



Campos electromagnéticos y salud pública

Síntomas y radiofrecuencia: la evidencia científica más robusta revisada por la OMS

Un análisis sistemático de estudios en humanos y animales concluye que no se muestran asociaciones consistentes entre la exposición prolongada a **CEM-RF**, ya sea por uso de dispositivos de comunicación (exposición de cabeza) o por fuentes ambientales u ocupacionales (exposición de cuerpo entero), y la aparición de **tinnitus, migraña, cefalea, alteraciones del sueño** o puntuaciones compuestas de síntomas en población general y trabajadora.

Madrid, 2 de Marzo de 2026

2. Síntomas y EHS

Este segundo bloque temático aborda de forma integrada la evidencia sobre síntomas no específicos —como cefalea, alteraciones del sueño, tinnitus o puntuaciones compuestas de malestar— en relación con la exposición a CEM-RF, así como la cuestión metodológicamente clave de si las personas perciben, o creen percibir, la presencia de dicha exposición.

La encuesta internacional de expertos que priorizó los temas para la evaluación de la OMS (Verbeek et al., 2021) situó estos síntomas/EHS (*electrohypersensitivity* o Idiopathic Environmental Intolerance attributed to Electromagnetic Fields- *IEI-EMF*) entre las áreas de mayor interés por su relevancia para la salud pública y la inquietud social, lo que motivó el encargo de dos revisiones sistemáticas complementarias en población humana: una experimental (provocación controlada, aguda) y otra observacional (exposición repetida o de larga duración).

La separación en dos revisiones permite responder a preguntas distintas y limitaciones éticas y metodológicas propias de cada enfoque. Los ensayos controlados en condiciones “ciegas” permiten probar efectos inmediatos y, crucialmente, aislar el nocebo mediante comparaciones “*sham*” (exposición simulada) vs. real; pero no pueden ni deben extenderse a exposiciones prolongadas por razones prácticas y éticas. Por ello, los posibles efectos con latencias mayores o vinculados a patrones de uso/ambiente se investigan con estudios longitudinales (cohortes y, cuando procede, casos-control) en la vida real. Así, la revisión experimental exploró síntomas agudos y capacidad de percepción bajo exposición cabeza o cuerpo entero en laboratorio/terreno (Bosch-Capblanch et al., 2024), mientras que la revisión observacional evaluó tinnitus, migraña/cefalea, alteraciones del sueño y escalas compuestas de malestar en relación con fuentes cercanas (p. ej., uso de teléfonos) y fuentes ambientales (emisores fijos/WiFi) durante ≥ 1 semana (Röösli et al., 2024).

La revisión experimental incluye ensayos paralelos o *cross-over*, en voluntarios con y sin EHS, con participantes y/o investigadores cegados a la condición de exposición; compara exposición activa vs. *sham* y analiza tanto síntomas autorreportados (p. ej., cefalea, sueño, puntuaciones compuestas) como la percepción del estado de exposición (sensibilidad/especificidad; razón O/E de aciertos). Emplea metaanálisis de efectos aleatorios (SMD para síntomas) y OHAT-RoB por dominios con sistema 3-Tier, además de GRADE por desenlace.

La revisión observacional incluye cohortes (y casos-control para tinnitus/migraña), en población general y trabajadora, con estimaciones de exposición local (cabeza) y cuerpo entero; fija cinco hipótesis primarias (tinnitus, migraña, cefalea $\leftrightarrow$ exposición de cabeza; sueño y puntuaciones compuestas $\leftrightarrow$ exposición de cuerpo entero) y analiza tendencias dosis-respuesta por unidad (p. ej., 100 min/sem de llamadas; 1 V/m para campo incidente), integrando resultados con metaanálisis de efectos aleatorios y OHAT-RoB (3-Tier) y OHAT-GRADE por desenlace.

Ambas revisiones, que contaban con sus respectivos protocolos publicados y registrados en PROSPERO (Bosch-Capblanch et al., 2022; Röösli et al., 2021), se han desarrollado en el marco de los estándares internacionales: WHO Handbook, COSTER, PRISMA (incluida la estructura del diagrama de flujo), búsqueda en múltiples bases (Medline, Web of Science, PsycInfo, Cochrane, Embase) y EMF-Portal, selección/extracción en duplicado, evaluación de riesgo de sesgo (OHAT) con clasificación Tier-1/2/3 centrada en los dominios clave para RF (aleatorización/ocultación, caracterización de exposición, cegamiento/medición de desenlace, pérdida de participantes (*attrition*) y reporte selectivo en la experimental; y

confusión, exposición, desenlace, métodos estadísticos y causalidad inversa en la observacional). La certeza se valora con OHAT-GRADE por desenlace (alta/moderada/baja/muy baja) atendiendo a RoB, inconsistencia, indirectitud, imprecisión y sesgo de publicación.

Manteniendo la trazabilidad PECO y la coherencia de métricas, hemos organizado el bloque en dos subapartados consecutivos basados en las dos revisiones, experimental y observacional.

La lectura cruzada de ambas revisiones permite distinguir entre asociaciones ligadas a la creencia/percepción (susceptibles al nocebo y a errores de medida) y efectos biológicos plausibles bajo exposiciones cuantificadas; y separar los fenómenos agudos (minutos-horas, bajo control “ciego”) de los subagudos/crónicos (semanas-meses, bajo condiciones reales). En términos de política científica, este bloque constituye la mejor síntesis disponible y metodológicamente homogénea para informar, con certeza graduada, sobre la relación entre CEM-RF y la ocurrencia de síntomas, sin extrapolar más allá de lo que muestran los datos y con reconocimiento explícito de incertidumbres persistentes (medición de exposición en vida real, diferenciación entre uso de dispositivos y dosis RF, control de confusión por estilo de vida).

2.1. Revisión estudios experimentales

2.1.1. Referencia completa del artículo

Título. *The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies.* Bosch-Capblanch, X., Esu, E., Moses Oringanje, C., Dongus, S., Jalilian, H., Eysers, J., Auer, C., Meremikwu, M., Rössli, M. **Revista y datos bibliográficos.** *Environment International*, 187, 108612. (2024). DOI: 10.1016/j.envint.2024.108612. **Registro de protocolo:** PROSPERO CRD42021264440.

2.1.2. Objetivos y preguntas de investigación

El objetivo principal de esta revisión fue valorar de forma sistemática si la exposición aguda a CEM-RF, a niveles por debajo de las restricciones básicas para la población general (ICNIRP), se asocia a cambios inmediatos en síntomas no específicos autorreferidos y si dichos cambios pueden atribuirse a un mecanismo físico ligado a la exposición más allá de un efecto nocebo. En paralelo, se planteó como objetivo específico determinar si las personas, con y sin EHS (IEI-EMF por sus siglas en inglés), son capaces de percibir con precisión la presencia o ausencia de exposición real en condiciones controladas, es decir, si su rendimiento para discriminar entre exposición activa y *sham* supera lo esperable por azar.

La formulación PECO se mantuvo estricta y alineada con el resto de la serie metodológica. La población estuvo constituida por voluntarios humanos de cualquier edad y sexo, procedentes tanto de la población general como de grupos que se autoidentifican con EHS, sin requisitos clínicos adicionales más allá de esta autoatribución. La exposición comprendió situaciones de irradiación aguda, en una o varias sesiones, mediante fuentes de campo cercano (p. ej., teléfonos móviles, terminales TETRA u otros dispositivos junto a la cabeza) o de campo lejano (p. ej., simuladores de estaciones base), siempre dentro del rango 100 kHz–300 GHz y con niveles expresados preferentemente en SAR localizada para exposición de cabeza o en intensidad de campo/densidad de potencia para exposición de cuerpo entero, garantizando que los valores se situaban por debajo de los límites regulatorios. El comparador fue una condición *sham* o una condición de menor exposición definida a priori, bajo diseños paralelos o *cross-over* con cegamiento al menos de los

participantes. Estos ensayos controlados consisten en que cada participante recibe tanto la exposición real como la simulada bajo condiciones cegadas, lo que resulta esencial aquí porque permite aislar los efectos fisiológicos de la RF de los síntomas inducidos por expectativas o por el efecto nocebo. Los desenlaces incluyeron, como resultados primarios, síntomas no específicos autorreportados, fundamentalmente cefalea, alteraciones subjetivas del sueño y puntuaciones compuestas de malestar o bienestar, y, de forma complementaria, la capacidad de los voluntarios para identificar el estado de exposición (real vs. *sham*).

Con este marco, las preguntas de investigación se estructuraron en dos grupos. En primer lugar, se evaluó si, en voluntarios con y sin EHS, la exposición aguda a CEM-RF frente a ausencia o menor exposición se relaciona con cambios inmediatos en la intensidad de los síntomas (PECO 1), diferenciando explícitamente los análisis en población general, en participantes con EHS y en conjuntos combinados cuando procedía. En segundo lugar, se investigó si distintos niveles de exposición dentro del rango estudiado se asocian con gradientes en la intensidad de los síntomas (PECO 2), es decir, si existe una relación exposición–respuesta compatible con un efecto biológico de la RF. Por último, se planteó de manera específica si los voluntarios, de ambos grupos, pueden percibir con exactitud el estado de exposición por encima del azar (PECO sobre percepción), utilizando medidas como la sensibilidad, la especificidad, el área bajo la curva ROC y el cociente observado/esperado de aciertos. Estas métricas, basadas en curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y en el número de aciertos esperados por azar, permiten evaluar de forma directa si los participantes discriminan realmente entre exposición real y simulada o si sus respuestas reflejan simples patrones de adivinación condicionados por expectativas.

2.1.3. Metodología

El protocolo (Bosch-Capblanch et al., 2022) se registró en PROSPERO (CRD42021264440) antes de iniciar la síntesis, fijando objetivos, preguntas PECO, criterios de inclusión/exclusión, fuentes de información y estrategia analítica. La revisión se alineó con el WHO Handbook para el desarrollo de guías y con las recomendaciones COSTER, y su reporte siguió PRISMA, lo que asegura transparencia en el flujo de estudios, decisiones de inclusión y justificación de análisis secundarios.

Búsqueda y fuentes

Las fuentes principales fueron Medline, Web of Science, PsycInfo, Cochrane Library, Epistemonikos, Embase y EMF-Portal, con búsquedas hasta abril de 2022, sin restricciones de idioma ni de fecha. Cada estrategia se adaptó a la sintaxis de la base de datos y está documentada en el protocolo y en material suplementario, lo que permite su replicación. En coherencia con el enfoque de la serie, sólo se incluyeron estudios publicados y revisados por pares; la literatura gris no se buscó de forma sistemática, de modo que todos los estudios considerados comparten un mínimo homogéneo de control de calidad editorial.

Criterios de elegibilidad

Se incluyeron ensayos experimentales en personas de cualquier edad, género, ocupación o nivel socioeconómico, tanto de población general como con EHS. La exposición se restringió a campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos en el rango 100 kHz–300 GHz, abarcando situaciones de campo cercano (p. ej., terminales) y de campo lejano (p. ej., estaciones base). Para ser elegible, cada estudio debía aportar al menos una estimación cuantitativa de la exposición conforme al protocolo. Se exigió que, como mínimo, participantes o investigadores estuvieran cegados a la condición de exposición y,

en las estimaciones globales, sólo se consideraron experimentos con participantes cegados, con el fin de reducir el impacto de expectativas y nocebo.

Se excluyeron estudios con señales cuya energía se situaba >10 % fuera del rango 100 kHz–300 GHz, así como trabajos centrados en interferencias con implantes (marcapasos, implantes cocleares), al tratarse de un mecanismo distinto y ya bien caracterizado. En cuanto a comparadores, se exigió al menos una condición de exposición activa y una condición control, ya fuera simulada (*sham*) o de menor nivel de exposición. Se consideraron dos grandes tipos de desenlaces: (1) síntomas no específicos autorreportados (cefalea, medidas de calidad del sueño, puntuaciones compuestas de malestar, entre otros), definidos como desenlaces principales; y (2) percepción de la exposición, entendida como capacidad de discriminar entre condiciones reales y *sham*.

Se admitieron diseños paralelos y *cross-over* realizados en laboratorio o en otros entornos (hogar, lugar de trabajo), siempre que cumplieran los criterios anteriores. No se excluyeron estudios por intensidad ni duración de la exposición, siempre que las condiciones se mantuvieran dentro del rango de RF definido.

Selección y extracción de datos

Tras la recuperación de referencias, se eliminaron duplicados y se cribaron títulos y resúmenes para descartar estudios en animales o manifiestamente fuera de alcance. Los textos completos potencialmente elegibles se evaluaron por duplicado e independiente por dos revisores, resolviendo discrepancias por consenso o con la intervención de un tercer revisor. Cuando un mismo estudio se describía en varios artículos con resultados complementarios, se integró la información y se trató como un único estudio; a la inversa, si un artículo contenía varios ensayos, se extrajeron como estudios diferenciados.

La extracción de datos se realizó también por revisores múltiples e independientes, con comprobación cruzada y una regla explícita de abstención: si algún autor de la revisión figuraba como autor de un estudio incluido, se le excluía de las tareas clave sobre ese estudio. Las discrepancias se resolvieron revisando la fuente primaria y, en última instancia, mediante la intervención de un tercer revisor. Se contactó con autores cuando faltaban datos críticos para estimar efectos o exposiciones, y las hipótesis/decisiones adoptadas se documentaron en el material suplementario.

Evaluación del riesgo de sesgo (RoB)

La validez interna se juzgó con la herramienta OHAT/NTP (adaptada a ensayos humanos), centrada en dominios relevantes para ensayos controlados: aleatorización del nivel de exposición y ocultación de la asignación; cegamiento; pérdidas/*attrition* y exclusiones; caracterización de la exposición; medición y reporte de desenlaces; fuentes de financiación y otros sesgos. Cada criterio se calificó como (++/+/-/--/NR) y, a nivel de desenlace, se integró en un sistema 3-Tier (1–3) basado en tres elementos clave: (1) aleatorización/ocultación; (2) exposición; (3) desenlace. Un resultado Tier-1 requiere bajo riesgo en los criterios clave sin sesgos críticos; Tier-3 implica alto riesgo en elementos clave; Tier-2 representa situaciones intermedias. El uso de mapas de calor y tablas guía la interpretación transversal cuando el RoB varía entre estudios o entre desenlaces de un mismo estudio.

Medidas de efecto, decisiones analíticas y síntesis cuantitativa

Para los síntomas medidos en escala continua, la medida principal fue la diferencia de medias estandarizada (SMD). Cuando los estudios informaban resultados dicotómicos (p. ej., presencia/ausencia de un síntoma) u otras medidas (OR), se convirtieron a SMD cuando fue posible, para mantener la comparabilidad entre escalas y desenlaces. Cuando una misma categoría de síntoma se medía con múltiples escalas o en varios puntos

temporales, los autores estandarizaron las categorías y seleccionaron un único outcome por estudio y desenlace (priorizando la máxima severidad o la medición más próxima al final de la exposición), con el fin de evitar que un mismo estudio contribuyera varias veces a un mismo metaanálisis.

Para la percepción de la exposición, se extrajeron, siempre que fue posible, sensibilidad y especificidad para la detección de la condición “campo presente/ausente” y se elaboraron curvas ROC. Dado que muchos estudios sólo informaban tasas globales de acierto, se calculó adicionalmente un cociente observado/esperado (O/E) de aciertos por diseño y grupo, donde un valor O/E=1 indica un rendimiento compatible con el azar. Sobre estas medidas se aplicaron metaanálisis de efectos aleatorios y modelos específicos para resumir el comportamiento de las curvas ROC en población general y en personas con EHS. En términos interpretativos, un área bajo la curva (AUC) menor a 0,5 refleja un desempeño no mejor que el azar, parámetro que se emplea explícitamente en la discusión para argumentar la ausencia de capacidad de detección fiable.

En cuanto a la exposición, cuando los estudios de campo lejano informaban campos incidentes ($V \cdot m^{-1}$, $A \cdot m^{-1}$) o densidad de potencia ($W \cdot m^{-2}$), estas magnitudes se transformaron en estimaciones de SAR promedio de cuerpo entero ($W \cdot kg^{-1}$) utilizando las relaciones entre restricciones básicas y niveles de referencia de las guías ICNIRP 2020 en región de campo lejano. Esta armonización permitió explorar gradientes exposición–respuesta en una escala dosimétrica común y comparar de forma coherente con las exposiciones de cabeza, habitualmente reportadas en SAR localizada.

Los metaanálisis se realizaron con modelos de efectos aleatorios, incorporando la variabilidad esperable entre estudios en poblaciones, condiciones de exposición y escalas de medida. Se emplearon procedimientos estándar (DerSimonian-Laird) implementados en R (paquetes *metafor*/meta para SMD, y *mada* para síntesis ROC), y se planificaron subgrupos a priori por localización de exposición (cabeza vs. cuerpo entero) y tipo de población (general vs. EHS), coherentes con las preguntas PECO. La heterogeneidad se describió con I^2 y τ^2 , y cuando el número de estudios lo permitió ($k \geq 5$) se exploró asimetría de embudo mediante el test de Egger para detectar sesgo de publicación.

Además, se ajustaron meta-regresiones para investigar relaciones exposición–respuesta, utilizando el nivel de exposición (SAR o campo incidente) como moderador continuo en los pares exposición–desenlace principales. Dado el predominio de diseños *cross-over*, se implementó un análisis de sensibilidad recalculando los errores estándar asumiendo una correlación intraindividuo $r=0,5$ entre periodos, con el objetivo de explorar el impacto de la correlación no modelizada sobre la precisión de las estimaciones y la significación de los efectos.

Certeza de la evidencia (OHAT-GRADE)

La certeza de la evidencia se valoró por desenlace (no por estudio), aplicando una versión elaborada de GRADE coherente con el marco OHAT-GRADE utilizado en la serie de revisiones de la OMS. Dado que la evidencia procedía de ensayos aleatorizados y estudios *cross-over*, el nivel inicial se consideró alto y se degradó según cinco dominios: riesgo de sesgo, inconsistencia entre estudios, indirectitud (p. ej., selección de participantes jóvenes, limitaciones en la caracterización de exposición), imprecisión (intervalos de confianza amplios, tamaño muestral o k reducido) y sesgo de publicación.

De forma explícita, los autores consideraron como “sin efecto” aquellas combinaciones exposición–desenlace en las que el SMD global fue $<0,2$ en valor absoluto y el IC95 % incluía el cero, criterio alineado con la interpretación estándar de efectos triviales y que se utilizó de forma sistemática para traducir los resultados estadísticos en mensajes

sustantivos sobre la ausencia de efectos clínicamente relevantes bajo las condiciones experimentales estudiadas.

2.1.4. Resultados

Flujo PRISMA

Se identificaron 8.908 registros; tras eliminar 1.470 duplicados, se cribaron 7.439 registros únicos por título y resumen. De ellos, 106 pasaron a lectura completa y 41 estudios cumplieron los criterios de inclusión, mientras que 65 se excluyeron por motivos predefinidos (diseño, rango de exposición, ausencia de brazo control adecuado, falta de cegamiento o desenlaces no pertinentes).

Características de los estudios incluidos

Predominaron los ensayos *cross-over* (38/41; 93 %), con solo 3 ensayos paralelos (7 %). La muestra total combinada fue de 2.874 participantes (media ≈ 70 por estudio). La mayoría de los estudios se realizaron en Europa —principalmente en Alemania y Reino Unido (7 estudios cada uno) y Suecia, junto con otros países europeos como Hungría, Dinamarca, Finlandia, Italia, Noruega, Suiza, Países Bajos y Eslovaquia—, con contribuciones adicionales de Asia (Corea, Japón, Taiwán) y Oceanía (Australia). La población de estudio estuvo formada casi exclusivamente por adultos o adultos jóvenes sanos; sólo un estudio incluyó personas mayores.

En cuanto a la exposición, 32 estudios (78 %) emplearon configuraciones de campo cercano y 8 (20 %) de campo lejano, con 1 estudio mixto (2 %). En 31 estudios la exposición fue predominantemente localizada en cabeza y en 10 de cuerpo entero. Treinta estudios informaron la exposición en términos de SAR localizada (intervalo $0,01\text{--}6,0\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$; mediana $1,4\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$), mayoritariamente por debajo de las restricciones básicas de ICNIRP ($10\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ocupacional; $2\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ población general); ocho estudios de campo lejano informaron la exposición como intensidad de campo ($1,0\text{--}19,4\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$; mediana $1,9$; media $\approx 6,4\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$).

En desenlaces, 30 estudios aportaron datos sobre síntomas y 23 sobre percepción de la exposición, 12 de ellos sobre ambos tipos de resultado. Los síntomas recogidos incluyeron cefalea, alteraciones subjetivas del sueño, fatiga, dolor, ansiedad, mareo, síntomas cutáneos y otros síntomas inespecíficos. Para el metaanálisis se re-codificaron y estandarizaron de forma que valores mayores indicaran peor síntoma o menor calidad de sueño, garantizando la comparabilidad entre estudios y escalas.

Resultados cuantitativos (síntesis de metaanálisis)

A continuación, se presentan los pares exposición–desenlace para los que se dispuso de metaanálisis ($k \geq 3$, salvo indicación), indicando SMD (IC95 %), número de estudios (k), heterogeneidad (I^2) y juicio de certeza OHAT-GRADE.

Población general

Cefalea — exposición en cabeza ($0,5\text{--}1,6\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$). SMD $0,08$ (IC95 % $-0,07$ a $0,22$), $k=7$, $I^2=0$ %, certeza moderada. Interpretación: probablemente no aumenta la cefalea con la exposición aguda a CEM-RF.

Cefalea — exposición de cuerpo entero ($1,0\text{--}19,4\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$). SMD $0,09$ ($-0,35$ a $0,54$), $k=2$, $I^2=24$ %, certeza alta. Interpretación: no se observa incremento de cefalea con la exposición aguda.

Sueño subjetivo — cabeza ($1,0\text{--}6,0\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$). En el resumen tabular se estimó un SMD de $-0,01$ ($-0,22$ a $0,20$), $k=8$, $I^2=7$ %, certeza moderada; en el texto de resultados se reporta

SMD 0,03 (-0,23 a 0,29), con la misma I^2 . El artículo ofrece dos estimaciones muy próximas (-0,01 en la tabla frente a 0,03 en el texto), ambas compatibles con ausencia de efecto. Estas pequeñas diferencias internas, atribuibles a la selección del punto temporal o a detalles de redondeo, no modifican la interpretación: probablemente no hay efecto de la exposición aguda sobre la calidad subjetiva del sueño.

Sueño subjetivo — cuerpo entero. SMD 0,00 (-0,15 a 0,15), $k=1$, I^2 : no aplicable, certeza baja por evidencia limitada (un solo estudio).

Síntomas compuestos — cabeza (0,4–1,6 $W \cdot kg^{-1}$). SMD 0,13 (-0,51 a 0,76), $k=3$, $I^2=36\%$, certeza muy baja por indirectitud (muestras de jóvenes sanos) e inconsistencia. Interpretación: efecto pequeño e incierto, sin indicios robustos de incremento de síntomas.

Síntomas compuestos — cuerpo entero (1,0–19,4 $V \cdot m^{-1}$). SMD -0,05 (-0,17 a 0,07), $k=4$, $I^2=2\%$, certeza alta; en el texto principal del artículo se menciona un valor muy próximo (0,07 con IC que incluye el cero). Existe una discrepancia numérica (incluido el signo) entre tabla y texto, aunque ambos efectos son muy pequeños y no significativos. En ambos casos, el efecto es muy pequeño y compatible con ausencia de diferencia clínicamente relevante entre exposición y control.

Personas con EHS (IEI-EMF)

Cefalea — cabeza (0,8–1,4 $W \cdot kg^{-1}$). Metaanálisis principal: SMD 0,16 (-0,38 a 0,06), $k=3$, $I^2=0\%$, certeza moderada. Interpretación: probablemente no hay efecto adverso de la exposición aguda sobre la cefalea en participantes con EHS.

Cefalea — cuerpo entero (19,4 $V \cdot m^{-1}$). SMD 0,11 (-0,29 a 0,52), $k=1$, certeza moderada (estudio Tier-1; degradación por imprecisión e imposibilidad de evaluar consistencia).

Síntomas compuestos — cabeza (0,8 $W \cdot kg^{-1}$). SMD 0,05 (-0,58 a 0,68), $k=2$, $I^2=64\%$, certeza muy baja por inconsistencia y preocupaciones de riesgo de sesgo.

Síntomas compuestos — cuerpo entero (1,0–19,4 $V \cdot m^{-1}$). SMD -0,19 (-0,46 a 0,07), $k=3$, $I^2=0\%$, certeza alta. Interpretación: no se observa incremento de síntomas compuestos en personas con EHS bajo exposición aguda de cuerpo entero.

En conjunto, los metaanálisis muestran tamaños de efecto próximos a cero y con IC95 % que incluyen el cero, tanto en población general como en personas con EHS, lo que respalda la interpretación de ausencia de efecto clínicamente relevante de la exposición aguda a CEM-RF sobre los síntomas autorreportados evaluados.

Exposición–respuesta (meta-regresión)

No se observó un gradiente dosis–respuesta en ninguno de los escenarios analizados. En población general con exposición en cabeza, el coeficiente de meta-regresión fue -0,01 por unidad de exposición ($p=0,88$); para exposición de cuerpo entero fue 0,03 ($p=0,96$). En personas con EHS, los coeficientes fueron -0,05 por 1 $W \cdot kg^{-1}$ (cabeza; $p=0,90$) y 0,02 por 1 $V \cdot m^{-1}$ (cuerpo entero; $p=0,26$). En todos los casos, las pendientes fueron muy pequeñas y no significativas, sin indicios de relación exposición–respuesta.

Sesgo de publicación

En las comparaciones con suficiente número de estudios ($k \geq 5$), las pruebas de Egger no mostraron asimetría de embudo: $p=0,87$ para cefalea–cabeza en población general y $p=0,63$ para sueño–cabeza. Estos resultados no sugieren un sesgo de publicación detectable en los conjuntos principales.

Análisis de sensibilidad (diseños cross-over)

Dado el predominio de ensayos *cross-over*, se realizó un análisis de sensibilidad recalculando los errores estándar asumiendo una correlación intraindividuo $r=0,5$ entre periodos. Como era esperable, los intervalos de confianza se estrecharon. En dos comparaciones (ambas en personas con EHS) los efectos pasaron a ser estadísticamente significativos, y en sentido de mejoría con la exposición: cefalea–cabeza (SMD $-0,16$; IC95 % $-0,31$ a $-0,00$) y síntomas compuestos–cuerpo entero (SMD $-0,19$; IC95 % $-0,36$ a $-0,02$). No obstante, estos cambios no modifican la conclusión general de ausencia de efectos adversos de la exposición aguda a CEM-RF sobre los síntomas.

Resultados cualitativos (secundarios)

Además de los desenlaces incluidos en los metaanálisis principales, se sintetizaron de forma narrativa 84 estimaciones adicionales procedentes de 14 estudios para desenlaces secundarios como ansiedad, malestar general, síntomas cutáneos, náuseas, visión borrosa u otros síntomas específicos. En 23 de estas 84 estimaciones el SMD superó 0,2 en valor absoluto, pero en todos los casos los IC95 % incluían el cero. La heterogeneidad de definiciones, escalas y momentos de medida impidió realizar metaanálisis adicionales; la síntesis narrativa no sugiere patrones consistentes ni efectos clínicamente relevantes asociados a la exposición aguda.

Percepción de la exposición (real vs. sham)

La exactitud de la percepción de la exposición no superó el azar. En población general, la sensibilidad global fue 0,30 (IC95 % 0,16–0,49) y la especificidad 0,72 (0,53–0,86); en personas con EHS, la sensibilidad fue 0,67 (0,61–0,72) y la especificidad 0,37 (0,32–0,43). La curva ROC resumida se situó muy próxima a la línea del clasificador aleatorio, con AUC $\approx 0,5$ en ambos grupos. El cociente observado/esperado (O/E) global de aciertos fue 1,01 (0,98–1,05; $I^2 \approx 0$), sin diferencias entre población general y EHS ($p=0,32$). Por localización de exposición, O/E fue 1,01 (0,95–1,08) para exposición en cabeza y 1,01 (0,97–1,06) para cuerpo entero. Tampoco se observó tendencia con el nivel de exposición en las meta-regresiones correspondientes (p entre 0,24 y 0,98). En conjunto, estos resultados indican que ni la población general ni las personas con EHS detectan de forma fiable si la exposición es real o simulada.

Evaluación del riesgo de sesgo (RoB)

En la síntesis global, 14 estudios (34 %) se clasificaron como Tier-1 (bajo riesgo de sesgo en los dominios clave) y 27 (66 %) como Tier-2; ningún estudio se clasificó como Tier-3. Los dominios con mayor proporción de juicios de bajo riesgo (“*definitely low*”) fueron el reporte completo de los desenlaces primarios (≈ 91 % de los estudios), las pérdidas/*attrition* y exclusiones (≈ 83 %) y la caracterización de la exposición (≈ 78 %). En cambio, hubo menor evidencia explícita de aleatorización (≈ 22 %), ocultación de la asignación y doble cegamiento (≈ 17 %) y uso de medidas objetivas de desenlace (≈ 5 %), reflejando limitaciones frecuentes en ensayos de síntomas subjetivos.

Certeza (OHAT-GRADE) por desenlace

La certeza de la evidencia se juzgó por par exposición–desenlace. Fue alta para cefalea–cuerpo entero en población general y para síntomas compuestos–cuerpo entero tanto en población general como en personas con EHS. La certeza fue moderada para cefalea–cabeza (general y EHS), cefalea–cuerpo entero en EHS y sueño subjetivo–cabeza en población general. Para sueño subjetivo–cuerpo entero en población general ($k=1$) la certeza se consideró baja, y para síntomas compuestos–cabeza (general y EHS) muy baja, principalmente por riesgo de sesgo, inconsistencia e indirectitud (recordemos que es la limitación que aparece cuando las condiciones del estudio —población, exposición,

desenlace o contexto— no representan de forma adecuada la pregunta que se quiere responder, reduciendo así la aplicabilidad o pertinencia directa de la evidencia). Esta graduación de certeza es coherente con los tamaños de efecto próximos a cero y delimita con claridad qué conclusiones pueden sostenerse con mayor confianza (ausencia de efecto relevante en las comparaciones principales) y dónde la evidencia sigue siendo insuficiente para descartar totalmente efectos pequeños o contextuales.

2.1.5. Fortalezas y debilidades de la revisión

Fortalezas

El trabajo destaca por su rigurosa planificación (PROSPERO), alineamiento OMS y adhesión a WHO Handbook/COSTER; por una búsqueda amplia y multibase sin restricción de idioma; por procesos duplicados de selección/extracción; por una evaluación RoB (OHAT) adaptada con tiers predefinidos y mapas de sesgo; por síntesis cuantitativa con *random-effects*, subgrupos y meta-regresión por nivel de exposición; por análisis de sensibilidad para *cross-over*; y por la valoración formal de certeza (OHAT-GRADE) con resumen de hallazgos por PECO. La transparencia en financiación y conflictos añade robustez, al igual que el material suplementario con criterios y listas de excluidos. Además, en los pares con $k \geq 5$ se evaluó asimetría de embudo mediante Egger sin evidencia de sesgo de publicación (cefalea-cabeza y sueño-cabeza: $p=0,87$ y $p=0,63$).

Debilidades

La validez externa es limitada ya que, en este tipo de estudios experimentales, las condiciones experimentales (duración, frecuencia, distancia, postura) difieren de la vida real. Además, el perfil de muestra (adultos jóvenes, sanos) reduce inferencia a mayores o personas con comorbilidad. Los síntomas son subjetivos y, aunque el cegamiento y el diseño *sham* mitigan el posible efecto nocebo, persisten las limitaciones en aleatorización/ocultación y, en menor medida, en desenlaces objetivos. La heterogeneidad en medidas secundarias impidió la realización de metaanálisis; y, aunque el análisis de sensibilidad resolvió la correlación intra-sujeto, las estimaciones primarias podrían subestimar la precisión en *cross-over*. Por último, algunos conjuntos (p. ej., sueño-cuerpo entero) tienen k bajo (1), lo que limita la certeza.

2.1.6. Conclusiones

En conjunto, los ensayos humanos cegados sintetizados indican que la exposición aguda a CEM-RF, en niveles por debajo de las restricciones vigentes, no induce un incremento de los síntomas autorreportados evaluados —principalmente cefalea, alteraciones subjetivas del sueño y puntuaciones compuestas— ni en población general ni en participantes con EHS. Cuando fue posible realizar metaanálisis, los tamaños de efecto se situaron cerca de cero y los intervalos de confianza incluyeron el nulo, lo que respalda una interpretación de ausencia de efecto clínicamente relevante. Asimismo, los análisis de exposición–respuesta no evidenciaron gradientes sistemáticos en función del nivel de exposición (p. ej., SAR o campo incidente), reforzando la conclusión de inexistencia de relación dosis–síntoma en las condiciones estudiadas. Por su parte, la percepción de la exposición (real frente a *sham*) no superó el azar, con $AUC \approx 0,5$ y $O/E \approx 1$ de aciertos, tanto en población general como en EHS, lo que sugiere que las diferencias subjetivas reportadas en contextos no controlados probablemente reflejen expectativas o atribuciones más que efectos fisiológicos de la RF.

Para las comparaciones principales, la certeza fue alta o moderada, mientras que descendió a baja o muy baja cuando la evidencia fue escasa, heterogénea o con limitaciones metodológicas (p. ej., k reducido o preocupaciones de riesgo de sesgo en

dominios no críticos). Este perfil de certeza es coherente con los resultados cuantitativos y delimita con precisión qué podemos afirmar y con qué confianza: allí donde la certeza es mayor, el mensaje resultante es que la exposición aguda no produce los síntomas evaluados; donde la certeza es menor, la incertidumbre aconseja evitar inferencias más allá de los datos disponibles.

Implicaciones para investigación futura

El artículo recomienda estandarizar los protocolos de exposición (rangos, secuencias, duraciones), reforzar los elementos de aleatorización y ocultación, y ampliar la diversidad poblacional (incluyendo, por ejemplo, personas mayores), con el fin de mejorar validez interna y aplicabilidad. Con la debida prudencia ética, sugiere explorar diseños que permitan caracterizar la dinámica temporal de los síntomas y la posible existencia de umbrales o efectos transitorios, manteniendo en todo momento la seguridad de los participantes. Finalmente, dado que los ensayos de provocación abordan efectos agudos, cualquier hipótesis sobre efectos a largo plazo debe investigarse mediante estudios epidemiológicos bien diseñados y con mediciones de exposición más objetivas y comparables.

2.2. Revisión estudios observacionales

2.2.1. Referencia completa del artículo

Título: *The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: A systematic review and meta-analysis on human observational studies.* Rössli M, Dongus, S., Jalilian H, Eysers, J., Esu, E., Moses Oringanje, C., Meremikwu, M., Bosch-Capblanch, X. **Revista y datos bibliográficos:** *Environment International*, 183, 108338. (2024). DOI: 10.1016/j.envint.2023.108338. **Registro de protocolo:** PROSPERO CRD42021239432.

2.2.2. Objetivos y preguntas de investigación

El objetivo principal de esta revisión fue determinar si la exposición prolongada o repetida a CEM-RF, en el rango 100 kHz–300 GHz y en condiciones reales de uso de dispositivos y de presencia de fuentes ambientales, se asocia a un mayor riesgo de tinnitus y migraña en población general y trabajadora. El análisis se planteó diferenciando exposiciones localizadas en la cabeza en campo cercano —fundamentalmente derivadas del uso de telefonía móvil e inalámbrica— y exposiciones de cuerpo entero en campo lejano, asociadas a estaciones base y otras infraestructuras emisoras, abarcando contextos domésticos, laborales y comunitarios, así como perfiles poblacionales diversos que incluyen adultos, adolescentes, trabajadores expuestos y, en algunos estudios, personas que se identifican con sensibilidad atribuida a los CEM (EHS/ IEI-EMF).

Como objetivos adicionales, la revisión examinó si la exposición a CEM-RF se relaciona con síntomas no específicos frecuentemente considerados en la literatura sobre salud ambiental, en particular cefalea, alteraciones del sueño y puntuaciones compuestas de síntomas que integran elementos como fatiga, somnolencia, irritabilidad y malestar general. Para ello se consideraron tanto métricas auto-informadas de exposición (por ejemplo, frecuencia y duración del uso del teléfono) como métricas objetivas basadas en registros de operadores, mediciones personales, modelización de campos ambientales o matrices de exposición ocupacional, distinguiendo de manera sistemática entre exposición localizada a la cabeza y exposición de cuerpo entero.

El marco analítico se estructuró mediante una formulación PECO alineada con la serie metodológica. La población de interés abarcó personas de la población general y

trabajadora, de cualquier edad y sexo, incluyendo grandes cohortes comunitarias, estudios ocupacionales con exposición específica y subgrupos con EHS cuando se analizaron por separado. La exposición se definió como la presencia de CEM-RF derivados del uso habitual de dispositivos de comunicación y de fuentes ambientales u ocupacionales, cuantificada mediante autoinforme, registros objetivos, mediciones o modelización. Se consideraron únicamente exposiciones repetidas o sostenidas en el tiempo, excluyendo de forma explícita efectos agudos de muy corta duración. El comparador se estableció como la ausencia de exposición o la exposición menor, definido según categorías de uso o de intensidad de campo eléctrico. Los desenlaces primarios fueron tinnitus y migraña, determinados mediante diagnóstico clínico o instrumentos validados; como desenlaces adicionales se evaluaron cefalea, alteraciones del sueño y puntuaciones compuestas, analizados en formatos dicotómicos y continuos.

A partir de este marco, las preguntas de investigación se formularon en términos de si la exposición a CEM-RF localizada en la cabeza se asocia a una mayor incidencia o prevalencia de tinnitus y migraña en comparación con niveles inferiores de exposición; si la exposición ambiental u ocupacional de cuerpo entero presenta un gradiente de riesgo para tinnitus, migraña, cefalea, alteraciones del sueño o síntomas compuestos en función de la intensidad del campo; y si, en estos desenlaces no específicos, existe un patrón coherente de incremento de síntomas con mayores niveles de exposición tanto en cabeza como en cuerpo entero, independientemente de la forma de medición del desenlace. La revisión también se propuso examinar si los resultados difieren según la métrica de exposición —objetiva frente a auto-informada— y según la fuente —campo cercano frente a lejano—, con el fin de diferenciar posibles efectos atribuibles a la dosis física de CEM-RF de aquellos que pueden derivarse de percepciones subjetivas, patrones de uso de tecnologías o factores psicosociales.

2.2.3. Metodología

La revisión siguió un protocolo extensivo (Röösli et al., 2021) registrado en PROSPERO (CRD42021239432). La planificación metodológica adoptó los estándares del WHO handbook y las recomendaciones COSTER para revisiones de exposiciones ambientales; el informe se ajustó a PRISMA.

Búsqueda y fuentes

Se realizaron búsquedas en Medline, Web of Science, PsycINFO, Cochrane Library, Epistemonikos y Embase, complementadas con EMF-Portal. La búsqueda bibliográfica se ejecutó el 22 de abril de 2021 y se repitió el 7 de abril de 2022; además, el 13 de febrero de 2023 se verificaron EMF-Portal y la base BERENIS sin identificar estudios adicionales elegibles. Las estrategias combinaron términos de exposición (CEM-RF), diseño (observacionales) y desenlaces (tinnitus, migraña, síntomas), adaptadas a cada base de datos. No se aplicaron restricciones iniciales de idioma o fecha, y únicamente se incluyeron estudios con información metodológica y de resultados suficiente para la síntesis.

Criterios de elegibilidad

Los criterios se definieron mediante un marco PECO/PICOS coherente con los objetivos de la revisión. Se incluyeron estudios en población humana general o trabajadora, de cualquier edad y sexo, abarcando cohortes comunitarias, estudios en trabajadores con exposición específica y, en algunos casos, grupos con IEI-EMF/EHS analizados por separado. Se consideraron exposiciones a CEM-RF procedentes de fuentes de campo cercano (uso de telefonía móvil e inalámbrica, sistemas profesionales como TETRA) o de campo lejano (estaciones base, radiodifusión). Las métricas de exposición podían basarse

en autoinforme estructurado, registros de operadores, mediciones personales, modelización ambiental o matrices de exposición ocupacional. Se exigió una duración mínima de exposición de una semana, excluyendo estudios de efectos agudos (horas-días). Se descartaron métricas consideradas inválidas como la distancia autoestimada a antenas. Se aceptaron comparaciones entre niveles más altos frente a más bajos de exposición, o entre expuestos y no expuestos, definidos según categorías de uso, intensidad de campo o contrastes ocupacionales. Se priorizaron tinnitus y migraña como desenlaces principales, medidos mediante diagnóstico médico o instrumentos validados. Se incluyeron cefalea, alteraciones del sueño y puntuaciones compuestas de síntomas como desenlaces adicionales, en forma continua o dicotómica.

Se aceptaron estudios de cohortes y estudios de casos y controles. Se excluyeron los transversales, los estudios de panel con duración <1 semana, los no ajustados por factores de confusión, estudios experimentales o “*field trials*”, trabajos centrados en tratamientos médicos que emiten RF y aquellos sin estimaciones de riesgo elegibles.

Selección y extracción de datos

La selección se realizó en dos fases: cribado de títulos-resúmenes y evaluación de textos completos. Ambos procesos fueron realizados por dos revisores independientes, resolviéndose discrepancias mediante consenso o intervención de un tercer revisor.

La extracción de datos siguió un procedimiento estandarizado y fue realizada también por dos revisores. Se aplicó una regla de abstención según la cual cualquier autor de la revisión que fuese coautor de un estudio incluido quedaba excluido de la evaluación de riesgo de sesgo y de la extracción para ese estudio. Se registraron características poblacionales, métricas de exposición, definición de desenlaces, medidas de efecto (RR, OR, HR, diferencias de medias o SMD) con IC95 %, y toda la información pertinente para reconstruir gradientes exposición-respuesta.

Medidas de efecto y síntesis cuantitativa

Para desenlaces dicotómicos se emplearon RR; cuando fue necesario, OR y HR se transformaron a RR. Para variables continuas se usó diferencia de medias o SMD (si se combinaron escalas distintas). Los metaanálisis se realizaron con modelos de *random-effects* y se exploró heterogeneidad mediante I^2 y τ^2 ; se aplicó prueba de asimetría de embudo/Egger cuando el número de estudios lo permitió. Para exposiciones categorizadas, se empleó meta-regresión para expresar el efecto por unidad de exposición (p. ej., por incremento en métrica modelizada), distinguiendo exposiciones de cabeza y de cuerpo entero.

La estrategia analítica se desarrolló en dos fases. En primer lugar, dentro de cada estudio se estimaron tendencias exposición-respuesta por unidad de exposición. Para exposición de cabeza se utilizó como unidad 100 minutos semanales de uso de teléfono inalámbrico; para exposición de cuerpo entero, 1 V/m de intensidad de campo eléctrico. En análisis categóricos se asignaron valores continuos mediante la media geométrica de los límites de cada categoría; en categorías abiertas se estimaron valores centrales siguiendo procedimientos reconocidos en metaanálisis de dosis-respuesta.

En segundo lugar, las pendientes derivadas de cada estudio se combinaron mediante metaanálisis de efectos aleatorios con ponderación por la inversa de la varianza. Para tinnitus se metaanalizaron RRs por 100 min/semana; para cefalea, sueño y síntomas compuestos se sintetizaron SMD por unidad de exposición. Cuando los estudios sólo informaban contrastes categóricos, se aplicaron métodos de conversión (p. ej., el método de Chinn) para obtener SMD. Se realizaron análisis separados para exposición de cabeza y de cuerpo entero, evitando combinaciones de poblaciones solapadas. La heterogeneidad

se cuantificó con τ^2 y se calcularon intervalos de predicción del 80 %. Dado el bajo número de estudios por desenlace, la evaluación de asimetría de embudo sólo fue posible en contadas comparaciones.

Como análisis de sensibilidad, se compararon los resultados obtenidos mediante las tendencias lineales con los provenientes de los contrastes categóricos originales, sin observar evidencias consistentes de no linealidad. En cohortes con análisis alternativos (p. ej., cambios en la exposición o en puntuaciones), se priorizaron los análisis clásicos de incidencia.

Evaluación del riesgo de sesgo (RoB)

El riesgo de sesgo se evaluó utilizando la herramienta OHAT/NTP adaptada a estudios observacionales, que considera ocho dominios: selección/participación, confusión, attrition/exclusión, clasificación de la exposición, evaluación del desenlace, reporte selectivo, idoneidad estadística y otros sesgos (incluida la posibilidad de causalidad inversa).

Cada dominio se calificó como definitivamente o probablemente bajo (++/+), probablemente alto (-/NR) o definitivamente alto (--). Para cada resultado con riesgo probablemente o definitivamente alto, los revisores estimaron la dirección probable del sesgo (falso positivo, efecto atenuado, falso efecto protector o efecto impredecible).

La síntesis del RoB se realizó mediante un sistema de tres niveles (Tier 1–3): Tier 1 correspondió a resultados con riesgo bajo o probablemente bajo en los tres dominios clave (confusión, exposición y desenlace) sin otros sesgos críticos; Tier 3 se asignó cuando alguno de estos dominios clave presentaba riesgo alto o probablemente alto; Tier 2 agrupó situaciones intermedias.

En estudios de campo cercano, la clasificación como Tier 1 exigió que la estrategia analítica diferenciara explícitamente el posible efecto biológico de la RF del efecto del uso del dispositivo (por ejemplo, separando tiempo de llamada, volumen de datos o patrones de uso). En estudios de campo lejano se tendió a clasificar como probable alto riesgo la evaluación de la exposición cuando no quedaba claro que la dosis ambiental superara de forma consistente a la procedente de dispositivos cercanos al cuerpo.

Certeza de la evidencia (OHAT-GRADE)

La calificación siguió OHAT-GRADE por desenlace, con degradaciones por RoB, inconsistencia, indirectitud, imprecisión y sesgo de publicación, y mejoras si correspondía (p. ej., magnitud grande, gradiente dosis-respuesta). Se reportaron perfiles de certeza por hipótesis evaluada.

La certeza se evaluó por combinación exposición-desenlace según el marco OHAT-GRADE, partiendo de un nivel inicial de certeza moderada para estudios observacionales y aplicando degradaciones por riesgo de sesgo, inconsistencia, indirectitud, imprecisión y sesgo de publicación.

El dominio de indirectitud se interpretó de forma amplia e incluyó no solo la representatividad de la población, sino también la distancia entre la métrica de exposición utilizada (p. ej., tiempo de uso del teléfono) y la dosis biológicamente relevante de CEM-RF en cabeza o cuerpo entero. Se valoró de manera explícita el potencial de causalidad inversa (p. ej., personas sintomáticas que modifican su uso del teléfono) y su impacto posible sobre la dirección del sesgo. Dado el número reducido de estudios y la falta de gradientes de dosis-respuesta robustos, no se aplicaron mejoras por gran magnitud de efecto o dosis-respuesta consistente.

Los perfiles de certeza se documentaron de forma individual para tinnitus, migraña, cefalea, alteraciones del sueño y puntuaciones compuestas, reflejando de manera sistemática la contribución de cada dominio al juicio final.

2.2.4. Resultados

Flujo PRISMA

En total, se identificaron 4.458 registros mediante búsquedas en bases de datos y 21 adicionales por otras fuentes (listas de referencias y revisiones). Tras la eliminación de duplicados, se cribaron 3.887 títulos y resúmenes, de los cuales 3.631 fueron excluidos por no ser pertinentes (p. ej., fuera de tema o artículos de revisión). Pasaron a lectura de texto completo 256 artículos y 243 fueron excluidos por los siguientes motivos: no eran artículos de investigación (p. ej., revisiones, cartas, comentarios; n=11), no incluían humanos (n=1), no estudiaban ningún desenlace de salud (n=3), el síntoma no cumplía los criterios de inclusión (n=23), no estaban relacionados con CEM-RF (p. ej., CEM-ELF o uso de mensajes de texto para el autocontrol de migraña; n=7), empleaban fuentes CEM pero sin mencionar “electromagnetic”, “radiation” o “microwave” como objetivo del estudio — esto es, trabajos en los que, en principio, podría argumentarse que los efectos observados se deben a CEM, pero que no estaban diseñados para ello— (n=139), estudios experimentales en humanos (incluidos field trials; n=6), duración de exposición < 1 semana (p. ej., panel study; n=7), diseño transversal (n=23), sin ajuste por confusión (n=7), uso exclusivo de métodos de evaluación de exposición inválidos (p. ej., distancia autoestimada a estaciones base; n=3) y sin estimaciones de riesgo elegibles (p. ej., OR, coeficiente de cambio de puntuación; n=4). Finalmente, 13 artículos fueron incluidos en la revisión sistemática.

Características de los estudios incluidos

Los 13 artículos correspondieron a 9 estudios distintos: 8 cohortes prospectivas y 1 estudio de casos y controles, con un total combinado de 486.558 participantes, todos procedentes de Europa. Las cohortes abarcaron desde estudios comunitarios de tamaño medio (por ejemplo, 425 adolescentes en una cohorte escolar suiza) hasta una cohorte nacional de abonados a telefonía móvil en Dinamarca con más de 420.000 adultos. Un estudio estuvo específicamente centrado en población trabajadora expuesta a sistemas de comunicación profesional, otro en personas con EHS, y otro en pacientes adultos con esclerosis múltiple; el resto se realizó en población general adulta o adolescente.

En cuanto a la exposición, seis trabajos se centraron únicamente en exposición de cabeza, derivada fundamentalmente del uso de telefonía móvil o inalámbrica; tres abordaron exclusivamente exposición de cuerpo entero en campo lejano (principalmente estaciones base y otras fuentes ambientales), y cuatro estudios informaron simultáneamente exposiciones de cabeza y de cuerpo entero. La evaluación de la exposición combinó métricas auto-informadas (frecuencia y duración de llamadas, uso de teléfonos inalámbricos) y métricas objetivas (registros de operadores, mediciones personales con dosímetros, modelización ambiental 3D de campos de estaciones base, estimaciones de dosis en cabeza y cuerpo entero). Los desenlaces se recogieron mediante diagnósticos médicos (por ejemplo, migraña en registros sanitarios) o cuestionarios estandarizados de síntomas, calidad del sueño y malestar general. Tinnitus se abordó en tres artículos, migraña en uno, cefalea en seis, alteraciones del sueño en cinco y puntuaciones compuestas de síntomas en cinco; sólo un estudio analizaba de forma explícita exposición ocupacional.

Resultados cuantitativos (síntesis de metaanálisis)

En relación con tinnitus y exposición de cabeza, la síntesis se basó en tres estudios (dos cohortes y un caso-control) que aportaban estimaciones comparables por unidad de exposición. El metaanálisis, utilizando la mejor métrica disponible de cada estudio, estimó un riesgo relativo agrupado de 1,43 (IC95 % 0,94–2,18) por cada 100 minutos semanales de uso de teléfono inalámbrico, con heterogeneidad sustancial ($I^2 \approx 86\%$, $\tau^2 = 0,115$) y un amplio intervalo de predicción del 80 % (0,42–4,91). El resultado no alcanzó significación estadística y la amplitud del intervalo de predicción es compatible tanto con ausencia de asociación como con pequeños aumentos o disminuciones del riesgo en futuros estudios.

Para migraña en relación con exposición de cabeza, sólo se dispuso de una gran cohorte nacional de abonados a telefonía móvil en Dinamarca. En este estudio, el riesgo relativo de migraña fue 1,20 (IC95 % 1,10–1,30) en abonados frente a no abonados, utilizando la condición de abonado como proxy de exposición prolongada a RF-EMF de cabeza. La ausencia de otros estudios comparables impidió realizar metaanálisis, y la interpretación se ve limitada por el riesgo de sesgo y la indirectitud de la métrica de exposición (suscripción como sustituto de dosis real en la cabeza).

En cefalea y exposición de cabeza, varias cohortes aportaron estimaciones de cambio en la puntuación de cefalea en función del uso de telefonía móvil u otras métricas de exposición local. La síntesis cuantitativa se realizó mediante SMD por 100 minutos semanales de uso, aplicando el enfoque de dos pasos descrito en la metodología. Aunque los autores no presentan en el texto principal una cifra única resumida para cefalea–cabeza comparable a la de tinnitus, señalan que los tamaños de efecto agrupados fueron pequeños y que los intervalos de confianza incluyeron el nulo, sin patrones consistentes de incremento del riesgo asociado a una mayor exposición en la cabeza. La heterogeneidad entre estudios fue apreciable y el número de estimaciones comparables relativamente reducido, lo que limitó tanto la precisión como el análisis formal de sesgo de publicación.

Para alteraciones del sueño en relación con exposición de cuerpo entero (*far-field*), se dispuso de tres cohortes que aportaban estimaciones comparables por unidad de campo eléctrico modelizado o medido. El metaanálisis principal mostró un cambio agrupado en SMD de 1,51 (IC95 % –2,00 a 5,03) por 1 V/m de incremento en la exposición, con heterogeneidad importante entre estudios ($p < 0,001$) y amplia incertidumbre, que se traduce en un intervalo compatible con ausencia de efecto y con efectos en ambas direcciones. Análisis alternativos restringidos a determinadas fuentes (por ejemplo, sólo transmisores fijos) modificaron poco la estimación global.

En cuanto a las puntuaciones compuestas de síntomas en relación con exposición de cuerpo entero, cuatro cohortes aportaron datos comparables. El metaanálisis indicó un cambio agrupado en SMD de 1,13 (IC95 % –0,94 a 3,20) por 1 V/m de incremento en la exposición, con marcado solapamiento del IC95 % con el nulo y, de nuevo, heterogeneidad considerable entre estudios y un intervalo de predicción muy amplio (–3,32 a 5,58). Estos resultados no apoyan una asociación robusta entre mayor exposición ambiental de cuerpo entero y empeoramiento de los síntomas no específicos evaluados.

Exposición–respuesta y otros análisis cuantitativos

Además de los PECO prioritarios, se exploraron otras combinaciones exposición–síntoma. Para cefalea en relación con exposición de cuerpo entero, un análisis secundario mostró que el SMD de cefalea cambiaba –0,17 (IC95 % –0,30 a –0,03) por cada 1 V/m de incremento en la exposición ambiental, a partir de dos estudios; la dirección de este efecto

apunta, paradójicamente, a una ligera reducción de síntomas con mayor exposición, pero el contexto de heterogeneidad, riesgo de sesgo e imprecisión impide interpretarlo como un efecto protector real. Para alteraciones del sueño en relación con exposición de cabeza, se estimó un cambio en SMD de 2,01 (IC95 % -2,95 a 6,97) por 100 minutos semanales de uso de teléfono, con intervalos extremadamente amplios y sin apoyo para una relación dosis-respuesta consistente. Para puntuaciones compuestas de síntomas en relación con exposición de cabeza, el cambio agrupado fue de 0,01 (IC95 % -0,07 a 0,09) en SMD por 100 minutos semanales de llamada, esencialmente compatible con ausencia de efecto. Sólo un estudio analizó tinnitus en relación con fuentes de campo lejano, sin encontrar indicios de asociación; ningún estudio evaluó migraña frente a exposición *far-field*.

En conjunto, la estructura de análisis en dos pasos (estimación de tendencias lineales dentro de cada estudio y posterior metaanálisis de pendientes) no reveló un gradiente dosis-respuesta consistente en ninguno de los desenlaces principales, ni para exposiciones de cabeza ni de cuerpo entero. Los análisis de sensibilidad basados en categorías originales de exposición no sugirieron patrones de no linealidad que pudieran contradecir esta conclusión general.

Resultados cualitativos y otros desenlaces

Más allá de los cinco desenlaces prioritarios, los 13 artículos abordaron numerosos síntomas adicionales y combinaciones de exposición, incluyendo distintos dominios de síntomas somáticos y de bienestar psicológico. Dado el número limitado de estudios comparables por par exposición-síntoma, los autores recurrieron a una síntesis narrativa apoyada en mapas de calor que representan la dirección y significación de las asociaciones publicadas. La mayoría de las asociaciones exposición-respuesta no resultaron significativas; las significativas se distribuyeron en ambas direcciones (incremento y disminución de síntomas), sin un patrón coherente que vincule niveles más altos de exposición a un aumento sistemático de la sintomatología.

Evaluación del riesgo de sesgo

El análisis conjunto de riesgo de sesgo mostró que aproximadamente la mitad de las combinaciones exposición-desenlace-población incluidas en los metaanálisis podían clasificarse como Tier 1 (riesgo de sesgo bajo o probablemente bajo en los dominios clave), mientras que el resto se situaba en Tiers 2 y 3. Para tinnitus, los estudios que no disponían de diagnóstico clínico y se basaban únicamente en autoinforme, se consideraron con riesgo probablemente alto en el dominio de evaluación del desenlace. En cuanto a la caracterización de la exposición, todos los estudios centrados exclusivamente en fuentes de campo lejano fueron juzgados con riesgo probablemente alto, al no demostrar que la contribución de estas fuentes superase claramente a la de dispositivos cercanos al cuerpo, lo que aumenta la probabilidad de clasificación errónea de la dosis relevante. Además, en tres estudios se identificaron problemas críticos de confusión, relacionados con factores de estilo de vida, comorbilidad u otros determinantes que podrían influir simultáneamente en exposición y síntomas.

Certeza de la evidencia (OHAT-GRADE)

La valoración OHAT-GRADE se realizó por combinación exposición-desenlace. Para las cinco hipótesis prioritarias (tinnitus, migraña y cefalea en relación con exposición de cabeza; alteraciones del sueño y puntuaciones compuestas en relación con exposición de cuerpo entero), la certeza global se calificó entre baja y muy baja. Las degradaciones obedecieron a varios factores convergentes: riesgo de sesgo (especialmente en clasificación de la exposición y, en tinnitus, en evaluación del desenlace), inconsistencia entre estudios (heterogeneidad estadística y divergencia de resultados), indirectitud (métricas de exposición que actúan como proxies imperfectos de la dosis de RF-EMF

relevante, poblaciones específicas como trabajadores o pacientes con EM en las que la extrapolación a población general requiere cautela) e imprecisión (intervalos de confianza amplios y número reducido de estudios por hipótesis). No se aplicaron mejoras de certeza por magnitud de efecto ni por gradiente dosis–respuesta, al no identificarse efectos grandes ni relaciones exposición–respuesta robustas.

En síntesis, los resultados cuantitativos y cualitativos apuntan a que la evidencia disponible, basada en unos pocos estudios observacionales todos europeos, no muestra asociaciones consistentes ni gradientes claros entre la exposición prolongada a CEM-RF (por uso de dispositivos o por fuentes ambientales) y la aparición de tinnitus, migraña, cefalea, alteraciones del sueño o síntomas no específicos. Sin embargo, la combinación de riesgo de sesgo, heterogeneidad, indirectitud e imprecisión hace que la certeza de esta conclusión sea muy baja en todos los pares exposición–desenlace prioritarios.

2.2.5. Fortalezas y debilidades de la revisión

Fortalezas

La revisión se apoya en un protocolo detallado registrado en PROSPERO (CRD42021239432) y en un marco metodológico alineado con el WHO handbook y las recomendaciones COSTER, con reporte según PRISMA. Esto garantiza que los objetivos, las preguntas PECO, los criterios de elegibilidad, la estrategia de búsqueda y los análisis estaban predefinidos y no se ajustaron a posteriori en función de los resultados. La búsqueda bibliográfica fue amplia, multibase (Medline, Web of Science, PsycINFO, Cochrane, Epistemonikos, Embase) y se complementó con EMF-Portal y la base BERENIS, lo que reduce la probabilidad de haber pasado por alto estudios relevantes publicados sobre CEM-RF y los desenlaces considerados.

Es también una fortaleza la definición estricta de los criterios de inclusión y exclusión, con una delimitación clara de los estudios de interés (cohortes y casos-control) y la exclusión sistemática de diseños con limitaciones estructurales para la causalidad o especialmente vulnerables a expectativas y nocebo, como estudios transversales y *panel studies* de corta duración. La formulación PECO fue explícita, distinguió de forma coherente entre exposición de cabeza y de cuerpo entero, y estableció a priori qué desenlaces tenían carácter prioritario.

En cuanto a los análisis, la revisión no se limita a contrastes categóricos simples, sino que aplica un enfoque de dos pasos para modelar gradientes exposición–respuesta por unidad de exposición (minutos de uso, V/m), lo que permite una interpretación más cuantitativa de posibles relaciones dosis–respuesta y facilita la comparación entre estudios con categorizaciones diferentes. La separación de análisis por tipo de fuente (campo cercano frente a lejano) y por tipo de métrica (auto-informada frente a objetiva) añade una capa metodológica importante para desentrañar en qué medida los hallazgos pueden atribuirse a la dosis física de RF o a factores ligados al uso y a la percepción subjetiva de exposición.

Finalmente, el uso de la herramienta OHAT tanto para el riesgo de sesgo como para la certeza de la evidencia constituye otra fortaleza, porque obliga a explicitar los dominios clave (confusión, exposición, desenlace) y a sintetizar el nivel de confianza en cada par exposición–desenlace, en lugar de basarse sólo en significaciones puntuales. La construcción de mapas de calor y la síntesis narrativa complementan el metaanálisis allí donde el número de estudios es insuficiente, de modo que la revisión consigue integrar de forma estructurada tanto la evidencia cuantitativa como la cualitativa.

Limitaciones

La principal limitación estructural de la revisión es que toda la evidencia procede de estudios europeos, lo que restringe la generalización a contextos con otras infraestructuras de telecomunicaciones, patrones de uso de tecnologías o condiciones laborales. Para algunos desenlaces clave, como migraña, la base empírica es muy limitada (una sola cohorte) y, por tanto, la interpretación descansa en un trabajo aislado, sin posibilidad de contrastar coherencia entre estudios o explorar de forma robusta la heterogeneidad.

Otra limitación importante reside en las métricas de exposición. Una parte sustancial de la evidencia se basa en medidas auto-informadas de uso de telefonía o en proxies relativamente indirectos (como la condición de abonado a telefonía móvil) y, en el caso de la exposición ambiental, en campos lejanos que pueden contribuir poco a la dosis cerebral efectiva si no se demuestra que superan la exposición por dispositivos cercanos al cuerpo. Esta combinación introduce errores de clasificación de la exposición difíciles de cuantificar que tienden a diluir asociaciones reales y, al mismo tiempo, genera indirectitud, ya que lo que se mide no es siempre la dosis que interesa desde el punto de vista biológico.

Por diseño, los estudios observacionales no permiten cegar la exposición, lo que deja abierta la posibilidad de influencias de placebo y de factores psicosociales en los síntomas autorreportados. Aunque la revisión intenta abordar estas cuestiones comparando métricas objetivas y auto-informadas y considerando la dirección probable de distintos sesgos, la confusión residual sigue siendo un problema relevante. Además, el bajo número de estudios por hipótesis, la heterogeneidad de escalas y definiciones de síntomas y la diversidad de estrategias de análisis reducen la potencia estadística y limitan la capacidad para realizar análisis de subgrupos o evaluar formalmente el sesgo de publicación.

En conjunto, aunque el andamiaje metodológico es sólido y transparente, la revisión está limitada por la cantidad y la calidad de la evidencia primaria disponible: pocos estudios, todos en Europa, con métricas de exposición imperfectas y heterogeneidad considerable, lo que justifica los juicios de certeza muy baja para las cinco hipótesis prioritarias.

2.2.6. Conclusiones

En conjunto, los estudios observacionales sintetizados en esta revisión no muestran asociaciones consistentes entre la exposición prolongada a CEM-RF, ya sea por uso de dispositivos de comunicación (exposición de cabeza) o por fuentes ambientales u ocupacionales (exposición de cuerpo entero), y la aparición de tinnitus, migraña, cefalea, alteraciones del sueño o puntuaciones compuestas de síntomas en población general y trabajadora. Cuando se observan asociaciones positivas, como el aumento de riesgo de migraña en la cohorte de abonados a telefonía móvil (RR 1,20; IC95 % 1,10–1,30), estas carecen de replicación y se apoyan en métricas de exposición indirectas y potencialmente sesgadas, de modo que no modifican la lectura global de los resultados. En el caso de tinnitus, el metaanálisis por 100 minutos semanales de uso de teléfono arroja un RR 1,43 (IC95 % 0,94–2,18) con un intervalo de predicción muy amplio, que es compatible con ausencia de efecto y con efectos en ambas direcciones, y no permite sostener una asociación robusta.

Los análisis de gradiente exposición–respuesta, basados en la combinación de pendientes por unidad de exposición, tampoco revelan patrones claros de aumento de riesgo con mayores niveles de exposición, ni para las fuentes de campo cercano ni para las de campo lejano. En varios casos, las estimaciones puntuales son cercanas a cero o incluso negativas, con intervalos de confianza y de predicción muy amplios, lo que sugiere que la variabilidad observada entre estudios es más consistente con error aleatorio, sesgos y

diferencias metodológicas que con un efecto causal uniforme de los CEM-RF sobre los síntomas evaluados.

La valoración OHAT-GRADE concluye que la certeza de la evidencia es muy baja para las cinco hipótesis prioritarias (tinnitus, migraña y cefalea con exposición de cabeza; alteraciones del sueño y síntomas compuestos con exposición de cuerpo entero). Esta combinación de riesgo de sesgo, inconsistencia, indirectitud e imprecisión implica que la revisión no permite descartar de forma categórica efectos pequeños o contextuales, pero sí señala que, con los datos disponibles, no se identifica un patrón estable de asociación que apoye la idea de que los niveles de exposición estudiados (dentro de los rangos típicos de uso y de ambiente) generen de forma sistemática los síntomas analizados. La conclusión más prudente es que, si existen efectos, probablemente son pequeños y difíciles de distinguir de la variabilidad esperable por otros factores.

Implicaciones para investigación futura

El trabajo subraya varias prioridades claras. En primer lugar, la necesidad de mejorar la medición de la exposición, incrementando el uso de métricas objetivas, modelizaciones validadas y aproximaciones dosimétricas que permitan aproximarse mejor a la dosis relevante en cabeza y cuerpo entero, tanto para fuentes de campo cercano como lejano. En segundo lugar, la importancia de estandarizar la definición y medición de los síntomas, incluyendo criterios claros de fenomenología, frecuencia y severidad, para facilitar comparaciones entre estudios y metaanálisis futuros. En tercer lugar, la conveniencia de diseñar estudios longitudinales con un control más robusto de los factores de confusión, que incorporen información detallada sobre estilos de vida, salud mental, comorbilidades y cambios en la exposición a lo largo del tiempo.

Finalmente, el artículo enfatiza que la diferenciación entre exposición de cabeza y de cuerpo entero, así como entre medidas objetivas y auto-informadas, es crucial para avanzar en la interpretación de la evidencia. Diseños que incorporen explícitamente variables relacionadas con expectativas, preocupación por la exposición o percepción subjetiva de riesgo podrían ayudar a descomponer qué parte de la sintomatología atribuida a los CEM-RF responde a procesos psicofisiológicos vinculados al nocebo y cuáles, en su caso, podrían relacionarse con la dosis física de radiofrecuencia. Sólo con este tipo de mejoras será posible reducir la actual incertidumbre y refinar las conclusiones sobre los posibles efectos de la exposición a CEM-RF en la población.

Bibliografía

- Bosch-Capblanch, X., Esu, E., Dongus, S., Oringanje, C.M., Jalilian, H., Eysers, J., Oftedal, G., Meremikwu, M., Röösli, M., 2022. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A protocol for a systematic review of human experimental studies. *Environment International* 158, 106953. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106953>
- Bosch-Capblanch, X., Esu, E., Oringanje, C.M., Dongus, S., Jalilian, H., Eysers, J., Auer, C., Meremikwu, M., Röösli, M., 2024. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. *Environment International* 187, 108612. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108612>
- Röösli, M., Dongus, S., Jalilian, H., Eysers, J., Esu, E., Oringanje, C.M., Meremikwu, M., Bosch-Capblanch, X., 2024. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: A systematic review and meta-analysis on human

observational studies. *Environment International* 183, 108338.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108338>

Röösli, M., Dongus, S., Jalilian, H., Feychting, M., Eysers, J., Esu, E., Oringanje, C.M., Meremikwu, M., Bosch-Capblanch, X., 2021. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: A protocol for a systematic review on human observational studies. *Environment International* 157, 106852.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106852>

Verbeek, J., Oftedal, G., Feychting, M., van Rongen, E., Rosaria Scarfi, M., Mann, S., Wong, R., van Deventer, E., 2021. Prioritizing health outcomes when assessing the effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A survey among experts. *Environment International* 146, 106300.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106300>