

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Grado en Ciencias Ambientales

Facultad de Ciencias Experimentales

ANÁLISIS DE LAS EVIDENCIAS EXPERIMENTALES EXISTENTES SOBRE POSIBLES ALTERACIONES EN LA FERTILIDAD CAUSADAS POR RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA NO IONIZANTE

Trabajo de Fin de Grado

Alberto Martínez Girona

Elche, noviembre de 2020

Curso académico 2020-2021

Director: Miguel Ángel Sogorb Sánchez (Área de Toxicología)

Instituto de Bioingeniería y Departamento de Biología Aplicada

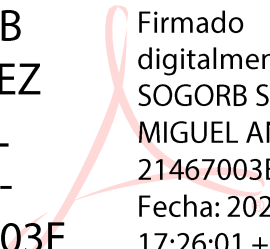
MIGUEL ÁNGEL SOGORB SÁNCHEZ, Catedrático de Universidad del Área de Toxicología del Departamento de Biología Aplicada e investigador del Instituto de Bioingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

CERTIFICA:

que don Alberto Martínez Girona, estudiante del Grado en Ciencias Ambientales por la Universidad Miguel Hernández de Elche, ha realizado, bajo mi dirección, el trabajo de investigación titulado “ANÁLISIS DE LAS EVIDENCIAS EXPERIMENTALES EXISTENTES SOBRE POSIBLES ALTERACIONES EN LA FERTILIDAD CAUSADAS POR RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA NO IONIZANTE” incluido en la presente memoria de Trabajo de Fin de Grado.

Y para que conste a todos los efectos oportunos, expido y firmo la presente certificación,

En Elche, noviembre de 2020

SOGORB		Firmado
SANCHEZ		digitalmente por
MIGUEL		SOGORB SANCHEZ
ANGEL -		MIGUEL ANGEL -
21467003E		21467003E
		Fecha: 2020.11.28
		17:26:01 +01'00'

Profesor Miguel Ángel Sogorb Sánchez

Quiero dedicar este Trabajo Fin de Grado principalmente a mi tutor Miguel Ángel Sogorb Sánchez, por su gran ayuda en la realización de este proyecto y sobre todo por su dedicación a la investigación, que para mí es la tarea más importante que los seres humanos podemos hacer para evolucionar. En estos momentos la investigación adquiere un papel más que importante, ya sea para la obtención de vacunas que son tan necesarias ahora mismo como para evitar problemas mayores si cabe. También me gustaría agradecer todo el apoyo proporcionado por mi familia y por último decir que no debemos olvidar que el ser humano avanza gracias a la curiosidad y el afán de superación o en otras palabras gracias a la investigación.

ABREVIATURAS

f = frecuencia (f)

Hz = Hertzio

ICNIRP = Comisión internacional para la protección frente a radiaciones no ionizantes (por International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection).

λ = longitud de onda

SAR = Tasa de absorción de energía específica (por Specific energy Absorption Rate)

T = periodo

TFG = Trabajo Fin de Grado (TFG)

RESUMEN

En este trabajo hemos realizado una revisión bibliográfica en la base de datos PubMed con la intención de encontrar evidencias publicadas en los últimos 5 años que demuestren posibles efectos adversos de la radiación electromagnética no ionizante sobre la fertilidad. Se localizaron 22 diferentes trabajos, 12 en estudios con roedores o modelos celulares *in vitro*, 2 con otros modelos animales, y 8 estudios epidemiológicos. La literatura seleccionada contiene información acerca alteraciones histopatológicas menores en órganos reproductores y alteraciones en células sexuales, pero ningún estudio de fertilidad propiamente dicho. Resulta muy difícil evaluar si los estudios están realizados en condiciones fisiológicamente relevantes en términos de intensidad de la radiación, distancia hasta el foco emisor, potencia de la radiación, etc. Tampoco se encontró ningún estudio epidemiológico que detectara alteraciones en la fertilidad. En conclusión, en este trabajo no se han encontrado evidencias experimentales robustas que sugieran que la radiación electromagnética no ionizante pudiera ser nociva para la fertilidad.

Palabras clave:

Radiación electromagnética no ionizante, fertilidad, telecomunicaciones, campo electromagnético, radiación de teléfono móvil.

SUMMARY

In this work, we have carried out a bibliographic review in the PubMed database with the aim of finding evidences published in the last 5 years that demonstrates a possible adverse effect of non-ionizing electromagnetic radiation on fertility. Twenty-two different papers were located, twelve in studies with rodents or *in vitro* cell models, two with other animal models, and eight epidemiological studies. The selected literature contains information on minor histopathological alterations in reproductive organs and alterations in sexual cells, but no real fertility study. It is very difficult to assess whether the studies are carried out under physiologically relevant conditions in terms of radiation intensity, distance to the emitter focus, radiation power, etc. There were no epidemiological studies detecting alterations in fertility. In conclusion, no robust experimental evidence has been found in this work suggesting that non-ionizing electromagnetic radiation could be harmful to fertility.

Keywords:

Non-ionizing electromagnetic radiation, fertility, telecommunications, electromagnetic fields, cellular phone radiation.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	Conceptos básicos sobre ondas.....	8
1.2	Ondas electromagnéticas.....	9
1.3	El espectro electromagnético.....	10
2	ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	12
2.1.	Antecedentes.....	13
2.2.	Objetivos.....	16
3	MATERIALES Y MÉTODOS	17
4	RESULTADOS	20
4.1	Resultados de la búsqueda bibliográfica con humanos.....	21
4.2	Resultados de la búsqueda bibliográfica con animales.....	21
4.3	Cribado preliminar trabajos en animales seleccionados en la búsqueda bibliográfica.....	22
4.4	Análisis de la información bibliográfica según el sistema diana en estudios con animales	22
4.5	Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad femenina en estudios con roedores.....	23
4.6	Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad masculina en estudios con roedores.....	25
4.7	Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad en estudios en humanos.....	26
4.8	Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad en animales no roedores.....	29
5	DISCUSIÓN	30
6	CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA	34
6.1	Conclusiones.....	35
6.2	Proyección futura.....	36
7	BIBLIOGRAFÍA	37



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Conceptos básicos sobre ondas

Una de las definiciones que otorga el diccionario de la lengua española Real Academia Española a la palabra onda es: “*Movimiento periódico que se propaga en un medio físico o en el vacío*”. La mayoría de las ondas se pueden dividir en ondas transversales y ondas longitudinales. La Figura 1 muestra cómo se generaría una onda transversal (aquella en que la perturbación avanza perpendicular al desplazamiento de la onda) (Figura 1A) y una onda longitudinal (aquella en que la perturbación avanza paralela al desplazamiento de la onda) (Figura 1B).

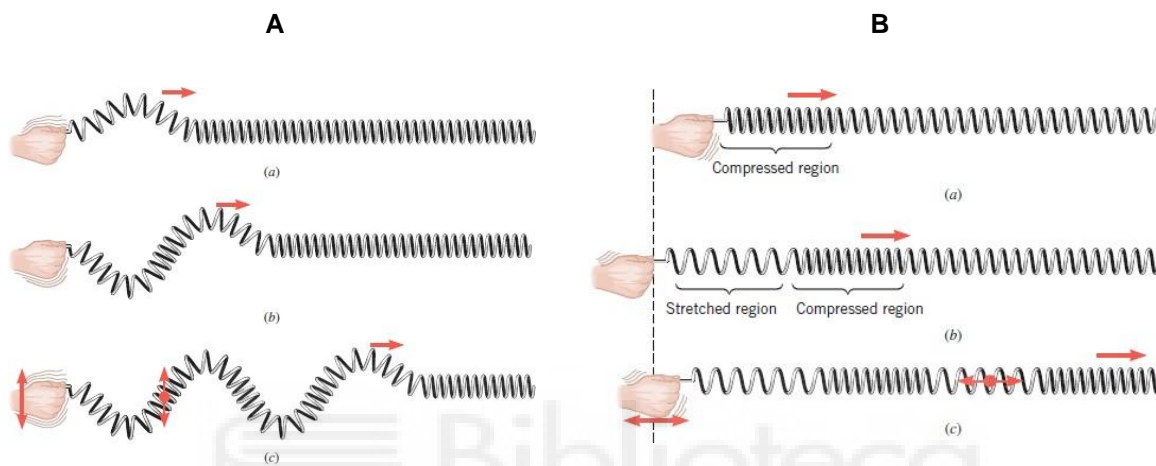


Figura 1: Ondas transversales (A) y perpendiculares (B). Tomado de Cutnell & Johnson (2007a).

Las ondas tienen un componente periódico porque están formadas por ciclos que se repiten permanente y constantemente durante su propagación. La Figura 2 muestra un ejemplo de una onda periódica donde se puede observar cómo la zona sombreada delimita un ciclo de la onda que se repite indefinidamente. Una onda periódica se puede definir físicamente a través de las siguientes propiedades (Cutnell y Johnson (2007a)):

- Se llama amplitud a la distancia entre el máximo de la perturbación (la “cresta” de la onda) y la zona donde no existe perturbación (Figura 2A y 2B);
- La longitud de onda (λ) es la distancia entre dos puntos idénticos de la onda (Figura 2A) y se mide en unidades de longitud;
- El periodo (T) es el tiempo requerido por la onda para desplazarse una distancia equivalente a una λ ; o bien, el tiempo que necesita la onda para alcanzar dos puntos idénticos del ciclo (Figura 2B) y se mide en unidades de tiempo, usualmente en segundos;
- La frecuencia (f) es el número de ondas contabilizado por unidad de tiempo y, por lo tanto: $f = 1 / T$. Las unidades de frecuencia del Sistema Internacional de unidades son los Herz (Hz). Un Hz se define como la frecuencia de una onda cuyo periodo es un segundo. Por ejemplo, si un

ciclo de una onda necesita 0.1 s en pasar por un observador diremos que $T = 0.1$ s y entonces, el observador notará 10 ciclos completos de la onda en 1 s. Por lo tanto, $f = 1 / T = 1 / 0.1$ s = 10 ciclos/s = 10 Hz;

- La velocidad de propagación de una onda (v) se define como la relación entre λ y T . Por lo tanto, $v = \lambda / T$; y dado que $f = 1 / T$, entonces $v = f \lambda$.

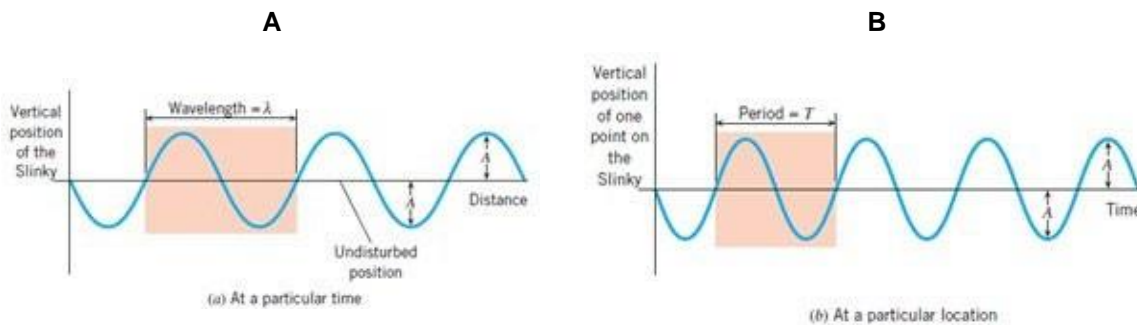


Figura 2: Conceptos básicos de ondas. En el panel A el eje X representa distancia. En la Figura B el eje X representa tiempo. La zona sombreada representa un ciclo de la onda. A representa en ambos paneles la amplitud de la onda. Tomado de Cutnell y Johnson (2007a)

1.2 Ondas electromagnéticas

El físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) concluyó que (Cutnell y Johnson (2007b):

- Un campo magnético variable induce un campo eléctrico proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético y de dirección perpendicular a aquel.
- Un campo eléctrico variable induce un campo magnético proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo eléctrico y de dirección perpendicular a aquel.

O, dicho de otra manera, que unos campos eléctricos fluctuantes junto a unos campos magnéticos también fluctuantes se desplazan juntos formando lo que se denomina una onda electromagnética (Figura 3).

Los conceptos de amplitud, longitud de onda, periodo, frecuencia y velocidad según se explicaron en la sección 1.1 también aplican a las ondas electromagnéticas. La velocidad de desplazamiento de una onda electromagnética en el vacío es de 3×10^8 m/s (300.000 km/s) (Cutnell y Johnson 2007b).

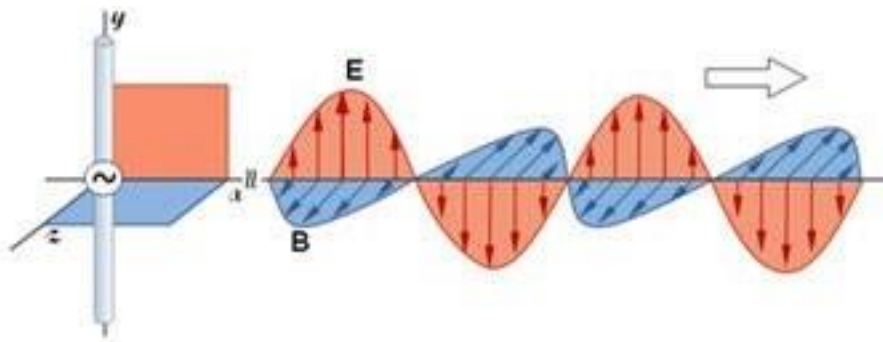


Figura 3: Onda electromagnética. Obsérvese que el campo eléctrico (E) (color rojo) es perpendicular al campo magnético (B) (color azul) y que ambos son perpendiculares a su vez a la dirección de desplazamiento de la onda. Tomada Tomado de Cutnell y Johnson (2007b).

Una onda electromagnética transporta energía (E). Dicha energía se puede calcular con la fórmula:

$$E = h \cdot f$$

donde h es la denominada constante de Plank ($h = 6.62 \times 10^{-34}$ J s) y f es la frecuencia definida según lo descrito en la sección 1.1. De esta ecuación podemos concluir que cuanto mayor sea la frecuencia de la onda electromagnética mayor será la energía que transportará, o lo que es lo mismo, cuanto menor sea λ , menor será la energía que transportará.

1.3 El espectro electromagnético

En la naturaleza existen ondas electromagnéticas con frecuencias que oscilan entre los 10^3 Hz y los 10^{24} Hz. La secuencia ordenada de frecuencias (o λ) es lo que se denomina espectro electromagnético (Figura 4).

Dentro del espectro electromagnético encontramos las siguientes zonas (Sogorb y Vilanova, 2004):

- **Ondas de radio.** Corresponden a las ondas de más alta λ y por lo tanto a las ondas menos energéticas del espectro. Se utilizan en telecomunicaciones.
- **Microondas.** La longitud de onda es superior a las ondas de radio y por lo tanto son más energéticas que éstas. La energía que portan las ondas de la zona de microondas es capaz de provocar la rotación de moléculas incrementando la fricción entre moléculas vecinas y causando un incremento de la temperatura del medio. Esta es la radiación que utilizan los microondas domésticos para el calentamiento y cocinado de alimentos. Las microondas también se utilizan en telecomunicaciones.

- **Infrarrojo.** Las longitudes de ondas superiores a las microondas caen dentro de la zona denominada infrarrojo. Las ondas infrarrojas son emitidas por cuerpos calientes debido a las oscilaciones de los átomos y tienen aplicaciones en industria y medicina.
- **Visible.** La zona visible del espectro electromagnético corresponde a una región muy estrecha del mismo donde se encuentran ondas que portan la energía necesaria para excitar las neuronas que contiene la retina humana traduciendo este estímulo en lo que el cerebro interpreta como colores. Las longitudes de onda más bajas del espectro visible corresponden al color rojo (de ahí que la zona inmediatamente inferior se denomine infrarrojo), mientras que las más altas corresponden con el color violeta.
- **Ultravioleta.** La zona ultravioleta corresponde a longitudes de onda inferiores a las del color violeta de la zona visible y por lo tanto sus ondas son más energéticas que las ondas que generan el color violeta en el ojo humano. Estas radiaciones ultravioletas portan una cantidad de energía capaz de generar la formación de enlaces covalentes y resultan peligrosas para el ser humano. Por ejemplo, la energía ultravioleta que emite la luz del sol está considerada cancerígena para la piel.
- **Rayos X.** Son producidos por oscilaciones de los electrones próximos al núcleo. Estas ondas tienen la capacidad de atravesar tejidos blandos del organismo, pero no tejidos duros (huesos). De ahí su aplicación médica en la prueba de imagen denominada radiografía o también en los escáneres en los aeropuertos, etc.
- **Rayos gamma.** Los rayos gamma son producidos por oscilaciones nucleares (por ejemplo, por los elementos radioactivos). Tienen un gran poder de penetración, lo que hace que sean nocivos para los seres vivos.

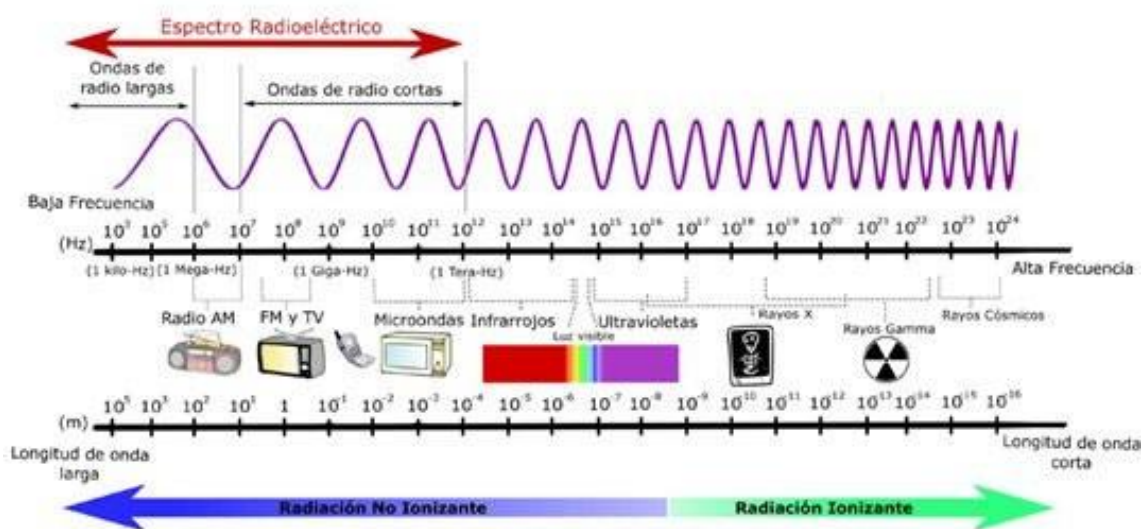


Figura 4: Espectro electromagnético. Tomado de Proyecto Esopo.



2 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

2.1. Antecedentes

Como se ha comentado anteriormente las ondas electromagnéticas de la zona de ondas de radio y microondas tiene aplicaciones en telecomunicaciones. Las frecuencias utilizadas van entre, aproximadamente 100 kHz y 100 GHz dependiendo de la aplicación (radio AM, radio FM, televisión terrestre, televisión digital, Wi-Fi, telefonía móvil, etc.).

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) nos centraremos exclusivamente en las ondas electromagnéticas no ionizantes, es decir, en las ondas electromagnéticas con frecuencias correspondientes a la zona visible e inferiores (Figura 4). Además, dado que las radiaciones visible e infrarroja no suponen ningún peligro para la salud, nos centraremos especialmente radiaciones con frecuencias empleadas en telecomunicaciones, con especial atención en aquellas empleadas en telefonía móvil.

¿Cómo funciona la telefonía móvil?

Cuando hacemos una llamada desde nuestro terminal móvil éste emite radiación electromagnética hasta una estación base que comunica con todos los terminales que se encuentran dentro de su radio de acción (Figura 5). Esta estación base transmite la señal hasta un punto denominado conmutador, que es el encargado de enviar la señal hasta una segunda estación base en cuyo radio de acción se encuentra el terminal destinatario de la llamada (Figura 5). A partir de ahí, se establece la comunicación entre los dos terminales móviles.

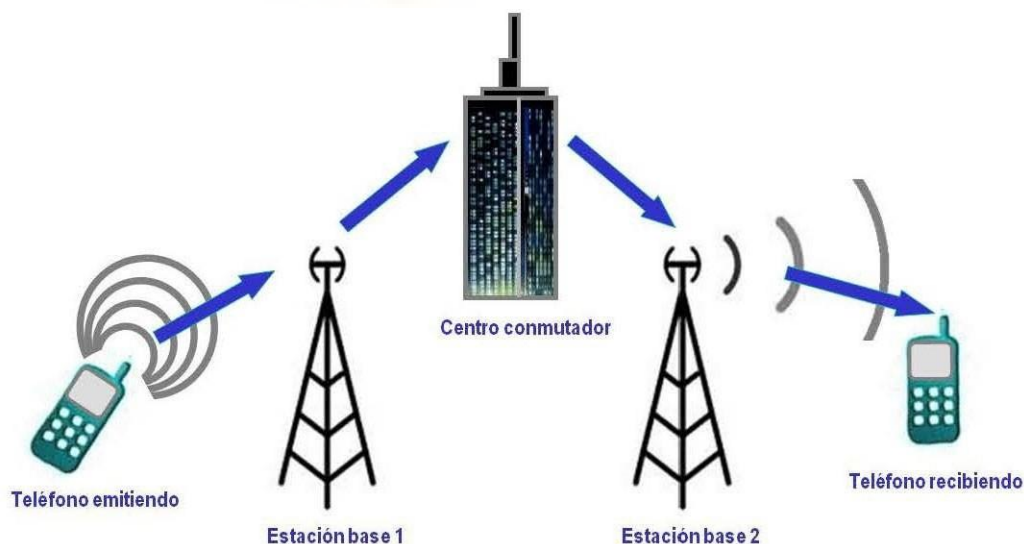


Figura 5: Funcionamiento de la telefonía móvil. Tomado de la sociedad española de protección radiológica. Disponible en: <https://www.sepr.es/archivo-doc/recursos/otros/1865-las-radiaciones-no-ionizantes-en-telefonía-movil-pdf>

Los teléfonos móviles operan en una radiofrecuencia que oscila entre varios cientos de MHz hasta varios GHz (ICNIRP). La frecuencia exacta depende tanto de los países como de la tecnología empleada (3G, 4G, 5G). Así, por ejemplo, en los Estados Unidos de América la tecnología 5G emplea una banda de 2.8 GHz (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)), mientras que en Europa esta tecnología opera en la banda de 3.5 GHz

Así pues, podemos aseverar que la población está expuesta a radiación electromagnética empleada en telefonía móvil procedente de dos diferentes fuentes. Por un lado, tendríamos la exposición a radiación emitida por los terminales móviles que afectaría al individuo emisor o receptor de la llamada exclusivamente durante la conversación. Por otro lado, tendríamos también la exposición a una radiación de fondo emitida de manera permanente por las antenas (estaciones base en la Figura 5) que enlazan los terminales.

Límites de exposición a radiación electromagnética

La comisión internacional para la protección frente a radiaciones no ionizantes (ICNIRP, por International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, <https://www.icnirp.org/>) es una organización no gubernamental sin ánimo de lucro reconocida por la Organización Mundial de la Salud que provee consejo científico sobre los efectos para la salud de radiaciones no ionizantes. ICNIRP ha revisado muy recientemente (mayo de 2020) los valores límite que se consideran seguros para exposición a radiación electromagnética de entre 100 kHz y 300 GHz. Estos valores se resumen en la Tabla 1 y cubren todas las bandas de radiación empleadas en telefonía móvil actualmente (incluida la banda más reciente denominada 5G).

Tabla 1. Restricciones básicas a la exposición a campos electromagnéticos de 100 kHz a 300 GHz, para intervalos promedio de \geq a 6 minutos. Tomado de ICNIRP (2020). SAR = Tasa de absorción de energía específica (por Specific energy Absorption Rate)

Escenario de exposición	Rango de frecuencia	SAR promedio		
		en el cuerpo entero (W/kg)	SAR en cabeza y torso (W/kg)	SAR en extremidades (W/kg)
Ocupacional	100 kHz a 6 GHz	0.4	10	20
	>6 a 300 GHz	0.4	No disponible	No disponible
Público General	100 kHz a 6 GHz	0.08	2	4
	>6 a 300 GHz	0.08	No disponible	No disponible

Planteamiento de este TFG

Determinados agentes sociales realizan campañas acerca de unos supuestos peligros sobre la salud de la radiación electromagnética, especialmente aquella utilizada por la telefonía móvil. El caso más

reciente se ha dado en los últimos meses con la implantación en España y Europa del sistema de telecomunicaciones del 5G.

Una de las potenciales alteraciones de la salud sobre la que más frecuentemente recurren estas campañas es a unas supuestas alteraciones en la fertilidad. Véase, solamente a modo de ejemplo, la entrada del blog Fertility Road titulada “¿La Implementación De 5G Afectará La Infertilidad Masculina?”¹ o el artículo en el Daily Star titulado “Fears UK's new 5G network could 'lower sperm counts and sterilise young men’”²

Un denominador común a estas campañas es que rara vez suelen venir acompañadas de evidencias científicas sólidas y publicadas en revistas científicas con revisores por pares, que es el estándar mínimo para dar plausibilidad a un efecto adverso sobre la salud derivado de la exposición a un agente químico o, como es el caso que nos ocupa, físico.

La radiación electromagnética empleada en telecomunicaciones se puede considerar ubicua (Figura 5) y por lo tanto puede afectar tanto al ser humano como a la fauna silvestre. Este TFG está centrado en el análisis de los potenciales efectos de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes sobre la fertilidad. Se ha seleccionado la fertilidad como potencial efecto diana de la radiación electromagnética por dos motivos:

- Las alteraciones en la fertilidad en humanos son motivo de una alta preocupación social; y,
- Las alteraciones en la fertilidad de fauna silvestre pueden tener importantes repercusiones en la conservación de las especies, especialmente aquellas en peligro de extinción.

¹ Disponible en: <https://fertilityroad.com/es/will-the-5g-rollout-affect-male-infertility/> (visitada el 26 de octubre de 2020)

² Disponible en: <https://www.dailystar.co.uk/news/weird-news/fears-uks-new-5g-network-21415777> (visitada el 26 de octubre de 2020)

2.2. Objetivos

En este escenario, el objetivo general de este TFG será:

Revisar las evidencias experimentales publicadas en revistas científicas sobre posibles alteraciones en la fertilidad causadas por radiación electromagnética no ionizante





3 MATERIALES Y MÉTODOS

La información presentada en este TFG se obtuvo de dos fuentes. Por un lado, las publicaciones científicas estrictamente relacionadas con efectos adversos de radiaciones electromagnéticas sobre la salud se obtuvieron del buscador PubMed de la Biblioteca Nacional de Medicina del Centro Nacional para información en Biotecnología (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?db=PubMed>) (Figura 6). Este portal de búsqueda permite acceder a más de 30 millones de citas de literatura biomédica, revistas de ciencias biológicas y libros online.

Otro tipo de información relacionada con propiedades físicas de la radiación electromagnética, frecuencias de operación de telefonía móvil, etc. se obtuvo, bien de libros de texto incluidos en la bibliografía recomendada en diversas asignaturas impartidas por el Área de Física Aplicada de la UMH o bien de páginas web de organizaciones gubernamentales u organizaciones científicas con comités científicos independientes y solventes.

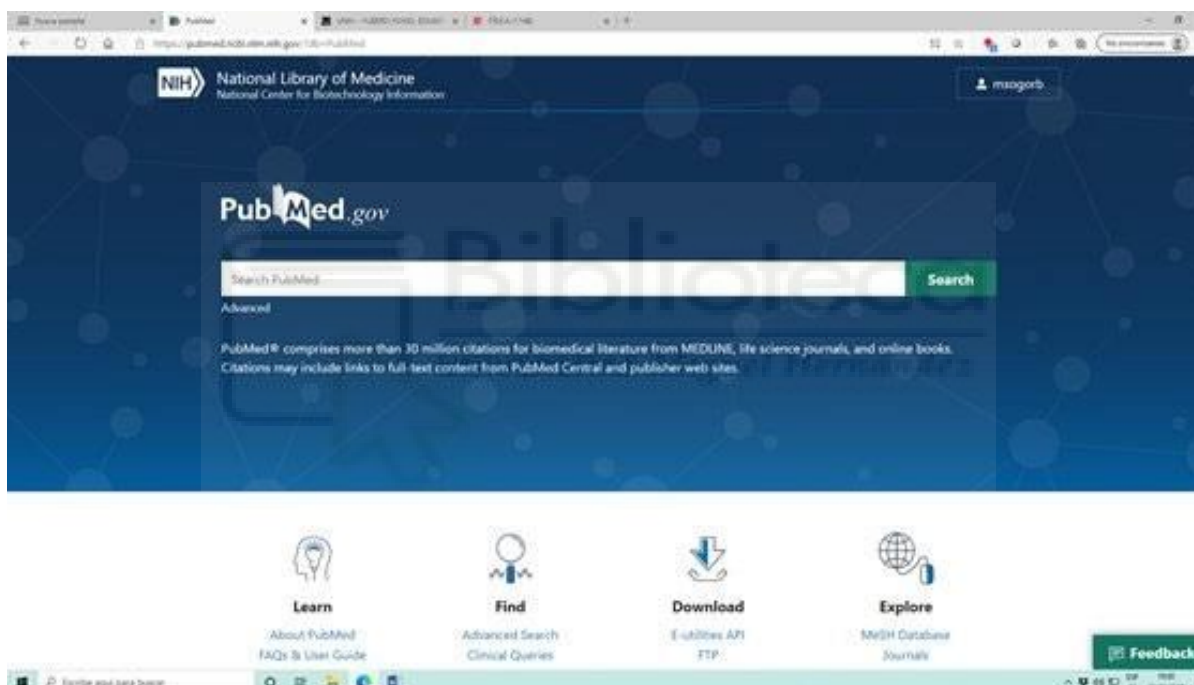


Figura 6: Página de entrada al buscador PubMed. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?db=PubMed>

Para realizar la búsqueda bibliográfica en PubMed se definieron los criterios de búsqueda con palabras clave como “radiación de teléfono móvil”, “campos electromagnéticos de baja frecuencia”, “hipersensibilidad electromagnética” y otras. Además, a fin de centrar la búsqueda y obtener un número de referencias que resultara manejable en términos prácticos, se aplicaron una serie de filtros. Las palabras clave y los filtros empleados en la búsqueda se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Palabras clave y filtros empleados en la búsqueda de las referencias bibliográficas analizadas en este TFG.

Crterios de búsqueda	Filtros
Electromagnetic hypersensitivity	Idioma: inglés
Mobile phone radiation	El criterio aparece en el título
Wireless damage	Especies: humanos
Electrosensitivity	Especies: otras especies
Low frequency electromagnetic fields	Años de publicación: 5 y 10 años atrás
Electromagnetic fields adverse effects	Tipo de revista: Medline
5G radiation	
Wireless radiation	

El idioma requerido fue el inglés ya que es la lengua en la que aparecen la mayoría de las publicaciones de PubMed y es una lengua que podíamos entender, se descartaron otros trabajos que aparecieron con estos criterios de búsqueda en idiomas como ruso o japonés.

Se exigió que el criterio de búsqueda apareciera de manera específica en el título del trabajo a fin de focalizar la búsqueda y evitar que aparecieran trabajos que no estuvieran directamente relacionados con el objetivo de este TFG.

Desde el primer momento quedó claro que no existía demasiada información epidemiológica y, por lo tanto, la búsqueda se realizó considerando como especies diana tanto humanos como animales. De hecho, para el campo “especie” se aplicaron dos filtros independientemente. Es decir, que se realizó una búsqueda centrada exclusivamente en humanos y una segunda búsqueda centrada exclusivamente en otros animales de experimentación.

Desde el principio se tuvo claro que la cantidad de información que se iba a manejar sería muy alta y por eso en una primera búsqueda se aplicó un filtro temporal de 10 años. Aun así, tras el primer escrutinio de la información se concluyó que el número de trabajos encontrados no era manejable en términos prácticos para un TFG y finalmente se decidió trabajar con un filtro de 5 años. La búsqueda de la información se realizó entre marzo y abril de 2020, por lo que cualquier información aparecida con posterioridad a esa fecha no se encuentra recogida en este TFG.

PubMed ofrece un filtro para seleccionar el tipo de revista entre: 1) Dental journals, 2) MEDLINE, y 3) Nursing journals. Se utilizó en filtro de MEDLINE ya que entendimos que revistas dentales y de cuidados de enfermería no deberían contener información relevante para los objetivos de este TFG.

La búsqueda bibliográfica se basó exclusivamente en estudios epidemiológicos y estudios experimentales con animales y, a fin de evitar posibles redundancias, se excluyeron de la búsqueda aquellas referencias etiquetadas por PubMed como “reviews”, “systemic reviews” y “meta-analysis”.



4 RESULTADOS

4.1 Resultados de la búsqueda bibliográfica con humanos

Se realizó una búsqueda bibliográfica en PubMed utilizando las palabras clave y criterios de búsqueda mostrados en la Tabla 2 y aplicando el filtro “*Especie: humano*”, el filtro temporal de 10 años y el resto de filtros mostrados en la Tabla 2. Esta búsqueda nos permitió localizar un total de 8 trabajos epidemiológicos centrados en la detección de efectos adversos sobre la salud humana de las radiaciones electromagnéticas. Dada la baja cantidad de información encontrada se decidió no aplicar cribados posteriores a estos 8 trabajos.

4.2 Resultados de la búsqueda bibliográfica con animales

Se realizó una búsqueda bibliográfica en PubMed utilizando las palabras clave y criterios de búsqueda presentados en la Tabla 2 y un filtro temporal de 10 años. El resultado de la búsqueda se resume en la Tabla 3 y muestra como el número total de trabajos encontrados fue de 125. Este número de trabajos se consideró demasiado alto para un trabajo de la profundidad de un TFG y resultaba poco manejable en términos prácticos. Es por ello que a continuación se repitió la búsqueda aplicando un filtro temporal de 5 años. Los resultados se muestran en la Tabla 3 y se observa como el número total de trabajos se redujo hasta 77, cifra que se consideró más aceptable. Es por ello, que toda la información que se analizó dentro de este TFG fue la obtenida aplicando el filtro de 5 años.

Tabla 3: Número de trabajos encontrados en PubMed según palabras clave.

Palabras clave	Filtro temporal 10 años	Filtro temporal 5 años
Electromagnetic hypersensitivity	0	0
Mobile phone radiation	45	23
Wireless damage	0	0
Electrosensibility	0	0
Low frequency electromagnetic fields	73	51
Electromagnetic fields adverse effects	2	1
5G radiation	0	0
Wireless radiation	5	2
TOTAL:	125	77

Las búsquedas realizadas con las palabras clave “*mobile phone radiation*” y “*low frequency electromagnetic fields*” fueron las que produjeron un mayor número de resultados (96% de los trabajos con el filtro temporal de 5 años y 94% con el filtro temporal de 10 años), mientras que las búsquedas con las palabras clave “*electromagnetic hypersensitivity*”, “*wireless damage*”, “*electrosensibility*” y “*5G radiation*” fueron totalmente infructuosas (Tabla 3).

4.3 Cribado preliminar trabajos en animales seleccionados en la búsqueda bibliográfica

Tras la selección inicial de trabajos a analizar se detectó que una parte de dichos artículos estaba dedicada analizar efectos terapéuticos sobre la salud humana (por ejemplo, en el tratamiento de lesiones musculares) o a describir aplicaciones de las radiaciones electromagnéticas sobre técnicas de diagnóstico. Dado que este TFG está focalizado en el análisis de los efectos adversos para la salud humana de las radiaciones electromagnéticas los artículos detectados aplicando el filtro de 5 años fueron cribados manualmente. Para ello, se leyó el resumen de cada uno de los 77 trabajos y se descartaron todos aquellos que no estuvieran relacionados con efectos adversos sobre la salud. Los resultados de este cribado manual se presentan en la Tabla 4 y se puede observar como este cribado redujo el número de trabajos a analizar hasta 69, es decir, que el 10.4% de los trabajos inicialmente seleccionados no estaban centrados en efectos adversos sobre la salud causados por exposición a radiación electromagnética.

Tabla 4: Número de trabajos encontrados en PubMed según palabras clave y centrados en efectos adversos sobre la salud.

Palabras clave	Trabajos totales	Trabajos centrados en efectos adversos sobre la salud
Mobile phone radiation	23	18
Low frequency electromagnetic fields	51	48
Electromagnetic fields adverse effects	1	1
Wireless radiation	2	2
TOTAL:	77	69

4.4 Análisis de la información bibliográfica según el sistema diana en estudios con animales

Los 69 trabajos seleccionados (Tabla 4) estaban tratados en el análisis de efectos adversos sobre diversos sistemas diana. A fin de focalizar el tema principal de este TFG se realizó un segundo cribado de estos 69 trabajos analizándolos según el sistema diana de los efectos adversos detectados. Los resultados de este segundo cribado se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Clasificación de los trabajos seleccionados según el sistema diana.

Sistema diana	Número de trabajos
Sistema inmune	8
Sistema cardiovascular	6
Sistema reproductor (fertilidad)	14
Desarrollo embrionario	5
Sistema nervioso	21
Hígado	3
Otros	12

El mayor número de trabajos (30.4%) estaba destinado al estudio de efectos sobre el sistema nervioso, mientras que los trabajos destinados a analizar el efecto de las radiaciones electromagnéticas sobre la fertilidad representó el segundo grupo más importante, con un 20% del total de trabajo.

4.5 Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad femenina en estudios con roedores

Cinco de los 14 trabajos seleccionados (Tabla 5) relacionados con potenciales alteraciones en la fertilidad como consecuencia de exposición a radiación electromagnética estuvieron relacionados con aspectos de la fertilidad femenina. La Tabla 6 resume las principales conclusiones de estos artículos, así como las condiciones experimentales que llevaron a dichas conclusiones.

Los estudios en animales que sugieren una potencial alteración de la fertilidad femenina por exposición a radiación electromagnética incluyen, para radiación de 1800 MHz, hiperplasia endometrial en ratas (Fadiloglu et al., 2019) (Tabla 6), alteraciones histopatológicas en ovario y útero junto con reducción en el número de folículos y cuerpos lúteos y estrés oxidativo en ratones (Shahin et al., 2017) (Tabla 6) y apoptosis y estrés oxidativo en ovario de *Drosophila melanogaster* (Manta et al., 2017) (Tabla 6). Además, la radiación de 935 MHz indujo reducciones en la tasa de fertilización *in vitro* y por lo tanto reducciones en la posibilidad de implantación de embriones en ratón (Chen et al., 2017) (Tabla 6).

Por otra parte, Alekperov y colaboradores (2019) demostraron que la radiación electromagnética de baja frecuencia (30 Hz) no altera significativamente la estructura y función de los ovarios de rata (Tabla 6).

Por el contrario, radiación también de baja frecuencia (50 Hz) indujo proliferación de células HeLa de cáncer de cuello de útero y de células CHO de ovario de hámster, si bien el efecto fue mayor en las células humanas que en las de roedor (Restrepo et al., 2016).

Tabla 6: Resumen de estudios sobre fertilidad femenina con animales. La biblioteca de la UMH no ofrecía acceso completo al estudio 3 por lo que en este caso se trabajó sobre el resumen.

Estudio	Especie animal	Exposición	Resultados	Conclusiones
Fadiloglu et al., 2019	Ratas albinas Wistar ovariectomizadas	4 mg/kg de estrógenos vía oral durante 14 días y radiación no ionizante de 1800 MHz durante 3 horas al día un total de 24 días. SAR para la región de la cabeza = 1.09 W/kg	Independientemente de los estrógenos se observa un crecimiento en la longitud epitelial y en la longitud epitelial de la parte luminal de la célula y un aumento de la densidad glandular	Se observa la relación entre exposición a radiación no ionizante e hiperplasia endometrial
Shahin et al., 2017	Ratones albinos hembra de doce semanas de edad (<i>Mus musculus</i>)	Radiación de 1800 MHz en varios modos de funcionamiento del teléfono móvil (marcar, llamada, recibir llamada y reposo) durante 3 horas al día un total de 120 días	En general se observaron cambios degenerativos significativos en los ovarios de todos los animales expuestos a radiación	La exposición prolongada a radiación de 1800 MHz produce efectos perjudiciales en los ovarios y útero, como alteraciones en la morfología uterina, también induce estrés oxidativo
Chen et al., 2017	Ratones hembra	Radiación electromagnética de 935 MHz, tres grupos, expuestos a 2 y 4 horas al día durante tres días consecutivos en tres intensidades diferentes, baja, media y alta	Los óvulos de las ratas expuestas a media y a alta intensidad (para ambos tiempos de exposición) mostraron una tasa de fecundación <i>in vitro</i> inferior a la de los óvulos de las ratas control no expuestas a radiación	La radiación electromagnética a 935 MHz puede reducir la probabilidad de implantación de un embrión.
Manta et al., 2017	<i>Drosophila melanogaster</i> de 2 a 4 horas de edad después de eclosionar la pupa.	Radiación no-ionizante procedente de un teléfono móvil GDM-Talk de 1800 MHz de frecuencia Intensidad de 10 V/m Densidad de flujo de 0.27 W/m ² SAR de 0.15 W/kg	Se detectó apoptosis 4 horas después de la exposición a la radiación. Esta radiación eleva los niveles de las especies reactivas de oxígeno. Se aumentó la expresión de genes relacionados con la autofagia	El tejido ovárico es sensible a radiación electromagnética
Alekperov et al., 2019	Ratas Wistar hembras de 9 semanas de edad	Exposición a radiación de un campo electromagnético de extremadamente baja frecuencia 30 Hz y 4 kA/m durante 2 horas al día y 12 semanas	No hay diferencias significativas en la duración del ciclo estrogénico. El peso medio de los ovarios fue el mismo en el grupo control y el expuesto a radiación. Tampoco se observaron alteraciones en la morfología de los ovarios	Ausencia de un efecto significativo sobre la estructura y función de los ovarios de estas ratas

4.6 Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad masculina en estudios con roedores

La revisión de los trabajos presentados en la Tabla 7 mostró los siguientes efectos en animales causados por exposición a radiación electromagnética:

- Cambios histológicos y morfológicos en el epitelio germinal de testículo de ratas tras exposición durante 70 días a radiación de 890-915 MHz en modo llamada (2 horas diarias) y en modo reposo (*stand-by*) (12 horas diarias) (Çetkin et al., 2016)
- Disminución del número de espermatozoides y aumento de alteraciones morfológicas en su cola probablemente mediados por estrés oxidativo y peroxidación lipídica tras exposición a radiación electromagnética 3G durante 45 días (2 horas diarias) (Gautam et al., 2018)
- Una disminución del tamaño de los túbulos seminíferos en ratones expuestos a radiación de 50 Hz 12 horas diarias durante 15 meses (Qi et al., 2015).

La búsqueda bibliográfica también detectó varias publicaciones donde se estudiaba el efecto de la radiación electromagnética de baja frecuencia (50 Hz) sobre células GC-2 de espermatozoides de ratón siguiendo un patrón intermitente de 5 minutos de exposición seguidos de 10 minutos de descanso durante un total de 72 horas. Los efectos detectados fueron (Tabla 7):

- Desregulación de la expresión de micro ARNs relacionados con la regulación del ritmo circadiano, la interacción entre citoquinas y sus receptores y la vía de señalización del p53 (Liu et al., 2015a)
- Desregulación de micro RNA miR-26b-5p, encargado de regular la ciclina 2, una proteína encargada de la regulación de quinasas (Liu et al., 2016).
- Desregulación de la metilación del DNA alterando la expresión de DNA metilasas (Liu et al., 2015b)

El significado biológico de estas todas alteraciones es incierto y los autores se limitan a proponer el uso de estos micro RNAs como biomarcadores de exposición a radiación de baja frecuencia.

La revisión bibliográfica también encontró trabajos donde no se pudo demostrar efectos sobre órganos reproductores tras exposición a radiación electromagnética. Así, Vereschako y Chueshova (2017) expusieron ratas a radiación electromagnética de 1745 MHz durante 90 días (8 horas diarias) y no encontraron un patrón claro de cambio de peso de órganos reproductores masculinos (epidídimo,

vesículas seminales y testículos). Además, tras 90 días de exposición, tampoco encontraron un efecto significativo la cantidad de espermatozoides y la fragmentación de su ADN.

4.5 Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad con humanos

La búsqueda bibliográfica detectó 8 diferentes estudios epidemiológicos. Las principales conclusiones de estos estudios fueron:

- Solo el 25% de pacientes autodiagnosticados como hipersensibles a radiación electromagnética fueron capaces de determinar realmente cuándo estaban expuestos a radiación de un teléfono móvil y cuando no y además no se registraron diferencias significativas en ritmo respiratorio y cardíaco y presión sanguínea entre momentos en que estos individuos estaban expuestos a radiación electromagnética procedente de un teléfono móvil (Mortazavi et al., 2011*)
- Una exposición aguda (15 o 30 minutos) a radiofrecuencia de 900 MHz de teléfono móvil causó un incremento significativo en las roturas de las hebras de DNA en células de raíz de cuero cabelludo (Çam and Seyhan, 2012*)
- En un ensayo doble ciego no se observaron alteraciones en la función cognitiva de individuos expuestos hasta 50 minutos a radiación de 420 MHz (10 mW/m²) (Wallace et al., 2012).
- Söderqvist y colaboradores (2015) no encontraron en un estudio ciego ninguna diferencia significativa en tres diferentes marcadores sanguíneos de daño cerebral entre voluntarios no expuestos a radiación y voluntarios expuestos a radiación de 890-MHz
- Un estudio doble ciego demostró que personas que se autodefinían como hipersensibles a radiación electromagnéticas no eran capaces de diferenciar cuándo efectivamente estaban siendo irradiados con radiofrecuencia de entre 50 y 925 MHz y cuando no (van Moorselaar et al., 2017)
- Witthöft y Rubin 2013 demostraron que los reportajes en medios de comunicación pueden contribuir a aumentar la cantidad de casos de hipersensibilidad electromagnética no sustentada por evidencias clínicas
- Los campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia fueron capaces de alterar ligeramente los electrocardiogramas de voluntarios expuestos a estos casos (Fang et al., 2016);
- Lv y colaboradores (2014) demostraron que la radiofrecuencia de 2.573 GHz también causó alteraciones en electroencefalogramas.

Tabla 7: Resumen de estudios sobre fertilidad masculina con animales. La biblioteca de la UMH no ofrecía acceso completo al estudio 2 por lo que en este caso se trabajó sobre el resumen.

Estudio	Especie animal	Exposición	Resultados	Conclusiones
Çetkin et al., 2016	Ratas albinas Wistar de entre 8 y 10 semanas de edad	Radiación de entre 890-915 MHz durante 70 días: 2 horas al día en modo llamada y 12 horas al día en modo reposo SAR = 0.96 W/kg.	Disminución significativa del volumen testicular, del volumen del tejido tubular, del diámetro del tubo seminífero y de la altura del epitelio germinal.	La exposición a campos electromagnéticos de teléfonos móviles produce una degeneración en el epitelio germinal
Vereschako and Chueshova 2017	Ratas	Exposición a radiación electromagnética de teléfono móvil de 1745 MHz de frecuencia y 0.2-20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ de densidad de potencia en distintos periodos de tiempo de 1 a 90 días durante 8 horas diarias	Aumento en el peso absoluto y relativo del epidídimo, vesículas seminales y el número de espermatozoides a los 7 días de la exposición. A los 14 días caída de los indicadores anteriores y después de una exposición más larga (30-60 días) se obtuvo un aumento del peso absoluto de los testículos. En todos los demás casos no se observan desviaciones significativas en el peso de los órganos reproductores.	No existe un patrón ni correlación clara entre exposición y efecto en órganos reproductores masculinos
Gautam et al., 2018	16 ratas adultas (10 semanas de edad) macho Wistar divididas en dos grupos de 8 ratas cada uno.	Exposición a radiación de teléfono móvil de 1915 MHz de frecuencia. SAR = 0.26 W/kg 45 días de exposición	Cambios significativos en el peso de los testículos, pero no en el peso de los epidídimos. Alteraciones significativas en el número de espermatozoides y su viabilidad. El grupo expuesto también mostró una variación en el tamaño de los tubos seminíferos y una degeneración vacuolar. Elevación significativa del nivel de especies reactivas de oxígeno en los espermatozoides expuestos.	Aumento del estrés oxidativo que altera la estructura testicular y cambia parámetros del esperma tales como morfología, viabilidad e integridad de la membrana
Liu et al., 2015a	Línea celular GC-2	Exposición a radiación de extremadamente baja frecuencia (50 Hz) con tres intensidades diferentes (1 mT, 2 mT y 3 mT) durante intervalos de 5 minutos de exposición seguidos de 10 minutos de reposo un total de 72 horas	La radiación no afecta no afectó ni a la morfología ni a la viabilidad de las células GC-2, por lo tanto, no afecta a su crecimiento. Tampoco afectó el ciclo celular ni indujo apoptosis. Se encontraron 55 miARNs cuya expresión cambió en respuesta a la exposición a esta radiación. Los que mostraron un mayor cambio en su expresión fueron miR-1965 y miR-224-5p para intensidades de 1 mT y 3 mT; respectivamente.	Desregulación de la expresión de micro ARNs relacionados con la regulación del ritmo circadiano, la interacción entre citoquinas y sus receptores y la vía de señalización del p53.
Liu et al., 2015b	Línea celular GC-2	Exposición a radiación de extremadamente baja frecuencia (50 Hz) con tres intensidades diferentes (1 mT, 2 mT y 3 mT) durante	Metilación del ADN menor en el grupo expuesto que en el control para 1 mT de intensidad, pero mayor para 2 mT y 3 mT. Las expresiones de las DNA metilasas 1 y 3b son más bajas que las del control para intensidades de 1 mT y 2 mT, pero significativamente mayores para la intensidad	La exposición a campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia (50Hz), puede inducir alteraciones de la

		intervalos de 5 minutos de exposición seguidos de 10 minutos de reposo un total de 72 horas	de 3 mT. Sin embargo, la expresión DNMT3a decrece en todas las intensidades, pero se incrementa para 3mT de intensidad. Miles de genes adquieren metilación aberrante cuando son expuestos a este tipo de campos electromagnéticos. Alteración de la metilación de 84 genes para 1 mT y 324 para 3 mT.	metilación del genoma y la expresión de las DNA metilasas
Liu et al., 2016	Línea celular GC-2	Exposición a radiación de extremadamente baja frecuencia (50 Hz) con tres intensidades diferentes (1 mT, 2 mT y 3 mT) durante intervalos de 5 minutos de exposición seguidos de 10 minutos de reposo un total de 72 horas	El nivel de expresión de miR-26b-5p fue alterado por las intensidades de 2 mT y 3 mT, pero no 1 mT. Esto no causó una influencia obvia en el crecimiento celular de GC-2, apoptosis y ciclo celular en células GC-2. La sobreexpresión de miR-26b-5p en las células GC-2 puede cambiar la expresión de ciclina 2 después de la radiación en intensidades de 3 mT.	Esta radiación alteró la expresión de miR-26b-5p en células GC-2 y de ciclina 2, una proteína encargada de la regulación de quinasas
Qi et al., 2015	Ratones C57BL/6NCrj preñadas (10 expuestas y 10 controles) que dieron a luz a ratones B6C3F1 que fueron expuestos a radiación	Radiación electromagnética de extremadamente baja frecuencia (50 Hz) y 500 mG, durante 1 semana (12 horas al día). La descendencia de los ratones C57BL/6NCrj fue expuesta a las mismas condiciones durante 15 meses y medio.	Los tubos seminíferos de los machos son significativamente más pequeños en los ratones expuestos.	La radiación causó alteraciones en el tamaño de algún órgano reproductor

4.6 Efectos de la radiación electromagnética sobre la fertilidad en animales no roedores

Fasseas y colaboradores (2015) estudiaron el efecto de la radiación electromagnética producida por teléfonos móviles, teléfonos inalámbricos y enrutadores WiFi sobre el nemátodo *Caenorhabditis elegans* encontrando que no había diferencias estadísticamente significativas entre los gusanos control y los gusanos expuestos en cuanto a tiempo de vida media, memoria, crecimiento y fertilidad.





5 DISCUSIÓN

Estudios con animales

La revisión bibliográfica desarrollada en este TFG ha encontrado varios trabajos donde se describen efectos adversos de radiación electromagnética sobre órganos reproductores masculinos y femeninos y células sexuales masculinas en roedores (Tabla 8).

Tabla 8: Resumen de efectos encontrados en experimentos con roedores.

	MACHOS		HEMBRAS	
	Efecto	Referencia	Efecto	Referencia
Alteraciones histopatológicas en órganos reproductores	Reducción de la altura del epitelio germinal de testículo	Çetkin et al., 2016	Ovario: Reducción del número de cuerpos lúteos y folículos maduros	Shahin et al., 2017
	Reducción tamaño de túbulos seminíferos	Çetkin et al., 2016 Qi et al., 2015	Hiperplasia endometrial	Fadiloglu et al., 2019
Alteraciones en células sexuales	Disminución del número de espermatozoides y aumento de alteraciones morfológicas en su cola	Gautam et al., 2018	-	-

En contraposición a los efectos descritos en la tabla anterior tenemos la ausencia de efecto sobre epidídimo, vesículas seminales, testículo y espermatozoides descrita en ratón por Vereschako y Chueshova (2017) tras exposición sub-crónica (90 días) a radiación de frecuencia de teléfono móvil. Del mismo modo, otro estudio con ratas también encontró ausencia de efectos en la estructura y función de ovarios (Alekperov et al., 2019).

También se encontró que la radiación electromagnética es capaz de inducir apoptosis en ovario de *Drosophila melanogaster* (Manta et al., 2017), pero este es un hallazgo cuya relevancia fisiológica para humanos es incierta ya que *Drosophila* es un modelo animal que se emplea habitualmente para analizar los mecanismos moleculares de toxicidad, pero no los efectos sobre la salud humana, donde se emplean preferentemente roedores. Algo similar ocurre con la falta de efectos sobre la fertilidad detectada en *Caenorhabditis elegans* (Fasseas et al., 2015). Es decir, que para ambos que los datos aportados con *Drosophila* y *Caenorhabditis* debemos considerar que este dato tal vez pudiera tener una cierta importancia medioambiental, pero tienen poco peso para valorar los efectos sobre la salud humana.

Estudios *in vitro* con células animales

Estudios *in vitro* han detectado: i) aumento de proliferación en células de ovario de hámster (Restrepo et al., 2016); y ii) alteraciones en la regulación de miRNAs y metilación de DNA en células GC-2 de espermatozoides de ratón (Liu et al., 2015a; Liu et al., 2015b; Liu et al., 2016).

El significado biológico de estas todas alteraciones es incierto y no necesariamente estarían relacionados con alteraciones en la fertilidad. De hecho, los autores se limitan simplemente a proponer el uso de estos micro RNAs como biomarcadores de exposición a radiación de baja frecuencia sin especular sobre potenciales efectos adversos sobre la reproducción.

Estudios con humanos

Se han detectado varios estudios epidemiológicos en humanos. Sin embargo, ninguno de ellos detecta efectos adversos sobre la fertilidad. Un estudio *in vitro* detectó un aumento de la proliferación en células HeLa de cuello de útero (Restrepo et al., 2016). Sin embargo, la relevancia fisiológica de este hallazgo es incierta porque las células HeLa son células cancerígenas, es decir, células cuya fisiología está alterada y por lo tanto el resultado no es directamente extrapolable a células del mismo órgano reproductor femenino sano.

Valoración global de los resultados

Se han encontrado resultados contradictorios en estudios con animales ya que, algunos estudios muestran efectos sobre órganos o células reproductoras y otros muestran ausencia de estos efectos. Cuando se analizan las condiciones experimentales de los diferentes estudios con animales se observa una enorme variabilidad, sobre todo en términos de frecuencia, régimen de exposición, potencia y tasa de absorción de energía. Esta variabilidad en las condiciones experimentales pueda explicar las discrepancias entre los diferentes estudios.

Otra debilidad común a la mayoría de los estudios es el bajo número de animales utilizados para cada condición experimental. En la mayoría de los casos el número era de 10 o inferior y solo en unos pocos estudios el número superaba ligeramente la decena. Esto se puede entender bajo el punto de vista bioético, pero también debemos tener presente que en los protocolos normalizados de ensayo para determinar el efecto de sustancias químicas sobre la reproducción el número mínimo de animales por cada condición experimental es de 25. Así pues, con tamaños de muestra tan bajos, es posible que efectos no demasiado evidentes hayan quedado enmascarados por la variabilidad biológica.

En la mayoría de los estudios analizados también resulta difícil valorar cuál es la relevancia fisiológica de dichas condiciones experimentales. Es decir, que muy pocos estudios ofrecen datos sobre, por ejemplo, la tasa de absorción específica de energía en W/m^2 , lo cual nos permitiría saber si la radiación

empleada está, o no, dentro de los valores límite ambientales tolerables. En concreto esta información se ha encontrado en solamente 4 estudios (Tablas 6 y 7) con valores de entre 0.15 (Manta et al., 2017), 0.26 (Gautam et al., 2018), 0.96 (Çetkin et al., 2016) y 1.09 (Fadiloglu et al., 2019) W/kg. Estos valores fueron en todos los casos superiores al valor límite ambiental para cuerpo entero en público en general (0.08 W/kg) (Tabla 1) y en algunos casos también para dicho valor para exposición de trabajadores (0.4 W/kg) (Tabla 1). Esto sugiere que las condiciones experimentales de estos estudios podrían no corresponder totalmente con situaciones fisiológicamente relevantes.

Igualmente, también se ha echado de menos en muchos estudios una descripción más clara de la distancia entre la fuente emisora de radiación y los animales. Tenemos que tener en cuenta que en condiciones fisiológicas el terminal móvil está situado a una distancia de los órganos genitales mayor en humanos de lo que estaría en animales, por lo que la extrapolación directa de los resultados de animales a humanos también debe realizarse con precaución.

Es de destacar que no se han encontrado estudios con animales que realmente midan efectos adversos sobre la fertilidad. Es decir, estudios con un protocolo similar al de las guías estandarizadas para evaluar el efecto de las sustancias químicas sobre la reproducción. En estos estudios, se deberían de irradiar machos y hembras durante varios ciclos de ovulación y espermatogénicos permitiendo a continuación aparearse a estos animales para observar si hay efectos reales sobre la fertilidad o no. Solamente se encontró un estudio con un diseño comparable a este donde se irradiaron hembras durante la ovulación y a continuación se evaluó la capacidad de los óvulos de ser fertilizados *in vitro*, encontrándose una cierta reducción en la tasa de fertilización a dos, no muestran efecto adverso alguno para la salud de los animales expuestos.

6 CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA



6.1 Conclusiones

Ninguno de los estudios experimentales detectados se ha realizado siguiendo protocolos estandarizados para el estudio de efectos sobre la fertilidad ni bajo condiciones de buenas prácticas de laboratorio, por lo que todos los estudios presentados en este TFG carecen de validez reguladora.

En este TFG no se han encontrado evidencias experimentales robustas que apoyen la hipótesis de que la exposición a radiación electromagnética pudiera alterar la fertilidad.



6.2 Direcciones Futuras

Sería necesario realizar estudios con validez reguladora para determinar si la radiación electromagnética tiene efectos sobre la fertilidad. Dichos estudios deberían ser realizados por laboratorios que actuaran bajo buenas prácticas de laboratorio y se deberían ajustar a alguno de los protocolos normalizados de para el estudio de alteraciones en la fertilidad causados por sustancias químicas; por ejemplo, el protocolo OECD 415 de toxicidad a la reproducción de 1 generación; el protocolo OECD 443 de toxicidad a la reproducción en 1 generación extendida; o el protocolo OECD 416 de toxicidad a la reproducción en dos generaciones.





7 BIBLIOGRAFÍA

Alekperov SI, Suetov AA, Efremov VI, Kimstach AN, Lavrenenok LV. The Effect of Electromagnetic Fields of Extremely Low Frequency 30 Hz on Rat Ovaries. *Bull Exp Biol Med.* 2019; 166(5):704-707.

Çam ST, Seyhan N. Single-strand DNA breaks in human hair root cells exposed to mobile phone radiation. *Int J Radiat Biol.* 2012; 88(5):420-4.

Çetkin M, Kızıllkan N, Demirel C, Bozdağ Z, Erkıılıç S, Erbağcı H. Quantitative changes in testicular structure and function in rat exposed to mobile phone radiation. *Andrologia.* 2017; 49(10).

Chen H, Qu Z, Liu W. Effects of Simulated Mobile Phone Electromagnetic Radiation on Fertilization and Embryo Development. *Fetal Pediatr Pathol.* 2017; 36(2):123-129.

Cutnell JD & Johnson KW (2007a) Waves and sound. pp: 477-510. En: *Physics.* John Wiley & Sons. 7a edición. ISBN: 0-471-66315-8.

Cutnell JD & Johnson KW (2007b) Electromagnetic waves. pp: 753-782. En: *Physics.* John Wiley & Sons. 7a edición. ISBN: 0-471-66315-8.

Fadiloglu E, Tapisiz OL, Unsal M, Fadiloglu S, Celik B, Mollamahmutoglu L. Non-Ionizing Radiation Created by Mobile Phone Progresses Endometrial Hyperplasia: An Experimental Rat Study. *Arch Med Res.* 2019; 50(2):36-43.

Fang Q, Mahmoud SS, Yan J, Li H. An Investigation on the Effect of Extremely Low Frequency Pulsed Electromagnetic Fields on Human Electrocardiograms (ECGs). *Int J Environ Res Public Health.* 2016; 13(11):1171.

Fasseas MK, Fragopoulou AF, Manta AK, Skouroliakou A, Vekrellis K, Margaritis LH, Syntichaki P. Response of *Caenorhabditis elegans* to wireless devices radiation exposure. *Int J Radiat Biol.* 2015; 91(3):286-93.

Gautam R, Singh KV, Nirala J, Murmu NN, Meena R, Rajamani P. Oxidative stress-mediated alterations on sperm parameters in male Wistar rats exposed to 3G mobile phone radiation. *Andrologia.* 2019; 51(3):e13201

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Disponible en: <https://www.icnirp.org/en/applications/5g/5g.html> (Fecha de última consulta: 30 de octubre de 2020)

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) *Health Phys* 118(5): 483–524; 2020
Disponibile en: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf> (Fecha de última consulta: 30 de octubre de 2020)

Liu Y, Liu WB, Liu KJ, Ao L, Cao J, Zhong JL, Liu JY. Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Affect the miRNA-Mediated Regulation of Signaling Pathways in the GC-2 Cell Line. *PLoS One*. 2015a; 10(10):e0139949.

Liu Y, Liu WB, Liu KJ, Ao L, Zhong JL, Cao J, Liu JY. Effect of 50 Hz Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields on the DNA Methylation and DNA Methyltransferases in Mouse Spermatocyte-Derived Cell Line GC-2. *Biomed Res Int*. 2015b; 237183.

Liu Y, Liu WB, Liu KJ, Ao L, Cao J, Zhong JL, Liu JY. Overexpression of miR-26b-5p regulates the cell cycle by targeting CCND2 in GC-2 cells under exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Cell Cycle*. 2016; 15(3):357-67.

Lv B, Chen Z, Wu T, Shao Q, Yan D, Ma L, Lu K, Xie Y. The alteration of spontaneous low frequency oscillations caused by acute electromagnetic fields exposure. *Clin Neurophysiol*. 2014; 125(2):277-86.

Manta AK, Papadopoulou D, Polyzos AP, Fragopoulou AF, Skouroliakou AS, Thanos D, Stravopodis DJ, Margaritis LH. Mobile-phone radiation-induced perturbation of gene-expression profiling, redox equilibrium and sporadic-apoptosis control in the ovary of *Drosophila melanogaster*. *Fly (Austin)*. 2017; 11(2):75-95.

Mortazavi SM, Mahbudi A, Atefi M, Bagheri Sh, Bahaedini N, Besharati A. An old issue and a new look: electromagnetic hypersensitivity caused by radiations emitted by GSM mobile phones. *Technol Health Care*. 2011; 19(6):435-43.

Proyecto Esopo. Disponible en: <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/eem/> (Fecha de última consulta: 30 de octubre de 2020)

Qi G, Zuo X, Zhou L, Aoki E, Okamura A, Watanebe M, Wang H, Wu Q, Lu H, Tuncel H, Watanabe H, Zeng S, Shimamoto F. Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) exposure on B6C3F1 mice. *Environ Health Prev Med*. 2015; 20(4):287-93.

Restrepo AF, Tobar VE, Camargo RJ, Franco E, Pinedo CR, Gutierrez O. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on in-vitro cellular cultures HeLa and CHO. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2016; 2016:4193-4196.

Shahin S, Singh SP, Chaturvedi CM. Mobile phone (1800MHz) radiation impairs female reproduction in mice, *Mus musculus*, through stress induced inhibition of ovarian and uterine activity. *Reprod Toxicol*. 2017; 73:41-60.

Sociedad Española de Protección Radiológica. Las radiaciones no ionizantes en telefonía móvil: preguntas y respuestas. Disponible en: <https://www.sepr.es/archivo-doc/recursos/otros/1865-las-radiaciones-no-ionizantes-en-telefonía-movil-pdf> (Fecha de última consulta: 30 de octubre de 2020)

Söderqvist F, Carlberg M, Hardell L. Biomarkers in volunteers exposed to mobile phone radiation. *Toxicol Lett*. 2015; 235(2):140-6.

Sogorb MA, Vilanova E (2004) Técnicas espectroscópicas. pp: 67-96. En: Técnicas analíticas de contaminantes químicos. Díaz de Santos. ISBN: 84-7978-662-0.

van Moorselaar I, Slottje P, Heller P, van Strien R, Kromhout H, Murbach M, Kuster N, Vermeulen R, Huss A. Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility - A double-blind randomized controlled trial. *Environ Int*. 2017; 99:255-262.

Vereschako GG, Chueshova NV. [Reaction of Reproductive System and Epididymal Spermatozoa .of Rats to Electromagnetic Radiation from Mobile Phone (1745 MHz) of Various Duration]. *Radiats Biol Radioecol*. 2017; 57(1):71-76.

Wallace D, Eltiti S, Ridgewell A, Garner K, Russo R, Sepulveda F, Walker S, Quinlan T, Dudley S, Maung S, Deeble R, Fox E. Cognitive and physiological responses in humans exposed to a TETRA base station signal in relation to perceived electromagnetic hypersensitivity. *Bioelectromagnetics*. 2012; 33(1):23-39.

Witthöft M, Rubin GJ. Are media warnings about the adverse health effects of modern life self-fulfilling? An experimental study on idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF). *J Psychosom Res*. 2013; 74(3):206-12.