable que puede ayudar a las organizaciones a cumplir con la normativa europea de protección de datos personales.

Esta norma es una extensión de las ya conocidas ISO 27001 e ISO 27002, orientadas a la implantación de Sistemas de Gestión de Seguridad de la Información. Pero a diferencia de sus predecesoras, la nueva ISO 27701 se centra en garantizar la seguridad de la información que contenga datos personales. Especifica los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar continuamente un PIMS.

El estándar ISO/IEC 27701 cuenta 6 anexos, dos de ellos normativos (Anexos A y B) y cuatro informativos (Anexos C, D, E y F).

El **Anexo A** presenta una tabla con 4 objetivos de control y 31 controles para los responsables del tratamiento de datos personales, que incluyen:

- Condiciones para la recolección y el tratamiento de datos personales.
- Obligaciones con los interesados (titulares).
- Privacidad por diseño y privacidad por defecto.
- Intercambio de datos personales, transferencia y divulgación.

El **Anexo B** presenta una tabla con 4 objetivos de control y 18 controles para los encargados del tratamiento, que incluyen:

- Condiciones para la recolección y el tratamiento de datos personales.
- Obligaciones con los interesados (titulares).
- Privacidad por diseño y privacidad por defecto.
- Intercambio de datos personales, transferencia y divulgación.

El **Anexo C** presenta una tabla que incluye el mapeo entre ISO/IEC 27701 y el estándar *ISO/IEC 29100 Privacy Framework*.

---

<sup>357</sup> La AEPD tiene publicada una guía de análisis de riesgos que facilitará la labor a los responsables del tratamiento [www.agpd.es](http://www.agpd.es)

<sup>358</sup> Disponible para su compra en: <https://www.iso.org/standard/71670.html>

El **Anexo D** presenta una tabla que mapea los artículos del Reglamento General de Protección de Datos y el estándar ISO/IEC 27701.

En este mapeo se consideran los principios, la obligación de transparencia e información, el ejercicio de los derechos, la notificación a la autoridad de control, la designación del oficial de protección de datos, la evaluación de impacto, la responsabilidad proactiva, las medidas de seguridad y las transferencias de datos personales.

El **Anexo E** incluye una tabla que mapea los estándares *ISO/IEC 27018 Code of practice for protection of personally identifiable information (PII) in public clouds acting as PII processors*, *ISO/IEC 29151 Code of practice for personally identifiable information protection* y el ISO/IEC 27701.

El **Anexo F**, se indican las cláusulas y actuaciones que se deben considerar para integrar la gestión de la privacidad dentro de una certificación o norma ISO/IEC 27001 *Information security management systems — Requirements*.

En el ámbito europeo, el legislador ha tenido en consideración estos precedentes en los Estándares Internacionales de Calidad para mejorar la salvaguardia y seguridad de la protección de datos personales a la hora de elaborar el RGPD y en específico señala en el Considerando 83:

A fin de mantener la seguridad y evitar que el tratamiento infrinja lo dispuesto en el presente Reglamento, el responsable o el encargado deben evaluar los riesgos inherentes al tratamiento y aplicar medidas para mitigarlos, como el cifrado. Estas medidas deben garantizar un nivel de seguridad adecuado, incluida la confidencialidad, teniendo en cuenta el estado de la técnica y el coste de su aplicación con respecto a los riesgos y la naturaleza de los datos personales que deban protegerse. Al evaluar el riesgo en relación con la seguridad de los datos, se deben tener en cuenta los riesgos que se derivan del tratamiento de los datos personales, como la destrucción, pérdida o alteración accidental o ilícita de datos personales transmitidos, conservados o tratados de otra forma, o la comunicación o acceso no autorizados a dichos datos, susceptibles en particular de ocasionar daños y perjuicios físicos, materiales o inmateriales.

De esta forma, todo tratamiento de datos requerirá un análisis general previo de los riesgos, que no debe confundirse con la EIPD propiamente tal. El análisis de riesgo previo forma parte de la EIPD, por lo tanto, si a partir de este análisis se determina que no es obligatoria la realización de una EIPD, sólo tendremos la obligación de gestionar los riesgos del tratamiento a través de un análisis de riesgos preliminar<sup>359</sup>.

---

<sup>359</sup> Al respecto el artículo 32 del RGPD señala: Teniendo en cuenta el estado de la técnica, los costes de aplicación, y la naturaleza, el alcance, el contexto y los fines del tratamiento, así como riesgos de probabilidad y gravedad variables para los derechos y libertades de las personas físicas, el responsable y

Si la evaluación preliminar general de riesgos indica que una operación concreta o un grupo de operaciones de tratamiento de datos personales plantea un probable «alto riesgo» o se ha producido un cambio en los riesgos en las operaciones que ya iniciaron, el responsable deberá llevar a cabo una Evaluación de impacto de protección de datos antes de continuar con la operación u operaciones. El RGPD aclara que esto podría ser, en especial, cuando la operación se realiza con el apoyo de las nuevas tecnologías<sup>360</sup>.

### **3. Riesgos específicos de privacidad y seguridad de los datos cerebrales o neurodatos: en particular, en entornos BCI**

A medida que las neurotecnologías evolucionan y están más disponibles comercialmente en numerosos sectores, es fundamental comprender los riesgos reales que plantean tales tecnologías. En particular, las BCI plantean muchos de los mismos riesgos que plantean los asistentes domésticos, los dispositivos médicos y los dispositivos portátiles, pero implican riesgos nuevos y mayores asociados con la privacidad del pensamiento, como resultado de registrar, usar y compartir una variedad de señales neuronales.

---

el encargado del tratamiento aplicarán medidas técnicas y organizativas apropiadas para garantizar un nivel de seguridad adecuado al riesgo (...)

<sup>360</sup> El GT29 en sus directrices sobre la EIPD, aprobadas por el CEPD, estableció nueve criterios que debían tenerse en cuenta para determinar si una operación de tratamiento puede dar lugar a un «alto riesgo»: cuando exista una evaluación de los datos, incluyendo perfiles sobre datos de trabajo, situación económica, salud, intereses, o ubicación. Un ejemplo de ello sería cuando las entidades de crédito disponen de una base de datos de referencia de sus clientes; cuando se toman decisiones automatizadas con efectos legales sobre un tratamiento de datos a gran escala, en torno a las categorías de datos incluidos en el artículo 9 del Reglamento o los relativos a infracciones penales del artículo 10; cuando exista un seguimiento sistemático utilizado para supervisar datos de los sujetos, incluyendo los datos recogidos en redes sociales. Estamos ante un método de vigilancia en un área de acceso público. Un ejemplo sería la recogida de datos en redes sociales para generar perfiles; cuando existan datos personales que sean considerados sensibles (como los delitos penales) porque están vinculados a actividades privadas. Un mal uso de los mismos, implicaría claramente un serio impacto en la vida de la persona afectada; cuando existen tratamientos de datos a gran escala, en base a: número de sujetos, volumen de los datos en el tratamiento, duración o permanencia del tratamiento o la extensión geográfica; cuando existen datos procedentes de dos o más operaciones de tratamiento de datos realizadas para diferentes propósitos; cuando hay tratamiento de datos relativos a intereses vulnerables. Estos datos suponen un desequilibrio entre el responsable y los titulares de los datos. Es decir, los casos en los que encontramos sujetos incapaces de consentir fácilmente u oponerse; cuando se aplican nuevas tecnologías, como es el uso de la huella digital o reconocimiento facial. El uso de dicha tecnología puede implicar nuevas formas de recolección de datos, suponiendo un alto riesgo; cuando el tratamiento de datos impide a los interesados el ejercicio de un derecho o uso de un servicio. Esto se da cuando un banco con el fin de ofrecer un préstamo, consulta una base de datos para comprobar perfiles. No obstante, pueden darse los casos mencionados anteriormente y el responsable entender que no sea probable un alto riesgo. En este caso, el responsable deberá justificar y documentar las razones para no llevar a cabo una EIPD. (GT29, 2017. Directrices sobre la evaluación de impacto relativa a la protección de datos [EIPD] y para determinar si el tratamiento "entraña probablemente un alto riesgo" a efectos del Reglamento 2016/679, págs. 10-12)

Por consiguiente, en un tratamiento de datos personales en entornos BCI los riesgos para el interesado son principalmente los que puedan afectar a sus derechos y libertades relacionados con 3 aspectos fundamentales:

- a) La naturaleza de los datos registrados en un EEG
- b) El uso de inteligencia artificial en el procesamiento de los datos.
- c) El desarrollo de nuevos canales de comunicación con el cuerpo a través de los cuales se puedan generar ataques contra el usuario.

Además, el nivel de riesgos de cada uno de estos aspectos fundamentales estará asociado tanto al contexto<sup>361</sup> como a la finalidad del tratamiento de datos cerebrales.

Así, en cuanto a la naturaleza de los datos, la situación es crítica principalmente en los procesos de monitorización de la actividad cerebral del usuario y de diagnóstico. En el procedimiento de monitorización, el EEG se utiliza de forma controlada para conocer las reacciones emocionales o cognitivas de las personas. Determinados marcadores en el EEG como la asimetría en alfa, o los N100, P200, N200, P300, pueden permitir conocer las emociones, preferencias o gustos de una persona hacia opciones políticas, orientación sexual, consumo, etc; o incluso acceder a sus capacidades cognitivas como la memoria, aprendizaje, o resolución de problemas, entre otras<sup>362</sup>.

En los últimos años, muchos investigadores han demostrado cómo se pueden utilizar diferentes componentes de las señales de EEG para inferir cosas sobre la personalidad, los recuerdos, las preferencias, los prejuicios, las creencias religiosas y políticas, los trastornos neurofisiológicos, etc. de un individuo<sup>363</sup>. Por ejemplo, el componente P300 de los potenciales relacionados con eventos (ERP) se usó para la detección de mentiras, para reconocer el nombre del sujeto en una secuencia aleatoria de nombres personales y para discriminar rostros familiares de desconocidos. De manera similar, el componente N400 de ERP se usó para inferir en qué está pensando una persona, después de haber sido preparado con palabras específicas. El componente P600 de ERP se usó para inferir las preferencias sexuales de una persona<sup>364</sup>, y se utilizó una estimación del nivel de ansiedad calculado a partir de las señales del EEG para sacar conclusiones sobre las creencias religiosas de la persona.

---

<sup>361</sup> Variable que influye en la clasificación de datos cerebrales relacionada con la monitorización, evaluación o diagnóstico, e interacción/intervención.

<sup>362</sup> BALLARIN USIETO, P., & MINGUEZ, J. (s.f.). La importancia de la ciberseguridad en *brain-computer interfaces*. [en línea] Recuperado el 02 de noviembre de 2020

<sup>363</sup> BONACI, T., & CHIZECK, H.J. (2013). "*Privacy by Design in BrainComputer Interfaces*", *University of Washington Technical Report Number UWEETR-2013-0001*

<sup>364</sup> *Ídem*

En un artículo de seguimiento, Frank et al. identificó una amenaza más grave para los usuarios de dispositivos BCI<sup>365</sup>. Propusieron un ataque subliminal en el que la víctima es dirigida a los niveles por debajo de su percepción cognitiva y expuesta a estímulos visuales durante 13,3 milisegundos, una duración que normalmente no es suficiente para la percepción consciente. Los resultados experimentales mostraron que es factible que un atacante extraiga la información privada relevante del usuario y que, si se lleva a cabo con cuidado, el ataque podría pasar desapercibido. Como resultado, el ataque podría escalarse para exponer a muchas víctimas al ataque durante mucho tiempo.

Por su parte, en aplicaciones de diagnóstico, los resultados de un EEG pueden detectar comportamientos anómalos del cerebro como epilepsia, hemorragias, desórdenes del sueño, encefalitis, tumores, migrañas, o el abuso de drogas o alcohol. En algunos casos, se trata de información de la cual ni siquiera el propio usuario tiene por qué ser consciente de ella. Esta información podría ser procesada para obtener, con algoritmos de predicción, la probabilidad de que elabore ciertos sentimientos o pueda desarrollar ciertas enfermedades<sup>366</sup>.

Por otro lado, los datos brutos reales generados por los dispositivos de EEG son fundamentales para optimizar los algoritmos de Inteligencia Artificial en los que se basa la interfaz cerebro-computador. La problemática en torno a la IA pivota en la inexistencia de la ética algorítmica, y la facilidad con que se produce el sesgo algorítmico. Debemos tener presente que los humanos dirigen todo el ciclo de vida de la IA. Dado que los humanos tenemos sesgos, estos pueden trasladarse con gran facilidad a la IA en todo ese ciclo de vida. El reto es que son muy difíciles de identificar y más aún de corregir<sup>367</sup>.

Es tan fundamental el uso ético de los algoritmos para los derechos fundamentales de los afectados que, con fecha 20 de octubre de 2020, la Eurocámara aprobó el primer informe sobre IA. El texto abogaba por la creación de un marco regulatorio de principios éticos que sea de obligado cumplimiento para los softwares, algoritmos y datos incluidos en la inteligencia artificial, la robótica y las tecnologías conexas que se desarrollen, se distribuyan o se usen en la Unión Europea. El eurodiputado García del Blanco ha enfatizado que “todos ellos deberán respetar la

---

<sup>365</sup>FRAN, M., HWU, K.T., JAIN, S., KNIGHT, R., MARTINOVIC, I., MITTAL, P., PERITO, D., & SONG, D. (2013) "*Subliminal Probing for Private Information via EEG-Based BCI Devices*". *ResearchGate* [en línea] <http://arxiv.org/abs/1312.605>, pp.1-19

<sup>366</sup> *Ídem*.

<sup>367</sup> MONASTERIO ASTOBIZA, A. (2017). Ética algorítmica: Implicaciones éticas de una sociedad cada vez más gobernada por algoritmos. *Dilemata* (24), pp.186-204.

dignidad humana, el cumplimiento de los derechos fundamentales y la legalidad de la Unión. Si no, no podrán operar en Europa”<sup>368</sup>.

En el texto, García del Blanco propuso también la creación de una Agencia Europea para la Inteligencia Artificial (IA), que coordine la acción de los estados en este ámbito. El informe propone “una perspectiva humano céntrica en el desarrollo de la tecnología, que sirva a los intereses de la ciudadanía y permita el control humano durante todo el proceso de desarrollo y uso, lo que conllevaría la habilitación de un *botón rojo* de parada por si fuera necesario. Al mismo tiempo, nuestra regulación debe garantizar un equilibrio entre la protección de los derechos de los ciudadanos y la eliminación de complejidad burocrática para la investigación, desarrollo e implementación”<sup>369</sup>.

Además, propuso definir como “de alto riesgo” “las tecnologías “que conlleven un riesgo significativo de quiebra de estos principios éticos; garantizar que las tecnologías se desarrollen, implementen y utilicen de manera segura, transparente y responsable; y asegurar que los datos usados o producidos por ellas respetan el valor de la dignidad humana y evitan el sesgo y la discriminación”.

En relación con la privacidad, García del Blanco recordó que “tanto el Reglamento General de Protección de Datos como la Carta de Derechos Fundamentales son plenamente de aplicación” en este campo.

Así, en el mes de abril de 2021 fue publicada la versión definitiva de la esperada propuesta de Reglamento (UE) de la Comisión Europea sobre el marco jurídico aplicable a los sistemas de Inteligencia Artificial (IA). Dicha propuesta regula los sistemas de IA de alto riesgo y contiene, además, reglas de transparencia armonizadas para aquellos sistemas dirigidos a interactuar con personas físicas para generar o manipular imágenes, sonidos o contenidos de video.

Es importante destacar que el reglamento propone un ámbito de aplicación subjetivo y territorial amplio que comprendería a todos los actores dentro de la cadena de valor de la IA, es decir, proveedores, importadores, distribuidores, y alcanzaría tanto aquellos ubicados en la UE como los empleados en un tercer país, siempre y cuando, en este último caso, desplieguen los efectos en la UE.

Con fecha 8 de diciembre de 2023 el Consejo de la Unión Europea, liderado por la presidencia española, y el Parlamento Europeo llegaron a un acuerdo provisional

---

<sup>368</sup> GARCÍA DEL BLANCO, “Hemos marcado el camino para que la inteligencia artificial en la UE sirva para mejorar nuestras vidas y nuestro entorno”, [en línea] Recuperado el 20 de octubre de 2020.

<sup>369</sup> PARLAMENTO EUROPEO, 2020. *DRAFT REPORT with recommendations to the Commission on a framework of ethical aspects of artificial intelligence, robotics and related technologies*. pp.1-34

histórico para avanzar hacia la aprobación definitiva del futuro Reglamento por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial<sup>370</sup>.

Como otras normas que pretenden mantener un equilibrio entre innovación y el respeto por las libertades y derechos fundamentales de los ciudadanos, la propuesta de Reglamento de IA mantiene un enfoque basado en el riesgo.

Así, la regulación propuesta divide los sistemas de IA en torno a cuatro niveles de riesgo, a los que le impone más o menos obligaciones en función de su categorización:

- i. **Sistemas de IA de riesgo inaceptable:** Se recoge una serie de sistemas de IA, listados de forma tasada y periódicamente revisados, cuyo uso estaría prohibido por implicar un riesgo inadmisibles para la seguridad, la vida y los derechos fundamentales. Dicho listado incluye sistemas tales como aquellos capaces de manipular el comportamiento humano, predecir información respecto a colectivos o grupos para identificar sus vulnerabilidades o circunstancias especiales, o aquellos que impliquen la identificación biométrica o la videovigilancia masiva en directo por parte de las autoridades en espacios públicos. Respecto a estos últimos, solo se permiten para el cumplimiento de la ley, bajo autorización judicial o administrativa. No obstante, esta autorización puede ser solicitada con posterioridad a su implementación en casos de “extrema urgencia”, lo que puede reabrir de nuevo el debate.
- ii. **Sistemas de IA de alto riesgo:** Se listan otros sistemas de IA, que si bien no están prohibidos, suponen un “alto riesgo” para los derechos y libertades de los individuos y, por consiguiente, deben estar sujetos a ciertas obligaciones reforzadas que garanticen su uso legal, ético, robusto y seguro. Este listado también está tasado y está sujeto a revisión periódica en un futuro para adaptarlo a las nuevas tecnologías. Los sistemas comprendidos en esta categoría incluyen componentes de seguridad aplicables a sectores regulados o infraestructuras críticas tales como el transporte aéreo, vigilancia de vehículos a motor, transporte ferroviario, etc. También se incluirían sistemas de identificación y categorización biométrica, selección de personal, control de fronteras o sistemas dirigidos a verificar el cumplimiento de la ley o evaluación de la situación crediticia de las personas, entre otros.
- iii. **Sistemas de IA de riesgo limitado:** Sistemas que no suponen un alto riesgo para los derechos y libertades. Incluyen determinadas tecnologías de menor

---

<sup>370</sup> Documentos de discusión, acuerdos y propuestas disponibles en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A52021PC0206>

sofisticación o capacidad de intrusión tales como asistentes virtuales como chatbots.

- iv. Sistemas de IA de riesgo mínimo: Estos últimos, en principio, no estarían sujetos a ninguna obligación en particular, pudiendo los agentes de la cadena elegir si desean adherirse a sistemas voluntarios de cumplimiento. Por consiguiente, estos sistemas quedarían, en principio, fuera del ámbito de aplicación del reglamento.

Como se había anticipado, se ha acordado la creación de una nueva Oficina Europea de Inteligencia Artificial dentro de la Comisión Europea que se encargará de la coordinación, a nivel europeo, de la supervisión de la aplicación y el cumplimiento de las normas en materia de IA, junto con la aparición, a nivel local, de autoridades nacionales competentes para la vigilancia del mercado nacional, como la Agencia Española de Supervisión de Inteligencia Artificial.

El incumplimiento del Reglamento de IA puede dar lugar a sanciones económicas que han sido revisadas en el marco del acuerdo alcanzado entre Consejo y Parlamento Europeo, sin perjuicio de que se prevé la existencia de límites proporcionados para las multas administrativas impuestas a pymes o empresas de nueva creación:

- 35 millones de euros (o el 7% del volumen de facturación anual global de la empresa en el año financiero anterior, lo que sea mayor) por violaciones relacionadas con IA listada como prohibida;
- 15 millones de euros (o el 3% del volumen de facturación anual global de la empresa en el año financiero anterior, lo que sea mayor) por otras violaciones de las obligaciones del Reglamento de IA;
- 7,5 millones de euros (o el 1,5% del volumen de facturación anual global de la empresa en el año financiero anterior, lo que sea mayor), por el suministro de información incorrecta.

Se espera que el Reglamento de IA puede ser aprobado entre el primer y segundo trimestre de 2024, presumiblemente en primavera, sin perjuicio de que su plena aplicación no se producirá hasta dentro de dos años (2026), con algunas salvedades para ciertas obligaciones que podrían resultar aplicables a partir de los seis meses.

La IA se identifica como “una de las partes más importantes de la economía de los datos”, del llamado mercado único digital<sup>371</sup>; es más, “sin datos, no hay inteligencia

---

<sup>371</sup> Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y social europeo y al Comité de las Regiones «*La construcción de una economía de los datos europea*», COM (2017) 9 final, de 10 de enero de 2017: «*La economía de los datos mide la repercusión global del mercado de los datos – es decir, el mercado en que se intercambian datos digitales como productos o servicios derivados de los datos brutos– en el conjunto de la economía. Implica la generación, recogida, almacenamiento,*

artificial”, dice la Comisión Europea. Los datos personales y la IA conformarían la base esencial de la personalidad virtual de todo ciudadano europeo. La Comisión es consciente de esta relación y vela por garantizar la coherencia de la Propuesta con la regulación vigente en materia de protección de datos. En este sentido, podríamos identificar a la IA como uno de los medios de obtención de datos personales, de forma que la defensa de estos justifica, en parte, la regulación de aquella<sup>372</sup>.

En cuanto a los riesgos del procesamiento de datos basados en IA en relación a la seguridad de la información, por ejemplo, en neurotecnologías como las BCI, generalmente las amenazas ocurren en escenarios donde el atacante logra acceder temporalmente a la diadema (EEG) e introduce contenido malicioso en el firmware, este malware puede crear y enviar datos EEG manipulados. La consecuencia que deriva de esta brecha de seguridad, es el robo de datos con fines de extorción o venta a terceros y la posible manipulación de los datos enviados al dispositivo de control cercano, por lo que la aplicación no lleva a cabo su objetivo, o peor, lleva a cabo un objetivo lucrativo para el atacante.

Otro ejemplo de riesgos de interacción máquina-cuerpo humano, es la posibilidad de que, un atacante desarrolle una app BCI idéntica a la original del fabricante con código adicional malicioso, que tiene como objetivo que la aplicación original no funcione, o enviar estímulos al usuario que le causen daño o le roben información privada (verbigracia, gustos, preferencias, PIN de tarjetas, entre otros)<sup>373</sup>.

Elevada importancia en este ámbito ha desarrollado la AGENCIA ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN DE DATOS, autoridad de control que se caracteriza por una participación activa, normativa y colaborativa. En el mes de febrero de 2020 publicó una Guía de adecuación al RGPD de tratamientos que incorporan inteligencia artificial dando a conocer una serie de recomendaciones para los productos y servicios que emplean distintas técnicas, entre ellas, el aprendizaje automático. En la referida guía también aborda las amenazas específicas en los componentes IA y ha señalado que<sup>374</sup>:

Existen tipologías estudiadas de ataque y defensa a componentes de IA. Entre las medidas de seguridad, se recomienda prestar especial atención a aquellas que gestionen estos tipos de amenazas:

---

*procesamiento, distribución, análisis, elaboración, entrega y explotación de los datos que hacen posibles las tecnologías digitales».*

<sup>372</sup> PEGUERA POCH, M. (2020): “En búsqueda de un marco normativo para la Inteligencia Artificial”. En Cerrillo i Martínez, Agustí et Peguera Poch, Miquel (Coords.) Retos de la inteligencia artificial. Cizur Menor: Aranzadi, pp. 41 a 56, vid. pp. 41 y 42.

<sup>373</sup> BALLARIN, P. & MINGUEZ, J. *Op. Cit.*

<sup>374</sup> AEPD, (2020). Adecuación al RGPD de tratamientos que incorporan Inteligencia artificial. Una introducción. pp.42-43.

- ✓ Acceso y manipulación del conjunto de datos de entrenamiento, previo a la configuración del modelo, por ejemplo, mediante técnicas de envenenamiento con patrones adversos.
- ✓ Inclusión de troyanos y puertas traseras durante el proceso de desarrollo de la IA, bien en el propio código o en las herramientas de desarrollo.
- ✓ Manipulación de la API de usuario para realizar accesos al modelo, tanto a nivel de caja negra como de caja blanca, para la manipulación de parámetros del modelo, filtrado del modelo a terceros, ataques a la integridad o disponibilidad de las inferencias.
- ✓ Ataques por “adversarial machine learning” por lo que sería necesario un análisis de la robustez y control de la alimentación con datos al modelo.
- ✓ Ataques por imitación de patrones que se conoce serán admitidos por el sistema.
- ✓ Reidentificación de los datos personales incluidos en el modelo (inferencia de pertenencia o inversión del modelo) por parte de usuarios internos y externos.
- ✓ Fraude o engaño a la IA por parte de los interesados, especialmente en casos que puedan suponer un perjuicio para otros interesados, lo que implica la necesidad de realizar un análisis de la robustez ante dichas actuaciones y la realización de auditorías.
- ✓ Filtrado a terceros de resultados de perfilado o decisiones inferidas por la IA (también relacionado con las API’s de usuario).
- ✓ Filtrado o acceso a los logs resultado de las inferencias generadas en la interacción con los interesados.

De otro lado, en cuanto al desarrollo de nuevos canales de comunicación con el cuerpo, generalmente estos riesgos están asociados a las aplicaciones de las BCI en contexto de interacción/intervención máquina/usuario, y suponen nuevos escenarios de riesgos debido al crecimiento exponencial de los dispositivos conectados, la seguridad poco adecuada de los mismos y el desconocimiento de las medidas básicas de seguridad por parte de los usuarios. En los escenarios de usuarios con discapacidad motora, los riesgos relacionados con la privacidad proceden del uso secundario de los datos procedentes de la actividad cerebral del usuario, de los cuales se pueden obtener, no solamente la condición de discapacidad por degeneración de la actividad de la corteza motora, sino también otra información relativa a enfermedades mentales. Además, la actividad cerebral es monitorizada durante varias horas continuadas de uso del dispositivo, por lo que potencialmente puede obtenerse información relativa a sus

emociones y motivaciones durante todas las actividades que realiza en su día a día, por ejemplo, la interacción con otras personas, visualización de la televisión, etc.<sup>375</sup>

En el Simposio de Seguridad USENIX 2012, Martinovic et. al., presentó el primer software malicioso diseñado para detectar la información privada de un usuario mediante una BCI<sup>376</sup>. Se refirieron a él como el "*spyware cerebral*". Los investigadores utilizaron un BCI disponible comercialmente para presentar a los usuarios estímulos visuales y registrar sus señales neuronales EEG. Se centraron en la respuesta del P300 y analizaron las señales registradas para detectar a los usuarios: a) PIN de 4 dígitos, b) información bancaria, c) meses de nacimiento, d) lugares de residencia, y e) si reconocieron el conjunto de rostros presentado.

Si bien los investigadores se han centrado solo en la respuesta del P300, no es difícil imaginar que se desarrollen aplicaciones de *spyware* cerebral para extraer información privada sobre los recuerdos, los prejuicios y las creencias de los usuarios, pero también sobre sus posibles trastornos neurofisiológicos.

Sobra decir, que los fabricantes de estas nuevas tecnologías tienen a su disposición millones de muestras de información de EEG en sus servidores en la nube generados por miles de usuarios cada vez que usan la diadema. Estos datos se pueden usar tanto para impulsar la investigación interna como para su comercialización dentro de un mercado muy lucrativo<sup>377</sup>. En estas circunstancias, no parece raro imaginar la cantidad de empresas que recogen información de los usuarios, crean perfiles lo más concretos posibles y venden todo ello a terceros sin el consentimiento del afectado. De hecho, en el mundo cibernético aquellas entidades ya poseen nombre y apellido, los "*data brokers*"<sup>378</sup>.

#### **4. Medidas y garantías para gestionar el riesgo en entornos neurotecnológicos**

El artículo 32 del RGPD establece que las medidas técnicas y organizativas apropiadas para garantizar el nivel de seguridad adecuado al riesgo se definen en función del estado de la técnica, los costes de aplicación, y la naturaleza, el alcance, el contexto y los fines del tratamiento, así como los riesgos de probabilidad y gravedad variables para los derechos y libertades de las personas. No se establecen medidas de seguridad estáticas, corresponderá al responsable determinar aquellas medidas de seguridad que son necesarias para garantizar la confidencialidad, la integridad y la

---

<sup>375</sup> BALLARIN, P. & MINGUEZ, J. *Op. Cit.*

<sup>376</sup> MARTINOVIC, I., DAVIES, D., FRANK, M., PERITO, D., ROS, T. & SONG, D. (2012). "*On the feasibility of side-channel attacks with brain-computer interfaces,*" in *Proc. 21st USENIX Security Symp.*

<sup>377</sup> *Ídem.*

<sup>378</sup> Se denominan *Data Brokers*, a las empresas que recopilan información ,incluida información personal sobre consumidores, de una amplia variedad de fuentes con el fin de revender dicha información a sus clientes, que incluyen tanto empresas del sector privado como agencias gubernamentales. (Véase, [https://en.wikipedia.org/wiki/Information\\_broker](https://en.wikipedia.org/wiki/Information_broker))

disponibilidad de los datos personales, por lo tanto, un mismo tratamiento de datos puede implicar medidas de seguridad distintas en función de las especificidades concretas en las que tiene lugar dicho tratamiento de datos.

Cuando nos referimos a confidencialidad nos referimos a cualquier medida que impida el acceso no autorizado a los datos personales, mecanismos para evitar la vulneración del deber de secreto o medidas encaminadas para garantizar los privilegios de acceso a la información o los datos personales. Por ejemplo, hablamos de medidas por la que se conceden o deniegan los permisos para acceder a un sistema de información o la gestión de las altas y bajas del personal de una organización. En seguridad se viene refiriendo a la confidencialidad con el principio de la “necesidad de saber” (*“need to know”*) principio mediante el cual únicamente deben acceder a la información aquellas personas que lo precisen en virtud de las funciones que deben desempeñar en su trabajo o su cargo<sup>379</sup>.

La integridad de los datos personales o de la información se relaciona con el principio de exactitud o de calidad de los datos. De acuerdo con este principio, el responsable del tratamiento de los datos debe garantizar que aquellos datos que vienen siendo tratados son acordes a la realidad o veraces y adecuados a la finalidad para la que fueron obtenidos y, además, se garantiza su inalterabilidad<sup>380</sup>.

La disponibilidad es la característica de la seguridad por la que se intenta mantener los datos accesibles para su consulta, localización y rectificación cuando sea necesario. Dicho de otra forma, esta característica garantiza los derechos de acceso, rectificación, supresión, derecho de limitación del tratamiento, derecho a la portabilidad de los datos, y el derecho a la portabilidad de los datos. En definitiva, se trata de una característica de la seguridad estrechamente vinculada a los derechos de los interesados<sup>381</sup>.

Para garantizar estos tres factores de la seguridad, indispensables para la protección y disminución de los riesgos relacionados con datos cerebrales y por consecuencia de los derechos y libertades de los individuos en entornos BCI, es necesario el “tratamiento del riesgo”. En términos de gestión de riesgo esto se traduce en la selección de medidas de mitigación, eliminación o control de los riesgos identificados. La AEPD expresa que las medidas y garantías que tienen por objeto atender o disminuir el riesgo en el tratamiento se suelen denominar “controles” en la terminología de la gestión del riesgo<sup>382</sup>.

---

<sup>379</sup> INSTITUTO NACIONAL DE CIBERSEGURIDAD [INCIBE]. (s.f.). incibe.es. pp.6-7. [en línea]

<sup>380</sup> *Ídem*.

<sup>381</sup> *Ídem*.

<sup>382</sup> AEPD, (2021). Guía de Gestión del Riesgo y Evaluación de Impacto en tratamientos de Datos Personales. pp.37-39

La AEPD en su guía sobre “Gestión del riesgo y evaluación de impacto en tratamiento de datos personales”, clasifica las medidas y garantías para mitigar el riesgo, de acuerdo a diferentes criterios:

- i. En cuanto previenen la materialización del riesgo o se activan como respuesta a un riesgo materializado, se pueden clasificar en medidas proactivas/preventivas, de detección y reactivas/correctivas.
- ii. En cuanto a la estrategia de cómo afrontar el riesgo, distinguimos entre medidas orientadas a:
  - Reducir/mitigar el riesgo: Para reducir el nivel de riesgo, se deben establecer medidas de control que disminuyan los niveles de probabilidad y/o los impactos asociados al riesgo inherente.
  - Evitar/eliminar el riesgo: Si el riesgo es muy elevado y no se quiere asumir el mismo, se puede decidir abandonar la actividad de tratamiento o, en su defecto, modificar la naturaleza, el alcance, el contexto y la finalidad del tratamiento para evitar dicho riesgo.
  - Aceptar/asumir el riesgo: Si el riesgo inherente es inferior al nivel de riesgo considerado como aceptable, se puede asumir, pero sin olvidar la necesidad de continuar gestionándolo de forma continua.
- iii. Atendiendo a su naturaleza, los controles pueden incorporar medidas:
  - Organizativas: Medidas asociadas a los procedimientos, a la organización y/o al gobierno de la entidad relacionadas con la aplicación de políticas de protección de datos.
  - Legales: Garantías jurídicas que pudieran ser necesarias como el establecimiento de cláusulas de confidencialidad o la adopción de compromisos de no reidentificación, entre otros.
  - Técnicas: Medidas de protección desde el diseño, medidas de seguridad o medidas para auditoría (“accountability”) automática, entre otras.

Ahora bien, tomando como base el modelo de responsabilidad proactiva establecido en el capítulo IV del RGPD, la AEPD considera que las medidas y garantías que se pueden adoptar para mitigar los riesgos de protección de datos se pueden clasificar en:

- i. Medidas sobre el concepto y diseño del tratamiento
- ii. Medidas de gobernanza y políticas
- iii. Medidas de protección de datos por defecto y desde el diseño
- iv. Medidas de prevención y gestión de brechas de datos personales/ medidas de seguridad.

Organizadas a la luz del RGPD clasificaremos estas medidas como medidas de índole organizativas y, medidas de índole técnicas, pues muchas de las medidas

descritas por la AEPD quedan subsumidas en los instrumentos propuestos en las medidas técnicas y organizativas. Las medidas organizativas son aquellas que afectan a la estructura y a la toma de decisiones para garantizar la reducción del riesgo de incumplimiento del RGPD, demostrando la efectividad de la gestión de la protección de datos. En tanto que, las medidas técnicas son básicamente los sistemas de seguridad aplicados a las tecnologías utilizadas en el tratamiento de datos personales. A continuación, analizaremos cada una de ellas, no sin antes aclarar que este listado es meramente ejemplificador y no tiene carácter taxativo:

#### *4.1 Medidas de índole organizativas*

##### *a) Neutralidad tecnológica y Privacidad desde el diseño (PbD) y por defecto.*

El Considerando 15 del RGPD establece que “a fin de evitar que haya un grave riesgo de elusión, la protección de las personas físicas debe ser tecnológicamente neutra y no debe depender de las técnicas utilizadas”<sup>383</sup>

En este contexto, el Considerando 78 del Reglamento, afirma que “la protección de los derechos y libertades de las personas físicas con respecto al tratamiento de datos personales exige la adopción de medidas técnicas y organizativas apropiadas con el fin de garantizar el cumplimiento de los requisitos del presente Reglamento”<sup>384</sup>

La neutralidad tecnológica, comúnmente definida como "la libertad de los individuos y las organizaciones de elegir la tecnología más apropiada y adecuada a sus necesidades y requerimientos para el desarrollo, adquisición, utilización o comercialización, sin dependencias de conocimiento implicadas como la información o los datos"<sup>385</sup>, está íntimamente relacionada con el principio de privacidad desde el diseño y por defecto.

El principio de protección de datos desde el diseño y por defecto, recogido en el artículo 25 del RGPD, consiste en incorporar, desde las primeras fases de todo proyecto, medidas técnicas y organizativas apropiadas, teniendo en cuenta factores como el estado de la técnica, el coste de la aplicación, la naturaleza, ámbito, contexto y fines del tratamiento o los riesgos del tratamiento para los derechos y libertades de los afectados, aquellas medidas permitirán cumplir los requisitos del Reglamento y proteger los derechos de los interesados, produciéndose una relación integral entre las nuevas tecnologías y la protección de datos personales<sup>386</sup>.

---

<sup>383</sup> Considerando 15 RGPD

<sup>384</sup> Considerando 78 RGPD

<sup>385</sup> Neutralidad tecnológica. (2018). *Wikipedia, La enciclopedia libre*.

<sup>386</sup> Agencia Española de Protección de Datos y a la Asociación Española para el Fomento de la Seguridad de la Información, ISMS *Forum Spain*, (2016). *Código de buenas prácticas en protección de datos en proyectos de Big Data*, pág.20.

En palabras de ANN CAVOUKIAN, los principios de Privacidad por Diseño pueden ser aplicados a todos los tipos de información personal, pero deben ser aplicadas con vigor especial a datos delicados tales como información médica y datos financieros. La robustez de las medidas de privacidad tiende a ser correspondiente con la sensibilidad de los datos. Así, para cumplir con la privacidad desde el diseño se deben practicar 7 principios fundamentales<sup>387</sup>:

- i. Proactivo, no Reactivo; Preventivo no Correctivo: El enfoque de Privacidad por Diseño (PbD por sus siglas en inglés) está caracterizado por medidas proactivas, en vez de reactivas. Anticipa y previene eventos de invasión de privacidad antes de que estos ocurran. PbD no espera a que los riesgos se materialicen, ni ofrece remedios para resolver infracciones de privacidad una vez que ya ocurrieron – su finalidad es prevenir que ocurran. En resumen, privacidad por diseño llega antes del suceso, no después.
- ii. Privacidad como la configuración predeterminada: Todos podemos estar seguros de una cosa – ¡Lo predeterminado es lo que manda! La privacidad por diseño busca entregar el máximo grado de privacidad asegurándose de que los datos personales estén protegidos automáticamente en cualquier sistema de IT dado o en cualquier práctica de negocios. Si una la persona no toma una acción, aun así, la privacidad se mantiene intacta. No se requiere acción alguna de parte de la persona para proteger la privacidad – está interconstruida en el sistema, como una configuración predeterminada.
- iii. Privacidad incrustada en el diseño: La privacidad por diseño está incrustada en el diseño y la arquitectura de los sistemas de tecnologías de información y en las prácticas de negocios. No está colgada como un suplemento, después del suceso. El resultado es que la privacidad se convierte en un componente esencial de la funcionalidad central que está siendo entregada. La privacidad es parte integral del sistema, sin disminuir su funcionalidad.
- iv. Funcionalidad total: “Todos ganan”, no “si alguien gana, otro pierde”. La privacidad por diseño busca acomodar todos los intereses y objetivos legítimos de una forma “ganar-ganar”, no a través de un método anticuado de “si alguien gana, otro pierde”, donde se realizan concesiones innecesarias. La privacidad por diseño evita la hipocresía de las falsas dualidades, tales como privacidad versus seguridad, demostrando que sí es posible tener ambas al mismo tiempo.
- v. Seguridad “extremo a extremo”: Proveyendo de una protección de ciclo de vida completo. Habiendo sido incrustada en el sistema antes de que el primer elemento de información haya sido recolectado, la privacidad por diseño se extiende con seguridad a través del ciclo de vida completo de los datos involucrados – las medidas de seguridad robustas son esenciales para la

---

<sup>387</sup> CAVOUKIAN, A. (2016). Privacidad por diseño los 7 principios fundamentales. Mediascope. pp.1-2

- privacidad, de inicio a fin. Esto garantiza que todos los datos son retenidos con seguridad, y luego destruidos con seguridad al final del proceso, sin demoras. Por lo tanto, la privacidad por diseño garantiza una administración segura del ciclo de vida de la información, desde la cuna hasta la tumba, desde un extremo hacia el otro.
- vi. Visibilidad y Transparencia: La privacidad por diseño busca asegurar a todos los involucrados que cualquiera que sea la práctica de negocios o tecnología involucrada, esta en realidad esté operando de acuerdo a las promesas y objetivos declarados, sujeta a verificación independiente. Sus partes componentes y operaciones permanecen visibles y transparentes, a usuarios y a proveedores. Recuerde, confíe, pero verifique.
  - vii. Respeto por la privacidad de los usuarios: Mantener un Enfoque Centrado en el Usuario Por encima de todo, la Privacidad por Diseño requiere que los arquitectos y operadores mantengan en una posición superior los intereses de las personas, ofreciendo medidas tales como predefinidos de privacidad robustos, notificación apropiada, y facultando opciones amigables para el usuario. Hay que mantener al usuario en el centro de las prioridades.

Así, ANN CAVOUKIAN propone extender a la privacidad el mismo planteamiento de “*design-thinking*” (o Metodología del Diseño) que ha dado lugar a la revolución tecnológica actual: “observar el mundo con ojos de diseñador” desde un planteamiento integral y transversal en el que nada se debe dar por sentado. Bajo esta nueva perspectiva, siempre que se traten datos personales, la privacidad debe protegerse por defecto y desde su mismo diseño en cualquier tecnología informática, modelo organizativo, arquitectura física, ecosistema informático conectado, e incluso modelos de gobierno o gobernanza.

Hasta que ANN CAVOUKIAN no acuñó su Privacidad desde el Diseño, el debate de la relación entre la privacidad y las nuevas tecnologías consistía o bien en “*aprovechar a fondo toda la potencialidad que ofrecen las nuevas tecnologías a costa de la privacidad, o bien “ponerle puertas al campo” para salvaguardar la privacidad de las personas, para proteger sus datos personales*”<sup>388</sup>.

Pero, gracias a CAVOUKIAN, el concepto evolucionó a nivel internacional y fue tenido en consideración por la Comisión Europea en la elaboración de su propuesta de RGPD, en el que finalmente fue incluido. De este modo, la Unión Europea ha adoptado formalmente un importante principio internacional, formulándolo como obligación en el RGPD.

---

<sup>388</sup> GARCÍA HERRERO, J. (2016). Privacidad desde el Diseño o “*Privacy by Design*” en el Reglamento General de Protección de Datos. [en línea]. Disponible en <https://jorgegarciaherrero.com/privacidad-desde-el-diseno-o-privacy-by-design-i/>

A su vez, la privacidad por defecto implica la adopción de medidas técnicas y organizativas cuya finalidad es garantizar que por defecto sólo se traten aquellos datos que sean necesarios para los fines del tratamiento<sup>389</sup>. Entre las estrategias básicas que permiten implementar la privacidad por defecto tenemos:

- i. Recogida de datos: Analizar los tipos de datos que se recaban con un criterio de minimización en función de los productos y servicios seleccionados por el usuario;
- ii. Tratamiento de los datos: Analizar los procesos asociados a dichos tratamientos para que se acceda a los mínimos datos personales necesarios para ejecutarlos;
- iii. Conservación: Implementar una política de conservación de datos que permita, con un criterio restrictivo, eliminar aquellos datos que no sean estrictamente necesarios;
- iv. Accesibilidad: Limitar el acceso por parte de terceros a dichos datos personales.

De tal manera que, el principio de “privacidad por defecto” está relacionado con el uso proporcionado de los datos personales a la finalidad por la que se recaban. Con las medidas de “*privacy by default*”, lo que se pretende es que las organizaciones, por defecto, solo traten los datos personales que sean necesarios para cada uno de los fines específicos del tratamiento.

*b) Evaluación de Impacto (EIPD): Privacy Impact Assessments (PIA)*

Una segunda herramienta que nos proporciona el RGPD para hacer frente a los riesgos que producen las tecnologías de la información en la protección de datos, como es el caso de un planteamiento de trabajo en entornos de *BCI* está establecida en su artículo 35.1 que reza:

Quando sea probable que un tipo de tratamiento, en particular si utiliza nuevas tecnologías, por su naturaleza, alcance, contexto o fines, entrañe un alto riesgo para los derechos y libertades de las personas físicas, el responsable del tratamiento realizará, antes del tratamiento, una evaluación de impacto de las operaciones de tratamiento en la protección de datos personales. Una única evaluación podrá abordar una serie de operaciones de tratamiento similares que entrañen altos riesgos similares.

En términos simples, podemos definir una EIPD como un análisis de los riesgos que un producto o servicio puede entrañar para la protección de datos de los afectados teniendo en consideración la categoría de los datos objeto del tratamiento, la finalidad del mismo, la necesidad de su realización y las tecnologías utilizadas. El objetivo principal

---

<sup>389</sup> CEPD. (2020). *Directrices 4/2019 relativas al artículo 25 Protección de datos desde el diseño y por defecto Versión 2.0.*

de ese análisis, es la gestión de dichos riesgos mediante la adopción de las medidas necesarias para eliminarlos o mitigarlos<sup>390</sup>.

En entornos de neurotecnológicos, no solo es necesaria una EIPD, sino que es una obligación legal, y es así, por las tecnologías que se utilizan, las categorías de datos que se tratan, y por el “alto riesgo”<sup>391</sup> que significa el tratamiento de datos cerebrales para los derechos y libertades de las personas físicas, desde que dicho tratamiento puede influir en el comportamiento, en los pensamientos, en las emociones de una persona física, es decir en la esfera más íntima de su personalidad<sup>392</sup>.

El contenido esencial de una EIPD viene determinado por el artículo 35.7 del RGPD, lo explicaremos en términos simples, para que sea mejor comprendido:

- i. Operaciones de tratamiento previstas y de los fines de tratamiento: Es básicamente una lista detallada del tratamiento de datos, incluyendo: los datos que usa, los detalles de sus responsables y encargados, la base legal o los períodos de retención aplicados a los datos.
- ii. Evaluación de la necesidad y la proporcionalidad: Se debe incluir una evaluación de la necesidad y la proporcionalidad de las operaciones de tratamiento con respecto a su finalidad superando el juicio de proporcionalidad.
- iii. Evaluación de los riesgos: Por ejemplo, dificultad para obtener el consentimiento expreso para datos especialmente protegidos, violaciones de confidencialidad, falta de diligencia por parte del encargado, y la dificultad o imposibilidad del ejercicio de los derechos, violaciones de seguridad, etc.
- iv. Medidas preventivas: Se establecerán las medidas previstas para afrontar los riesgos, incluidas garantías, medidas de seguridad y mecanismos que garanticen la protección de datos personales, teniendo en cuenta los derechos e intereses legítimos de los interesados y de otras personas afectadas.

La AEPD también ha dado su opinión en relación a la EIPD en aquellos tratamientos que incorporan tecnologías basadas en IA. La cuestión es interesante debido a que, por ejemplo, en entornos BCI se mantiene una relación bidireccional de funcionamiento y retroalimentación en base a IA. De esta forma, la AEPD ha señalado que una EIPD ha de concretarse en la adopción de una serie de medidas específicas y

---

<sup>390</sup> AEPD, (2021). Gestión del riesgo y evaluación de impacto en tratamientos de datos personales, pp.25-28

<sup>391</sup> GT29, (2017). Directrices sobre la evaluación de impacto relativa a la protección de datos [EIPD] y para determinar si el tratamiento "entraña probablemente un alto riesgo" a efectos del Reglamento 2016/679, pp. 10-12

<sup>392</sup> Artículo 35.1 RGPD

concretas para la gestión del riesgo, algunas de ellas orientadas a reforzar las obligaciones de cumplimiento en función de dicho riesgo y que afectan a<sup>393</sup>:

- i. La concepción del tratamiento, en sus fases, procedimientos, tecnologías y extensión.
- ii. La incorporación de medidas de privacidad por defecto y desde el diseño en el tratamiento y que sigan los principios de:
  - ✓ Minimizar la cantidad de datos que son tratados, tanto en volumen de información recopilada como en el tamaño de la población de estudio, así como a lo largo de las diferentes fases del tratamiento.
  - ✓ Agregar los datos personales en la medida de lo posible para reducir al máximo el nivel de detalle que es posible obtener.
  - ✓ Ocultar los datos personales y sus interrelaciones para limitar su exposición y que no sean visibles por partes no interesadas.
  - ✓ Separar los contextos de tratamiento para dificultar la correlación de fuentes de información independientes, así como la posibilidad de inferir información.
  - ✓ Mejorar la Información a los interesados, en tiempo y forma, de las características y bases jurídicas de su tratamiento para fomentar la transparencia y permitir a los interesados tomar decisiones informadas sobre el tratamiento de sus datos.
  - ✓ Proporcionar medios a interesados para que puedan controlar cómo sus datos son recogidos, tratados, usados y comunicados a terceras partes mediante la implementación de mecanismos adaptados al nivel de riesgo que les permita realizar el ejercicio de sus derechos en materia de protección de datos.
  - ✓ Cumplir con una política de privacidad compatible con las obligaciones y requisitos legales impuestos por la normativa.
  - ✓ Demostrar, en aplicación del principio de responsabilidad proactiva, el cumplimiento de la política de protección de datos que esté aplicando, así como del resto de requisitos y obligaciones legales impuestos por el Reglamento, tanto a los interesados como a las autoridades de control. Esto implica auditar dinámicamente el resultado/ las conclusiones de los tratamientos, evaluando las divergencias o desviaciones sobre los inicialmente previstos o evaluados como previsibles, incluidos los algoritmos ejecutados, para adoptar, en su caso, medidas correctivas, incluida, la supresión de la

---

<sup>393</sup> AEPD, (2020). Adecuación al RGPD de tratamientos que incorporan Inteligencia Artificial. Una introducción, pp. 32-33.

información y documentar detalladamente el análisis realizado y las medidas adoptadas.

- iii. La identificación de requisitos de seguridad que minimicen el riesgo para la privacidad.
- iv. La adopción de medidas específicas dirigidas a implementar un sistema de gobernanza de los datos personales que permitan demostrar el cumplimiento de principios, derechos y garantías para gestionar el riesgo de los tratamientos realizados.

El modelo de evaluación del impacto sobre la protección de datos es necesario para brindar a los responsables del tratamiento de datos pautas suficientemente específicas, útiles y claras para el cumplimiento de los principios del tratamiento de datos.

*c) Designar un delegado de protección de datos (DPO, por su acrónimo en inglés)*

Esta figura resulta esencial en entornos neurotecnológicos, ya que, tal y como anunciamos, el tratamiento de los neurodatos implica un alto riesgo para los derechos y libertades fundamentales de las personas.

De acuerdo al artículo 39.2 del RGPD, el DPO debe desempeñar sus funciones prestando la debida atención a los riesgos teniendo en cuenta la naturaleza, el alcance, el contexto y fines del tratamiento.

Además, según especifica el artículo 39 del RGPD, esta figura tiene entre sus funciones informar y asesorar al responsable o al encargado del tratamiento y a los empleados que se ocupen de la gestión de las obligaciones que les incumben en virtud del reglamento; supervisar el cumplimiento de lo dispuesto en el RGPD, incluida la asignación de responsabilidades, la concienciación y formación del personal que participa en las operaciones de tratamiento. Por otro lado, el RGPD insiste en la importancia de que el DPO coopere siempre con la autoridad de control y actúe como punto de contacto del regulador para cuestiones relativas al tratamiento, incluida la consulta previa a que se refiere el artículo 36, y realizar consultas, en su caso, sobre cualquier otro asunto. El delegado de protección de datos debe ser nombrado atendiendo a sus cualificaciones profesionales y, en particular, a su conocimiento de la legislación y la práctica de la protección de datos.

En definitiva, es sabido que el fenómeno de las neurotecnologías supone la gestión y tratamiento de ingentes cantidades de datos personales sensibles que pueden brindar grandes ventajas y beneficios a las organizaciones públicas y privadas y a la sociedad en general. Pero, no es menos cierto que también conlleva altos riesgos en

materia de privacidad. Por ello, es importante que cada entidad tenga una postura definida y ordenada en cuanto a los procedimientos y estrategias a seguir destinadas al cumplimiento de los principios del tratamiento en este entorno tecnológico.

*d) Nombrar un auditor de sesgos algorítmicos*

Un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de operaciones que deben seguirse para resolver un problema<sup>394</sup>. En la actualidad, la mayoría de las aplicaciones y sistemas informáticos están compuestos de algoritmos.

Las interfaces cerebro-computadora utilizan algoritmos de inteligencia artificial para decidir qué es lo que la persona quería hacer. Igual que tenemos el autocumplido en el procesador de texto, que adivina la palabra que estás escribiendo, estos algoritmos adivinan la intención de la acción y la completan, lo cual es muy bueno desde un cierto punto de vista, pero, desde otro, también empiezan a tomar control sobre la decisión. Y es en esta fase donde se han encontrado dentro de estos procesos, algoritmos sesgados por el género, la clase, la raza, entre otros<sup>395</sup>. Además, también existen ejemplos de algoritmos tan complejos que sus desarrolladores no están seguros del porqué de los resultados y las recomendaciones.

Estos desafíos algorítmicos, junto con los problemas en la privacidad de los datos crean la necesidad de contar con profesionales especializados que puedan prevenir y controlar las dificultades que nos presentan los algoritmos, para lo cual se ha propuesto la creación de una nueva figura el “auditor de algoritmos”.

El “auditor de algoritmos” es el profesional encargado de asegurar que los algoritmos desarrollados no contengan sesgos capaces de generar un daño o detrimento a cierto grupo de personas. El auditor de algoritmos serán una figura especializada en ética, junto con una comprensión práctica de cómo los algoritmos actuales pueden afectar la vida cotidiana de las personas. Trabjará en conjunto con el equipo IT de la organización, con el DPD, y con proveedores externos para revisar algoritmos, asegurando que sean transparentes, justos y explicables. El auditor de algoritmos realizará revisiones periódicas para determinar la imparcialidad de un algoritmo después de ser publicado.

Las auditorías de algoritmos deberán indicar que estos se ajustan a la legislación vigente, identificará riesgos que plantea su aplicación a las actividades propias de la empresa u organización. Todo un trabajo que debe continuar con la evaluación y medición necesarias para realizar correcciones en caso necesario. Además, deberá

---

<sup>394</sup> CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L. & STEIN, C. (2001). *Introduction to Algorithms (2nd ed.)*. p.10

<sup>395</sup> LIPPERT-RASMUSSEN, K. (2013). *Born Free and Equal? A Philosophical Inquiry Into the Nature of Discrimination*. Oxford: Oxford University Press.

proporcionar recomendaciones a los desarrolladores sobre cómo hacer que el modelo sea más ético y entendible para la población.

Los algoritmos pueden tomar malas decisiones si se basan en datos de mala calidad, si no son capaces de adoptar las variables más importantes de causalidad o de incluir de manera explícita la complejidad de las decisiones que tienen objetivos inciertos o que compiten entre sí. Por esa razón, evaluar esos datos es uno de los principales puntos de una auditoría de algoritmos.

La inteligencia artificial debe ser más humana, sobre todo si interviene en decisiones que afectan a los individuos y sus libertades. La auditoría de algoritmos se encarga de ello.

Esta nueva figura del “auditor de algoritmos” aparece en un momento crucial para la sociedad española. Cabe recordar que, la Ley 22/2021, de 28 de diciembre, de Presupuestos Generales del estado para el año 2022, en su Disposición adicional centésimo trigésima, autoriza al Gobierno a impulsar la creación de la Agencia Española de Supervisión de Inteligencia Artificial, adscrita a la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial dentro del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, con una dotación presupuestaria de 5 millones de euros.

La nueva Agencia Estatal se configura como “ente con personalidad jurídica pública, con patrimonio propio y autonomía en su gestión y potestad administrativa, que actuará con plena independencia orgánica y funcional de las Administraciones Públicas, de forma objetiva, transparente e imparcial, llevando a cabo medidas destinadas a la minimización de riesgos significativos sobre la seguridad y salud de las personas, así como sobre sus derechos fundamentales, que puedan derivarse del uso de sistemas de inteligencia artificial”. Sus competencias comprenden “actuaciones propias, actuaciones en coordinación con otras autoridades competentes y actuaciones de apoyo a entidades privadas” y se regirá por lo establecido en su estatuto orgánico y en la Ley de Régimen jurídico del Sector Público.

Así, será en este contexto que la figura del “auditor de algoritmos” tendrá un rol fundamental, actuando como mediador entre la organización y esta nueva entidad estatal.

Corresponderá a las autoridades competentes definir y delimitar el perfil profesional de esta nueva figura, como también los casos en que su nombramiento sea obligatorio.

*e) Llevar un Registro de Actividades de Tratamiento (RAT)*

Una de las obligaciones principales del nuevo RGPD es la de crear un registro de actividades de tratamiento. Dicho registro sustituye a la obligación anterior de inscribir los ficheros, y aparece regulada en el artículo 30 del Reglamento General de Protección

de Datos. Cada responsable debe llevar un registro de actividades de tratamiento en el que se contenga la siguiente información:

- i. Nombre y datos de contacto del responsable
- ii. Fines del tratamiento
- iii. Descripción de los interesados (clientes, proveedores, usuarios etc.)
- iv. Categorías de datos (datos identificativos, datos fiscales, datos sensibles, etc.)
- v. Categorías de destinatarios a quienes se comunicarán los datos
- vi. Transferencias internacionales previstas
- vii. Medidas técnicas y organizativas de seguridad
- viii. Plazos de supresión para las diferentes categorías de datos

Este Registro de actividades de tratamiento es un documento interno de cada responsable que debe estar a disposición de la Autoridad de Control en caso de que haya una inspección. Es un documento que debe ser modificado cuando existan cambios, como puede ser ampliar a otras categorías de datos nuestro tratamiento.

Se exige que conste por escrito, inclusive en formato electrónico<sup>396</sup>. Y se establece que esta obligación no se aplicará a ninguna empresa que emplee a menos de 250 personas, a menos que el tratamiento que se realice pueda entrañar un riesgo para los derechos y libertades de los interesados, no sea ocasional, o incluya categorías especiales de datos personales (como en el caso de los EEG) indicadas en el artículo 9, apartado 1, o datos personales relativos a condenas e infracciones penales a que se refiere el artículo 10<sup>397</sup>.

*f) Celebrar contratos con los encargados del tratamiento*

El artículo 4.8 del RGPD, define al encargado del tratamiento como “la persona física o jurídica, autoridad pública, servicio u otro organismo que trate datos personales por cuenta del responsable del tratamiento”.

En palabras de la AEPD “los tipos de encargado del tratamiento y las formas en que se regulará su relación pueden ser tan variados como los tipos de servicios que puedan suponer acceso a datos personales. Así, podemos encontrar servicios cuyo objeto principal es el tratamiento de datos personales (por ejemplo, una empresa o entidad pública que ofrece un servicio de alojamiento de información en sus servidores) y otros que tratan datos personales sólo como consecuencia de la actividad que presta

---

<sup>396</sup> Artículo 30.3 RGPD

<sup>397</sup> Artículo 30.5 RGPD

por cuenta del responsable del tratamiento (por ejemplo, el gestor de un servicio público municipal)”.

La regulación de la relación entre el responsable y el encargado del tratamiento debe establecerse a través de un contrato o de un acto jurídico similar que los vincule. Al amparo del artículo 28 del RGPD, la vinculación entre ambos debe reflejarse en un contrato escrito o acto jurídico, inclusive en formato electrónico, en el que se tendrán en cuenta aspectos como:

- i. Objeto, duración, naturaleza y fin del tratamiento de datos.
- ii. Qué tipo de datos personales se van a considerar y clases de interesados.
- iii. Obligación por parte del encargado de seguir las instrucciones de responsable a lo largo de todo el tratamiento de datos.
- iv. Necesidad de que el responsable dé siempre el consentimiento específicamente si hubiera que hacer subcontrataciones.
- v. Asistir al responsable cuando lo precise, sobre todo en los derechos de los interesados. Es necesario que figure en el contrato cómo ayudará el encargado al responsable en el cumplimiento de las obligaciones necesarias para llevar a cabo unas medidas de seguridad adecuadas, notificaciones de violaciones de datos a las autoridades, a interesados, evaluaciones sobre protección de datos, etc. Algunas funciones pueden ser delegadas por el responsable en el encargado.

El encargado del tratamiento deberá cumplir con lo siguiente:

- i. Únicamente tratará los datos conforme a las instrucciones del responsable del tratamiento.
- ii. No aplicará ni utilizará los datos con un fin distinto al que figure en el contrato.
- iii. Deber de confidencialidad por parte del encargado de tratamiento de datos y las personas autorizadas a tratar datos de carácter personal. No comunicará los datos, ni siquiera para su conservación, a otras personas.
- iv. Expondrá qué hará con los datos una vez finalizado el servicio correspondiente. Al finalizar la prestación del servicio, los datos personales pueden ser suprimidos de la base, o devueltos por el encargado al responsable, se establecerá la fórmula cómo se llevará a cabo.
- v. Implantará las medidas de seguridad que está obligado a seguir. Todas las personas que tengan acceso a los datos personales deberán seguir

escrupulosamente las medidas de seguridad y las instrucciones del responsable.

Sin perjuicio de lo anterior, es necesario aclarar que, el responsable del tratamiento no pierde esta consideración en ningún caso y, por tanto, continúa siendo responsable del correcto tratamiento de los datos personales y de la garantía de los derechos de las personas afectadas. El responsable tiene una obligación de especial diligencia en la elección y supervisión del encargado.

*g) Mantener relaciones con la autoridad de control*

Las autoridades de control nacional, se erigen como el ente fundamental en la fiscalización y garantía del cumplimiento de los principios y derechos establecidos por el Reglamento europeo en relación con el tratamiento de datos personales y los titulares de estos últimos<sup>398</sup>.

Por este motivo, cuando un responsable de tratamiento pretende realizar un tratamiento de datos de salud o de datos biométricos mediante la utilización de neurotecnologías, éste debe contemplar en caso necesario la interrelación con la correspondiente autoridad de control en todas las etapas del proyecto que se proponga.

De esta manera, deberá considerar los siguientes aspectos:

- i. Consulta previa a la autoridad de control en base a los resultados de la Evaluación de Impacto en la Protección de Datos que se realice<sup>399</sup>.
- ii. El responsable del tratamiento además de planificar y adoptar las medidas técnicas u organizativas con miras a garantizar la seguridad del tratamiento, en el marco de la consulta previa a la que alude el apartado anterior, debería informar la autoridad de control sobre las concretas medidas y garantías que estime adoptar en proyectos BCI, debiendo la autoridad de control instruir y asesorar al responsable en caso de que considere que éste no ha identificado o mitigado suficientemente el riesgo con las medidas que haya proyectado<sup>400</sup>.
- iii. Especial importancia tiene el deber de colaborar con la autoridad de control en el correcto ejercicio de sus competencias, operando este deber como una garantía general en favor de la protección de la privacidad de los neurodatos de las personas físicas en proyectos BCI.

*h) Deber de confidencialidad y secreto*

---

<sup>398</sup> Artículo 47, Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales. BOE número 294.

<sup>399</sup> Artículo 35 RGPD

<sup>400</sup> Artículo 57.1 RGPD

Los responsables y encargados del tratamiento de datos cerebrales así como todas las personas que intervengan en cualquier fase de este estarán sujetas al deber de confidencialidad al que se refiere el artículo 5.1.f) del RGPD. Es decir, los datos personales serán tratados de manera “(...) que se garantice una seguridad adecuada de los datos personales, incluida la protección contra el tratamiento no autorizado o ilícito y contra su pérdida, destrucción o daño accidental, mediante la aplicación de medidas técnicas u organizativas apropiadas”.

Asimismo, son varios los Considerandos del RGPD que se refieren al principio/deber de confidencialidad, a saber, Considerandos 39, 49, 75, 83, 85, 162 y 163.

Por otro lado, la Disposición Adicional 17.ª.2.d) de la LOPDGDD dispone que “se considera lícito el uso de datos personales seudonimizados con fines de investigación en salud y, en concreto, biomédica”.

Si bien, el uso de tales datos personales seudonimizados exigirá:

- i. Una separación técnica y funcional entre:
  - El equipo investigador
  - Los que realicen la seudonimización y conserven la información que posibilite la reidentificación.
- ii. Que los datos seudonimizados solamente sean accesibles al equipo de investigación cuando:
  - Exista un acuerdo de confidencialidad y de no realizar ninguna actividad de reidentificación.
  - Se hayan adoptado medidas de seguridad concretas para evitar la reidentificación y el acceso de terceros que no estén autorizados.

No obstante, cabe la posibilidad de proceder a la reidentificación de los datos en su origen, cuando con motivo de una investigación que utilice datos seudonimizados, se estime:

- La existencia de un peligro real y concreto para la seguridad o salud de una persona o grupo de personas.
- Una amenaza grave para sus derechos o sea necesaria para garantizar una adecuada asistencia sanitaria.

La LOPDGDD establece que confidencialidad y secreto profesional son dos derechos complementarios. Se puede entender el secreto profesional como la aplicación del principio de confidencialidad en el ámbito laboral. Para garantizar la privacidad de los datos, es frecuente que las organizaciones incluyan una cláusula de confidencialidad en los contratos con sus trabajadores. Dicha cláusula establece que los empleados deben guardar secreto profesional respecto a los datos a los cuales tengan acceso como consecuencia del ejercicio de sus funciones.

*i) Gestión de los derechos de los titulares de datos cerebrales*

El RGPD en su capítulo III, artículos 12 a 22 reconoce a los titulares de datos personales el ejercicio de los derechos de acceso, rectificación, oposición, supresión (“derecho al olvido”), limitación del tratamiento, portabilidad y de no ser objeto de decisiones individualizadas. El responsable del tratamiento de datos o encargado, según corresponda, deberá establecer un procedimiento de respuesta ante el ejercicio de los derechos de los interesados, definiendo claramente los mecanismos por los que pueden ejercerse los derechos, teniendo en cuenta lo siguiente:

- i. En caso de ejercicio del derecho de acceso se facilitará a los interesados:
  - Lista de los datos personales de que disponga junto con la finalidad para la que han sido recogidos,
  - Identidad de los destinatarios de los datos,
  - Plazos de conservación e
  - Identidad del responsable ante el que solicitar la rectificación, supresión y oposición al tratamiento de los datos.
- ii. En caso de solicitarse la rectificación, debemos tener dos prevenciones: primero, en el caso de que el titular solicite la rectificación de sus datos identificativos se modificarán los datos de los interesados que fueran inexactos o incompletos atendiendo a los fines del tratamiento. Segundo, respecto de los datos cerebrales obtenidos mediante técnicas neurotecnológicas invasivas o no invasivas, no podrá solicitarse el derecho de rectificación, debido a la naturaleza de los datos (imágenes).
- iii. Cuando se solicite la supresión, se suprimirán los datos de los interesados cuando los interesados manifiesten su negativa u oposición al consentimiento para el tratamiento de sus datos y no exista deber legal que lo impida.

El responsable del tratamiento deberá informar a todas las personas con acceso a los datos personales acerca de los términos de cumplimiento para atender los derechos de los interesados, el procedimiento y la manera en que se atenderán dichos derechos.

*j) Establecer medidas de concienciación y formación del personal*

El personal de la empresa u organización, que maneja o está en contacto con datos personales debe conocer y saber distinguir la naturaleza y categoría de los datos personales objeto de tratamiento. Asimismo, debe conocer cuáles son los derechos y obligaciones de los distintos actores involucrados (responsable del tratamiento, titular de los datos, usuario de datos, entre otros) y debe ser concientizado sobre las consecuencias del incumplimiento de los requisitos y obligaciones establecidos por la ley<sup>401</sup>.

Debe conocer también cómo deben tratarse los datos en relación a su exactitud, actualización y supresión, y el deber de confidencialidad al que se encuentran obligados aún después de haber finalizado su relación con el titular de los datos. El personal debe ser consciente de las medidas de protección a adoptar para impedir amenazas de software malicioso que puedan afectar archivos con datos de carácter personal. Éstos son algunos de los aspectos destacables de la normativa, sobre los cuales la empresa u organización debe focalizar a nivel de capacitación y concientización general.

Por último, una vez definidas las políticas, procedimientos y documentos de seguridad de datos personales de la empresa u organización, deben ser comunicados, y se debe capacitar y concientizar sobre los mismos. Dentro de los puntos clave encontramos los relacionados al registro y gestión de incidentes de seguridad, control de acceso (físico y lógico), auditorías, *backup* y pruebas de restauración, gestión y destrucción de soportes, transmisión de datos, mecanismos de acceso y rectificación, actualización o supresión de datos a solicitud del titular de los mismos, entre otros.

*4.2 Medidas de índole técnicas*

*a) Mantenimiento de los equipos, sistema operativo o software*

La importancia de realizar el mantenimiento del software, radica en que los equipos mejoran en cuanto a operatividad, además que se refuerzan los parámetros de seguridad de los programas informáticos y por consecuencia de la seguridad de los datos. Un buen mantenimiento de software no solo modifica y corrige, sino que permite que se conozca el estado y las condiciones de funcionamiento. El funcionamiento incorrecto del software significa que, los programas instalados presentarán salidas incorrectas y el tiempo de respuesta se incrementará. Adicionalmente, aparecerán múltiples inconsistencias.

---

<sup>401</sup> AEPD, (2021). Guía de Gestión del Riesgo y Evaluación de Impacto en tratamientos de Datos Personales. pp.108.109

Un buen mantenimiento del software de la empresa contribuye a evitar los accesos no autorizados y los códigos maliciosos, que representan una amenaza para todo el sistema informático. Las actualizaciones y las mejoras de los programas contribuyen a detectar irregularidades exteriores que pueden causar gran daño a los sistemas operativos de la empresa.

El mantenimiento más importante, que puede recibir el software de la empresa, es el preventivo. Este constituye un proceso en el que se realizan actualizaciones de antivirus, actualización de aplicaciones y controladores, cambio de contraseñas, limpieza del registro del sistema y la desfragmenta los discos duros, entre otras actividades, que aumentan la seguridad del software y optimizan su funcionamiento<sup>402</sup>.

El mantenimiento preventivo confiere una serie de beneficios:

- Constituye el mecanismo periódico que mejora la protección de los datos y del sistema en general. Evita la incursión de malware y contrarresta las posibilidades que despliegue sus formas de infección. Por lo tanto, las tareas preventivas de mantenimiento ayudan a incrementar los niveles de seguridad que necesita el software de la empresa.
- Reduce los fallos en programas y sus componentes.
- Disminución del tiempo de respuesta a cualquier acción dentro de los programas instalados.
- Realiza tareas de *Backups*, de manera que se cuente con las copias de seguridad que exige la organización, como una manera de resguardar su información.

En caso de que un determinado riesgo se haya hecho efectivo y como consecuencia haya causado daño a los sistemas operativos de una institución, es posible recurrir al mantenimiento correctivo<sup>403</sup>.

El mantenimiento correctivo, corrige fallos detectados en el software, a través de una serie de acciones. El fundamento de este tipo de mantenimientos, ronda en el objetivo de reparar, más que de sustituir. Trabaja en base a los resultados de los mantenimientos preventivos y predictivos. Entre las ventajas que se pueden obtener a través de este tipo de mantenimiento, tenemos:

- Daños causados por virus, *spywares* o malwares, el mantenimiento correctivo se encarga de ello, y restablece el sistema operativo de manera limpia. Para ello destaca las medidas de seguridad con las que se intenta reforzar la seguridad del software.

---

<sup>402</sup> ESPAÑA BOQUERA, M. (2010). *Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones*. Mexico D. F.: Diaz de Santos.

<sup>403</sup> GARCIA CARBALLEIRA, F. CARRETERO PÉREZ, J., GARCIA SÁNCHEZ, J. D., & EXPÓSITO SINGH, D. (2012). *Problemas resuletos de Estructura de Computadores*. Madrid: Paraninfo.

- Corrige la incompatibilidad de drivers.
- Instala y configura los parámetros de los servicios de Internet, además de la programación de *routers WiFi*.

Por otra parte, también es posible recurrir al mantenimiento predictivo<sup>404</sup>. Este tipo de mantenimiento es estratégico, porque se hace para detectar posibles errores en el futuro, además que se maneja con el tiempo de vida útil de los componentes y del sistema lógico. Responde a un tipo de programación o plan que se realiza en base a información de adquisición e instalación de elementos, programas o drivers, asimismo del monitoreo de los diversos fallos en el software que se puedan presentar en un determinado tiempo. La ventaja del mantenimiento predictivo consiste en lograr proyectar el tiempo de vida de componentes esenciales, lo que garantiza que se corrija a tiempo y evite que se produzca un caos en el software de la empresa u organización.

*b) Comunicación con los servidores de la institución, organización o empresa*

No se deben utilizar conexiones poco fiables (por ejemplo: conexiones Wi-Fi abiertas, redes públicas), ya que las medidas de seguridad implementadas son desconocidas. La mayor amenaza para la seguridad de una red pública es la capacidad del hacker de posicionarse entre el usuario y el punto de conexión. Cuando se trabaja con esta configuración, el hacker tiene acceso a toda la información que se envía a través de Internet.

Lo más seguro para la empresa es implantar una Red Privada Virtual (VPN), creando una conexión privada entre los dispositivos, de tal modo que se garantice la confidencialidad y la integridad de los datos.

*c) Seudonimización y anonimización*

Una de las medidas que pueden contribuir a reducir el nivel del riesgo es la seudonimización. La seudonimización o disociación de los datos personales, supone eliminar aquellos datos que a priori permiten una identificación de los interesados, dejando accesibles aquellos datos o información personal que se necesita para el tratamiento. Cuando hablamos de seudonimización siempre hay que tener en cuenta que se trata de un mecanismo que oculta la identidad de los interesados, pero este ocultamiento de la identidad es reversible y siempre podremos reidentificar a las personas.

Frente a la seudonimización hablamos de anonimización cuando el procedimiento para disociar la información está diseñado para evitar la reidentificación

---

<sup>404</sup>GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Fundación Confemetal. Madrid, p.137

de los interesados e interesadas, sin embargo, el propio RGPD también pone de manifiesto los límites de la anonimización de forma que en ningún caso podremos hablar en términos absolutos de datos anónimos, siempre existirá un riesgo de reidentificación de las personas<sup>405</sup>.

En esta línea, un enfoque de ingeniería para mejorar la privacidad y la seguridad neuronal es el uso de un anonimizador BCI. Howard Jay Chizek y Tamara Bonaci, investigadores de la Universidad de Washington, EE.UU., desarrollaron “BCI Anonymizer”, cuya idea básica es preprocesar las señales neuronales, antes de que se almacenen y transmitan, para eliminar toda la información, excepto los comandos BCI específicos previstos y necesarios<sup>406</sup>. La fuga de información no intencionada se evita al no transmitir ni almacenar nunca señales neuronales sin procesar y cualquier componente de señal que no sea explícitamente necesario para el propósito de comunicación y control de BCI. El anonimizador BCI se puede realizar en hardware o en software, como parte del dispositivo BCI del usuario, pero no como parte de ninguna red externa o plataforma computacional. Por lo tanto, actúa como un subsistema de software o hardware seguro y confiable que toma la señal neuronal sin procesar y la descompone en componentes específicos. De tal manera que, los dispositivos neurotecnológicos realizan una separación *in situ* de los distintos componentes de las señales cerebrales. Así, la interfaz cerebro-máquina puede enviar al dispositivo de control (normalmente un teléfono móvil u ordenador asociado) solo la información relevante para la tarea que debe ejecutar. Por ejemplo, un sensor de electroencefalografía diseñado para controlar una silla de ruedas podría transmitir solo la componente de las ondas cerebrales que contiene información relevante a la intención de movimiento, y no otras componentes que puedan delatar, entre otras, sensaciones emotivas. El razonamiento es que, si se limita el almacenaje y el envío de datos en bruto, se limitan las oportunidades de interceptar información útil para criminales u otros actores oportunistas.

#### *d) Control de acceso a los equipos*

Otro ejemplo de medida de seguridad es el establecimiento de un sistema de control de accesos. Identificar usuarios implica gestionar la identidad digital de forma diligente. Es decir, cada usuario debe estar perfectamente registrado en el sistema, disponer de credenciales únicas y tener los privilegios de acceso definidos y delimitados.

---

<sup>405</sup> GT29, 2014. Sobre técnicas de anonimización, p. 5-28.

<sup>406</sup> BONACI, T., CALO, R., & JAY CHIZECK, H. (2015). *App Stores for the Brain, Privacy and Security in Brain-Computer Interfaces*. *IEEE Technology and Society Magazine*, pp.33-39.

Se ha propuesto por algunos investigadores un “control de acceso basado en atributos (ABAC)”<sup>407</sup>. El modelo de control de acceso basado en atributos, se basa en un conjunto de atributos asociados a un solicitante o a un recurso a ser visitado, con el fin de tomar las decisiones de acceso. Hay muchas maneras de definir o utilizar los atributos en este modelo. Un atributo puede ser un trabajo, fecha de inicio de un usuario, una ubicación de un usuario, un rol de un usuario o de todos ellos. Los atributos pueden también estar o no relacionados entre sí. Después de definir los atributos que se utilizaran en el sistema, cada atributo es considerado como un valor discreto, y los valores de todos los atributos se comparan con un conjunto de valores para un punto de decisión de una política de conceder o denegar algún acceso. En este tipo de modelo, un sujeto no tiene que ser conocido con anticipación por el sistema, sólo tiene que autenticarse en el sistema y luego proveer sus atributos<sup>408</sup>.

*e) Instalación de cortafuegos o firewalls*

Una estrategia técnica de uso generalizado son los cortafuegos o *firewall*. Una buena manera de asegurar que sólo las personas y archivos adecuados están recibiendo nuestros datos es mediante *firewalls*. Software o hardware diseñado con un conjunto de reglas para bloquear el acceso a la red de usuarios no autorizados. Son líneas de defensa para evitar la interceptación de datos y bloquear el malware que intenta entrar en la red, y también evitan que la información importante salga, tales como contraseñas o datos confidenciales.

En esta línea, en un trabajo presentado en la Conferencia IEEE 2016 sobre comunicaciones y seguridad de redes (CNS), se propuso que, en lugar de utilizar tecnologías de mejora de la privacidad agnósticas de datos de propósito general, se debía desarrollar una solución específica de dominio que se base en la estructura de las aplicaciones BCI y los cálculos que se realizan en las señales de ondas cerebrales, y que sea capaz de aplicar protección de la privacidad en el nivel adecuado de abstracción<sup>409</sup>. Así se presentó un nuevo proyecto denominado *MindShield*, un cortafuego para el cerebro, el cual aplica varias capas de protección de la privacidad para abordar los desafíos de la misma. Es un trabajo en progreso e incluye varios componentes. Un componente desarrolla procesamiento de señales en dominio encriptado. Utiliza una combinación de cifrado homomórfico, cifrado funcional y computación multiparte segura para permitir que los algoritmos de procesamiento de señales se realicen en señales cifradas. Otro componente proporciona control de acceso

---

<sup>407</sup> Malek, B. & Miri, A. (2009). *Combining attribute-based and Access systems. International Conference on Computational Science and Engineering*. pp.305-312

<sup>408</sup> Wang, J., & Shu-jian, S. (2018). *Attribute Revocable Access Control Scheme for Brain-Computer Interface Technology. Computer Science*, 45(9), pp.187-194.

<sup>409</sup> TAKABI, H. (2016). *Firewall for Brain: Towards a Privacy Preserving Ecosystem for BCI Applications. IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*: pp.1-2

para determinar qué componentes de los ERP deben estar disponibles para las aplicaciones y cómo debe hacerse esa determinación. Otro componente principal desarrolla técnicas de análisis de código para determinar si la aplicación presenta algún estímulo para el usuario y si es para fines legítimos. De tal manera que, *MindShield* aplica múltiples capas de protección, como encriptación, control de acceso, análisis de código, etc. para abordar los desafíos de privacidad.

*f) Salvaguardar la información: copias de seguridad*

Como hemos adelantado un *Backup* o copia de seguridad es un proceso mediante el cual se duplica la información existente de un soporte a otro, con el fin de poder recuperarlos en caso de fallo del primer alojamiento de los datos<sup>410</sup>. Las copias de seguridad se pueden realizar mediante un administrador de servidores. También pueden ser programadas para realizarse de forma automática. Normalmente, estos respaldos y copias de seguridad son realizados hacia un servidor dentro de las mismas instalaciones de la empresa.

Sin embargo, esta opción es vulnerable ante posibles robos o incendios en la empresa, siendo el almacenamiento remoto la manera más recomendable y segura para almacenar las copias de seguridad.

Un servidor remoto es una combinación de *software* y *hardware* administrado por una empresa tecnológica, la cual presta el servicio de procesamiento y almacenamiento de datos. Al almacenar en servidores remotos, es posible garantizar que la información estará protegida y respaldada. Esta información puede ser utilizada de manera inmediata y ofrece un soporte oportuno para momentos críticos en la empresa u organización.

*g) Destrucción de soportes*

Toda información tiene una vida útil tanto si está formato digital (tarjetas de memoria) como en formatos tradicionales (papel). Cuando la vida de los documentos llega a su fin, se deben emplear mecanismos de destrucción y borrado para evitar que queden al alcance de terceros.

Con el borrado y destrucción de soportes de información no solo se busca proteger la difusión de información confidencial de una organización. También se busca proteger la difusión de datos personales que puedan contener los soportes.

Los procedimientos más eficaces para evitar la recuperación de los datos contenidos en estos soportes serían la desmagnetización y la destrucción física<sup>411</sup>. La

---

<sup>410</sup> INCIBE, (2018). Copias de Seguridad. Una guía de aproximación para el empresario. pp.3-4

<sup>411</sup> INCIBE, (2016). Guía sobre borrado seguro de la información. Una aproximación para el empresario. pp.6-9

desmagnetización consiste en la exposición de los soportes de almacenamiento a un potente campo magnético, proceso que elimina los datos almacenados en el dispositivo. Este método es válido para la destrucción de datos de los dispositivos magnéticos, como, por ejemplo, los discos duros, disquetes, cintas magnéticas de *backup*, etc. Cada dispositivo, según su tamaño, forma y el tipo de soporte magnético de que se trate, necesita de una potencia específica para asegurar la completa polarización de todas las partículas.

Por otro lado, la destrucción física es la inutilización del soporte que almacena la información en el dispositivo para evitar la recuperación posterior de los datos que almacena. Existen diferentes tipos de técnicas y procedimientos para la destrucción de medios de almacenamiento:

- Desintegración, pulverización, fusión e incineración: son métodos diseñados para destruir por completo los medios de almacenamiento. Estos métodos suelen llevarse a cabo en una destructora de metal o en una planta de incineración autorizada, con las capacidades específicas para realizar estas actividades de manera eficaz, segura y sin peligro.
- Trituración: las trituradoras de papel se pueden utilizar para destruir los medios de almacenamiento flexibles. El tamaño del fragmento de la basura debe ser lo suficientemente pequeño para que haya una seguridad razonable en proporción a la confidencialidad de los datos que no pueden ser reconstruidos. Los medios ópticos de almacenamiento (CD, DVD, magneto-ópticos) deben ser destruidos por pulverización, trituración de corte transversal o incineración. Cuando el material se desintegra o desmenuza, todos los residuos se reducen a cuadrados de cinco milímetros (5mm) de lado.

Es necesario mencionar, que existe otro método menos eficiente de borrado seguro, la sobre-escritura. Consiste en la escritura de un patrón de datos sobre los datos contenidos en los dispositivos de almacenamiento. Para asegurar la completa destrucción de los datos se debe escribir la totalidad de la superficie de almacenamiento. La sobre-escritura se realiza accediendo al contenido de los dispositivos y modificando los valores almacenados, por lo que no se puede utilizar en aquellos que están dañados ni en los que no son regrabables, como los CD y DVD.

#### *h) Implementar arquitecturas descentralizadas y distribuidas*

A su vez, y de forma transversal, se podrían implementar otro tipo de soluciones de privacidad orientadas a proteger los datos, como el *Blockchain* o el aprendizaje federado, las cuales permiten hacer seguimiento y auditorías de los datos. *Blockchain*, configurada como una base de datos distribuida formada por cadenas de bloques diseñadas para evitar su modificación una vez que un dato ha sido publicado usando un sellado de tiempo confiable (o *trusted timestamping*) y enlazando a un bloque anterior.

Esta configuración la traduce en una herramienta de incalculable valor para la seguridad, pero también sirve para tareas como el almacenamiento de datos o su confirmación empleando la “minería de datos”<sup>412</sup>.

El aprendizaje federado es un paradigma emergente de aprendizaje automático para entrenar modelos a través de una arquitectura descentralizada en múltiples dispositivos de borde que contienen sus propios conjuntos de datos locales y privados, sin intercambiarlos explícitamente. Las técnicas de aprendizaje federado permiten entrenar modelos de *Machine Learning* sin enviar los datos de los usuarios fuera de sus dispositivos<sup>413</sup>. Así, en el aprendizaje federado, el algoritmo para el aprendizaje automático con los datos neuronales de una persona operaría localmente en el dispositivo neurotecnológico y solo compartiría ciertas inferencias no personalizadas sobre los datos con un servidor central para su posterior procesamiento. Tal encapsulación local, cuando se combina con una sólida seguridad de hardware y software a nivel de dispositivo y un cifrado sólido de los datos transferidos, podría hacer que dicho sistema sea mucho menos vulnerable a la piratería de dispositivos y los ataques cibernéticos.

*i) Incorporar un sistema de trazabilidad*

Por otra parte, es recomendable, también, incorporar un sistema de trazabilidad debido que, la eficacia en la protección de datos sensibles pasa por la monitorización del acceso y el uso que se da a los sistemas, pero también de la política que se ha implantado para conseguirlo. Es decir, que un seguimiento apropiado permite saber si realmente esa política está funcionando o si, por el contrario, es necesario adaptarla a nuevas circunstancias.

*j) Utilizar mecanismos de certificación y códigos de conducta*

Además, el RGPD, en su artículo 32.3 permite a los responsables de los tratamientos la posibilidad de utilizar mecanismos de certificación para garantizar y demostrar el cumplimiento de los requisitos de seguridad, o la adopción de un código de conducta. Mediante un mecanismo de certificación, un tercero examina las medidas de seguridad implantadas por el responsable del tratamiento y evalúa los riesgos con el fin de determinar si dichas medidas de seguridad son acordes a los riesgos implícitos en el tratamiento. La certificación y los códigos de conducta pueden ser herramientas útiles

---

<sup>412</sup> PALOMO-ZURDO, R. (2018). *Blockchain: la descentralización del poder y su aplicación en la defensa*. Documento Opinión, Instituto Español de Estudios Estratégicos. pp.1-30.

<sup>413</sup> GAFNI, T., SHLEZINGER, N., COHEN, K., ELGAR, Y., & POOR, V. (2022). *Federated Learning. A signal processing perspective*. *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.14-41

para el cumplimiento de lo previsto en el RGPD en cuanto a medidas de seguridad, pero no exime a los responsables del enfoque de riesgo<sup>414</sup>.

*k) Notificación de las brechas de seguridad*

La notificación de las violaciones de seguridad es una obligación del responsable del tratamiento, y también del encargado, establecida en los artículos 33 y 34 del RGPD. El artículo 33 se refiere a las obligaciones de notificación del responsable a la Autoridad de Control y del encargado al responsable, mientras que el artículo 34 se refiere a las obligaciones de notificación al interesado.

Se trata de una obligación más amplia para el responsable. Se emplaza al responsable para que implemente un procedimiento de gestión de incidentes de seguridad que afecten a datos de carácter personal, cuyo resultado visible al exterior son las notificaciones tanto de las brechas de seguridad como de las acciones y decisiones relativas a dichas violaciones. Además, establece una obligación para la Autoridad de Control, que es la de, si lo estima oportuno, intervenir de conformidad con las funciones y poderes establecidos en RGPD.

El RGPD define el concepto de “violación de seguridad” en su artículo 4.12 como:

Toda violación de la seguridad que ocasione la destrucción, pérdida o alteración accidental o ilícita de datos personales transmitidos, conservados o tratados de otra forma, o la comunicación o acceso no autorizados a dichos datos;

El RGPD es muy riguroso y establece un plazo de 72 horas después de que el responsable del tratamiento haya tenido constancia de la violación de seguridad de los datos personales, para notificar de esta circunstancia a la Autoridad de Control competente. En caso de que el encargado del tratamiento sufra una violación de seguridad, éste debe notificar sin dilación al responsable la existencia de la misma<sup>415</sup>.

El responsable debe notificar la violación de seguridad a la autoridad competente y los interesados, cuando esta entrañe un alto riesgo para los derechos y libertades del mismo. Esta comunicación debe realizarse en un lenguaje claro y sencillo, describiendo la naturaleza de la violación de seguridad de los datos personales y contendrá como mínimo la información del nombre y los datos del Delegado de Protección de Datos o de otro punto de contacto en el que pueda obtenerse información, la descripción de las posibles consecuencias de la violación de seguridad, la descripción de las medidas adoptadas o propuestas por el responsable del tratamiento para poner remedio a la

---

<sup>414</sup> Artículo 40 del RGPD.

<sup>415</sup> Artículo 33.1 RGPD

violación de seguridad de los datos personales, incluyendo, si procede, las medidas adoptadas para mitigar los posibles efectos negativos<sup>416</sup>.

El 34.3 del RGPD establece una serie de excepciones a la necesidad de comunicar la violación a los interesados, y son las que siguen:

- i. Que el responsable del tratamiento haya adoptado medidas de protección técnicas y organizativas apropiadas y estas medidas se han aplicado a los datos personales afectados por la violación de la seguridad, en particular aquellas que hagan ininteligibles los datos personales para cualquier persona que no esté autorizada a acceder a ellos, como puede ser el caso de que los datos estén cifrado.
- ii. El responsable ha tomado medidas ulteriores que garanticen que ya no existe la probabilidad de que se concrete el alto riesgo para los derechos y libertades del interesado.
- iii. Que el realizar esa comunicación suponga un esfuerzo desproporcionado. En este caso, se optará en su lugar por una comunicación pública o una medida semejante por la que se informe de manera igualmente efectiva a los interesados. Hay que tener en cuenta que la decisión del responsable de no notificar a los interesados puede ser revocada por la Autoridad de Control y ésta exigir que dicha notificación se ejecute.

Hay que tener en cuenta que la decisión del responsable de no notificar a los interesados puede ser revocada por la Autoridad de Control y ésta exigir que dicha notificación se ejecute.

Por último, debemos aclarar que los recursos ofrecidos por la nueva normativa europea, tienen como objetivo facilitar el tratamiento de datos personales en una sociedad cada vez más tecno-dirigida. De tal manera que, el RGPD no debe apreciarse como un límite para los responsables y encargados del tratamiento de datos, sino como un documento de apoyo que establece las directrices indispensables para un desarrollo lícito de dicha actividad.

---

<sup>416</sup> Artículo 33 letras b), c) y d) del RGPD.

## **CONCLUSIONES**

1. Los grandes avances actuales sobre las ciencias del cerebro permiten la posibilidad de analizar, registrar, alterar y /o manipular la actividad del cerebro. Es lo que científicamente se conoce como “neuromodulación”. Si adicionalmente, se incluyen los avances en materia de sistemas y microcircuitos, surge la neurotecnología que, junto con la Inteligencia Artificial, ha demostrado que es posible acceder a través de técnicas invasivas o no invasivas a parte de la información almacenada en el cerebro e incluso llegar a leer y escribir la actividad cerebral de las personas.
2. Este ámbito de las neurotecnologías remite a la llamada “Internet de los Cuerpos” (IoB), con un número sin precedentes de dispositivos y sensores conectados que se fijan o incluso se implantan e ingieren en el cuerpo humano. Las tecnologías de Internet of Bodies caen bajo el paraguas más amplio de IoT. Pero como sugiere el nombre, los dispositivos IoB introducen una interacción aún más íntima entre los humanos y los dispositivos. Los dispositivos IoB monitorean el cuerpo humano, recopilan métricas de salud y otra información personal, y transmiten esos datos a través de Internet.
3. El potencial de la neurociencia para mejorar nuestras vidas es casi ilimitado. Sin embargo, el nivel de intrusión para obtener dichos beneficios es muy profundo. Estamos a un paso de que las capacidades de las neurotecnologías pasen del campo de la investigación médica a un mundo comercial no regulado.
4. Estas nuevas amenazas recomiendan una actualización de los derechos humanos entendidos así desde una perspectiva evolutiva y adaptativa a la nueva realidad tecnocientífica. Se vuelve indispensable, entonces, la incorporación en las legislaciones internacionales como nacionales de los nuevos “neuroderechos humanos”, estableciendo con ellos, salvaguardas básicas y universales que generen un marco infranqueable para las neurotecnologías; convirtiendo, además, estos principios éticos en jurídicos, porque para los tribunales de justicia no son suficientes —a la hora de resolver— las meras vulneraciones éticas.
5. En el ámbito de la protección de datos personales, algunas amenazas atribuidas a las neurotecnologías ya están presentes en la forma en que las empresas tecnológicas utilizan los datos todos los días. La IA y los algoritmos que leen el movimiento de los ojos y detectan cambios en el color y la temperatura de la piel están leyendo los resultados de la actividad cerebral en estudios controlados para publicidad. Estos datos han sido utilizados por intereses comerciales durante años para analizar, predecir y estimular el comportamiento. Empresas

como Google, Facebook y Amazon han ganado miles de millones con datos personales en este contexto. Es en esta línea —donde el interés se convierte en comercial— cuando nos enfrentamos a los mayores riesgos.

6. Los avances en Inteligencia Artificial emulan, en parte, los procesos subjetivos y estructura nerviosa humana. En términos neurocientíficos tendríamos múltiples argumentos para explorar hasta qué punto nuestro sistema nervioso es voluble, moldeable e incluso manipulable. El papel que en tales cosas juega la tecnología es motivo de amplias disertaciones que se extienden a lo médico, ético y filosófico. Pero, al hilo de lo anterior, también es un área de interés en lo jurídico, en particular, para los expertos y profesionales de la privacidad y protección de datos. La clamada neutralidad tecnológica que exige el Reglamento General de Protección de Datos se hace cada vez más necesaria a medida que la tecnología se vuelve más invasiva con relación al ser humano.
7. Si abordamos los avances neurotecnológicos desde el punto de vista jurídico, y nos referimos a las orientaciones e instrucción del RGPD, debemos entonces hacernos varias preguntas. Si estamos de acuerdo en que la definición de “datos cerebrales” tiene un contexto y plantea ya unas demandas jurídicas claras, se presenta, en primer lugar, la necesidad de definir la naturaleza jurídica de esos datos; configurar un concepto amplio de datos cerebrales que abarque todas las hipótesis con el fin de dar protección eficaz a los derechos y libertades fundamentales de las personas. Además, surge la necesidad de determinar el régimen jurídico aplicable a su tratamiento, teniendo en consideración la diversidad cultural y la diversidad cognitiva de las regiones participantes en esta tarea.
8. Según la OCDE, los datos cerebrales son “datos relacionados con el funcionamiento o con la estructura del cerebro humano de un individuo identificado o identificable que incluye información única sobre su fisiología, salud o sus estados mentales”. En ese sentido, podemos señalar que los datos cerebrales son datos personales, puesto que permiten identificar o hacer identificable a una persona natural.
9. Para comprender mejor esta aseveración es necesario realizar el análisis que sigue. Los impulsos eléctricos registrados en un EEG, procesados y decodificados, se traducen en datos fisiológicos, que, unidos a otras características personales internas o externas como la edad, sexo, historial clínico, patologías, información relacionada con factores de carácter psicológico, información de ficheros automatizados o manuales, entre otros, permiten determinar la identidad del titular de los datos. Por lo tanto, en todos esos casos en que los identificadores

de que dispone el responsable del tratamiento o cualquier otra persona, que no permiten singularizar a una persona determinada, pero al combinarlos con otros datos (tanto se tenga conocimiento de su existencia como si no) es posible distinguir a la persona de otras, debe entenderse que la persona es identificable indirectamente. Por lo tanto, estamos frente a un dato personal “compuesto”, como ya se ha explicado durante el desarrollo de este estudio, cuyo tratamiento queda sometido a la normativa sobre protección de datos personales.

10. De momento, es necesario señalar que, este tipo de datos personales caería en la definición de datos sensibles del RGPD, ya que, son datos que corresponden a la esfera más íntima de la persona. Los datos cerebrales pueden conllevar a información sensible como datos biométricos, opiniones políticas, orientación sexual, religiosa, entre otros.
11. El objetivo de aplicar la legislación de datos personales a estos nuevos desarrollos tecnológicos es impedir que la información disponible sobre el cerebro humano pueda ser utilizada con fines ilícitos que perjudiquen los derechos y libertades fundamentales del titular de datos personales.
12. Con la aprobación y vigencia del RGPD se ha reformado de manera sustancial el panorama europeo relativo a la protección de datos personales. El actual RGPD está pensado para afrontar los problemas que suponen las nuevas tecnologías en el ámbito de la privacidad. La magnitud de la recogida y del intercambio de datos personales ha aumentado de manera significativa y el legislador europeo ha observado los problemas y limitaciones que generaba la Directiva 95/46, y ha asegurado la protección de los datos personales de sus ciudadanos, incluso más allá de los límites territoriales, incluso más allá del *big data* y del *cloud computing*, incluso más allá de la inteligencia artificial y de las neurotecnología en general. Verbigracia, el Considerando 24 manifiesta que “[...] Para determinar si se puede considerar que una actividad de tratamiento controla el comportamiento de los interesados, debe evaluarse si las personas físicas son objeto de un seguimiento en internet, inclusive el potencial uso posterior de técnicas de tratamiento de datos personales que consistan en la elaboración de un perfil de una persona física con el fin, en particular, de adoptar decisiones sobre él o de analizar o predecir sus preferencias personales, comportamientos y actitudes”. Unido este Considerando al artículo 3.2 del RGPD nos permite concluir que, el RGPD es aplicable no solo a la monitorización de los comportamientos mostrados en internet; sino también a cualquier monitorización realizada por cualquier medio destinado para ello.

13. En este sentido, LOPGDD junto con el RGPD dan cobertura, aunque un poco tímida, a la protección a los datos del cerebro y la identidad mental explotada y consumida por la neurotecnología. Por ello, al encontrarnos ante un riesgo real de invasión de la esfera personal como lo es el tratamiento de “datos cerebrales”, es fundamental que tanto el responsable como encargado del tratamiento de estos datos cuenten con medidas técnicas y organizativas que garanticen la confidencialidad y seguridad de la información recabada de los procesos cerebrales, así como poder demostrar que estos datos están siendo tratados para una finalidad específica, limitando su uso, debiendo el afectado ser conocedor en todo momento de los propósitos para los cuales están siendo empleados. Y, en todo caso tanto el responsable como el encargado del tratamiento deben evitar que el tratamiento de la información captada en el cerebro implique una intromisión a la esfera privada del individuo sin observar los **principios básicos** emanados de la normativa en materia de protección de datos personales. El Reglamento dibuja, así, un responsable que debe velar de manera positiva y proactiva porque el tratamiento de datos personales respete la legislación. Se trata de un responsable con una actitud propositiva y atenta a la evolución tecnológica.
  
14. Sin embargo, no basta con la consagración excepcional o reconocimiento de un sistema normativo que abarque y proteja la privacidad mental y los datos personales cerebrales sin otorgar eficiencia y eficacia a sus disposiciones legales. Para todo aquello, es indispensable el rol activo de las autoridades de control, que tal como lo expresa el artículo 57.1.a) del RGPD, tiene como principal función en su territorio “controlar la aplicación del presente Reglamento y hacerlo aplicar”.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABOUJAOUDE, E. (2019). Protecting privacy to protect mental health: the new ethical imperative. *Journal of Medical Ethics*, vol.45(9), pp.604-607. [Consulta: 02 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31123190/>
- AKHTARI, M., BRYANT, H.C., & MAMELAK, A.N. (2000). Conductivities of three-layer live human skull. *Cerebro Topogr*, vol.13 (1), pp.29–42. [Consulta: 04 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11073092/>
- ALBORNOZ ZAMORA, E. J., & GUZMÁN, M. (2016). Desarrollo cognitivo mediante estimulación en niños de 3 años. *Revista Científica Multidisciplinar de la Universidad de Cienfuegos*, vol.8(4), pp.186-192. [Consulta: 03 de enero 2024]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202016000400025](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202016000400025)
- ALCÁZAR-FABRA, M. (2012). El potencial de acción. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, n°5, pp.166-170. [Consulta: 03 de enero de 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3879243>
- ALONSO, X. (2015). Encefalografía en el niño. [Consulta: 04 de enero 2024]. Disponible en: <http://neuropedwikia.es/content/electroencefalografia-en-el-nino>
- ÁLVAREZ, M. (1998). Informática y Derecho en España. *Revista iberoamericana de derecho informático*, n°23-26, pp.1033-1044. [Consulta: 05 de enero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=248145>
- AMAT, A., MARTÍ, J., & DARNÉ, I. (2018). Investigamos cómo funciona el cuerpo humano. *Petit Talent Científics*, pp.63-70. [Consulta: 05 de enero 2024]. Disponible en: <file:///C:/Users/Alumno/Downloads/Investigamos-como-funciona-el-cuerpo-humano-WEB.pdf>
- ARMONY, J.; TREJO-MARTÍNEZ, D. & HERNÁNDEZ, D. (2012). Resonancia magnética funcional (RMf): principios y aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias cognitivas. *Neuropsicología Latinoamericana*, vol.4(2), pp.36-50. [Consulta: 06 de enero 2024]. Disponible en: [http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2075-94792012000200005](http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2075-94792012000200005)
- ATIENZA, M. (2015). Razonamiento jurídico. En J. Fabra Zamora, & Á. Nuñez Vaquero, *Enciclopedia de filosofía y teoría del derecho*, vol. 2, pp.1419-1452. México: Universidad Nacional Autónoma de México. [Consulta: 13 de febrero de 2024] disponible en: <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/8/3796/19.pdf>
- AZNAR CASANOVA, J. A. (2017). ub.edu. [Consulta: 20 de diciembre de 2024]. Disponible en: <http://www.ub.edu/pa1/node/>
- BALLARIN USIETO, P., & MINGUEZ, J. (s.f.). *La importancia de la ciberseguridad en brain-computer interfaces*. [Consulta: 07 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.bitbrain.com/es/blog/ciberseguridad-cerebro-computadora>
- BANDES A., (2010). "The promise and Pitfalls of Neuroscience for Criminal Law and Procedure", *Ohio State Journal of Criminal Law*, vol. 8, p. 120. MORENO, Joelle Anne, "The Future of

- Neuroimaged Lie Detection and the Law*”, *Akron Law Review*, vol. 42, 3, p. 723.  
[Consulta: 07 de enero 2024]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/228193525\\_The\\_Promise\\_and\\_Pitfalls\\_of\\_Neuroscience\\_for\\_Criminal\\_Law\\_and\\_Procedure](https://www.researchgate.net/publication/228193525_The_Promise_and_Pitfalls_of_Neuroscience_for_Criminal_Law_and_Procedure)
- BARCHAS HUDA, JACK D.; GLEN R, AKIL; BRUCE HOLMAN, ELLIOTT R.; WATSON, STANLEY J; BARCHAS HUDA, JACK D.; GLEN R, AKIL; BRUCE HOLMAN, ELLIOTT R.& WATSON, STANLEY J. (1979).  
Neuroquímica de la conducta: neuroreguladores y estados conductuales. *Revista Facultad de Medicina*, Universidad Nacional Autónoma de México, pp.23-38.  
[Consulta: 07 de enero 2024]. Disponible en:  
<https://www.revistas.unam.mx/index.php/rfm/article/view/74061>
- BARON-COHEN, S. (2004). *Essential difference: Male and female brains and the truth about autism*. Basic Books.
- BERGER, H. (1929). *Über das elektroencephalogramm des menschen*. *Arch Psychiatr Nervenkr*, vol.87, pp.527–570. [Consulta: 07 de enero 2024]. Disponible en:  
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01797193>
- BHATTACHARYYA, S., BISWAS, A., MUKHERJEE, J., MAJUMDAR, AK, MAJUMDAR, B., MUKHERJEE, S., ET AL. (2013). *Detection of artifacts from high energy bursts in neonatal EEG*. *Comput Biol. Med.* vol.43, pp.1804–1814. [Consulta 07 de enero 2024]. Disponible en:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24209926/>
- BIRBAUMER, N. (2006). *Breaking the silence: brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control*. *Psychophysiology*, vol.46(6), pp.517- 532. [Consulta: 09 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17076808/>
- BOAS, D.A, ELWELL, CE, FERRARI, M. & TAGA, G. (2014). *Twenty years of functional near-infrared spectroscopy: introduction for the special issue*. *Neuroimage* vol.85, pp.1–5.  
[Consulta: 08 de enero 2024]. Disponible en:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24321364/>
- BONACI, T., & CHIZECK, H.J. (2013). *"Privacy by Design in BrainComputer Interfaces"*, University of Washington Technical Report Number UWEETR-2013-0001
- BONACI, T., CALO, R., & JAY CHIZECK, H. (2015). *App Stores for the Brain, Privacy and Security in Brain-Computer Interfaces*. *IEEE Technology and Society Magazine*, pp.33-39.
- BOUSSETA, R., EL OUAOUAK, I., GHARBI, M., & REGRAGUI, F. (2018). *EEG Based Brain Computer Interface for Controlling a Robot Arm Movement Through Thought*. *IRBM*, vol.39, pp.129–135.
- BREZNITZ, S. (2019). *cognifit.com*. [Consulta: 13 de diciembre 2023]. Disponible en:  
<https://www.cognifit.com/es/que-es-cognifit>
- BUBLITZ, C. (2013). My mind is mine!? Cognitive Liberty as a legal concept. En E. Hildt & A. Franke (Eds.), *Cognitive enhancement: An interdisciplinary perspective*, pp.233-264. Springer. [Consulta: 10 de enero 2024]. Disponible en:  
[http://www.antonioacasella.eu/dnlaw/Bublitz\\_2013.pdf](http://www.antonioacasella.eu/dnlaw/Bublitz_2013.pdf)
- BULLING, A., WARD, J.A., GELLERSEN, H. & TROESTER, G. (2011). *Eye Movement Analysis for Activity Recognition Using Electrooculography*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and*

- Machine Intelligence*. Vol.33, pp.741–753. [Consulta: 10 de enero de 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20421675/>
- CÁCERES, E., & LÓPEZ, C. (2022). El neuroderecho como un nuevo ámbito de protección de los derechos humanos. *Cuestiones Constitucionales*, n°46, pp.65-92. [Consulta: 10 de enero 2024] Disponible en: <https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/cuestiones-constitucionales/article/view/17048>
- CALVO-BETANCUR, V., PINEDA-ZAPATA, J., ARANGO-ZAPATA, A., BUSTAMANTE-ARCILA, C., VÉLEZ-ARANGO, J., SÁNCHEZ-RAMÍREZ, M. & ROJAS-ARBELDEZ, C. (2015). Evaluación de estructuras cerebrales por resonancia magnética en personas infectadas con el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) y adherentes al tratamiento antirretroviral. *Medicina y Laboratorio*, vol.21(9-10), pp.465-479. [Consulta: 10 de enero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8741600>
- CARMENA, J.M., LEBEDEV, M.A., CRIST, R.E., O'DOHERTY, J.E., SANTUCCI, D.M., DIMITROV, D.F., PATIL, P.G., HENRIQUEZ, C.S., NICOLELIS, M.A.L. (2003). *Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates*. *PLoS Biology*, vol.1, pp. 193-208. [Consulta: 10 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14624244/>
- CASALES, R. (2011). De la Neurociencia a la Neuroética. Narrativa científica y reflexión filosófica. *Revista Tópicos de la Universidad Panamericana de México*, N°40, pp.261-268. [Consulta: 11 de enero 2024]. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-66492011000100010](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-66492011000100010)
- CAO, L., LI, J., JI, HF & JIANG, C.J. (2014). *A hybrid brain computer interface system based on the neurophysiological protocol and brain-actuated switch for wheelchair control*. *J. Neurosci. Methods*, vol.229, pp. 33–43. [Consulta: 15 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24713576/>
- CAVOUKIAN, A. (2016). Privacidad por diseño los 7 principios fundamentales. Mediascope. pp.1-2. [Consulta: 15 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.mediascope.es/wp-content/uploads/2016/10/privacidad-por-disen%CC%83o-1.pdf>
- CAZURRO BARAHONA, V. (2020). Antecedentes y fundamentos del derecho a la protección de datos. Barcelona: Bosch.
- CLER, M.J., & STEPP, C.E. (2015). *Discrete vs. Continuous Mapping of Facial Electromyography for Human-Machine-Interface Control: Performance and Training Effects*. *IEEE Trans neural Syst Rehabil Eng*. vol.23, pp.572–580. [Consulta: 15 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25616053/>
- CHANG, M.H., LEE, J.S., HEO, J. & PARK, K.S. (2016). *Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI*. *J. Neurosci. Methods*, vol.258, pp.104–113. [Consulta: 15 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26561770/>
- CHEN, B.J., FENG, Y.G., & WANG, Q.N. (2016). *Combining Vibrotactile Feedback with Volitional Myoelectric Control for Robotic Transtibial Prostheses*. *Front neurorobot*. vol.10, p.8. [Consulta: 17 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27597824/>

- CINCOTTI, F., MATTIA, D., ALOISE, F., BUFALARI, S., SCHALK, G., ORIOLO, G., *et al.* (2008). *Non-invasive brain-computer interface system: towards its application as assistive technology*, *Brain Res. Toro.* vol.75(6), pp. 796-803. [Consulta: 16 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18394526/>
- COMMITTEE ON SCIENCE AND LAW. (2005). *Are your thoughts your own?: Neuroprivacy and the legal implications of brain imaging*. [Consulta: 13 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.nycbar.org/pdf/report/Neuroprivacy-revisions.pdf>
- CONTRERAS, N. (2019). Comprendiendo el Código Neuronal: un análisis de cuatro perspectivas. *Revista Chilena de Neuropsicología*, vol.14(1), pp.30-35. [Consulta: 16 de enero 2024]. Disponible en: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1102090>
- CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L. & STEIN, C. (2001). *Introduction to Algorithms (2nd ed.)*. p.10
- CORNET I PRAT, J. (17 de diciembre de 2017). Communityofinsurance.es. [Consulta: 25 de diciembre 2023]. Disponible en: <https://communityofinsurance.es/2017/12/17/las-nuevas-tecnologias-y-los-retos-para-la-identidad-personal/>
- CORTINA, A. (2011). *Neuroética y Neuropolítica. Sugerencias para la educación moral*. Madrid: Tecnos.
- COYLE, S.T., WARD, E., & MARKHAM, C.M. (2007). *Brain-computer interface using a simplified functional near-infrared spectroscopy system*. *J. Neural Eng.*, vol. 4(3), pp. 219-226. [Consulta: 18 enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17873424/>
- CUÑA, M., HWANG, H.J., KIM, W., LEE, S.H., & IM, C.H. (2016). *Machine-learning-based diagnosis of schizophrenia using combined sensor-level and source-level EEG features*. *Esquizofr. Res.*, vol.176, pp. 314–319. [Consulta: 18 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27427557/>
- DALY, J.J., HOGAN, N., PEREPEZKO, E.M., KREBS, H.I., ROGERS, J.M., GOYAL, S., *et al.* (2005). *Response to upper-limb robotics and functional neuromuscular stimulation following stroke*, *J. Rehab. Res. Dev*, vol.42(6), pp.723-735. [Consulta: 18 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16680610/>
- DALY, J.J., & WOLPAW, J.R. (2008). *Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation*, *Lancet Neurol.* Vol.7 (11), pp. 1032-1043. [Consulta: 18 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18835541/>
- DE SANTIAGO RODRIGO, L. (2016). *Análisis avanzado de señales potenciales evocados multifocales aplicados al diagnóstico de neuropatías ópticas (tesis doctoral)*. Universidad de Alcalá, pp.18-19. [Consulta: 20 de enero 2024]. Disponible en: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/29264>
- DEKKERS, R. (1935). *La fiction juridique: étude de droit romain et de droit comparé*. París: Sirey
- DENBY B., SCHULTZ T., HONDA K., HUEBER T., GILBERT JM & BRUMBERG J.S. (2009). *Silent speech interfaces*. *Speech Communication*, vol.52, pp.270–287. [Consulta: 18 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167639309001307>

- DOBKIN, B.H. (2007). *Brain-computer interface technology as a tool to augment plasticity and outcomes for neurological rehabilitation*, *J. Physiol.* vol.579(3), pp.637-642. [Consulta: 20 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2151380/>
- DONG, Y., HU, Z., UCHIMURA, K., & MURAYAMA, N. (2011). *Driver Inattention Monitoring System for Intelligent Vehicles: A Review*. *Conference: Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, 12( 2 ), pp. 596 – 614. [Consulta: 20 de enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5665773>
- DONOGHUE, J. (2015), “*Neurotechnology*”, in Marcus, G. and J. Freeman (eds.), *The future of the brain*, Princeton University Press.
- EATON, M. L., & ILLES, J. (2007). *Commercializing cognitive neurotechnology—the ethical terrain*. *Nature Biotechnology*, vol.25(4), pp.393-397. [Consulta: 20 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17420741/>
- ELIO, J. (25 de septiembre de 2016). elespañol.com. [Consulta: 26 de diciembre 2023]. Disponible en: <https://elandroidelibre.elespanol.com/2016/09/historia-de-loswearables.html>
- ELSHOUT, J.A. (2009). “*Review of Brain-Computer Interfaces Based on the P300 Evoked Potential*”.
- ENZINGER, C., ROPELE, S., FAZEKAS, F., LOITFELDER, M., GORANI, F., SEIFERT, T., et al., (2008). *Brain motor system function in a patient with complete spinal cord injury following extensive brain-computer interface training*, *Exp. Res. cerebral*. Vol.190(2), pp. 215-223. [Consulta: 25 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18592230/>
- Emotiv Epoc (2020). Disponible en <https://www.emotiv.com/epoc/#tab-description>
- ESPAÑA BOQUERA, M. (2010). *Sistemas Avanzados de Telecomunicaciones*. Mexico D. F.: Diaz de Santos.
- EVALUATE (2016), *EvaluateMedTech: World Preview 2016, Outlook 2022*, disponible en: <http://info.evaluategroup.com/rs/607-YGS-364/images/mt-wp16.pdf>
- FADZAL, C., MANSOR, W., & KHUAN, L. (2011). *Review of brain computer interface application in diagnosing dyslexia*. In: *Systems and Control Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, IEEE. pp.124–28. [Consulta: 25 de enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5991843>
- FARAH, M.J., E.M. SMITH, C. GAWUGA, D. LINDSELL & D. FOSTER. (2012). *Brain imaging and brain privacy: A realistic concern?* *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol.21 (1), pp.119-127. [Consulta: 24 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18476762/>
- FARWELL, L. A. & DONCHIN E. (1988). *Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials*. *Electroencefalograma Clin Neurofisiol.* 70 (6), pp.510–523. [Consulta: 25 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2461285/>

- FATOURECHI, M., BASHASHATI, A., WARD, R.K., & BIRCH, G.E. (2007). *EMG and EOG artifacts in brain computer interface systems: A survey*. *Clinical Neurophysiology*, vol.118, pp.480–494. [Consulta: 28 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17169606/>
- FAZLI, S., MEHNERT, J., STEINBRINK, J., CURIO, G., VILLRINGER, A., MULLER, KR, et al. (2012). *Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface*. *Neuroimage*, vol.59, pp.519–529. [Consulta: 28 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21840399/>
- FERNÁNDEZ, A., SRIRAMAN, N., GUREVITZ, B., & OUIILLER, O. (2015). *Pervasive neurotechnology: A groundbreaking analysis of 10,000+ patent filings transforming medicine, health, entertainment and business*. SharpBrains.
- FRAN, M., HWU, K.T., JAIN, S., KNIGHT, R., MARTINOVIC, I., MITTAL, P., PERITO, D., & SONG, D. (2013) "Subliminal Probing for Private Information via EEG-Based BCI Devices". *ResearchGate*, pp.1-19 [Consulta: 27 de enero 2024]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/259399944\\_Subliminal\\_Probing\\_for\\_Private\\_Information\\_via\\_EEG-Based\\_BCI\\_Devices](https://www.researchgate.net/publication/259399944_Subliminal_Probing_for_Private_Information_via_EEG-Based_BCI_Devices)
- FUNDACIÓN DE LA INNOVACIÓN BANKINTER. (2011). El Internet de las Cosas. En un mundo conectado de objetos inteligentes. pp.9-10. [Consulta: 29 de enero 2024]. Disponible en: [https://www.fundacionbankinter.org/wp-content/uploads/2021/09/Publicacion-PDF-ES-FTF\\_IOT.pdf](https://www.fundacionbankinter.org/wp-content/uploads/2021/09/Publicacion-PDF-ES-FTF_IOT.pdf)
- FUNDACIÓN INNOVACIÓN BANKINTER. (2019). Neurociencias: Más allá del cerebro. Future Trends Forum, pp.15-33. [Consulta: 29 de enero 2024]. Disponible en: [https://www.fundacionbankinter.org/wp-content/uploads/2021/09/RE-PDF-ES-FTF\\_Neurociencia.pdf](https://www.fundacionbankinter.org/wp-content/uploads/2021/09/RE-PDF-ES-FTF_Neurociencia.pdf)
- GAFNI, T., SHLEZINGER, N., COHEN, K., ELДАР, Y., & POOR, V. (2022). *Federated Learning. A signal processing perspective*. *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.14-41. [Consulta: 29 de enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9770266>
- GAGO, L., & ELGIER, Á. (2018). Trazando puentes entre las neurociencias y la educación. Aportes, límites y caminos futuros en el campo educativo. *Psicogente*, vol.21(40), 476-494. [Consulta: 29 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=497557156012>
- GARCIA CARBALLEIRA, F., CARRETERO PÉREZ, J., GARCIA SÁNCHEZ, J. D., & EXPÓSITO SINGH, D. (2012). *Problemas resueltos de Estructura de Computadores*. Madrid: Paraninfo.
- GARCÍA HERRERO, J. (2016). Privacidad desde el Diseño o "Privacy by Design" en el Reglamento General de Protección de Datos. [Consulta: 29 de enero 2024]. Disponible en: <https://jorgegarciaherrero.com/privacidad-desde-el-diseno-o-privacy-by-design-i/>
- GARCÍA, M. & QUIZPILEMA, J. (2021). Tomografía por emisión de positrones en diagnóstico oncológico. *Infoanalítica*, vol.9(2), pp.185-197. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8270043>
- GARIPELLI, G., GALAN, F., CHAVARRIAGA, R., FERREZ, P., LEW, E., & MILLAN, J. (2008). *The use of brain-computer interfacing for ambient intelligence*. LNCS, Springer Verlag.

- GEVENSLEBEN, B., HOLL, B., ALBRECHT C., VOGEL D., SCHLAMP O., KRATZ P., STUDER A., ROTHENBERGER G.H., & MOLL H. HEINRICH (2009). *Physiological origins and functional correlates of eeg rhythmic activities: implications for self-regulation. Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol.50(7), pp. 780–789. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8833314/>
- GIMÉNEZ-AMAYA, J., & MURILLO, J. (2007). Mente y cerebro en la neurociencia contemporánea. Una aproximación a su estudio interdisciplinar. *Scripta Theológica*, vol.39(2), pp.607-635. [Consulta: 04 de febrero 2024]. Disponible en: <https://revistas.unav.edu/index.php/scripta-theologica/article/view/11125>
- GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, F., (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Fundación Confemetal. Madrid, p.137
- GUGER, C., DABAN, S., SELLERS, E., HOLZNER, C., KRAUSZ, G., CARABALONA, R., GRAMATICA, F., & EDLINGER, G. (2009). “How Many People Are Able to Control a P300-Based Brain-Computer Interface (BCI)?” *Neuroscience Letters*, vol.462 (1), pp.94-98. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19545601/#:~:text=89%25%20of%20the%2081%20RC,accuracy%20of%2080%2D100%25.>
- GUIU, D. (2016) Definición de marketing, sinónimos de marketing, tipos de marketing y aplicaciones de marketing. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en <http://www.socialetic.com/definicion-de-marketing.html>.
- GULATI, T., WON, S.J., RAMANATHAN, D.S., WONG, C.C, BODEPUDI, A., SWANSON, R.A., GANGULY, K. (2015). *Robust Neuroprosthetic Control from the Stroke Perilesional Cortex. J Neurosci*, vol.35 (22), pp. 8653–8661. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6605327/>
- GUTIERREZ, J. (2001). Análisis de señales en el neuromonitoreo. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol.22(2), pp.66-67. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=3157>
- HACKMAN, D.A., & FARAH, M.J. (2009). *Socioeconomic status and the developing brain. Trends Cogn Sci*, vol.13(2), pp.65–73. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19135405/>
- HANAFIAH, M., TAIB, M.N., & HAMID, N. (2010). *EEG pattern of smokers for Theta, Alpha and Beta band frequencies. IEEE Student Conference on. IEEE*. pp.320–23. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5704025>
- HAMILTON, J. O’C. (2004). *If They Could Read Your Mind. Stanford Magazine*. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://stanfordmag.org/contents/if-they-could-read-your-mind>
- HAYNES, J.-D., SAKAI, K., REES, G., GILBERT, S., FRITH, C., & PASSINGHAM, R.E. (2007). *Reading hidden intentions in the human brain. Curr Biol*, vol.17(4), pp.323-328. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17291759/>
- HERRMANN, CHRISTOPH S. (2001). “Human EEG Responses to 1-100 Hz Flicker: Resonance Phenomena in Visual Cortex and Their Potential Correlation to Cognitive Phenomena.”

- Experimental Brain Research*, vol.137(3-4), pp. 346–53. [Consulta: 02 de febrero 2024].  
Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11355381/>
- HOCHBERG, L. R., SERRUYA, M.D., & FRIEHS, G.M. (2006). *Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia*. *Nature*, vol.442 (7099) pp.164–171. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature04970>
- HONG, K.-S., NASEER, N. & KIM, YH (2015). *Classification of prefrontal and motor cortex signals for three-class fNIRS-BCI*. *Neurosci. Lett.* Vol.587, pp.87–92. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25529197/>
- HORNERO, R., CORRALEJO, R., & ÁLVAREZ, D., (2012). “*Brain-Computer Interface (bCI) Aplicado Al Entrenamiento Cognitivo Y Control Domótico Para Prevenir Los Efectos Del Envejecimiento.*” *Lychnos*, pp.29-34. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3929765>
- HORWITZ, B., & POEPEL, D., (2002). *How Can Eeg/Meg and Fmri/Pet Data Be Combined? Human Brain Mapping*, vol.17 (1), pp.1-3. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6871863/>
- HUPPERT, T.J., SCHMIDT, B., BELUK, N., FURMAN, J. & SPARTO, P. (2013). *Measurement of brain activation during an upright stepping reaction task using functional near-infrared spectroscopy*. *Hum Brain Mapp.* Vol.34(11) pp. 2817–2828. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23161494/>
- IENCA, M. & ANDORNO, R. (2021). *Hacia nuevos derechos humanos en la era de la neurociencia y la neurotecnología*. *Análisis Filosófico*, vol.41(1), pp.141-185. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8850631>
- IENCA, M., & Haselager, P. (2016). *Hacking the brain: brain-computer interfacing technology and the ethics of neurosecurity*. *Ethics Inf Technol*, vol.18(2), pp.117-129. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10676-016-9398-9>
- ILLES, J. (2003). *Neuroethics in a new era of neuroimaging*. *Am J Neuroradiol*, 24(9), pp. 1739-1741.
- IOANNIDES, A.A., LIU, L., THEOFILOU, D., DAMMERS, J., et al. (2000). *Real Time Processing of Affective and Cognitive Stimuli in the Human Brain Extracted from MEG Signals*. *Brain Top*, vol.13, pp.1-19. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11073090/>
- JANCKE, L. (2009). *Music drives brain plasticity*. *F1000 Biol Rep* 1, p.78
- JIANG, J., ZHOU, Z.T., YIN, EW, YU, Y. & HU, D.W. (2014). *Hybrid Brain-Computer Interface (BCI) based on the EEG and EOG signals*. *BioMed. Mate. Ing.* Vol.24, pp.2919–2925. [Consulta: 05 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25226998/>

- KAHNEMAN, D. (1973). *Attention and effort*. London: Prentice Hall. Versión traducida al castellano: Kahneman, D. (1997). *Atención y esfuerzo*. Madrid: Biblioteca Nueva.
- KAISER, V., BAUERNFEIND, G., KREILINGER, A., KAUFMANN, T., KUBLER, A., NEUPER, C., *et al.* (2014). *Cortical effects of user training in a motor imagery based brain-computer interface measured by fNIRS and EEG*. *Neuroimage*, vol.85, pp.432–444. [Consulta: 05 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23651839/>
- KHALIFA, W., SALEM, A., ROUSHDY, M., & REVETT, K., (2012). *A survey of EEG based user authentication schemes*. In: *Informatics and Systems (INFOS), 8th International Conference on*. IEEE; p. BIO–55.
- KHAN, M.J., HONG, M.J., & HONG, K.-S. (2014). *Decoding of four movement directions using hybrid NIRS-EEG brain-computer interface*. *Front Hum Neurosci*. vol.8, pp.244. [Consulta: 05 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4009438/>
- KHUSHABA, R.N., KODAGODA, S., LAL, S. & DISSANAYAKE, G. (2011). *Driver drowsiness classification using fuzzy wavelet-packet-based feature-extraction algorithm*. *IEEE Trans. biomed Eng*. vol.58, pp.121–131. [Consulta: 06 de febrero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5580017>
- KIM, T., KIM, S., SHIN, D., SHIN, D. (2011). *Design and implementation of smart driving system using context recognition system*. In: *Computers & Informatics (ISCI), 2011 IEEE Symposium on*. IEEE, pp. 84–89. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5958889>
- KOCH, W., TEIPEL, S., MUELLER, S., BENNINGHOFF, J., WAGNER, M., BOKDE, A.L., & MEINDL, T. (2012). *Diagnostic power of default mode network resting state fMRI in the detection of Alzheimer's disease*. *Neurobiol Aging*, vol.33(3), pp.466-478. [Consulta: 06 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20541837/>
- KOLB, B., & WHISHAW, I. (2006). *Neuropsicología humana*. Ed. Médica Panamericana
- KOTCHETKOV, I. S., HWANG, B. Y., APPELBOOM, G., KELLNER C. P., & CONNOLLY JR, E. S. (2010). *Brain-computer interfaces: military, neurosurgical, and ethical perspective*, *Neurosurgical Focus*, vol.28(5), E25, pp.1-6. [Consulta: 02 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20568942/>
- KREPKI, R., ET AL., (2007). *“The Berlin Brain-Computer Interface (BBCI): Towards a New Communication Channel for Online Control in Gaming Applications,”* *J. Multimedia Tools and Applications*, vol.33(1), pp. 73-90. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/239553709\\_The\\_Berlin\\_Brain-Computer\\_Interface\\_BBCI\\_towards\\_a\\_new\\_communication\\_channel\\_for\\_online\\_control\\_of\\_multimedia\\_applications\\_and\\_computer\\_games](https://www.researchgate.net/publication/239553709_The_Berlin_Brain-Computer_Interface_BBCI_towards_a_new_communication_channel_for_online_control_of_multimedia_applications_and_computer_games)

- KRUSIENSKI, D.J., & SHIH, J.J. (2011). *Control of a Visual Keyboard Using an Electrocorticographic Brain–Computer Interface. Neurorehabil Neural Repair. Vol.25 (4)*, pp.323–331. [Consulta: 01 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3407379/>
- KUNO, N., (2016). La nanotecnología cobra vida con dispositivos de interfaz humana basados en agujas. News Center Latam.
- LALOR, E., ET AL. (2005). “Steady-State VEP-Based Brain Computer Interface Control in an Immersive 3-D Gaming Environment,” *EURASIP J. Applied Signal Processing*, vol. 19, pp. 3156-3164. [Consulta: 04 de febrero 2024]. Disponible en: <https://a.xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=1c2808y0k10a0g50mn3804f060381899>
- LAREO, L. (2006). Costo energético de procesos cerebrales con especial énfasis en aprendizaje y memoria. *Universitas Scientiarum*, vol.11(2), pp.77-84. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/499/49911207.pdf>
- LEBEDEV, M. A. & NICOLELIS, M. A. (2006). *Brain-machine interfaces: past, present and future. Trends in Neuroscience*, vol.29(9), pp.536–546. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16859758/>
- LEBEDEV, M., & NICOLELIS, M. (2017). *Brain-Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation. Physiological Reviews*, vol.97(2), pp.767-837. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28275048/>
- LEFAUCHEUR, J.-P., ANDRÉ-OBADIA, N., ANTAL, A., AYACHE, S. S., BAEKEN, C., BENNINGER, D. H., & DE RIDDER, D. (2014). *Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). Clin Neurophysiol*, vol.125(11), pp.2150-2206. [Consulta: 01 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25034472/>
- LENA, M., & MALGIERI, G. (2021). Mental data protection and the GDPR. *Journal of Law and the Biosciences*, vol.9(1), pp.1-19. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://academic.oup.com/jlb/article/9/1/ljac006/6564354>
- LEÓN SANZ, P. (2016). Bioética y explotación de grandes conjuntos de datos. En A. Andérez Gonzales, J. Díaz García, F. Escolar Castellón, & P. León Sanz, *La explotación de datos de salud. Retos, oportunidades y límites* (p.25). Sociedad Española de Informática y Salud.
- Li, Y.Q., Long, J.Y., Yu, T.Y., Yu, Z.L., Wang, C.C., Zhang, H.H, et al. (2010). *An EEG-based BCI system for 2-D cursor control by combining Mu/Beta rhythm and P300 potential. IEEE Trans biomed Eng.* 57, pp.2495–2505.

- LI, M.G., GUO, S.D., ZUO, G.Y., SUN, Y.J., & YANG, J.F. (2015). *Removing ocular artifacts from mixed EEG signals with FastKICA and DWT*. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 28, pp.2851–2861. [Consulta: 04 de enero 2024]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/282981588\\_Removing\\_ocular\\_artifacts\\_from\\_mixed\\_EEG\\_signals\\_with\\_FastKICA\\_and\\_DWT](https://www.researchgate.net/publication/282981588_Removing_ocular_artifacts_from_mixed_EEG_signals_with_FastKICA_and_DWT)
- LIPPERT-RASMUSSEN, K. (2013). *Born Free and Equal? A Philosophical Inquiry Into the Nature of Discrimination*. Oxford: Oxford University Press.
- LIU, X. & HONG, K.-S. (2017). *Detection of primary RGB colors projected on a screen using fNIRS*. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, vol.10, p.6. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/312518768\\_Detection\\_of\\_primary\\_RGB\\_colors\\_projected\\_on\\_a\\_screen\\_using\\_fNIRS](https://www.researchgate.net/publication/312518768_Detection_of_primary_RGB_colors_projected_on_a_screen_using_fNIRS)
- LÓPEZ, J.; MACAVILCA, Z.; SALON, J.; SÁNCHEZ, M.; SERRANO, C. & VALENZUELA, F. (2017). *El derecho a la intimidad: nuevos y viejos debates*. Madrid: Dykinson
- LOSHIMA, L. (2015). *Blue Brain – The Future Generation*. *International Journal Of Engineering Research & Technology (Ijert)*, vol.3(30), pp.1-5. [Consulta: 15 de enero 2024]. Disponible en: [https://www.isca.me/COM\\_IT\\_SCI/Archive/v3/i2/1.ISCA-RJCITS-2015-002.pdf](https://www.isca.me/COM_IT_SCI/Archive/v3/i2/1.ISCA-RJCITS-2015-002.pdf)
- LOTTE, L., RENARD, Y., & LÉCUYER, A. (2008). “Self-Paced BrainComputer Interaction with Virtual Worlds: A Quantitative and Qualitative Study ‘Out-Of-The-Lab,’” *Proc. 4th Int’l Brain-Computer Interface Workshop and Training Course, to appear*.
- Lu, X., & Merritt, J. (2020). *Shaping the future of the Internet of Bodies: New challenges of technology governance*. *World Economic Forum*, p.7.
- LUCERO, B., & MUÑOZ-QUEZADA, M. T. (2014). *Sistemas de interfaz neuronal y su desarrollo en las neurociencias: revisión bibliográfica sistemática acerca de su aplicación en personas con parálisis*. *Revista Ciencias Psicológicas*, vol.8(2). [Consulta: 05 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5052388>
- LUNA, A. (2004). *Las ficciones del derecho en el discurso de los juristas y en el sistema del ordenamiento*. Discurso de ingreso de académico de número. Academia de jurisprudencia y legislación de Cataluña, pp.1-107. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ajilc.cat/assets/img/pdf/Discurs-Luna-Serrano.pdf>
- MA, J.X., ZHANG, Y., CICHOCKI, A. & MATSUNO, F. (2015). *A Novel EOG/EEG Hybrid Human–Machine Interface Adopting Eye Movements and ERPs: Application to Robot Control*. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, vol.62, pp.876–889. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25398172/>

- MA, T., LI, H., DENG, L., YANG, H., LV, X., LI, P., ET AL. (2017). *The hybrid BCI system for movement control by combining motor imagery and moving onset visual evoked potential*. *J. Neural. Eng.* 14(2) 026015.
- MAKIN., J.G, MOISÉS, D.A., & CHANG, E.F. (2021). "Descodificación de voz como traducción automática". En Guger, C., Allison, B.Z., Gunduz, A. (eds.). *Investigación de la interfaz cerebro-computadora: un resumen de vanguardia 10*. SpringerBriefs en Ingeniería Eléctrica e Informática. Cham: Springer International Publishing.
- MALEK, B. & MIRI, A. (2009). *Combining attribute-based and Access systems*. *International Conference on Computational Science and Engineering*. pp.305-312. [Consulta: 06 de enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5283447>
- MARCEL, S., & MILLAN, J.R. (2007). *Person authentication using brainwaves (EEG) and maximum a posteriori model adaptation*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - Special Issue on Biometrics*.
- MARQUEZ, B.Y., ALANIS, A., LOPEZ, M.A., & MAGDALENO-PALENCIA, J.S. (2012). *Sport education based technology: Stress measurement in competence*. In: *e-Learning and e-Technologies in Education (ICEEE), 2012 International Conference on*. IEEE; pp. 247–52.
- MARTÍNEZ-FREIRE, P. (1999). El debate mente-cerebro a la luz de las nuevas técnicas de exploración del cerebro. *Revista interdisciplinaria de filosofía*, vol.4, pp.65-75. [Consulta: 04 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=230355>
- MARTINOVIC, I., DAVIES, D., FRANK, M., PERITO, D., ROS, T. & SONG, D. (2012). "On the feasibility of side-channel attacks with brain-computer interfaces," in *Proc.21st USENIX Security Symp.*
- Matwyshyn, A. M. (2019). *The Internet of Bodies*. *William & Mary Law Review*, vol.61(77), pp.89-115. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://scholarship.law.wm.edu/wmlr/vol61/iss1/3/>
- MCCLURE, S. M., LI, J., TOMLIN, D., CYPERT, K. S., MONTAGUE, L.M., & MONTAGUE, P.R. (2004). *Neural correlates of behavioral preference for culturally familiar drinks*. *Neuron*. Vol.44(2), pp.379-387. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15473974/>
- McFARLAND, D.J., & WOLPAW, J.R. (2008). *Brain-Computer Interface Operation of Robotic and Prosthetic Devices*, *Computer*, vol.41(10), pp. 52-56. [Consulta: 02 de enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4640662>
- McFARLAND, D.J, & WOLPAW, J.R. (2011). "Brain-Computer Interfaces for Communication and Control." *Communications of the ACM*. doi:10.1145/1941487.1941506.

- MICHAEL, L., MARTINI, B.A., ERIC KARL O., NICHOLAS L., FEDOR P., THOMAS O., & KURT, Y. (2020). *Sensor Modalities for Brain-Computer Interface Technology: A Comprehensive Literature Review. Neurosurgery*, vol.86(2), pp.E108–E117
- MINGUEZ, J. (s.f.). Tecnología de interfaz cerebro-computador. *Departamento de informática e ingeniería de sistemas*, p.3. [Consulta: 15 de diciembre 2023]. Disponible en [https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001\\_UJI.pdf](https://webdiis.unizar.es/~jminguez/Sesion001_UJI.pdf)
- MONASTERIO ASTOBIZA, A. (2017). Ética algorítmica: Implicaciones éticas de una sociedad cada vez más gobernada por algoritmos. *Dilemata* (24), pp.186-204.
- MONTALVO, C., (2019). Tejido y sistema nervioso. Departamento de biología celular y tisular. Universidad Nacional Autónoma de México.
- MORENO, I., SERRACÍN, J., SERRACÍN, S., & QUINTERO, J. (2019). Los sistemas de interfaz cerebro-computadora basado en EEG: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico*, vol.15(2), p.13. [Consulta: 02 de enero 2024]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/2230>
- MOYA, I.; BLASCO, M. & MOLERO, V. (2016). El papel de las emociones en el proceso de toma de decisiones de compra en mujeres. Estudio realizado con resonancia magnética funcional–fMRI. *Asociación de marketing de España*, pp.1-17.
- MULLER-PUTZ, G.R., SCHERER, R., BRAUNEIS, C., & PFURTSCHELLER, G. (2005). *Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: Impact of harmonic frequency components. Journal of Neural Engineering*, vol.2(4), pp.123–130. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16317236/>
- MURASE, N., DUQUE, J., MAZZOCCHIO, R., & COHEN, L.G. (2004). *Influence of interhemispheric interactions on motor function in chronic stroke, Ann. Neurol.* Vol.55(3), pp. 400-409. [Consulta: 02 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14991818/>
- MURILLO DE LA CUEVA, P. L. (2000). La publicidad de los archivos judiciales y la confidencialidad de los datos sanitarios. VII Congreso Nacional de Derecho Sanitario. Madrid: Fundación Mapfre Medicina.
- NASEER, N., & HONG, K.-S. (2015). *fNIRS-based brain-computer interfaces: a review. Front Hum Neurosci.* vol.9, p.3.
- NICOLÁS-ALONSO, L.F. & GÓMEZ-GIL, J. (2012). Brain computer interfaces, a review . *Sensors*, vol.12 (2), pp.1211–1279. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3304110/>
- NIETO-SANPEDRO, M., GUDIÑO-CABRERA, G., TAYLOR, J., & VERDÚ, E. (2002). Trauma en el sistema nervioso central y su reparación. *Revisiones en Neurociencia*, pp.34-35. [Consulta: 02 de diciembre 2023]. Disponible en: <https://neurologia.com/articulo/2002414/esp>

- NEUPER, C., MULLER, G.R., KUBLER, A., BIRBAUMER, N., & PFURTSCHELLER, G. (2003). *Clinical application of an EEG-based brain-computer interface: a case study in a patient with severe motor impairment*, *Clin. Neurophysiol*, vol.114, (3), pp. 399-409. [Consulta: 04 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12705420/>
- NEUPER, C., SCHERER, R., WRIESSNEGGER, S., & PFURTSCHELLER, G. (2009). *Motor imagery and action observation: Modulation of sensorimotor brain rhythms during mental control of a brain-computer interface*. *Clinical Neurophysiology*, vol.120(2), pp.239-247. [Consulta: 06 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19121977/>
- NEW YORK CITY BAR ASSOCIATION. (2005). *Are your thoughts your own? Neuroprivacy and the legal implications of brain imaging*. New York: The Committee on Science and Law
- NGUYEN, L.H., & HONG, K.S. (2013). *Adaptive synchronization of two coupled chaotic Hindmarsh–Rose neurons by controlling the membrane potential of a slave neuron*. *Applied Mathematical Modelling*, vol.37, pp.2460–2468. [Consulta: 07 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X12003599>
- NIJHOLT, A. (2008). *Bci for games: A 'state of the art'survey*. *Lecture Notes in Computer Science*.
- NIJHOLT, A. (2009). *BCI for Games: A 'State of the Art' Survey*. In: *Entertainment Computing - ICEC 2008*, edited by S.M. Stevens and S.J. Saldamarco. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp.225-228.
- NOWLIS, D.P. & KAMIYA, J. (1970). *The control of electroencephalographic alpha rhythms through auditory feedback and the associated mental activity*. *Psychophysiology*, 6, pp.476–484. [Consulta: 17 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/5418812/>
- OKANO, H., SASAKI, E., YAMAMORI, T., IRIKI, A., SHIMOGORI, T., YAMAGUCHI, Y., MIYAWAKI, A. ET. AL. (2016). *Brain/MINDS: A Japanese National Brain Project for Marmoset Neuroscience*. *Neuron*, vol.92, pp.582-590. [Consulta: 02 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27809998/>
- OPIE, N. (2021). "El sistema de interfaz neuronal Stentrode™". En Guger C., Allison B.Z., Tangermann M. (eds.). "The Stentrode™ Neural Interface System". In Guger C., Allison B.Z., Tangermann M. (eds.). *Brain-Computer Interface Research: A Cutting-Edge Overview*. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Cham: Springer International Publishing, pp.127–132
- ORFILA, M. (16 de marzo de 2019). *elobservador.com*. [Consulta: 13 de diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.elobservador.com.uy/nota/de-humano-a-cyborg-lahistoria-de-neil-harbisson-el-primer-cyborg-de-la-historia-201931595557>

- OU, C.Z., LIN, B.S., CHANG, C.J., & LIN, C.T. (2012). *Brain computer interface-based smart environmental control system*. In: *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), Eighth International Conference on*. IEEE; pp. 281–84.
- PALANIAPPAN, R., & RAVI, K. (2003). *A new method to identify individuals using signals from the brain*. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Communications and Signal Processing* p. 15.
- PALOMO-ZURDO, R. (2018). *Blockchain: la descentralización del poder y su aplicación en la defensa*. Documento Opinión, Instituto Español de Estudios Estratégicos. pp.1-30. [Consulta: 18 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.ieee.es/publicaciones-new/documentos-de-opinion/2018/DIEEEO70-2018.html>
- PARANJAPPE, R., MAHOVSKY, J., BENEDICENTI, L., & KOLES, Z. (2001). *“The Electroencephalogram as a Biometric,” Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol 2, pp. 1363-1366
- PATIL, S.M., & PATIL, C.G. (2014). *An Approach for Human Machine Interaction Using Electromyography*. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 4, pp.71–75
- PECES-BARBA, G. (2003). Derecho y arte. *Letra Internacional*, n°81, pp.34-36. [Consulta: 13 de febrero de 2024]. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/9758#preview>
- PEGUERA POCH, M. (2020): “En búsqueda de un marco normativo para la Inteligencia Artificial” en Cerrillo Martínez, Agustí et Peguera Poch, Miquel (Coords.) *Retos de la inteligencia artificial*. Cizur Menor: Aranzadi, pp. 41 a 56, vid. pp. 41 y 42.
- Penenberg, A. (2011). *NeuroFocus uses neuromarketing to hack your brain*. *Fast Company*. <https://www.fastcompany.com/1769238/neurofocus-uses-neuromarketing-hack-your-brain>
- PFURTSCHELLER, G., MULLER-PUTZ, G.R., SCHLOGL, A., GRAIMANN, B., SCHERER, R., LEEB, R., ET AL. (2006). *15 years of BCI research at Graz University of Technology: current projects*, IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng , vol. 14, pp. 205-210
- PFURTSCHELLER, G., ALLISON, B.Z, BRUNNER, C., BAUERNEFEIND, G., SOLIS-ESCALANTE, T., SCHERER, R., ET AL. (2010). *The hybrid BCI*. *Front Neurosci*. 4, p.30
- PIÑAR MAÑAS, J. (2005). El derecho fundamental a la protección de datos personales. Algunos retos de presente y futuro. *Revista parlamentaria de la Asamblea de Madrid*, n°13, pp.21-46. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2021205>
- PLOTKIN, W.B. (1976). *On the self-regulation of the occipital alpha rhythm: control strategies, states of consciousness, and the role of physiological feedback*. *Journal of Experimental Psychology. General*, 105, pp.66–99

- POLO, A. (2022). Privacidad, intimidad y protección de datos: una mirada estadounidense y europea. *Derechos y Libertades*, n°47, Época II, pp.307-338. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://e-revistas.uc3m.es/index.php/DYL/article/view/6884>
- POULOS, M., RANGOSSI, M., CHRISICOPOULOS, V., & EVANGELOU, A. (1999). *Person identification based on parametric processing on the eeg. Proceedings of the Sixth International Conference on Electronics, Circuits and Systems* p. 283-286
- POWELL, C., MUNETOMO, M., SCHLUETER, M., MIZUKOSHI, M. (2013). *Towards thought control of next-generation wearable computing devices* Documento presentado en *International Conference on Brain and Health Informatics*.
- PRIETO, J. (1996). Lenguaje jurídico y estado de derecho. *Revista de administración pública*, n°140, pp.111-129. [Consulta: 13 de febrero de 2024]. Disponible en: <file:///C:/Users/Mauricio/Downloads/Dialnet-LaExigenciaDeUnBuenLenguajeJuridicoYEstadoDeDerech-17313.pdf>
- QIAN, D., WANG, B., QING, X.Y., ZHANG, T., ZHANG, Y., WANG, X.Y., ET AL. (2017). *Drowsiness Detection by Bayesian-Copula Discriminant Classifier Based on EEG Signals During Daytime Short Nap. Trans. IEEE. biomedicin Ing. Vol.64*, pp.743–754. [Consulta: 10 de enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7482804>
- RAMADAN, R.A., & VASILAKOS, A.V. (2017). *Brain computer interface: control signals review. Neurocomputin*, vol.223, pp.26–44.
- RAMLI, R., AROF, H., IBRAHIM, F., MOKHTAR, N. & IDRIS, MYI (2015). *Using finite state machine and a hybrid of EEG signal and EOG artifacts for an asynchronous wheelchair navigation. Expert Systems with Applications*, vol.42(5), pp.2451–2463. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417414006903>
- RAMOS ARGÜELLES, F., MORALES, G., EGOZCUE, S., PABÓN, R. M., & ALONSO, M. T. (2009). Técnicas básicas de electroencefalografía: principios y aplicaciones clínicas. *anales sistema sanitario navarra*, 32(supl.3), p.70. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1137-66272009000600006](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272009000600006)
- RAMOS, K. M., GRADY, C., GREELY, H., CHIONG, W., EBERWINE, J., FARAHANY, N., KOROSHETZ, W. ET. AL. (2019). *The NIH BRAIN Initiative: Integrating Neuroethics and Neuroscience. Neuron*, vol.101(3), pp.394-398. [Consulta: 12 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30731065/>
- REVVET K., DERAVID, F., & SIRLANTZIS, K. (2010). *Biosignals for user authentication-towards cognitive biometrics? In: Emerging Security Technologies (EST), International Conference on. IEEE*; p. 71–76.

- ROSE, K., ELDRIDGE, S., & CHAPIN, L. (2015). La Internet de las Cosas- Una breve reseña para entender mejor los problemas y desafíos de un mundo más conectado. *Internet Society*, pp.13-16. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.internetsociety.org/es/resources/doc/2015/iot-overview/>
- RUDOMÍN, P. (1980). El sistema nervioso: maravilla que empezamos a descifrar. *Salud mental*, vol.3(1), pp.6-25. [Consulta: 06 de febrero 2024]. Disponible en: [http://revistasaludmental.mx/index.php/salud\\_mental/article/view/53](http://revistasaludmental.mx/index.php/salud_mental/article/view/53)
- RUIZ, M. (2012). El sistema nervioso, en M. Leira Permuy, *Manual de bases biológicas del comportamiento humano*, pp. 61-124. Montevideo: Universidad de la República.
- RUTKOWSKI, T.M. (2016). *Robotic and Virtual Reality BCIs Using Spatial Tactile and Auditory Oddball Paradigms. Frontier In neurorobotics*. vol.10, p.20. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2016.00020/full>
- SALDAÑA, M. (2011). El derecho a la privacidad en los Estados Unidos: aproximación diacrónica de los intereses constitucionales en juego. *Teoría y realidad constitucional UNED*, n°28, pp.279-312. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://revistas.uned.es/index.php/TRC/article/view/6960>
- SALDAÑA, M. N. (2012). "The Right to Privacy". La génesis de la protección de la privacidad en el sistema constitucional norteamericano: el centenario legado de Warren y Brandeis. *Revista de derecho público UNED*, n°85, pp.195-240. [Consulta: 07 de febrero de 2024]. Disponible en: <https://revistas.uned.es/index.php/derechopolitico/article/view/10723>
- SALIN-PASCUAL, R. (2015). Optogenética: la luz como una herramienta para el estudio del funcionamiento cerebral en los mecanismos del sueño-vigilia y la conducta alimentaria. *Revista Mexicana de Neurociencias*. Vol.16(3), pp. 39-51. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=64815>
- SÁNCHEZ, C. (2016). Historia de la neurociencia: el conocimiento del cerebro y la mente desde una perspectiva interdisciplinar. *Revista Ideas y Valores*, vol.65(160), pp.266-277. [Consulta: 05 de enero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5415114>
- SCHREIBER, D., FONZO, G., SIMMONS, A.N., DAWES, C.T., FLAGAN, T., FOWLER, J.H., & PAULUS, M.P. (2013). *Red brain, blue brain: Evaluative processes differ in Democrats and Republicans. PLoS One*, vol.8(2), e52970. [Consulta: 23 de enero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23418419/>
- SELVAM, V.S., & SHENBAGADEVI, S. (2011). *Brain tumor detection using modified wavelet-ica scalp EEG and multilayer feed-forward neural network. In: Society for Engineering in Medicine and Biology, EMBC, IEEE Annual International Conference*. pp. 6104–09.

- SENTENTIA, W. (2004). Neuroethical considerations: Cognitive Liberty and converging technologies form improving human cognition. *Ann NY Acad Sci*, vol.1013(1), pp.221-228. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15194617/>
- SERRUYA, M.D. & DONOGHUE, J.P. (2003). "Capítulo III: Principios de diseño de una prótesis neuromotora". En Horch KW, Dhillon GS (eds.). *Neuroprótesis: teoría y práctica*. Prensa del Colegio Imperial.
- SHARANREDDY, M., & KULKARNI, P. (2013). *Automated EEG signal analysis for identification of epilepsy seizures and brain tumour*. *J Med Eng Technol*, vol.37 ( 8 ), pp. 511 – 519. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24116656/>
- SHIH, J.J., & KRUSIENSKI, D.J. (2012). *Signals from Intraventricular Depth Electrodes Can Control a Brain-Computer Interface*. *J Neurosci Methods*. Vol.203 (2), pp.311–314. [Consulta: 13 de enero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3246120/>
- SHRI, P., & SRIRAAM, N. (2012). *Eeg based detection of alcoholics using spectral entropy with neural network classifiers*. In: *Biomedical Engineering (ICoBE), International Conference on*. IEEE; pp. 89–93.
- SMITH, B., & SHUM, H. (2018). *The Future Computed Artificial Intelligence and its role in society*. Microsoft Corporation, pp.57-73.
- SMITH, K. (2013). *Reading minds*. *Nature*, 502, pp.428-430.
- SORUDEYKIN, KA. (2010). Una interfaz educativa cerebro-computadora. preimpresión de arXiv arXiv:1003.2660
- STANLEY, L. JR. (1968). Westin: Privacy and Freedom. *Michigan Law Review*, vol.66 (5), pp.1064-1075. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/289230796.pdf>
- STERMAN, M.B., MACDONALD, L., STONE, R. (1974). *Biofeedback training of the sensorimotor electroencephalogram rhythm in man: effects on epilepsy*. *Epilepsia*, vol.15, pp.395–416. [Consulta: 06 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4527675/>
- STERMAN, M.B. (1996). *Physiological origins and functional correlates of eeg rhythmic activities: implications for selfregulation*. *Biofeedback Self Regulation*, vol.21(1), pp.3–33. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8833314/>

- SU, F., ZHOU, H., FENG, Z., & MA, J. (2012). *A biometric-based covert warning system using EEG*. In: *Biometrics (ICB), 5th IAPR International Conference on*. IEEE; p. 342–47.
- SULZER, J., HALLER, S., SCHARNOWSKI, L., WEISKOPF, N., BIRBAUMER, N., BLEFARI, M.L., BRUEHL, B., ET AL. (2013). *Real-Time fMRI Neurofeedback: Progress and Challenges*. *NeuroImage*, vol.76, pp. 386–99. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23541800/>
- SUNG-JIN, J., IN YOUNG, L., BANG, O., YOUNG-JOON, R., JEONG-WOO, S., SUNG-PHIL, K., PANN-GHILL, S. (2019). *Korea Brain Initiative: Emerging Issues and Institutionalization of Neuroethics*. *Neuron*, vol.101(3), pp.390-393. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30731064/>
- SVOGOR, I., & KISASONDI, T. (2012). *Two factor authentication using eeg augmented passwords*. In: *Information Technology Interfaces (ITI), Proceedings of the ITI 34th International Conference on*. IEEE; p. 373–78.
- TAKABI, H. (2016). *Firewall for Brain: Towards a Privacy Preserving Ecosystem for BCI Applications*. *IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*: pp.1-2
- TAN, D.S., & NIJHOLT, A. (2010). *Brain-computer interfaces: applying our minds to human-computer interaction* Springer.
- TANAKA, K., MATSUNAGA, K., & WANG, H.O. (2005). *Electroencephalogram-Based Control of an Electric Wheelchair*, *IEEE Trans. Robot.* Vol.21 (4), pp. 762-766. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1492493>
- TAYLOR, P.M. (2005). *UN and European Human Rights Law and Practice*. pp.115-202. Cambridge: Cambridge University Press.
- TELEB, M.S., CZIEP, M.E., LAZZARO, M.A., GHEITH, A., ASIF, K., REMLER, B., & ZAIDAT, OO. (2014). *Idiopathic Intracranial Hypertension. A Systematic Analysis of Transverse Sinus Stenting*. *Interv Neurol*, vol.2 (3), pp. 132–143. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24999351/>
- THOMPSON, P., CANNON, T., NARR, K., VAN ERP, T., POUTANEN, V., HUTTUNEN, M., ET AL. (2001). *Genetic influences on brain structure*. *Nat Neurosci.*, vol.4(12), pp.1253-1258. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nn758>
- TORRES GARCÍA, A. (2016). *Análisis y clasificación de electroencefalogramas (EEG) registrados durante el habla imaginada*. (tesis doctoral) Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, pp.16-18.
- TREVIÑO, MA., & JARAMILLO, F. (2005). *El Sistema Nervioso y su Relación con el Sistema Inmunológico*. *Investigación y Ciencia*, vol. 13(33), pp. 14-21. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6121898>

- TURNIP, A. & HONG, K.-S. (2012). *Eliciting dual-frequency SSVEP using a hybrid SSVEP-P300 BCI*. *J. Neurosci Methods*, vol.8, pp.6429–6443. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26561770/>
- UFRE, E. (2009). Neuroimágenes en la investigación de mercados. *Revista científica pensamiento y gestión*. Vol.26, pp.73-93. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/pensamiento/article/view/862>
- ULMAN, Y.I., CAKAR, T., YILDIZ, G. (2015). *Ethical issues in neuromarketing: “I consume, therefore I am!”*. *Sci Eng Ethics*, 21(5), pp.1271–84.
- VADILLO BUENO, G. (2020). Futuros de la Inteligencia Artificial. *Revista Digital Universitaria*. Vol.21(1) pp.1-12. [Consulta: 07 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.revista.unam.mx/ojs/index.php/rdu/article/view/1699>
- VALDES-SOSA, P., GALAN, L., BOSCH-BAYARD, J., BRINGAS VEGA, M., AUBERT VAZQUEZ, E., DAS, S., VALES-SOSA, M. (2020). *The Cuban Human Brain Mapping Project population based normative EEG, MRI, and Cognition dataset*. *bioRxiv*, 2. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.07.08.194290v1.full.pdf+html>
- VASEAHTA, A. (2012), “*The potential utility of advanced science convergence*”, in James Giordano (ed.), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, CRC Press.
- VERMEULEN, M. (2010). *Unilateral exceptions to fundamental rights in the use of detection technologies in the fight against terrorism: Permissible limitations to the right to privacy*. *DETECTOR project*. D06, n°.3. p.7.
- VERNON, D. (2005). *Can neurofeedback training enhance performance? an evaluation of the evidence with implications for future research*. (4), p.347. [Consulta: 03 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16385423/>
- VIDAL J. J., (1973). *Toward direct brain–computer communication* *Annual Review of Biophysic*, vol.2, pp. 157–80. [Consulta: 08 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
- WACHINGER, C., GOLLAND, P. & REUTER, M. (2014). *in Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI*, pp.41–48
- WACHINGER, C., GOLLAND, P., KREMEN, W., FISCHL, B. & REUTER, M. (2015). *BrainPrint: A discriminative characterization of brain morphology*. *NeuroImage*, vol.109, pp.232–248. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25613439/>
- WANG, L. (2017). *Mu-ming Poo: China Brain Project and the future of Chinese neuroscience*. *National Science Review*, 258-263. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/314070218\\_Mu-ming\\_Poo\\_China\\_Brain\\_Project\\_and\\_Future\\_of\\_Chinese\\_Neuroscience](https://www.researchgate.net/publication/314070218_Mu-ming_Poo_China_Brain_Project_and_Future_of_Chinese_Neuroscience)

- WANG, J., & SHU-JIAN, S. (2018). *Attribute Revocable Access Control Scheme for Brain-Computer Interface Technology*. *Computer Science*, vol.45(9), pp.187-194.
- WARREN, S. & BRANDEIS, L. (1890). The Right to Privacy. *Harvard Law Review*, vol.15(5), pp.194-220. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: [https://groups.csail.mit.edu/mac/classes/6.805/articles/privacy/Privacy\\_brand\\_warr2.html](https://groups.csail.mit.edu/mac/classes/6.805/articles/privacy/Privacy_brand_warr2.html)
- WEI, L., HONG, Q., YUE, H., & XI, C. (2010). *The research in a plantar pressure measuring system connected with eeg*". In: *Signal Processing (ICSP), IEEE 10th International Conference on*. pp. 434–37.
- WEXLER, A. (2019). Separating neuroethics from neurohype. *Nat Biotechnology*, vol.37(9), pp.988-990. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31399721/>
- WOLPAW, J.R., BIRBAUMER N., MCFARLAND D.J, PFURTSCHELLER G., & VAUGHAN T.M. (2002). *Brain-computer interfaces for communication and control*. *Clin Neurophysiol*, vol.113 (6), pp.767–791. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1388245702000573>
- WOLPAW, J.R., LOEB, G.E., ALLISON, B.Z., DONCHIN, E., HEETDERKS, W.J., ET AL., (2006). *BCI meeting 2005-workshop on signals and recording methods*. *IEEE Trans. Sistema neural. rehabilitación Ing.*, vol. 14, pp. 138-141. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1642754>
- WYRICKA, W. & STERMAN, M. (1968). *Instrumental conditioning of sensorimotor cortex EEG spindles in the waking cat*. *Physiology & Behavior*, vol.3, pp.703–707.
- YUAN, B. J., HSIEH, C.-H., CHANG, C.-C. (2010). *National technology foresight research: A literature review from 1984 to 2005*. *Int J Foresight Innov Policy*, vol.6(1), pp.5-35. [Consulta: 09 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJFIP.2010.032663>
- YUSTE, R. (2019). Las nuevas neurotecnologías y su impacto en la ciencia, medicina y sociedad. *La Lección Cajal*, p.37. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://puz.unizar.es/2183-las-nuevas-tecnologias-y-su-impacto-en-la-ciencia-medicina-y-sociedad.html>
- ZAFAR, A. & HONG, K.-S. (2017). *Detection and classification of three-class initial dips from prefrontal cortex*. *Biomed Opt Express*. Vol.8, pp.367–383. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5231305/>

- ZANDER, T.O., & KOTHE, C. (2011). *Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general*. *J. Neural Eng.* vol.8(2), pp.1-20. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21436512/>
- ZHANG, Y., ZHAO, Q.B., JIN, J., WANG, X.Y., & CICHOCKI, A. (2012). *A novel BCI based on ERP components sensitive to configural processing of human faces*. *J. Neural Eng.* vol.9(2), pp.01-20. [Consulta: 10 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22414683/>
- ZIMMERMANN, R., MARCHAL-CRESPO, L., EDELMANN, J., LAMBERCY, O., FLUET, MC, RIENER, R., (2013). *Detection of motor execution using a hybrid fNIRS-biosignal BCI: a feasibility study*. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol.10, (4) pp.1-15. [Consulta: 11 de febrero 2024]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23336819/>

## DOCUMENTOS DE TRABAJO

- AEPD Y ISMS *FORUM SPAIN*, (2016). *Código de buenas prácticas en protección de datos en proyectos de Big Data*. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/guia-codigo-de-buenas-practicas-proyectos-de-big-data.pdf>
- AEPD. (2020). *Adecuación al RGPD de tratamientos que incorporan Inteligencia artificial. Una introducción*. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/adecuacion-rgpd-ia.pdf>
- AEPD. (2021). *Guía de Gestión del Riesgo y Evaluación de Impacto en tratamientos de Datos Personales*. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/gestion-riesgo-y-evaluacion-impacto-en-tratamientos-datos-personales.pdf>
- CEPD. (2017). *Directrices sobre la evaluación de impacto relativa a la protección de datos [EIPD] y para determinar si el tratamiento "entraña probablemente un alto riesgo" a efectos del Reglamento 2016/679*. Disponible en: <https://www.aepd.es/documento/wp248rev01-es.pdf>
- CEPD. (2020). *Directrices 4/2019 relativas al artículo 25 Protección de datos desde el diseño y por defecto Versión 2.0*. Disponible en: [https://edpb.europa.eu/system/files/2021-04/edpb\\_guidelines\\_201904\\_dataprotection\\_by\\_design\\_and\\_by\\_default\\_v2.0\\_es.pdf](https://edpb.europa.eu/system/files/2021-04/edpb_guidelines_201904_dataprotection_by_design_and_by_default_v2.0_es.pdf)
- GT29. (2007). *sobre el concepto de datos personales.(WP136)*. Disponible en: [https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2007/wp136\\_es.pdf](https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2007/wp136_es.pdf)
- GT29. (2010). *Opinión 3/2010 on the principle of accountability.(WP173)*. Disponible en: [https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2010/wp173\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2010/wp173_en.pdf)
- GT29. (2012). *Dictamen 3/2012 sobre la evolución de las tecnologías biométricas*. Disponible en: [https://www.aepd.es/documento/wp193\\_es.pdf](https://www.aepd.es/documento/wp193_es.pdf)

- GT29. (2014). Sobre técnicas de anonimización.(WP216). Disponible en:  
<https://www.aepd.es/documento/wp216-es.pdf>
- GT29. (2014). *Statement on the role of a risk-based approach in data protection legal frameworks*. Disponible en: [https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2014/wp218\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/opinion-recommendation/files/2014/wp218_en.pdf)
- GT29. (2015). *ANNEX - Health data in apps and devices*. Disponible en:  
[https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/other-document/files/2015/20150205\\_letter\\_art29wp\\_ec\\_health\\_data\\_after\\_plenary\\_annex\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/justice/article-29/documentation/other-document/files/2015/20150205_letter_art29wp_ec_health_data_after_plenary_annex_en.pdf)
- GT29. (2017). Directrices sobre el consentimiento en el sentido del Reglamento (UE) 2016/679, revisadas por última vez y adoptadas el 10 de abril de 2018. (WP259 y rev.01). Disponible en:  
[https://edpb.europa.eu/sites/default/files/files/file1/edpb\\_guidelines\\_202005\\_consent\\_es.pdf](https://edpb.europa.eu/sites/default/files/files/file1/edpb_guidelines_202005_consent_es.pdf)
- INFORME DE LA ASOCIACIÓN MÉDICA AMERICANA, LA ASOCIACIÓN PSIQUIÁTRICA AMERICANA (et. al.), como *amici curiae* en apoyo del demandado en el caso *Roper vs. Simmons*, 543 U.S. 551 (2005), Nº 03-633. Disponible en: <https://caselaw.findlaw.com/court/us-supreme-court/543/551.html>
- INFORME DE LA ASOCIACIÓN AMERICANA DE PSICOLOGÍA Y POR LA ASOCIACIÓN DE PSICOLOGÍA DE MISSOURI, como *amici curiae* en apoyo del demandado en el caso *Roper vs. Simmons*, 543 U.S. 551 (2005), Nº 03-633. Disponible en: <https://caselaw.findlaw.com/court/us-supreme-court/543/551.html>
- INCIBE. (2018). Copias de Seguridad. Una guía de aproximación para el empresario. Disponible en: <https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/guia-copias-de-seguridad.pdf>
- INCIBE. (2016). Guía sobre borrado seguro de la información. Una aproximación para el empresario. Disponible en:  
[https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia\\_ciberseguridad\\_borrado\\_seguro\\_metad\\_0.pdf](https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia_ciberseguridad_borrado_seguro_metad_0.pdf)
- OCDE. (2017). *Neurotechnology and Society Strengthening Responsible Innovation in Brain Science*. *OECD Science, Technology and Innovation Policy Papers* (46), pp.1-65. Disponible en: <https://www.oecd.org/science/inno/17/>
- OCDE. (2019). Recommendation of the Council on Responsible Innovation in Neurotechnology. Disponible en: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0457>

OEA. (2021). *Declaración sobre “Neurociencia, Neurotecnologías y Derechos Humanos: Nuevos desafíos jurídicos para las Américas”*. Disponible en:  
[https://www.oas.org/es/sla/cji/temario\\_actual.asp](https://www.oas.org/es/sla/cji/temario_actual.asp)

PARLAMENTO EUROPEO. (2020). *DRAFT REPORT with recommendations to the Commission on a framework of ethical aspects of artificial intelligence, robotics and related technologies*. Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2020-0186\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2020-0186_EN.html)

SENADO DE CHILE. (2019). *Inteligencia Artificial y neuroderechos: la protección de nuestro cerebro podría quedar consagrado en la Constitución*. Disponible en:  
<https://www.senado.cl/noticias/congreso-futuro/inteligencia-artificial-y-neuroderechos-la-proteccion-de-nuestro>

## **NORMATIVA RELEVANTE**

CARTA DE DERECHOS FUNDAMENTALES (UE) (2000/C 364/01). Disponible en:  
[https://www.europarl.europa.eu/charter/pdf/text\\_es.pdf](https://www.europarl.europa.eu/charter/pdf/text_es.pdf)

CARTA DE DERECHOS DIGITALES DE ESPAÑA (2021). Disponible en:  
[https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/140721-Carta\\_Derechos\\_Digitales\\_RedEs.pdf](https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/140721-Carta_Derechos_Digitales_RedEs.pdf)

LEY ORGÁNICA 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales. (2018). Disponible en:  
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2018-16673>

PROPUESTA DE REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial (ley de inteligencia artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la unión. (2021). Disponible en:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A52021PC0206>

REGLAMENTO (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de abril de 2016, relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos. DUOE número 119. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2016/119/L00001-00088.pdf>

*El impacto de las neurociencias y neurotecnologías en el derecho fundamental a la protección de datos personales.  
Un estudio sobre el régimen jurídico aplicable a los datos cerebrales o neurodatos a la luz del RGPD (UE)*