

Artículo traducido al castellano por Ecologistas en Acción (abierto a revisión), ante cualquier duda contrastar con el documento original en inglés:

“Efectos de los campos electromagnéticos de bajo nivel en la fauna y la flora: lo que nos dice la investigación acerca de un enfoque ecosistémico”. B.Blake Levitt, Henry C. Lai y Albert M. Manville II. *Frontiers in Public Health*. Volumen 10, 25 Noviembre de 2022. Fuentes: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1000840>
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2022.1000840>

Original article (English): “Low-level EMF effects on wildlife and plants: What research tells us about an ecosystem approach”. B. Blake Levitt, Henry C. Lai and Albert M. Manville II. *Frontiers in Public Health*. Volume 10, 25 November 2022. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1000840>. This original article in English is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

“Efectos de los campos electromagnéticos de bajo nivel en la fauna y la flora: lo que nos dice la investigación acerca de un enfoque ecosistémico”.

B. Blake Levitt^{1*}, Henry C. Lai^{2*} and Albert M. Manville II^{3*}

1 National Association of Science Writers, Berkeley, CA, United States.

2 Department of Bioengineering, University of Washington, Seattle, WA, United States.

3 Advanced Academic Programs, Krieger School of Arts and Sciences, Environmental Sciences and Policy, Johns Hopkins University, Washington, DC, United States.

Existen pruebas suficientes que indican que el aumento de los niveles ambientales de los campos electromagnéticos (CEM) antropogénicos no ionizantes de 0 Hz a 300 GHz puede estar dañando a las especies no humanas a nivel de ecosistema y biosfera en todos los taxones. Este documento se centra en la fisiología única de las especies no humanas, su extraordinaria sensibilidad a los CEM naturales y antropogénicos, y la probabilidad de que los CEM artificiales en los rangos de frecuencias estáticas, extremadamente bajas (FEB) y de radiofrecuencia (RF) del espectro electromagnético no ionizante sean capaces, a intensidades muy bajas, de afectar negativamente tanto a la fauna como a la flora de todas las especies estudiadas. Todas las normas de exposición existentes son sólo para los seres humanos; la fauna está desprotegida, incluso dentro de los márgenes de seguridad de las directrices existentes, que son inapropiadas para las sensibilidades transespecíficas y la diferente fisiología no humana. Se discuten los efectos mecánicos, genotóxicos y sobre el ecosistema.

Introducción

En contra de la opinión popular, sabemos mucho sobre cómo afectan los campos electromagnéticos no ionizantes (CEM) a las especies no humanas porque hemos utilizado modelos animales y vegetales en las investigaciones que se remontan al menos a la década de 1930 (1). Estas investigaciones pueden haberse realizado pensando en los seres humanos, pero también pueden extrapolarse a la protección de las especies no humanas si decidimos aplicarlas de esa manera.

Los ratones y las ratas han sido las principales especies animales utilizadas en la investigación, pero también los conejos, los perros, los gatos, los pollos, los cerdos, los primates no humanos, los anfibios, los insectos, los nemátodos, varios microbios, las células de levadura y las plantas, entre otros. Se han observado efectos en todos los taxones, en diversas frecuencias, intensidades y parámetros de exposición. Para las especies no humanas, se trata de exposiciones

altamente biológicamente activas, que a menudo funcionan como estresores. Esto incluye los CEM no ionizantes en la estática, la frecuencia extremadamente baja (FEB; 0-300 Hz) a través de los rangos de radiofrecuencia (RF) utilizados en toda la tecnología moderna entre 3 kHz y 300 GHz.

Sin embargo, las extrapolaciones a la fauna y la flora a partir de condiciones de laboratorio cuidadosamente controladas son difíciles de cuantificar debido a un largo número de variables como: la variación genética y la movilidad, el cambio meteorológico/climático, los aspectos ambientales específicos del lugar/región, la duración de la exposición y las variaciones en los movimientos a través de los hábitats, las características físicas especializadas de las especies, el tamaño de los animales y la orientación hacia la fuente de campo, todo lo cual puede confundir la evaluación precisa de los datos. A veces, los estudios controlados se correlacionan con patrones observados en fauna y flora, por ejemplo, efectos genéticos, de comportamiento, reproductivos y de otro tipo. Cuando este es el caso, es posible tener más confianza. Pero a menudo los efectos sobre la fauna y flora se manifiestan en sentido negativo: las especies simplemente desaparecen. No obstante, cada vez hay más pruebas de que se han encontrado efectos para diferentes especies cerca de las estructuras de comunicación en estudios en los que se han hecho extrapolaciones a la exposición de campo (2-9).

Además, entre 2003 y 2021 se han publicado extensas revisiones de fauna y flora con los CEM (10-22). Recientemente, Levitt et al. (23-25) extrapolaron por primera vez los efectos a nivel del ecosistema en general, incluyendo extensas tablas que comparan los niveles ambientales crecientes con los efectos observados a intensidades extremadamente bajas que ahora son comunes en el medio ambiente como exposiciones crónicas, y ofrecen recomendaciones políticas basadas en las leyes ambientales existentes.

Los crecientes niveles medidos de CEM en los entornos ambientales (23) ciertamente aumentan la preocupación, especialmente con la 5G en el horizonte, que utiliza frecuencias más altas y nuevas características/formas de onda de la señal que son capaces de afectar a los insectos en particular, con implicaciones para todo el bioma, como se discute a continuación. La 5G está aumentando como plataforma de red en muchos lugares, incluso mientras intentamos averiguar cómo medir y distinguir sus señales de banda ancha del esquema más amplio de las redes LTE 3-4G con las que interactúa. Algunos de los aspectos extraordinarios de la 5G (por ejemplo, los picos de emisión significativamente más altos) ya se pueden distinguir del fondo de otras exposiciones como factor ambiental (26).

Conceptos erróneos sobre el funcionamiento y la terminología

En la actualidad existen dos ideas erróneas predominantes sobre cómo los campos electromagnéticos no ionizantes de bajo nivel se acoplan a las especies no humanas y las afectan: (1) No es necesario preocuparse por el medio ambiente, ya que las exposiciones, tal y como están reguladas actualmente, son demasiado bajas para causar efectos; y (2) Las normas de exposición existentes para los seres humanos son suficientes para cubrir también a las especies no humanas. Ninguna de las dos suposiciones es correcta.

En la actualidad, ninguna directriz sobre emisiones de radiofrecuencia (RF) tiene en cuenta a las especies no humanas, a pesar del constante aumento de los niveles de fondo medidos en las zonas urbanas, suburbanas y rurales [véase el Suplemento 1 de la referencia (23)] que pueden afectar a la fauna y la flora [véase los Suplementos 3 y 4 de la referencia (24)]. Esto incluye las directrices permitidas para la radiación de RF (100 kHz-300 GHz) creadas por la Comisión

Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) (27), así como una organización miembro del Instituto Nacional de Normalización de Estados Unidos (ANSI) llamada International Electronics and Electrical Engineers (IEEE) que ha escrito directrices de exposición para frecuencias entre 0 Hz y 300 GHz (28). Una vez que los países o las agencias reguladoras, como la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de Estados Unidos (29), adoptan dichas directrices, éstas pueden convertirse en normas aplicables si dichas entidades deciden hacerlo dentro de su autoridad estatutaria. La FCC puede aplicar, y a veces lo hace, normas de emisión de RF basadas parcialmente en las directrices del IEEE (a efectos de este documento, nos referiremos a las recomendaciones como directrices de exposición aplicadas al medio ambiente). Además, la ICNIRP y la IEEE/FCC sólo controlan las exposiciones agudas a corto plazo capaces de calentar los tejidos, no las exposiciones crónicas de bajo nivel a largo plazo que son comunes hoy en día y para las que dicen que no hay pruebas suficientes que justifiquen un cambio en las recomendaciones (Estos autores no están de acuerdo). Tampoco incluyen importantes características de señalización (29), como la modulación con efectos biológicos significativos particulares de las diferentes características de transmisión (30). Muchos países europeos, así como Canadá y Australia, han adoptado tradicionalmente las directrices de la ICNIRP (a veces con ligeras variaciones), mientras que otros, como Suiza, han adoptado niveles más estrictos (25).

Una de las complejidades (entre otras) de la redacción de las directrices de seguridad de los CEM en general, pero sobre todo teniendo en cuenta la fauna, es la diferencia semántica entre "emisiones" (características del campo en la fuente de transmisión) y "exposiciones" (características del campo absorbido por un objeto). La ICNIRP/IEEE/FCC tiene componentes de directrices tanto para las emisiones (expresadas como un valor de energía radiante en el espacio para encuentros de campo lejano a cierta distancia de la fuente generadora) como para las exposiciones [expresadas como una Tasa de Absorción Específica (TAS -SAR en inglés-) que también es pertinente para las exposiciones de campo cercano, como las de los teléfonos móviles sostenidos contra la cabeza humana]. Las emisiones, por supuesto, dan lugar a exposiciones; es sólo una cuestión de grado. Dependiendo de la especie y el entorno, la fauna es capaz de experimentar exposiciones de campo cercano y lejano como los humanos. Una vez que las emisiones abandonan la fuente emisora, son capaces de crear amplias exposiciones y convertirse en una fuente crónica de contaminación. A efectos de este documento, utilizaremos "emisiones" para denotar los valores de transmisión y "exposiciones" para denotar las exposiciones ambientales no controladas y no reguladas.

Hay muchos elementos en el medio ambiente que pueden afectar a la forma en que se absorbe la energía electromagnética no ionizante, incluyendo la humedad atmosférica y/o el contenido de partículas, la composición del suelo, los obstáculos naturales y/o artificiales (árboles/edificios), y la presencia de otras formas de onda que pueden aumentar y/o disminuir las exposiciones, entre otros. Estas complejidades no deben utilizarse como excusa para no hacer nada. Redactar directrices para todas las especies es, sin duda, una tarea de leones que requerirá mucho más que simplemente bajar la potencia; puede ser necesaria una importante reingeniería eléctrica y de RF, alteraciones en la asignación de frecuencias y también un cambio social (30).

Un esfuerzo actual para incluir a las especies no humanas en las directrices sobre emisiones

Actualmente, la Agencia Australiana de Protección contra la Radiación y Seguridad Nuclear (ARPANSA), que utiliza las normas de la ICNIRP, se esfuerza por investigar una amplia

información sobre los efectos en fauna y flora (31). La ARPANSA, al igual que la ICNIRP/IEEE/FCC, se ha centrado tradicionalmente en las exposiciones humanas sin que se hayan reconocido directrices dirigidas específicamente a la protección de plantas y animales (31). Hasta ahora, la investigación de ARPANSA se ha centrado en el diseño de los estudios, es decir, en cómo clasificar la investigación de acuerdo con criterios de inclusión/exclusión predefinidos, y luego incorporar los conocimientos en "mapas sistemáticos" para ver si los actuales criterios de exposición humana son suficientes para cubrir la fauna y flora.

Aunque se trata de un proyecto importante que hasta ahora han pasado por alto los grupos que establecen las directrices, el enfoque descrito puede resultar poco más que una fórmula para verificar el statu quo. Los criterios de exclusión definidos probablemente eliminarán de la revisión la mayor parte de la investigación destacada sobre la sensibilidad no humana a los niveles de exposición de menor intensidad a los que muchas especies son exquisitamente sensibles en, o cerca de, niveles de fondo naturales que están claramente muy por debajo de las directrices actuales. Los datos resultantes estarán inevitablemente sesgados, ya que la investigación sobre el nivel de exposición más bajo se mezclará con los controles y esencialmente desaparecerá en el análisis propuesto como una no exposición, o puede ser eliminada de la revisión por completo. Ejemplo: el criterio de eliminación define los controles del estudio como: "Exposición simulada, ninguna exposición más allá del nivel de exposición de fondo (que puede suponerse insignificante), o exposición a un nivel inferior" (31). Dado que no se define el "nivel inferior" y que muchos niveles ambientales de fondo son ahora artificialmente altos [véase el Suplemento 1 de la referencia (23)], puede que ésta no sea la mejor metodología para cuantificar las exposiciones de campo en el mundo real para las especies no humanas, y mucho menos para compararla con los estudios pertinentes. Cualquier investigación verdadera sobre los efectos de los CEM en fauna y flora debe partir de las realidades ambientales/biológicas, no de las perspectivas dosimétricas preexistentes.

Diferentes rangos de frecuencia pueden afectar negativamente a una especie, pero no tienen ningún impacto en otra. El enfoque singular de ICNIRP/IEEE/FCC sobre los efectos del calentamiento puede ser particularmente insostenible en lo que respecta a los insectos, que pueden alcanzar coincidencias resonantes con frecuencias más altas como las utilizadas en los rangos superiores de 5G (>6 GHz) debido al tamaño reducido de los insectos (32, 33). Los insectos no disipan el calor y pueden sufrir efectos extremos en cortos periodos de exposición incluso en rangos mucho más bajos (<3 GHz), provocando problemas reproductivos y la muerte (1). Las normas de exposición existentes pueden evitar los efectos del calentamiento en los seres humanos debido a los mecanismos de termorregulación, pero no en otras especies como los insectos, los pequeños anfibios y los reptiles.

La exposición de la fauna y flora en la actualidad es sólo una cuestión de grado. Muchas especies de la fauna silvestre atraviesan constantemente campos artificiales variables en todos los entornos, con muchas especies voladoras -como pájaros, murciélagos e insectos- que se acercan mucho a las fuentes de transmisión a las que los humanos rara vez, o nunca, se exponen. Algunas de las zonas de mayor densidad de potencia, por ejemplo, cerca de fincas de antenas de radiodifusión, están específicamente ubicadas lejos de las poblaciones humanas con la suposición de que, si fauna y flora se vieran afectadas, abandonarían esos sitios por otros más favorables. Sin embargo, debido a la compleja magnetorrecepción de las aves, las infraestructuras generadoras de RF pueden funcionar como un atrayente. Muchas de estas exposiciones pueden simplemente dañar la fauna silvestre y pasar desapercibidas,

probablemente por efectos térmicos de campo cercano, así como por efectos no térmicos de campo lejano, entre otras causas (34-36).

La investigación sobre los CEM antropogénicos ha encontrado efectos no lineales que funcionan de forma diferente a los modelos clásicos de toxicología lineal de dosis-respuesta. Los efectos de los CEM pueden ser fundamentalmente diferentes a los efectos térmicos, posiblemente actuando a través de mecanismos diferentes (37). Los efectos pueden ser más perjudiciales para algunas especies a intensidades más bajas, exactamente lo contrario de cómo se redactan actualmente las directrices de emisión que pueden convertirse en normas de exposición y una razón principal para incluir las exposiciones de nivel más bajo en los nuevos esfuerzos de investigación. Incluso las regiones naturales que antes eran vírgenes son ahora entornos expuestos a las RF debido a las redes de telefonía móvil terrestres que bordean los parques nacionales y las áreas naturales, y al aumento exponencial de los satélites que ofrecen conectividad a Internet en cualquier lugar de la Tierra (23).

Las verdaderas realidades biológicas transespecíficas de las exposiciones actuales son enormemente difíciles de cuantificar, dadas las variables inherentes a las diferencias de las especies, las adaptaciones macro y microclimáticas, los patrones de apareamiento/migración y los entornos enormemente diferentes -por ejemplo, aéreos, terrestres y acuáticos-, todos ellos con adaptaciones específicas de las especies y mecanismos de recepción electromagnética únicos. Se necesitan nuevos enfoques metodológicos que tengan en cuenta las exposiciones más bajas en los niveles del ecosistema.

Sensibilidad natural frente a los CEM de origen artificial

Muchas especies no humanas tienen vulnerabilidades muy específicas a los CEM antropogénicos debido a una fisiología única que depende de los campos geomagnéticos estáticos de la Tierra y los utiliza constantemente para la migración/orientación estacional, la construcción del nido/de la guarida, el apareamiento, la reproducción, el cuidado de las crías, la búsqueda de alimentos, la defensa del territorio, los simples ritmos circadianos diarios/estacionales, e incluso la longevidad y la supervivencia. Los factores de percepción electromagnética incluyen mecanismos ambientales multisistémicos específicos de cada especie. Muchas especies tienen células electrorreceptoras especializadas y/o capacidades de magnetorrecepción pertinentes para sus entornos que superan con creces la sensibilidad humana. Por ejemplo, muchas especies pueden percibir los campos magnéticos naturales de corriente continua de diversas maneras, entre ellas: las especies de aves migratorias (38, 39); numerosas especies de insectos, incluidas las abejas melíferas (40, 41); los peces (42-47); los mamíferos (48); los murciélagos (49); los moluscos (50), y las bacterias (51, 52). Algunas especies de aves pueden llegar a "ver" los campos magnéticos de la Tierra a través de complejas capacidades de magnetocepción (53) situadas en la zona de los ojos y el pico.

Como señalan Panagopoulos et al. (54), los CEM naturales y los producidos por el hombre son significativa y fundamentalmente diferentes. A diferencia de los CEM naturales, todos los CEM antropogénicos están polarizados, lo que significa que son más activos desde el punto de vista biológico por su capacidad de amplificar las intensidades (lo que se denomina interferencia constructiva), así como de alterar las oscilaciones de las moléculas celulares cargadas/polares en planos paralelos en fase con el campo aplicado. Esto puede dar lugar a un cierre irregular de los canales iónicos de las membranas celulares y, por tanto, alterar el equilibrio electroquímico celular normal. En otras palabras, los CEM producidos por el hombre pueden captar, arrastrar y manipular la arquitectura del funcionamiento básico de las células vivas, a diferencia de los CEM

naturales con los que la mayoría de los seres vivos han evolucionado. Además, los CEM antropogénicos suelen funcionar a intensidades más altas durante períodos más largos, aumentando así las exposiciones en rangos de frecuencia que son mínimos en el entorno natural, introduciendo características de señalización (modulación, desfase, pulsación, etc.) que simplemente no existen en la naturaleza, pero que ahora se amplifican enormemente como una nueva exposición debido a la tecnología. Todos estos factores pueden explicar los innumerables efectos biológicos observados en la literatura durante las últimas décadas.

Magnetorecepción: Mecanismos

Existen tres mecanismos principales relacionados con la magnetorecepción en las especies no humanas:

- Un proceso de inducción en el que señales eléctricas débiles son inducidas por la estimulación magnética en receptores sensoriales especializados (55).
- Un método magnetomecánico en el que los depósitos localizados de cristales de magnetita de dominio único crean interacciones de información de señales (56, 57).
- Un modelo de células especializadas en el que las moléculas fotorreceptoras de pares de radicales crean vías de información dedicadas, un área que está recibiendo una importante atención de investigación en la actualidad (19, 30, 58-73).

En el modelo de inducción, según Tenforde (57), los órganos especializados participan en las interacciones electrodinámicas con campos electromagnéticos débiles. En las especies acuáticas, esto se observa en los tiburones, las rayas y las rayas (peces elasmobranquios) con cabezas que contienen canales llenos de gelatina que tienen una alta conductividad eléctrica llamados Ampullae de Lorenzini. En estos canales se inducen pequeños gradientes de tensión a través de campos eléctricos de corriente continua de hasta $0,5 \mu\text{V}/\text{m}$ cuando estos peces nadan a través de las líneas de flujo geomagnético de la Tierra. La información direccional la proporciona la polaridad del campo inducido en relación con el campo geomagnético de la Tierra. Puede tratarse de un factor específico del entorno acuático y de la especie, ya que no se han encontrado órganos de este tipo en aves, insectos o animales terrestres (58), aunque otros mecanismos fisiológicos pueden funcionar de forma similar en algunas especies terrestres.

Muchos animales han desarrollado otros órganos receptores especiales. Por ejemplo, el ornitorrinco (*Ornithorhynchus anatinus*), un mamífero semiacuático que pone huevos, tiene miles de sensores eléctricos en la piel del pico que permiten procesar información vital en la corteza somatosensorial (74). Un ornitorrinco puede detectar un campo eléctrico de $20 \mu\text{V}/\text{cm}$ (equivalente al producido por los músculos de una gamba) a través de estos electrorreceptores que interactúan con un mecanorreceptor. Este tipo de electrorrecepción también se observa en dos especies acuáticas de monotremas: el equidna de pico largo (*Zaglossus bruijnii*) y el de pico corto (*Tachyglossus aculeatus*). Otros peces eléctricos (incluidos los elasmobranquios) emiten sus propios campos eléctricos que se extienden varios centímetros para su localización/orientación, búsqueda de alimento y defensa (75, 76). Esta capacidad única permite a los peces eléctricos distinguir diferencias sutiles en las propiedades eléctricas de su entorno inmediato, incluidos los campos eléctricos de otros peces, mediante electrorreceptores capaces de detectar un campo de $5 \text{ nV}/\text{cm}$. Aunque estas adaptaciones perceptivas evolutivas son extremadamente eficaces y sensibles, también hacen que estas especies sean excepcionalmente vulnerables a los campos antropogénicos no naturales. Algunos investigadores postulan que los electrorreceptores de los peces son una forma de tacto y comunicación alternativos (77). La

principal preocupación para las especies acuáticas es la exposición a la FEB de corriente alterna (CA) [AC-ELF en inglés] del cableado submarino y otras tecnologías, y no a la RF, que es más preocupante para las especies terrestres y aéreas (24).

El modelo magnetomecánico implica el cristal natural basado en el hierro llamado magnetita (78-80) que se ha encontrado en la mayoría de las especies estudiadas, a menudo en áreas fisiológicas muy diferentes. Las orientaciones/interacciones de la magnetita se modelan en función del campo geomagnético. La magnetita es altamente reactiva a los campos electromagnéticos externos, un millón de veces más fuerte que cualquier otro material magnético conocido. Las zonas abdominales de las abejas melíferas, por ejemplo, contienen magnetita con complejas terminaciones nerviosas que se alimentan de ella y pueden detectar fluctuaciones de campos magnéticos estáticos tan débiles como 26 nT frente a campos magnéticos de fondo de fuerza terrestre que son mucho más elevados (79). También pueden detectar campos alternos débiles a frecuencias de 10 y 60 Hz (79). Las abejas también se ven afectadas por las RF, como se explica más adelante.

El tercer modelo mecanicista implica una compleja conversión de electrones (interconversión singlete-triplete) y una reacción de pares de radicales libres en un grupo de proteínas llamadas criptocromos.

Tal y como revisan Levitt et al. (24), se han encontrado criptocromos en las retinas de los pájaros cantores migratorios nocturnos, lo que indica una intrincada comunicación entre el ojo y el cerebro de las aves para orientarse cuando dependen de la magnetorrecepción (38, 39). También se ha descubierto que los criptocromos son un componente crítico de la magnetorrecepción en las moscas de la fruta (*Drosophila melanogaster*) (81). También se sabe que otros animales tienen criptocromos en la retina (38). Se ha informado de que la radiación de radiofrecuencia (82) y los campos magnéticos oscilantes interrumpen la orientación de la brújula migratoria en las aves migratorias (83). También se ha informado de la presencia de criptocromos en las plantas, lo que podría explicar el efecto de los CEM en el crecimiento de las mismas (66). También se sabe que los criptocromos están implicados en los ritmos circadianos (72). Ritz et al. (63) publicaron una revisión sobre las teorías, la plausibilidad y las complejidades de los pares criptocromo/radical.

Algunas especies dependen de combinaciones de mecanismos, por ejemplo, en algunas aves existen dos mecanismos paralelos que median, según sea necesario, diferentes tipos de información magnética. Esto es lo que facilita el vuelo en días soleados frente a los nublados y/o los vuelos nocturnos. Ambos mecanismos pueden interrumpirse fácilmente (63, 84-86). Se cree que las aves pueden coprocesar la información magnética natural de corriente continua (CC) con la información visual y son capaces de distinguirlas entre sí (87, 88). Según Wiltschko y Wiltschko (88) y Wiltschko et al. (89), el mecanismo probable se produce en el área cerebral superior y en los ojos a través de los pares radicales y del procesamiento de la información dependiente de la luz (se han encontrado criptocromos de fotopigmentos que absorben la luz azul en las retinas de las aves). La brújula magnética aviar -una brújula de inclinación- reacciona a algo más que a los campos magnéticos naturales. Se ha descubierto que los campos de RFR en las frecuencias de Larmor cercanas a 1,33 MHz alteran la orientación de las aves en una relación de resonancia extremadamente sensible (24). La radiación de radiofrecuencia, en particular, puede interferir con la magnetorrecepción y ser capaz de inutilizar la brújula de las aves mientras dure la exposición (4, 84). Hay muchas incertidumbres en este campo que necesitan ser aclaradas.

Las radiaciones de radiofrecuencia también pueden afectar al "comportamiento natural de regreso a casa" -la asombrosa capacidad de algunas especies como las tortugas marinas (90); las anguilas (91); y los salmones (42-44), entre otras- de volver a su lugar de nacimiento original para reproducirse. El mecanismo subyacente, aunque no se conoce bien, implica que estas especies tienen "impreso" el lugar exacto de su nacimiento, probablemente a través de las configuraciones geomagnéticas, y luego lo "recuerdan" en el momento de la reproducción, incluso cuando están a miles de kilómetros de distancia. La intensidad del campo geomagnético local y el ángulo de inclinación se imprimen de alguna manera en los recién nacidos, información que luego se utiliza para regresar en el momento de la reproducción. Landler et al. (92) descubrieron múltiples efectos de los CEM en las tortugas que se reproducen también en tierra, por ejemplo, que la RFR puede alterar la orientación natural, establecer su propia orientación e invertir completamente la orientación natural. Este estudio pionero es una razón para proteger las zonas de cría/anidación sensibles de las torres de telefonía móvil/transmisoras que se encuentran en las cercanías.

Es probable que en muchas especies se utilicen diferentes aspectos de los CEM y mecanismos moleculares y posiblemente estímulos más sutiles aún no definidos. La intensidad y/o inclinación de un estímulo, cuando se combina con el vector del campo geomagnético, puede proporcionar información direccional. En estudios de comportamiento aviar (93) se descubrió que las aves utilizaban tanto el criptocromo como la magnetita en respuesta a un campo magnético pulsado corto e intenso. También se descubrió que la orientación de las aves dependía de la luz y se veía fácilmente alterada por campos magnéticos de alta frecuencia en el rango de los MHz (83), lo que sugiere que, junto con los estudios electrofisiológicos e histológicos, los ojos de las aves tienen un mecanismo de pares radicales que proporciona información direccional tipo brújula, mientras que la magnetita de la parte superior del pico detecta la intensidad magnética, proporcionando así información posicional. Sin embargo, los autores (83) señalaron que la brújula magnética de los pájaros cantores puede ser perturbada por un campo magnético oscilante de 1,403-MHz de 2-3 nT, un nivel que no puede ser explicado por el mecanismo de pares radicales.

En 2014, Engles et al. (3) descubrieron que el ruido magnético entre 2 kHz y 9 MHz perturbaba la orientación de la brújula magnética del petirrojo europeo migratorio (*Erithacus rubecula*) a un nivel increíblemente bajo de 0,01 V/m, o 0,0000265 μ W/cm² (ese rango de frecuencia está dentro de la transmisión de radio AM). También se ha informado de interferencias similares de magnetorrecepción por RFR en la misma especie, siendo la banda ancha la más perjudicial (8), así como en otras especies (4).

Se sabe que otra especie migratoria de larga distancia -la emblemática mariposa Monarca (*Danaus plexippus*) en Estados Unidos- tiene magnetita en sus antenas (94, 95) y contiene criptocromos (96, 97). Un estudio de 1982 (98) descubrió que las zonas de la cabeza y el tórax de las monarcas contenían materiales magnéticos y un estudio de 2014 (99) descubrió que la migración otoñal más larga de las monarcas desde Canadá hasta las zonas de hibernación en México está asistida por una brújula magnética.

La información anterior indica posibles efectos adversos a nivel de ecosistema para algunas especies de aves, acuáticas e insectos debido a la RF en los niveles ambientales actuales [véase el Suplemento 1 de la referencia (23)].

Efectos genéticos y efectos de los CEM en los insectos

A pesar de las suposiciones clásicas de que la radiación no ionizante no puede dañar directamente el ADN, se han observado efectos genotóxicos en especies terrestres, aéreas, acuáticas y vegetales a exposiciones de RF de muy baja intensidad muy por debajo de las directrices de la ICNIRP/IEEE/FCC. Hay al menos 48 artículos que muestran daños en el ADN tras la exposición a RF de $< 0,4$ W/kg [véase el Suplemento 1 de la referencia (24)]. Los efectos genotóxicos también se observan en especies animales y vegetales que son excepcionalmente sensibles tanto a los CEM naturales como a los artificiales [véase también el Suplemento 2 de la referencia (24)]. Los insectos son especialmente preocupantes, ya que sus poblaciones están siendo diezgadas en todo el mundo (24).

En el rango de 1,2 MHz -conocido como la frecuencia de Larmor- los insectos demostraron los efectos más fuertes (100). La frecuencia de Larmor también está relacionada con la resonancia de pares de radicales y la formación de superóxido. Esto indica que los efectos de la radiación de RF dependen de la frecuencia. La 5G y la banda ancha incluyen este rango. Shepherd et al. (101) también descubrieron que los CEM de frecuencia extremadamente baja perturban el sentido direccional de las abejas melíferas (*Anthophila*).

Dependiendo del tipo de insecto y de la duración de la exposición, Michaelson y Lin (1), ya en 1987, observaron reacciones secuenciales de los insectos a la RFR (a altas intensidades): los insectos primero intentaban escapar, seguidos de alteraciones motoras y problemas de coordinación, incluyendo rigidez, inmovilidad y finalmente la muerte. A la misma intensidad de campo, *D. melanogaster*, por ejemplo, sobrevivió más de 30 minutos, mientras que algunos insectos tropicales sólo vivieron unos segundos. También se observaron cambios en la concentración metabólica y efectos en la embriogénesis, acelerándose la gastrulación y el crecimiento larvario (102) (la embriogénesis es el periodo necesario para que una mariposa complete la metamorfosis). En 1961 -en uno de los primeros estudios en encontrar que la pulsación por sí sola es una exposición biológicamente activa-, Heller y Mickey (103) descubrieron que la RFR pulsada entre 30-60 MHz causaba un aumento de 10 veces en las mutaciones recesivas ligadas al sexo. En estudios posteriores con modelos de *D. melanogaster*, Panagopoulos et al. (104) descubrieron efectos graves en la oogénesis de las fases temprana y media cuando las moscas fueron expuestas in vivo a la radiación GSM 900-MHz o DCS 1.800-MHz de los teléfonos móviles digitales comunes, a intensidades no térmicas durante unos minutos al día durante los primeros 6 días de vida adulta. La disminución de la oviposición -como también informaron previamente Panagopoulos et al. (105-107)- se planteó como hipótesis la degeneración de un gran número de cámaras de huevos tras la fragmentación del ADN de las células constituyentes. Esto fue inducido por la radiación de los teléfonos móviles GSM y DCS. Por primera vez, se documentó la muerte celular inducida en todos los tipos de células que constituyen una cámara de huevos -incluyendo las células del folículo, las células nodrizas y el ovocito- y en todas las etapas de la oogénesis temprana y media, desde el germarium hasta la etapa 10, durante la cual la muerte celular programada no se produce fisiológicamente (se descubrió que las etapas de desarrollo más sensibles al estrés electromagnético inducido por los campos GSM y DCS eran el germarium y las etapas 7-8). Estos trabajos, tomados en conjunto, significan graves efectos potenciales de los teléfonos/infraestructuras móviles/inalámbricas y dispositivos WiFi para todas las especies de insectos de tamaño similar. Panagopoulos (108) trató más a fondo el tema en una extensa revisión sobre los efectos genéticos en 2019.

Las hormigas también reaccionan negativamente a la RF (109-111). Cammaerts et al. (111) descubrieron que la memoria y la asociación entre los lugares de comida y las señales visuales/olfativas en las hormigas (*Myrmica sabuleti*) se inhibían de forma significativa, llegando

a anularse por completo la memoria, por exposiciones a la señal GSM-900 MHz a 0,0795 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Se observó un efecto acumulativo incluso a muy baja intensidad con la exposición posterior. El estado general de las colonias expuestas acabó pareciéndose al del trastorno de colapso de las colonias de abejas (*Apis mellifera*). Los investigadores concluyeron que las exposiciones comunes a teléfonos móviles/torres y otras fuentes de transmisión pueden tener efectos desastrosos en una amplia gama de insectos que dependen de la memoria olfativa y/o visual, incluidas las abejas.

Desde hace casi 100 años, los investigadores saben que las abejas tienen un agudo sentido de los campos magnéticos de corriente continua de la Tierra (40, 112-115) y dependen de esa percepción para sobrevivir. Debido a la gran importancia de las abejas como polinizadoras en el suministro de alimentos para el ser humano, y a su actual y significativo descenso de población, son un modelo muy estudiado para los efectos de los CEM de las RF y las FEB (véase más adelante). Los primeros estudios se llevaron a cabo en los rangos de FEB (24) y están en curso. Para una excelente revisión de los efectos de los CEM de FEB/RF en los insectos, incluidas las abejas, véase Balmori (16) y un artículo reciente de Li et al. (114) sobre la exposición a FEB y los defectos del desarrollo.

Discusión

Está claro que las especies no humanas experimentan los campos electromagnéticos como factores estresantes ambientales y los efectos biológicos pueden ocurrir a niveles antropogénicos en nuestro entorno actual. Esta variable, en gran medida no reconocida, puede posiblemente alterar ecosistemas delicados, incluyendo posiblemente la biosfera donde se encuentran todos los organismos vivos, y puede, de hecho, estar haciéndolo. Tradicionalmente, salvo en pequeñas situaciones localizadas, por ejemplo, cerca de los corredores de las líneas eléctricas o de las antenas de radiodifusión, los efectos ambientales de los CEM de RF y FEB no han sido motivo de grave preocupación para las autoridades reguladoras. Pero este tema requiere ahora una atención inmediata con la 5G en el horizonte, así como reexaminar los niveles ambientales crónicos crecientes en todos los rangos de frecuencias electromagnéticas no ionizantes actuales.

Desde principios de la década de 1970, los investigadores han sabido cómo los campos electromagnéticos y de radiofrecuencia se acoplan con la mayoría de las especies animales (128, 129). Dados nuestros crecientes niveles ambientales de CEM, una comprensión mucho más precisa de los procesos moleculares y celulares de electro y magnetorrecepción en especies no humanas resulta repentinamente crítica. Es posible que ya estemos sobrepasando los sensores biológicos naturales de algunas especies que evolucionaron durante eones. Los mecanismos de electrorrecepción, incluidos los magneto/electrorreceptores, la magnetita y los pares de criptocromos/radicales, permiten que grandes organismos vivos en todos los entornos detecten la presencia y los cambios inmediatos en campos electromagnéticos no ionizantes a intensidades muy bajas en un rango de frecuencias. Esas sensibilidades aumentadas funcionan mucho más allá de la percepción humana y crean vulnerabilidades únicas que pueden ser perturbadas fácilmente por nuevos campos creados por el hombre. Dado que la tecnología cambia tan rápido, no es posible una adaptación evolutiva.

La radiación de radiofrecuencia es una forma de contaminación atmosférica energética y debe regularse como tal (25). La ley estadounidense (130) [42 USC § 7602 (g)] define la contaminación del aire como:

"El término 'contaminante atmosférico' significa cualquier agente de contaminación atmosférica o combinación de dichos agentes, incluyendo cualquier sustancia o materia física, química, biológica o radiactiva (incluyendo el material fuente, el material nuclear especial y el material subproducto) que se emita o entre de otro modo en el aire ambiente. Dicho término incluye cualquier precursor de la formación de cualquier contaminante atmosférico, en la medida en que el Administrador haya identificado dicho precursor o precursores para el propósito particular para el que se utiliza el término 'contaminante atmosférico'."

A diferencia de los contaminantes clásicos de la toxicología química, en los que normalmente se puede identificar y cuantificar un culpable, la RF puede funcionar como un contaminante "de proceso" en el aire, de forma parecida a cómo funcionan los disruptores endocrinos en los alimentos y el agua, en los que el agente estresante provoca una cascada de efectos sistémicos imprevisibles. El estímulo en la analogía de la radiación de RF sería físico/energético en lugar de químico.

Deben establecerse en consecuencia, para la fauna y flora, directrices de exposición crónica a largo plazo a los CEM de bajo nivel, actualmente inexistentes; deben desarrollarse técnicas de mitigación cuando sea posible; se deben realizar revisiones ambientales completas antes de la concesión de licencias/construcción de nuevas tecnologías importantes como 5G; y deben aplicarse estrictamente las leyes/reglamentos ambientales (25). Desde hace mucho tiempo tenemos la obligación de considerar las posibles consecuencias para otras especies de nuestra actual "tecnoforia" [euforia tecnológica] sin control, una obligación que hasta ahora no hemos considerado antes de que las especies se extingan. En opinión de estos autores, la evidencia que requiere acción es clara.

Referencias:

1. Michaelson SM, Lin JC. *Biological Effects and Health Implications of Radiofrequency Radiation*. New York and London: Plenum Press (1987). doi: 10.1007/978-1-4757-4614-3
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
2. Balmori A. Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of white stork (*Ciconia ciconia*). *Electromagn Biol Med*. (2005) 24:109–19. doi: 10.1080/15368370500205472
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
3. Engels S, Schneider NL, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, Michalik A, et al. Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature*. (2014) 509:353–6. doi: 10.1038/nature13290
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
4. Wiltschko R, Thalau P, Gehring D, Nießner C, Ritz T, Wiltschko W. Magnetoreception in birds: the effect of radio-frequency fields. *J Royal Soc Interface*. (2015) 12:20141103. doi: 10.1098/rsif.2014.1103
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
5. Nicholls B, Racey PA. Bats avoid radar installations: could electromagnetic fields deter bats from colliding with wind turbines? *PLoS ONE*. (2007) 2:e297. doi: 10.1371/journal.pone.0000297
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
6. Nicholls B, Racey PA. The aversive effect of electromagnetic radiation on foraging bats: a possible means of discouraging bats from approaching wind turbines. *PLoS ONE*. (2009) 4:e6246. doi: 10.1371/journal.pone.0006246
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
7. Magras IN, Xenos TD. RF-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics*. (1997) 18:455–61. doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:6<455::AID-BEM8>3.0.CO;2-1
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
8. Schwarze S, Schneibder NL, Reichl T, Dreyer D, Lefeldt N, Engels S, et al. Weak broadband electromagnetic fields are more disruptive to magnetic compass orientation in a night-migratory songbird (*Erithacus rubecula*) than strong narrow-band fields. *Front Behav Neurosci*. (2016) 10:55. doi: 10.3389/fnbeh.2016.00055

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

9. Zosangzuali M, Lalremruati M, Lalmuansangi C, Nghakliana F, Pachuau L, Bandara P, et al. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation emitted from a mobile phone base station on the redox homeostasis in different organs of Swiss albino mice. *Electromagn Biol Med.* (2021) 40:393–407. doi: 10.1080/15368378.2021.1895207

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

10. Martínez AB. The Effects of Microwave Radiation on the Wildlife. *Preliminary Results.* (2003). Available online at: <https://www.semanticscholar.org/author/A.-Mart%C3%ADnez/2110496513> (accessed November 17, 2022).

[Google Scholar](#)

11. Balmori A. Electromagnetic pollution from phone masts. Effects on wildlife. *Pathophysiology.* (2009) 16:191–9. doi: 10.1016/j.pathophys.2009.01.007

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

12. Balmori A. The incidence of electromagnetic pollution on wild mammals: a new “poison” with a slow effect on nature? *Environmentalist.* (2010) 30:90–7. doi: 10.1007/s10669-009-9248-y

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

13. Balmori A. Electrosmog and species conservation. *Sci Total Environ.* (2014) 496:314–6. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.061

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

14. Balmori A. Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation. *Sci Total Environ.* (2015) 518–519:58–60. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.077

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

15. Balmori A. Radiotelemetry and wildlife: highlighting a gap in the knowledge on radiofrequency radiation effects. *Sci Total Environ.* (2016) 543 (Part A):662–9. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.073

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

16. Balmori A. Electromagnetic radiation as an emerging driver factor for the decline of insects. *Sci Total Environ.* (2021) 767:144913. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144913

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

17. Cucurachi S, Tamis WLM, Vijver MG, Peijnenburg WJGM, Bolte JFB, de Snoo GR. A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). *Environ Intern.* (2013) 51:116–40, doi: 10.1016/j.envint.2012.10.009

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

18. Krylov VV, Izyumov Yu G, Izekov EI, Nepomnyashchikh VA. Magnetic fields and fish behavior. *Biol Bull Rev.* (2014) 4:222–31. doi: 10.1134/S2079086414030049

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

19. Lai H. Exposure to static and extremely-low frequency electromagnetic fields and cellular free radicals. *Electromagn Biol Med.* (2019) 38:231–48. doi: 10.1080/15368378.2019.1656645

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

20. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Mobile telephony radiation effects on living organisms. In: Harper AC, Buress RV, editors. *Mobile Telephones.* Hauppauge, NY: Nova Science Publishers (2018), p. 107–49.

[Google Scholar](#)

21. Sivani S, Sudarsanam D. Impacts of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) from cell phone towers and wireless devices on biosystem and ecosystem – a review. *Biol Med.* (2013) 4:202–16.

[Google Scholar](#)

22. Tricas T, Gill A. *Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species.* Camarillo, CA: Normandeau Associates, Exponent; U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, Pacific OCS Region, (OCS Study BOEMRE 2011-09). (2011).

[Google Scholar](#)

23. Levitt BB, Lai HC, Manville AM II. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, part 1. Rising ambient EMF levels in the environment. *Rev Environ Health.* (2021) 37:81–122. doi: 10.1515/reveh-2021-0026

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

24. Levitt BB, Lai HC, Manville AM II. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 2 impacts: how species interact with natural and man-made EMF. *Rev Environ Health.* (2021) 37:327–406. doi: 10.1515/reveh-2021-0050

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

25. Levitt BB, Lai HC, Manville AM II. Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna, Part 3. Exposure standards, public policy, laws, and future directions. *Rev Environ Health*. (2021). doi: 10.1515/reveh-2021-0083 [Epub ahead of print].
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
26. Chiaraviglio L, Lodovisi C, Franci D, Pavoncello S, Aureli T. Six months in the life of a cellular tower: is 5G exposure higher than pre-5G one? In: *2022 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*. (2022), p. 1–6. doi: 10.1109/MN55117.2022.9887670
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
27. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physic*. (2020) 118:483–524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
28. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric Magnetic and Electromagnetic Fields 0 Hz to 300 GHz. In: *IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019)*. (2019), p. 1–312. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
29. Federal Communications Commission (FCC),. Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields and Reassessment of FCC Radiofrequency Exposure Limits and Policies. A Rule by the Federal Communications Commission on 04/01/2020. Available online at: <https://www.federalregister.gov/documents/2020/04/01/2020-02745/human-exposure-to-radiofrequency-electromagnetic-fields-and-reassessment-of-fcc-radiofrequency> (accessed November 17, 2022).
[Google Scholar](#)
30. Barnes F, Freeman ER Jr. Some thoughts on the possible health effects of electric and magnetic fields and exposure guidelines. *Front Public Health*. (2022) 10:994758. doi: 10.3389/fpubh.2022.994758
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
31. Karipidis K, Brzozek C, Bhatt CR, Loughran SP, Wood A. What evidence exists on the impact of anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields on animals and plants in the environment? A systematic map protocol. *Environ Evid*. (2021) 10:39. doi: 10.1186/s13750-021-00252-w
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
32. Thielens A, Bell D, Mortimore DB, Greco MK, Martens L, Joseph W. Exposure of insects to radio-frequency electromagnetic fields from 2 to 120s A, *BSci Rep*. (2018) 8:3924. doi: 10.1038/s41598-018-22271-3
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
33. Thielens A, Greco MK, Verloock L, Martens L, Joseph W. Radio-frequency electromagnetic field exposure of western honey bees. *Sci Rep*. (2020) 10:461. doi: 10.1038/s41598-019-56948-0
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
34. Manville AM II. Anthropogenic-related bird mortality focusing on steps to address human-caused problems. In: *Invited White Paper for the Anthropogenic Panel, 5th International Partners in Flight Conference, August 27, 2013, Snowbird, Utah*. Division of Migratory Bird Management, USFWS, peer-reviewed white paper. (2013), p. 16.
[Google Scholar](#)
35. Manville AM II. Impacts to birds and bats due to collisions and electrocutions from some tall structures in the United States — wires, towers, turbines, and solar arrays: state of the art in addressing the problems. In: Angelici FM, editor. *Problematic Wildlife: a Cross-Disciplinary Approach*. New York, NY: Springer International Publishing (2016), p. 415–442. doi: 10.1007/978-3-319-22246-2_20
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
36. Manville AM II. *A Briefing Memo: What We Know, Can Infer, and don't Yet Know About Impacts from Thermal and Non-thermal Non-ionizing Radiation to Birds and Other Wildlife — For Public Release*. Peer-reviewed briefing memo. (2016), p. 12.
[Google Scholar](#)
37. Lai H, Levitt BB. The roles of intensity, exposure duration, and modulation on the biological effects of radiofrequency radiation and exposure guidelines. *Electromagn Biol Med*. (2022) 41:230–55. doi: 10.1080/15368378.2022.2065683
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

38. Moller A, Sagasser S, Wiltschko W, Schierwater B. Retinal cryptochrome in a migratory passerine bird: a possible transducer for the avian magnetic compass. *Naturwissenschaften*. (2004) 91:585–8. doi: 10.1007/s00114-004-0578-9
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
39. Heyers D, Manns M, Luksch H, Güntürkün O, Mouritsen H. A visual pathway links brain structures active during magnetic compass orientation in migratory birds. *PLoS ONE*. (2007) 2:9. doi: 10.1371/journal.pone.0000937
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
40. Fleischmann PN, Grob R Rn structures active during magnetic compass orientation in migratory b *Anim Cogn*. (2020) 23:1051–051 doi: 10.1007/s10071-020-01431-x
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
41. Collett TS, Barron J. Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. *Nature*. (1994) 386:137–40. doi: 10.1038/368137a0
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
42. Putman NF, Lohmann KJ, Putman EM. QuinnTP, Klimley AP, Noakes DLG. Evidence for geomagnetic imprinting as a homing mechanism for Pacific salmon. *Curr Biol*. (2013) 23:312–6. doi: 10.1016/j.cub.2012.12.041
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
43. Putman NF, Scanlan MM, Billman EJ, Oas a homing mechanism for Paci, et al. An inherited magnetic map guides ocean navigation in juvenile Pacific salmon. *Curr Biol*. (2014) 24:4461rit doi: 10.1016/j.cub.2014.01.017
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
44. Putman NF, Jenkins ES, Michielsens CG, Noakes DL. Geomagnetic imprinting predicts spatio-temporal variation in homing migration of pink and sockeye salmon. *J Royal Soc Interface*. (2014) 11:20140542. doi: 10.1098/rsif.2014.0542
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
45. Putman NF, Meinke AM, Noakes DL. Rearing in a distorted magnetic field disrupts the 'map sense' of juvenile steelhead trout. *Biol Lett*. (2014) 10:20140169. doi: 10.1098/rsbl.2014.0169
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
46. Putman NF, Williams CR, Gallagher EP, Dittman AH. A sense of place: pink salmon use a magnetic map for orientation. *J Exp Biol*. (2020) 223:218735. doi: 10.1242/jeb.218735
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
47. Quinn TP, Merrill RT, Brannon EL. Magnetic field detection in Sockeye salmon. *J Exper Zool*. (2005) 217:137–42. doi: 10.1002/jez.1402170114
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
48. Malewski S, Begall S, Schleich CE, Antenucci CD, Burda H. Do subterranean mammals use the Earth's magnetic field as a heading indicator to dig straight tunnels? *PeerJ*. (2018) 6:e5819. doi: 10.7717/peerj.5819
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
49. Holland RA, Kirschvink JL, Doak TG, Wikelski M. Bats use magnetoreception to detect the earth's magnetic field. *PLoS ONE*. (2008) 3:e1676. doi: 10.1371/journal.pone.0001676
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
50. Ratner SC. Kinetic movements in magnetic fields of chitons with ferromagnetic structures. *Behav Biol*. (1976) 17:573. doi: 10.1016/S0091-6773(76)91045-2
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
51. Blakemore R. Magnetotactic bacteria. *Science*. (1975) 190:377. doi: 10.1126/science.170679
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
52. Blakemore RP, Frankel RB, Kalmijn A. South-seeking magnetotactic bacteria in the southern hemisphere. *Science*. (1980) 212:1269. doi: 10.1126/science.212.4500.1269
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
53. Yong E. Robins can literally see magnetic fields, but only if their visions is sharp. *DiscoverMagazine.com*, July 8 (2010). Available online at: <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/robins-can-literally-see-magnetic-fields-but-only-if-their-vision-is-sharp> (accessed November 17, 2022).
[Google Scholar](#)

54. Panagopoulos DJ, Johansson O, Carlo GL. Polarization: a key difference between man-made and natural electromagnetic fields, in regard to biological activity. *Sci Rep.* (2015) 5:14914. doi: 10.1038/srep14914
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
55. Kalmijn AJ. Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. *Science.* (1982) 218:916. doi: 10.1126/science.7134985
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
56. Tenforde TS. Electroreception and magnetoreception in simple and complex organisms. *Bioelectromagnetics.* (1989) 10:215–21. doi: 10.1002/bem.2250100302
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
57. Tenforde TS. Biological responses to static and time-varying magnetic fields. In: Lin JC, editor. *Electromagnetic Interaction with Biological Systems.* New York, NY: Plenum Press (1989). doi: 10.1007/978-1-4684-8059-7_5
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
58. Kobayashi A, Kirschvink J. Magnetoreception and electromagnetic field effects: sensory perception of the geomagnetic field in animals and humans. In: Blank M, editor. *Electromagnetic Fields, Biological Interactions and Mechanisms. Advances in Chemistry Series 250.* Washington, DC: American Chemical Society (1995), p. 367–94. doi: 10.1021/ba-1995-0250.ch021
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
59. Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J.* (2000) 78:707–18. doi: 10.1016/S0006-3495(00)76629-X
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
60. Ritz T, Dommer DH, Phillips JB. Shedding light on vertebrate magnetoreception. *Neuron.* (2002) 34:503–6. doi: 10.1016/S0896-6273(02)00707-9
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
61. Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W. Resonance effects indicate a radical pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature.* (2004) 429:177–80. doi: 10.1038/nature02534
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
62. Ritz T, Wiltschko R, Hore PJ, Rodgers CT, Stapput K, Thalau P, et al. Magnetic compass of birds is based on a molecule with optimal directional sensitivity. *Biophys J.* (2009) 96:3451–7. doi: 10.1016/j.bpj.2008.11.072
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
63. Ritz T, Ahmad M, Mouritsen H, Wiltschko R, Wiltschko W. Photoreceptor-based magnetoreception: optimal design of receptor molecules, cells, and neuronal processing. *J R Soc Interface.* (2010) 7:S135–46. doi: 10.1098/rsif.2009.0456.focus
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
64. Johnsen S, Lohmann KJ. Magnetoreception in animals. *PhysToday.* (2008) 61:29–35. doi: 10.1063/1.2897947
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
65. Mouritsen H, Ritz T. Magnetoreception and its use in bird navigation. *Curr Opin Neurobiol.* (2005) 15:406–14. doi: 10.1016/j.conb.2005.06.003
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
66. Ahmad M, Galland P, Ritz T, Wiltschko R, Wiltschko W. Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*. *Planta.* (2007) 225:615–24. doi: 10.1007/s00425-006-0383-0
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
67. Lambinet V, Hayden ME, Reid C, Gries G. Honey bees possess a polarity-sensitive magnetoreceptor, *J. Comp Physiol A.* (2017) 203:1029. doi: 10.1007/s00359-017-1214-4
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
68. Hore PJ, Mouritsen H. The radical-pair mechanism of magnetoreception. *Annu Rev Biophys.* (2016) 45:299–344. doi: 10.1146/annurev-biophys-032116-094545
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
69. de Melo RD, Acosta-Avalos D. Light effects on the multicellular magnetotactic prokaryote *Candidatus magnetoglobus multicellularis* are cancelled by radiofrequency fields: the involvement of radical pair mechanisms. *Antonie Van Leeuwenhoek.* (2016) 110:177–86. doi: 10.1007/s10482-016-0788-0
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

70. Hore PJ. Upper bound on the biological effects of 50-60 Hz magnetic fields mediated by radical pairs. *Elife*. (2019) 8:e44179. doi: 10.7554/eLife.44179
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
71. Dhiman SK, Wu F, Galland P. Effects of weak static magnetic fields on the development of seedlings of *Arabidopsis thaliana*. *Protoplasma*. (2022). doi: 10.1007/s00709-022-01811-9 [Epub ahead of print].
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
72. Deppisch P, Helfrich-Förster C, Senthilan PR. The gain and loss of cryptochrome/photolyase family members during evolution. *Genes*. (2022) 13:1613. doi: 10.3390/genes13091613
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
73. Barnes F. S, Greenebaum B. The effects of weak magnetic fields on radical pairs. *Bioelectromagnetic*. (2015) 36:45–54 doi: 10.1002/bem.21883
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
74. Manger PR, Pettigrew JD. Ultrastructure, number, distribution and innervation of electroreceptors and mechanoreceptors in the bill skin of the platypus, *Ornithorhynchus anatinus*. *Brain Behav Evol*. (1996) 48:27-40 doi: 10.1159/000113185
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
75. von der Emde G. Active electrolocation of objects in weakly electric fish. *J Exp Biol*. (1999) 202:1205–15. doi: 10.1242/jeb.202.10.1205
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
76. Montgomery JC, Bodznick D. Signals and noise in the elasmobranch electrosensory system. *J Exp Biol*. (1999) 202:1349–349 doi: 10.1242/jeb.202.10.1349
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
77. Yong E. *An Immense World, How Animal Senses Reveal the Hidden Realms Around Us*. New York, NY: Random House (2022), p. 276–99.
[PubMed Abstract](#) | [Google Scholar](#)
78. Eder SHK, Cadiou H, Muhamad A, McNaughton PA, Kirschvink JL, Winklhofer M. Magnetic characterization of isolated candidate vertebrate magnetoreceptor cells. *Proc Natl Acad Sci USA*. (2012) 109:12022–7. doi: 10.1073/pnas.1205653109
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
79. Kirschvink JL, Kuwajima T, Ueno S, Kirschvink SJ, Diaz-Ricci JC, Morales A, et al. Discrimination of low-frequency magnetic fields by honeybees: biophysics and experimental tests. In: *Sensory Transduction, edited by DP Corey and S D Roper Society of General Physiologists, 45th Annual Symposium*. New York, NY: Rockefeller University Press (1992), p. 225–40.
[PubMed Abstract](#) | [Google Scholar](#)
80. Kirschvink JL, Padmanabha S, Boyce CK, Oglesby J. Measurement of the threshold sensitivity of honeybees to weak, extremely low-frequency magnetic fields. *J Exp Biol*. (1997) 200:1363–8. doi: 10.1242/jeb.200.9.1363
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
81. Gegear RJ, Casselman A, Waddell S, Reppert SM. Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity to *Drosophila*. *Nature*. (2008) 454:1014–8. doi: 10.1038/nature07183
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
82. Hiscock H, Mouritsen H, Manolopoulos DE, Hore PJ. Disruption of magnetic compass orientation in migratory birds by radiofrequency electromagnetic fields. *Biophys J*. (2017) 113:1475–84. doi: 10.1016/j.bpj.2017.07.031
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
83. Pakhomov A, Bojarinova J, Cherbunin R, Chetverikova R, Grigoryev PS, Kavokin K, et al. Very weak oscillating magnetic field disrupts the magnetic compass of songbird migrants. *J Royal Soc Interface*. (2017) 14:20170364. doi: 10.1098/rsif.2017.0364
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
84. Wiltschko W, Munro U, Beason RC, Ford H, Wiltschko R. A magnetic pulse leads to a temporary deflection in the orientation of migratory birds. *Experientia*. (1994) 50:697–700. doi: 10.1007/BF01952877
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
85. Wiltschko W, Wiltschko R. Magnetoreception in birds: two receptors for two different tasks. *J Ornithol*. (2007) 148:561–76. doi: 10.1007/s10336-007-0233-2
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

86. Wiltschko R, Wiltschko W. Sensing magnetic directions in birds: radical pair processes involving cryptochrome. *Biosensors*. (2014) 4:221–43. doi: 10.3390/bios4030221
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
87. Wiltschko W, Freire R, Munro U, Ritz T., Rogers L, Thalau P, et al. The magnetic compass of domestic chickens, *Gallus gallus*. *J Exp Biol*. (2007) 210:2300–10. doi: 10.1242/jeb.004853
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
88. Wiltschko R, Wiltschko W. Magnetoreception in birds. *J Royal Soc Interface*. (2019) 16:20190295. doi: 10.1098/rsif.2019.0295
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
89. Wiltschko R, Stapput K, Thalau P, Wiltschko W. Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *J Royal Soc Interface*. (2010) 7:S163–77. doi: 10.1098/rsif.2009.0367.focus
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
90. Brothers JR, Lohmann KJ. Evidence for geomagnetic imprinting and magnetic navigation in the natal homing of sea turtles. *Curr Biol*. (2015) 25:3921JR doi: 10.1016/j.cub.2014.12.035
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
91. Naisbett-Jones LC, Putman NF, Stephenson JF, Ladak S, Young KA. A magnetic map leads juvenile European eels to the gulf stream. *Curr Biol*. (2017) 27:1236–236 doi: 10.1016/j.cub.2017.03.015
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
92. Painter MS, Youmans PW, Hopkins WA, Phillips JB. Spontaneous magnetic alignment by yearling snapping turtles: rapid association of radio frequency dependent pattern of magnetic input with novel surroundings. *PLoS ONE*. (2015) 10:e0124728. doi: 10.1371/journal.pone.0124728
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
93. Wiltschko W, Munro U, Ford H, Wiltschko R. Effect of a magnetic pulse on the orientation of silvereyes, *Zosterops l. lateralis*, during spring migration. *J Exp Biol*. (1998) 201:3257–61. doi: 10.1242/jeb.201.23.3257
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
94. Kirschvink JL, Gould JL. Biogenic magnetite as a basis for magnetic field sensitivity in animals. *Biosystems*. (1981) 13:181–201. doi: 10.1016/0303-2647(81)90060-5
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
95. Kirschvink JL. Birds, bees and magnetism: a new look at the old problem of magnetoreception. *Trends Neurosci*. (1982) 5:160–7. doi: 10.1016/0166-2236(82)90090-X
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
96. Yuan Q, Metterville D, Briscoe AD, Reppert SM. Insect cryptochromes: gene duplication and loss define diverse ways to construct insect circadian clocks. *Mol Biol Evol*. (2007) 24:948–55. doi: 10.1093/molbev/msm011
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
97. Kyriacou CP. Clocks, cryptochromes and Monarch migrations. *J Biol*. (2009) 8:55. doi: 10.1186/jb10153
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
98. Jones DS, MacFadden BJ. Induced magnetization in the Monarch butterfly, *Danaus Plexippus* (Insecta, Lepidoptera). *J Exp Biol*. (1982) 96:1–9. doi: 10.1242/jeb.96.1.1
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
99. Guerra P, Gegear RJ, Reppert SM. A magnetic compass aids monarch butterfly migration. *Nature Comm*. (2014) 5:4164. doi: 10.1038/ncomms5164
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
100. V64omm 10.me gear RJ, Reppert SM. A magnetic compass aids monarch butterfly magnetoreception in American cockroach. *J Exp Biol*. (2009) 212:3473–47 doi: 10.1242/jeb.028670
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
101. Shepherd S, Lima MAP, Oliveira EE, Sharkh SM, Jackson CW, Newland PL. Extremely low frequency electromagnetic fields impair the cognitive and motor abilities of honey bees. *Sci Rep*. (2018) 8:7932. doi: 10.1038/s41598-018-26185-y
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
102. Marha K, Musil J, Tuha H. *Electromagnetic Fields and the Living Environment*. (Trans. SBN 911302-13-7, San Francisco Press, 1971). Prague: State Health Publishing House (1968).
[Google Scholar](#)
103. Heller JH, Mickey GH. Non-thermal effects of radiofrequency in biological systems. In: *Digest of the 1961 International Conference on Medical Electronics*. New York, NY (1961), p. 152.

[Google Scholar](#)

104. Panagopoulos DJ, Chavdoula ED, Nezis IP, Margaritis LH. Cell death induced by GSM 900-MHz and DCS 1800-MHz mobile telephony radiation. *Mutat Res.* (2007) 626:69sle doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.08.008

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

105. Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarbounis A, Philippetis AL, Margaritis LH. Radio frequency electromagnetic radiation within "safety levels" alters the physiological function of insects. In: Kostarakis P, Stavroulakis P. *Proceedings of the Millennium International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Heraklion, Crete, Greece, October 17-20.* (2000), p. 169–75.

[PubMed Abstract](#) | [Google Scholar](#)

106. Panagopoulos DJ, Margaritis LH. Theoretical considerations for the biological effects of electromagnetic fields. In: Stavroulakis P, editor. *Biological Effects of Electromagnetic Fields.* New York, NY: Springer Publisher (2003), p 5–33.

[Google Scholar](#)

107. Panagopoulos DJ, Karabarbounism A, Margaritis LH. Effect of GSM 900-MHz mobile phone radiation on the reproductive capacity of *Drosophila melanogaster*. *Electromagn Biol Med.* (2004) 23:29–43. doi: 10.1081/JBC-120039350

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

108. Panagopoulos DJ. Comparing DNA damage induced by mobile telephony and other types of man-made electromagnetic fields. *Mutat Res Rev Mutat Res.* (2019) 781:53–62. doi: 10.1016/j.mrrev.2019.03.003

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

109. Cammaerts MC, Rachidi Z, Bellens F, De Doncker P. Food collection and response to pheromones in an ant species exposed to electromagnetic radiation. *Electromagn Biol Med.* (2013) 32:315agn doi: 10.3109/15368378.2012.712877

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

110. Cammaerts MC, Vandenbosch GAE, Volski V. Effect of short-term GSM radiation at representative levels in society on a biological model: the ant *Myrmica sabuleti*. *J Insect Behav.* (2014) 27:514–26. doi: 10.1007/s10905-014-9446-4

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

111. Cammaerts MC, De Doncker P, Patris X, Bellens F, Rachidi Z, Cammaerts D. GSM-900 MHz radiation inhibits ants' association between food sites and encountered cues. *Electromagn Biol Med.* (2012) 31:151–65. doi: 10.3109/15368378.2011.624661

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

112. von Frisch K. *The Dancing Bees, an Account of the Life and Senses of the Honey Bee.* Wien, Vienna: Springer-Verlag (1954). doi: 10.1007/978-3-7091-4697-2

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

113. von Frisch K. *The Dance Language and Orientation of Bees.* Boston, MA: Belknap Press of Harvard University Press (1967).

[PubMed Abstract](#) | [Google Scholar](#)

114. Li Y, Sun C, Zhou H, Huang H, Chen Y, Duan X, et al. Extremely low-frequency electromagnetic field impairs the development of honeybee (*Apis cerana*). *Animals.* (2022) 12:2420. doi: 10.3390/ani12182420

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

115. Valkova T, Vacha M. How do honeybees use their magnetic compass? Can they see the north? *Bull Entomol Res.* (2012)102:461–467. doi: 10.1017/S0007485311000824

[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

116. Lopatina NG, Zachevilo TG, Kamyshev NG, Dyuzhikova NA, Serov IN. Effect of non-ionizing electromagnetic radiation on behavior of the honeybee, *Apis mellifera* L. (Hymenoptera, Apidae). *Entomol Rev.* (2019) 99:24–9. doi: 10.1134/S0013873819010032

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

117. Favre D. Mobile phone-induced honeybee worker piping. *Apidologie.* (2011) 42:270–9. doi: 10.1007/s13592-011-0016-x

[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)

118. Sharma VP, Kumar NR. Changes in honeybee behaviour and biology under the influence of cellphone radiations. *Curr Sci.* (2010) 98:1376–8.

[Google Scholar](#)

119. Sainudeen Sahib S. Impact of mobile phone on the density of honey bees. *Mun Ent Zool.* (2011) 6:396–9.
[Google Scholar](#)
120. Odemer R, Odemer F. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMF) on honey bee queen development and mating success. *Sci Total Environ.* (2019) 661:553–62. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.154
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
121. Stever H, Kimmel S, Harst W, Kuhn J, Otten C, Wunder B. Verhaltensänderung der Honigbiene *Apis mellifera* unter elektromagnetischer exposition. *Folgeversuch.* (2007) 2006.
[Google Scholar](#)
122. Harst W, Kuhn J, Stever H. Can electromagnetic exposure cause a change in behaviour? Studying possible non-thermal influences on honey bees—an approach within the framework of educational informatics. *Acta Systemica-IIAS Internat J.* (2006) 6:1–6.
[Google Scholar](#)
123. Kumar NR, Sangwan S, Badotra P. Exposure to cell phone radiations produces biochemical changes in worker honey bees. *Toxicol Int.* (2011)18:70–72. doi: 10.4103/0971-6580.75869
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
124. Kumar NR, Rana N, Kalia P. Biochemical changes in haemolymph of *Apis mellifera* L. drone under the influence of cell phone radiations. *J Appl Nat Sci.* (2013) 5:139–41. doi: 10.31018/jans.v5i1.296
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
125. Darney K, Giraudin A, Joseph R, Abadie P, Aupinel P, Decourtye A, et al. Gauthier M. Effect of high-frequency radiations on survival of the honeybee (*Apis mellifera* L). *Apidologie.* (2016) 47:703–10. doi: 10.1007/s13592-015-0421-7
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
126. Kumar SS. Colony collapse disorder (CCD) in honey bees caused by EMF radiation. *Bioinformation.* (2018) 14:521–4. doi: 10.6026/97320630014521
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
127. Warnke U. *Bees, Birds Mankind.* (2008). Available online at: https://www.researchgate.net/publication/241538484_BEES_BIRDS_AND_MANKIND (accessed November 17, 2022).
[Google Scholar](#)
128. Gandhi OP. Polarization and frequency effects on whole animal absorption of RF energy. *Proc IEEE.* (1974) 62:1171–5. doi: 10.1109/PROC.1974.9581
[PubMed Abstract](#) | [CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
129. Gandhi OP. Conditions of strongest electromagnetic power deposition in man and animals. In: *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.* (1975) 23:1021–29. doi: 10.1109/TMTT.1975.1128736
[CrossRef Full Text](#) | [Google Scholar](#)
130. 42 USC § 7602(g). Available online at: https://www.govregs.com/uscode/expand/title42_chapter85_subchapterIII_section7602#uscode_1 (accessed November 17, 2022).
[Google Scholar](#)

Más información complementaria:

- Artículo original en inglés:

<https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1000840> <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2022.1000840>

- Consultar *Effects of non-ionizing electromagnetic fields on flora and fauna*, revisión bibliográfica publicada por los autores en 2021 en tres partes (mayo / julio / septiembre): donde analizan exhaustivamente el aumento de los niveles ambientales de EMF en el medio ambiente (**parte 1**: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/reveh-2021-0026/html>), sus efectos en flora y fauna (**parte 2**: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/reveh-2021-0050/html>); así como las normas de exposición, políticas públicas, leyes y orientaciones futuras (**parte 3**: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/reveh-2021-0083/html>).