

LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS: ¿UN PROBLEMA DE SALUD PÚBLICA?

J. Antonio Heredia-Rojas, Laura Rodríguez-Flores, Martha Santoyo-Stephano, Esperanza Castañeda-Garza,

Abraham Rodríguez-De la Fuente.

Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León (México)

E mail jheredia59@att.net.mx y jheredia59@hotmail.com

Introducción

Desde que el hombre apareció en el planeta ha convivido con los campos magnéticos de la tierra y con los campos electromagnéticos provenientes del espacio exterior, los que probablemente tuvieron y tienen influencia sobre diversas funciones biológicas. Como resultado del avance tecnológico que conlleva a un aumento en el uso de la energía eléctrica, en este último siglo el ser humano está cada vez más expuesto a campos electromagnéticos (CEM) de frecuencia extremadamente baja particularmente de 50-60 Hz, similares a los producidos por el tendido eléctrico y una gran variedad de aparatos electrodomésticos. Por otra parte, las personas ocupacionalmente expuestas a campos magnéticos incluyen, entre otros, operadores de resonancia magnética, radar y radiofrecuencia, instalaciones de física especializada y biomédica, trabajadores de fundición eléctrica y procesos electrolíticos.



A finales de los años setenta aparecieron trabajos que sugerían la asociación entre CEM y cáncer, particularmente leucemia infantil (1). A partir de entonces se han llevado a cabo una gran cantidad de estudios, tanto epidemiológicos como de laboratorio, para tratar de establecer una posible relación entre la exposición a CEM y enfermedades del ser humano (2). En la presente revisión, se tratará de dar una aproximación al contexto actual sobre la controversia que se ha dado acerca del riesgo potencial que representa el estar sometido a la influencia de campos magnéticos y si esto podría llegar a convertirse en un problema de salud pública. Asimismo se presenta un resumen de la experiencia de siete años de trabajo en que hemos investigado el efecto biológico de los campos magnéticos.

Física de los Campos Electromagnéticos

Wood (3), señala que en los tiempos de Tales de Mileto (640 – 546 a. C.), el hombre hablaba de atracciones magnéticas. Desde hace más de dos mil años, los chinos utilizaron la brújula magnética para orientarse en sus viajes marítimos y por los desiertos de Mongolia. Como es sabido, el fundamento de la brújula es adoptar una orientación, la cual esta dada por un campo magnético periférico.

Ya en tiempos modernos, el físico danés Hans Christian Oersted, en 1820, observó que la orientación de la aguja de una brújula puede cambiar por la acción de una corriente eléctrica de forma semejante a como lo hacía un imán. Esto lo llevó a pensar que alrededor de un conductor de electrones se forma un campo que se manifiesta como un imán, siendo así como relacionó el magnetismo con la electricidad (4).

Un campo magnético se define como la región en el espacio en el que un objeto magnetizado puede, a su vez, magnetizar a otros cuerpos. De acuerdo a la distribución de su intensidad se pueden clasificar en:

- Homogéneos: en donde la intensidad del campo es uniforme.
- Heterogéneos: en donde la intensidad disminuye proporcionalmente con la distancia del centro.

Y de acuerdo a sí son constantes o variables en el tiempo se clasifican en:

- a. Estáticos: las líneas de fuerza y su dirección son constantes en el tiempo.
- b. Oscilantes: la carga se alterna en cada impulso a la vez que la intensidad también varía.

Tomando en cuenta ambos criterios de clasificación, el efecto de los campos magnéticos sobre los diversos sistemas biológicos dependerá de si éste es homogéneo, heterogéneo, estático u oscilante (5).

Por otro lado, un campo eléctrico se origina por cargas eléctricas estáticas. Cuando el campo magnético y eléctrico en una región determinada varían en el tiempo, ambos se relacionan de tal manera que todo campo eléctrico que varíe con el tiempo, siempre va acompañado de un campo magnético también variable y viceversa, por lo tanto, el así llamado **campo electromagnético**, es resumido por Parker (6) como la interrelación entre campo eléctrico y magnético en una sola entidad física.

Según Stewart (7), en general para la transmisión de corriente alterna (A. C.), en Norteamérica, la frecuencia es de 60 Hertz (Hz) y para Europa y otras regiones, es de 50 Hz, entendiéndose por *frecuencia* el número de ciclos completos por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional de Unidades 1 ciclo/1 seg. equivale a 1 Hz.

Por otra parte, en un campo magnético la fuerza está dada por la densidad de flujo magnético (también llamada *intensidad magnética*), siendo ésta el número de líneas de fuerza que pasan por unidad de área. La unidad en el sistema sexagesimal para la intensidad magnética es el *Oersted (Oe)* establecido en 1932 por acuerdo internacional, como sustituto de *Gauss (G)*, aunque sigue utilizándose más éste último en la literatura. Para el Sistema Internacional de Unidades la densidad de flujo magnético está dada en *Teslas (T)*, en donde cada T equivale a 10,000 G (8).

A su vez, la intensidad de un campo magnético depende no solo de una variable eléctrica, sino además de la distancia, su magnitud se relaciona directamente con el flujo de corriente (medido en amperes) y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. En forma similar, la magnitud del campo eléctrico está en proporción directa al voltaje y decrece conforme la distancia aumenta (9).

Efectos Biológicos de los Campos Magnéticos

Debido a su composición electrolítica los seres vivos son por lo general buenos conductores de la electricidad. A través de las membranas celulares y de los fluidos corporales intra y extracelulares existen corrientes iónicas, especialmente en las células nerviosas y musculares a las cuales debe estar asociado un campo magnético. Además, en los sistemas biológicos existen estructuras magnéticamente influenciables como los radicales libres que presentan propiedades paramagnéticas y aquellas en las que intervienen sustancias ferromagnéticas. La respuesta de un sistema biológico a un campo magnético externo depende tanto de las propiedades magnéticas intrínsecas del sistema como de las características del campo externo y de las propiedades del medio en el cual tiene lugar el fenómeno (10).

Experimentalmente se ha probado que en los cambios que sufren algunos parámetros de los sistemas biológicos por la acción de los campos magnéticos influyen no solamente la intensidad, sino también las características espaciales y temporales de dicho campo (11). Dentro de este contexto es diferente el efecto de un campo estático, que solamente produciría una rotación de los dipolos magnéticos tendiendo a orientarlos en la dirección del campo y restringiendo su movilidad, occasionando así un efecto significativo si éstos participan en reacciones químicas. En contraste, un campo oscilante que presenta variaciones periódicas con el tiempo y que puede inducir movimientos sobrepuertos a la oscilación en los dipolos magnéticos moleculares, podría afectar la velocidad de las reacciones químicas dependiendo de la amplitud, frecuencia y sentido de las variaciones del campo magnético. En la literatura científica un gran número de trabajos prueban el efecto de los campos magnéticos sobre reacciones enzimáticas *in vitro*, dando efectos cualitativa y cuantitativamente diferentes dependiendo de la reacción que se trate y de las características del campo (12).

Por otra parte, en los seres vivos que se desplazan en el seno de un campo magnético como el terrestre, se induce una diferencia de potencial que puede alterar su motilidad. Aunque el campo geomagnético es relativamente débil, estos efectos han sido observados en elasmobranquios. Se sabe que los tiburones y rayas poseen mecanismos basados en la inducción electromagnética para orientarse y localizar a sus

presas y que la intensidad del campo magnético puede ser un factor limitante en la capacidad de respuesta del sujeto. También se ha propuesto que las aves migratorias poseen un mecanismo de orientación para la navegación basado en la generación de potenciales eléctricos inducidos electromagnéticamente. Igualmente, se ha encontrado que algunos microorganismos, particularmente bacterias, tienen la propiedad de orientar su movimiento en respuesta a un campo magnético externo (magnetotaxis), estas bacterias contienen una o dos cadenas intracelulares ricas en partículas de fierro. Asimismo se han descrito propiedades de magnetosensibilidad para una gran diversidad de insectos migratorios y aún en el ser humano, aunque en éste último el hallazgo es controversial (13).

Por otra parte, las ondas de radio y algunos tipos de luz ultravioleta, son algunas radiaciones no ionizantes a las que el hombre está frecuentemente expuesto. Los efectos biológicos de las primeras están siendo determinados en la actualidad, mientras que el daño que produce la luz ultravioleta en el ADN se ha relacionado con la formación de dímeros de timina, que es la lesión más frecuentemente inducida por esta radiación, por lo general estos daños son eliminados por las células a través de mecanismos de reparación por escisión. Si las células expuestas no son eficientes en este tipo de reparación, el daño al ADN permanecerá y la célula sufrirá alteraciones considerables como en el caso del *Xeroderma pigmentosum* y del cáncer en la piel (14).

Por otro lado, radiaciones no ionizantes de frecuencia extremadamente baja como es el caso de los campos magnéticos de 60 Hz han mostrado tener efectos sobre los sistemas biológicos y se ha informado que éstos pueden afectar la velocidad de las reacciones y una gran cantidad de procesos bioquímicos. Asimismo, se ha informado que los CEM tienen efectos sobre la síntesis de ADN, ARN y proteínas, cambios en la producción de hormonas; modificación de la respuesta inmune y en el grado de crecimiento y diferenciación celular (15).

Adicionalmente se han obtenido evidencias experimentales que sugieren que los CEM afectan el crecimiento y proliferación en varios tipos de células. (16,17,18,19)

Desde el punto de vista físico, se ha demostrado que es el campo eléctrico inducido por el campo magnético variable el que determina la respuesta celular. Sin embargo, la influencia de un campo magnético estático añadida al campo variable, también ha quedado demostrada, por lo que el mecanismo de interacción es más complejo que la sola influencia de campos eléctricos inducidos. Se supone que la interacción principal ocurre en la membrana celular y más específicamente en los canales iónicos, siendo los del calcio los que participan más activamente en las alteraciones biológicas (20).

Se ha evaluado también el efecto de los campos eléctricos en embriones. En un estudio, se expusieron ratones C3H/He machos, a un campo eléctrico de 20 kV/m de 50 Hz de frecuencia por dos semanas. Despues, cada ratón macho fue apareado con 2 hembras diferentes cada semana durante un período de 8 semanas para que las hembras fueran fecundadas por los ratones que habían sido expuestos al campo eléctrico y no se encontraron alteraciones en la sobrevivencia de los embriones (21).

En otro estudio Nordstrom y cols. (22) encontraron un incremento en la frecuencia de malformaciones congénitas en niños cuyos padres trabajaban en fuentes generadoras de alta tensión, lo cual podría indicar, efecto a nivel genético de los CEM.

Por otra parte, es bien sabido que los CEM pueden producir una variedad de efectos benéficos en los sistemas biológicos. Los campos magnéticos pulsantes por ejemplo, son usados para la reparación de fracturas óseas, Andrew y Basset (23), mostraron que el tejido óseo es sensible a campos magnéticos y eléctricos de baja frecuencia. Primero se sometió al tejido a un campo magnético variable de baja frecuencia y se detectó que en el tejido se inducía una corriente, ya que la lectura del voltímetro se modificaba en presencia de dicho campo. De este modo se inicio el estudio de la posible utilización de campos magnéticos para la terapia de fracturas persistentes y en algunos casos, de osteoporosis.

Campos Electromagnéticos y Cáncer

Recientemente se ha discutido la posible asociación de la exposición a CEM con el desarrollo de leucemia aguda y se ha propuesto una relación entre la forma de exposición al campo magnético en niños y adultos, sin embargo, no se han definido bien a estos agentes físicos como causantes de la enfermedad (24).

Asimismo, en varios estudios epidemiológicos se ha correlacionado la exposición de seres humanos a campos electromagnéticos con una alta incidencia de cáncer. (25,26,27,28,29)

En contraste, Costa y Hoffmann (30), descubrieron que campos magnéticos de alta intensidad, en el intervalo 1 a 50 T, con una frecuencia de 5 a 1000 KHz, reducen la concentración de células malignas en tejido animal. Por lo general para el tratamiento del cáncer, el tejido enfermo se somete de 1 a 1000 pulsos de 100 m seg a un segundo de duración dependiendo del tipo de tumor. El efecto de este tratamiento es la reducción en el número de células malignas; después se aplica la quimioterapia. La ventaja es que no se genera calor en el tejido y aunque el tejido normal también sufre alteración, el cambio es menor comparado con el efecto que tiene en las células cancerosas. En adición, las células del sistema inmunológico no se afectan con el tratamiento por lo que el efecto neto en el organismo es favorable.

Por otro lado, se han postulado teorías acerca de la posibilidad de carcinogénesis asociada con los CEM. Así, Fitzgerald (31), propuso un mecanismo para explicar la formación de un tumor debido a esta causa en el cual se tienen al menos dos etapas: 1) Etapa de iniciación, en la cual el ADN es dañado por un agente externo, produciendo ADN anormal y dando lugar a la expresión de proteínas anormales. Para la iniciación se requiere suficiente energía para romper los enlaces químicos del ADN (más de la que pueden proporcionar los CEM a los cuales estamos habitualmente expuestos). 2) Etapa de promoción, que es el período de latencia entre la exposición a un carcinógeno y la manifestación de cáncer. De acuerdo a lo anterior los CEM actuarían más bien como promotores que como iniciadores, ya que acelerarían el proceso de desarrollo de cáncer más que inducirlo directamente.

En un estudio experimental (32) se indujeron tumores mamarios en ratas utilizando el 7, 12 dimetilbenzantraceno (DMBA) a un grupo de 99 ratas hembras para luego exponer a campos magnéticos de 100 m T por 24 horas diarias durante 7 días; otro grupo de 99 ratas fue utilizado como testigo bajo las mismas condiciones ambientales que el grupo expuesto al tratamiento. Los resultados indicaron que las ratas tratadas con DMBA y expuestas por un largo período al campo magnético, manifestaron un crecimiento e incidencia de tumores mamarios malignos mayor que el del grupo no expuesto al campo magnético.

Por otro lado se ha observado que cuando se exponen cultivos de células cancerosas a campos magnéticos, se presentaba un aceleramiento significativo en el crecimiento celular, el cual continuaba a una tasa rápida aún después de la exposición al campo magnético. Asimismo, en ratas en las que se indujo la formación de tumores mamarios químicamente, se encontró que presentaban un grado mayor de crecimiento de tumor cuando se exponían a campos magnéticos de baja frecuencia (33).

Por otra parte, se ha sugerido que el riesgo de leucemia infantil puede estar relacionado con los efectos combinados de campos magnéticos estáticos y de campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja (34). También en otro estudio (35), se ha sugerido que los CEM tienen relación con el cáncer, para esto, se incubaron cultivos de sangre periférica en presencia de un CEM de 5 mT y 50 Hz de frecuencia. Los resultados obtenidos indicaron que los efectos carcinogénicos originados por los CEM no son de tipo iniciador, pero probablemente tengan efectos promotores.

Efectos Genéticos de los Campos Electromagnéticos

No hay a la fecha un consenso general acerca del efecto genotóxico atribuido a la exposición a CEM de 60 Hz, sin embargo se han realizado diversos estudios que incluyen una diversidad de modelos biológicos, por ejemplo en una investigación se expuso a *Salmonella typhimurium* previamente tratada con azida (mutágeno químico) a un CEM de 2 Gauss y de 60 Hz de frecuencia, y se encontró un incremento de 14% en la tasa de mutación (36).

Por otro lado, Koana y cols. (37), estimaron los efectos genéticos de los campos magnéticos sobre la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. Las larvas jóvenes tanto de genotipos normales y mutantes fueron expuestas a un campo magnético homogéneo de 0.6 T por 24 h, y luego fueron dejadas para continuar el desarrollo bajo condiciones de cultivo normal y finalmente emergir al estadio de pupa. Después de la eclosión los sobrevivientes fueron contados y se encontró que el número de adultos de genotipo mutante, aumentó aproximadamente un 8 % comparado con el grupo control, lo cual sugiere que el campo magnético estático provoca daño a nivel del DNA de células larvarias eliminando los homocigóticos recesivos.

En lo que respecta al efecto en cromosomas, Nordenson y cols. (38) expusieron células amnióticas de humano a un campo magnético sinusoidal de 30 μ T y de 50 Hz por espacio de 72 h y encontraron un incremento en la frecuencia de aberraciones cromosómicas comparado con un grupo no expuesto.

En contraste Galt y cols. (39) probaron el efecto de un CEM de $30\mu\text{T}$ de 50 Hz sobre células amnióticas humanas durante un período de exposición de tres días, con el fin de confirmar los experimentos realizados por Nordenson y colaboradores en los cuales el rompimiento de cromosomas y la formación de gaps era relativamente alta después de la exposición. Pero ellos no encontraron incremento de daño a los cromosomas en las células expuestas a campos electromagnéticos.

En un estudio relacionado a los anteriores, se encontró un incremento significativo de aberraciones cromosómicas cuando exponían cultivos de linfocitos periféricos de bovino a CEM de 50 Hz. También se observó un incremento en el número de aberraciones cromosómicas en células tumorales de ratón después de exponerlas a campos electrostáticos y también en linfocitos expuestos a microondas (40).

En otra investigación, se expusieron líneas celulares linfocíticas de pacientes con síndromes de inestabilidad cromosómica a campos magnéticos de 1-2 Gauss de 60 Hz, y no encontraron efecto en la frecuencia de intercambio de cromátidas hermanas y rompimiento de cromosomas (41).

Por otro lado, en otro trabajo se analizaron linfocitos humanos periféricos de 32 trabajadores ocupacionalmente expuestos a transformadores que generan campos magnéticos intensos por más de 20 años y no se encontraron cambios en la frecuencia de aberraciones cromosómicas ni del intercambio de cromátidas hermanas (42).

Además, en otro estudio relacionado, se expusieron linfocitos humanos *in vitro* a campos electromagnéticos de 2.5 mT. y los resultados obtenidos no demostraron efecto genotóxico ocasionado por los mismos (43).

Por otra parte Rosenthal y Obe (44), expusieron linfocitos humanos periféricos a CEM y encontraron que no alteraban la frecuencia espontánea de intercambio de cromátidas hermanas y aberraciones cromosómicas, pero cuando se sometían linfocitos previamente expuestos a mutágenos químicos a la acción de los CEM, se encontró una frecuencia de intercambio de cromátidas hermanas mayor que cuando estaban en presencia del mutágeno químico, pero en ausencia del campo magnético, lo cual sugería un efecto sinérgico.

En otro trabajo se estudió el efecto *in vitro* de los campos electromagnéticos pulsantes de 10, 20 y 40 Gauss por 48 horas sobre linfocitos humanos periféricos, utilizando la prueba citogenética de intercambio de cromátidas hermanas y no encontraron diferencia estadísticamente significativa entre los grupos expuestos a CEM y el testigo (45).

Sin embargo Khalil y Qassem (46) expusieron linfocitos humanos a CEM de 1.05 mT y frecuencia de 50 Hz por 24, 48 y 72 h y encontraron disminuida la actividad mitótica y un alto índice de aberraciones cromosómicas.

Por otra parte, se realizaron exposiciones de linfocitos humanos a campos eléctricos (0.5,2,0,5.0 kV/m) de 50 Hz para ver si estos producían efecto genotóxico (estudiando la formación de micronúcleos) *in vitro*. Se encontró que los campos eléctricos de 50 Hz de frecuencia no producen efectos genotóxicos a nivel cromosómico (47).

En otro trabajo realizado en seres humanos, se determinó la frecuencia de aberraciones cromosómicas, intercambio de cromátidas hermanas, índice de replicación y micronúcleos en linfocitos periféricos de 27 muestras de trabajadores de fuentes de alta tensión, que tuvieron períodos prolongados de exposición a los CEM de 50 Hz y 27 muestras de trabajadores de la línea telefónica que servían como grupo de referencia. Lo que se obtuvo fue que no existían diferencias estadísticamente significativas entre los grupos en el análisis de intercambio de cromátidas hermanas, índice de replicación o formación de micronúcleos. Sin embargo, se observó un incremento con el rompimiento de cromosomas en los trabajadores de fuentes de alta tensión comparado con el grupo de referencia, por lo cual se sugiere que la exposición a CEM 50 Hz está asociada con un incremento en el rompimiento de cromátidas (48).

Evaluación del Potencial Genotóxico y Citotóxico de Campos Electromagnéticos de 60 Hz.

En años recientes, se ha trabajado en el laboratorio de Física de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, sobre un proyecto de largo alcance que tiene como propósito evaluar el riesgo genotóxico y/o citotóxico asociado con una exposición a CEM oscilantes de 60 Hz

similares a los generados por el tendido eléctrico, sub-estaciones de distribución y en general por dispositivos que funcionan con electricidad de la red de corriente alterna y que circundan nuestro medio ambiente, en células de mamífero. Se midió la influencia de estos campos magnéticos en cultivos de Linfocitos humanos (49) a intensidades de 1.0, 1.5 y 2.0 mT y se observó un aumento en la proliferación celular, evaluado por el índice mitótico y proliferativo. Asimismo evaluamos el efecto de los CEM en células sanguíneas circulantes de ratón *in vivo* (50) y encontramos que los linfocitos disminuyen y los neutrófilos se incrementan en respuesta a un tratamiento magnético similar al utilizado para el caso de los linfocitos *in vitro*. También, se ha estudiado en nuestro laboratorio el efecto clastogénico en células de médula ósea de ratón *in vivo* y se encontró un aumento en la frecuencia de células micronucleadas, lo que es un indicador de rupturas cromosómicas, en animales tratados a las intensidades magnéticas antes mencionadas (51). Sin embargo, al estudiar los efectos de este factor físico sobre células germinales reproductoras de ratón *in vivo*, no se encontró efecto citotóxico o genotóxico al evaluar aberraciones en cromosomas meióticos y alteraciones morfológicas de células espermáticas (52). Recientemente se estudiaron los efectos agudos de 1.0 mT de CEM de 60 Hz sobre funciones *ex vivo* de macrófagos y linfocitos murinos y sobre crecimiento de células tumorales y no se detectó ningun cambio, en comparación con animales no tratados (53).

Conclusión

Basados en lo anteriormente mencionado, no se puede afirmar contundentemente que los campos electromagnéticos puedan considerarse un problema de salud pública generalizado, sin embargo, hay suficiente evidencia de que estos campos representan una forma de energía que conviene evitar. Recientemente se ha postulado que los campos magnéticos del medio ambiente juegan un papel importante en la alteración de la expresión génica lo que puede tener consecuencias negativas sobre la salud humana (54). También se ha dicho que la gran variabilidad y lo controversial de los resultados, se debe a que hay demasiadas variables involucradas y que no todos los experimentos se realizan con la rigurosidad necesaria (55).

Por otro lado, es evidente que a través del tiempo ha sido creciente la cantidad de agentes físicos y químicos a los que nos vemos expuestos como producto del desarrollo tecnológico e industrial, en consecuencia también ha aumentado el interés público por los posibles efectos negativos que para la salud pudiera tener la exposición a estos factores. Si bien, para una gran cantidad de éstos (pesticidas, metales pesados, radiaciones ionizantes, etc.) ya se han comprobado efectos adversos para la salud, existen otros agentes que son objeto de gran controversia debido a que sus efectos no han sido determinados con claridad, como anteriormente se indicó al respecto de la exposición de CEM de frecuencia extremadamente baja.

Los resultados de las investigaciones aquí presentadas, incluyendo nuestra propia experiencia, sugiere que los campos magnéticos son capaces de modificar actividades celulares, y que esto debe ser considerado en la estimación del riesgo potencial que representa una exposición laboral o ambiental a estos agentes físicos.

Resumen

En la presente revisión, se da una aproximación al contexto actual sobre la controversia que se ha dado acerca del riesgo potencial que representa el estar sometido a la influencia de campos magnéticos y si esto podría llegar a convertirse en un problema de salud pública. Los resultados de las investigaciones aquí presentadas, sugieren que los campos magnéticos son capaces de modificar actividades celulares, y que esto debe ser considerado en la estimación del riesgo potencial que representa una exposición laboral o ambiental a estos agentes físicos

Palabras clave: campos electromagnéticos, salud pública

Abstract

In the present revision, an approach to the present context occurs on the controversy that has occurred about the potential risk that represents being submissive the influence of magnetic fields and if this could get to become a problem of public health. The results of the investigations presented here, suggest them magnetic fields are able to modify cellular activities, and that this must be considered in the estimation of the potential risk that represents a labor or environmental exposition these physical agents

Key words: Electromagnetic field, Public health

Referencias

- 1.- Wertheimer C.L. and E. Leeper 1979. Electrical wiring configurations and childhood cancers. *Am. J. Epidemiol.* 109: 273-284.
- 2.- Juutilainen J. and S. Lang 1997. Genotoxic, carcinogenic and teratogenic effects of electromagnetic fields. Introduction and overview. *Mutat. Res.* 387: 165-171.
- 3.- Wood R. 1991. Magnetismo: De la brújula a los imanes superconductores. 1^a. Edición. McGraw-Hill. Capítulo 12 Biomagnetismo. pp 165-173.
- 4.- Galar-Castelan I. 1988. Electricidad y magnetismo para Estudiantes de Ciencias Biológicas. Editorial Limusa.1^a. Edición. Mex., pp. 223-237.
- 5.- Pothakamury U.R., B.J. Barletta, G.V. Barbosa y B.G. Swanson 1993. Inactivación de microorganismos en alimentos usando campos magnéticos oscilantes. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de alimentos.* 33: 479-489.
- 6.- Parker S.P. 1993. *Encyclopedia of Physics.* Second Edition. McGraw-Hill, USA. pp. 337-339.
- 7.- Stewart J.R. 1979. The electrostatic and electromagnetic effects of A.C. transmission Lines. IEEE. U.S.A. pp 4-10 .
8. Galar-Castelan I., *Op. Cit.*
- 9.- Hewitt. 1998. Física Conceptual. Addison Wesley Longman (Editorial). Séptima reimpresión. pp. 616-629.
- 10.- Lin J.C. 1994. Advances in electromagnetic fields in living systems. Volume 1. First Edition. Plenum Press. N.Y. pp. 18-20.
- 11.- Cadossi R., F. Bersani, A. Cossarizza, P. Zucchini, G. Emilia, G. Torelli and C. Franceschi 1992. Lymphocytes and Low-Frequency Electromagnetic Fields. *The Faseb Journal.* 6: 2667-2674.
- 12.- Harkins, T.T. and Ch. B. Grissom 1994. Magnetic Field Effects on B12 Ethanolamine Ammonia Lyase: Evidence For a Radical Mechanism. *Science* Vol. 263: 958-960.
- 13.- Lin J.C., *Op. Cit.*
- 14.- Brusik D. 1987. *Principles of genetic toxicology.* New York. Plenum Press. 1st Edition. pp 53-76.
- 15.- Tenforde T.S. 1991. ELF field interactions at the animal, tissue, and cellular levels. *Electromagnetics in biology and medicine.* 39: 225-245.
- 16.- Goodman R., C.A.L. Bassett and A.S. Henderson 1983. Pulsing electromagnetic Fields induce cellular transcription. *Science.* 220: 1283-1285.
- 17.- Liboff A.R., Williams T., D.M. Strong and R. Wistar 1984. Time-varing magneticfields: effects on DNA synthesis. *Science.* 223: 818-820.
- 18.- Takahashi K., I. Kaneko, M. Date and E. Fukada 1987. Influence of pulsing electromagnetic field on the frequency of sister-chromatid exchanges in cultured mammalian cells. *Experientia.* 43:331-332.
- 19.- Yen-Patton G.P.A.,W.F. Patton, D.H. Beer and B.S. Jacobson 1988. Endothelial response to electromagnetic fields: stimulation of growth rate and angiogenesis in vitro. *J. Cell. Physiol.* 134:37-46.

- 20.- Liburdy R.P. 1993. Biological Interactions of Cellular Systems with Time-Varying Magnetic Fields. Ann. N.Y. Acad. of Sci. III: 74-95.
- 21.- Kowalcuk Cl., L. Robbins, J.M. Thomas and R.D. Saunders 1996. Dominant lethal studies in male mice after exposure to 50 Hz magnetic field. Mutation Research. Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis. 328: 2 pp. 229-237. Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis - 328: 2 pp 229-237 .
- 22.- Nordstrom S., E. Birke and L. Gustavsson 1983. Reproductive Hazards Among Workers at High Voltage Substations. Bioelectromagnetics.4: 91-101.
- 23.- Andrew C. y L. Basset 1989. Aspectos prácticos y fundamentos de usos terapéuticos de campos electromagnéticos pulsados. Revista de Ingeniería Biomédica, 5: 451-529.
- 24.- Blank M. 1995. Biological effects of environmental electromagnetics fields:Molecular mechanism. Biosystems. 35:175-178.
- 25.- Coleman M., J. Bell and R. Skeet 1983. Leukemia incidence in electrical workers. Lancet. 982-983.
- 26.- McDowall M.E. 1983. Leukemia mortality in electrical workers in England and Wales. Lancet. 16: 243.
- 27.- Milham S. 1982. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. New Engl. J. Med. 307: 249.
- 28.- Pearce N.E., R.A. Sheppard, J.K. Howard, J. Fraser and B.M. Lilley 1985. Leukemia in electrical workers in New Zealand. Lancet. 18: 811-812.
- 29.- Wright W., J.M. Peters and T.M. Mack 1982. Leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. Lancet. 15: 1160-1161.
- 30.- Costa J.L. and G.A. Hoffmann 1987. Malignancy treatment. US Patent No.65898.
- 31.- Fitzgerald K. 1990. Electromagnetic fields: the jury's still out. IEEE Spectrum. August. 800: 22-35.
- 32.- Loescher W., M. Mevissen, W. Lehmlacher and A. Stamm 1993. Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. Cancer letters 71:75-81.
- 33.- Perry T.S. 1993. Today's view of magnetic fields IEEE SPECTRUM. December 14-23.
- 34.- Bowman J.D., D.C. Thomas, S.J. London and J.M. Peters 1995. Hypothesis: The risk of childhood leukemia is related to combinations of power-frequency and static magnetic fields. Bioelectromagnetics. 16: 48-59.
- 35.- Antonopoulos A., B.C. Yang, A. Estamm, W.D. Heller and G. Obe 1995. Cytological Effects of 50 Electromagnetic Fields on Human Lymphocytes *in vitro*. Mutat. Res. Letters. 346: 157.
- 36.- Tabrah F.L., H.F. Mower, S. Batkin and P.B. Grenwood 1994. Enhanced Mutagenic Effect of a 60 Hz time-varying magnetic field on numbers of azide-induced TA100 revertant colonies. Bioelectromagnetics 15:85-93.
- 37.- Koana T., M. Ikehata and M. Nakagawa 1995. Estimation of genetic effects of a static magnetic field by a somatic cell test using mutagen-sensitive mutants of *Drosophila melanogaster*. Bioelectrochem. and Bioen. 36: 95-100.
- 38.- Nordenson I., K.H. Mild, G. Anderson and M. Sandstrom 1994. Chromosomal aberrations in human amniotic cells after intermittent exposure to fifty hertz magnetic fields. Bioelectromagnetics. 15: 293-301.
- 39.- Galt S., J. Wahstrom, Y. Hamnerius, D. Holmqvist and J. Johannesson 1995. Study of effects of 50 Hz magnetic fields on chromosome aberrations and growth-related enzyme ODC in human amniotic cells. Bioelectrochem. and Bioen. 36: 1-9.

- 40.- D'Ambrosio G., A. Scaglione, D.D. Beradino, M.B. Lioi, L. Iannuzzi , E. Mostacciuolo and M.R. Scarfi 1985. Chromosomal aberrations induced by ELF electric fields. *J. Bioelectric.* 4: 279-284.
- 41.- Cohen M.M., A. Kunka, J.A. Astemborski and D. McCulloch 1986. The effect of low-level 60 Hz electromagnetic fields on human lymphoid cells. *Mutat. Res.* 172:177-184.
- 42.- Bauchinger M., R. Hauf, E. Schmid and J. Dresp 1981. Analysis of structural chromosome changes and SCE after occupational long-term exposure to electric and magnetic fields from 380 kV-systems. *Radiat Environ. Biophys.* 19, 235-238.
- 43.- Bersani F., C. Franceschi, D. Monti, A. Bologni, C. Gatti, R. Cadossi, M. Nichelatti, G. Moschini and A. Cossarizza 1988. The effects of extremely low frequency pulsed electromagnetic fields (ELF) on human lymphocyte proliferation *in vitro* and DNA repair. *Engineering in medicine and biology society 10th annual international conference.* CH2566-8/88/0000-0906.
- 44.- Rosenthal M. and G. Obe 1989. Effects of 50 Hertz electromagnetic fields on proliferation and on chromosomal alterations in human peripheral lymphocytes untreated or pretreated with chemical mutagens. *Mutat. Res.* 210:329-325.
- 45.- Garcia-Sagredo J.M., L.A. Parada and J.L. Monteagudo 1990. Effect on SCE in human chromosomes *in vitro* of low-level pulsed magnetic field. *Environ. and mol. mutagen.* 16:185-188.
- 46.- Khalil A.M. and W. Qassem 1991. Cytogenetic effects of pulsing electromagnetic field on human lymphocytes *in vitro*: Chromosome aberrations, sister-chromatid exchanges and cell kinetics. *Mutat. Res.* 247:141-146.
- 47.- Scarff M.R. and Franceschetti. 1991. Micronuclei formation in human lymphocytes exposed to 50 Hz AC electric fields. *Electromag. in Biol. and Med.* 27:159-162.
- 48.- Valjus J., H. Norppa, H. Jarventaus, M. Sorsa, E. Nykyri, S. Salomaa, P. Jarvinen and J. Kajander 1993. Analysis of chromosomal aberrations, sister chromatid exchanges and micronuclei among power linesmen with long-term exposure to 50 Hz electromagnetic fields. *Journal. Radiat. Environ. Biophys.* 32: 325-336.
- 49.- Heredia-Rojas J.A., A.O. Rodriguez-De la Fuente, M.R. Velazco-Campos, C.H. Leal-Garza, L. Rodríguez-Flores and B. De la Fuente-Cortez 2001. Cytological effects of 60 Hz magnetic fields on human Lymphocytes *in vitro*: Sister-Chromatid exchanges, cell kinetics and mitotic rate. *Bioelectromagnetics* 22: 145-149.
- 50.- 'Mendiola-Jiménez A. 2000. Efecto de campos electromagnéticos oscilantes de 60 Hz. Sobre parámetros hematológicos de ratón *Mus musculus* linea BALB/c *in vivo*. Tesis inédita, Facultad de Ciencias Biológicas , Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- 51.- Ramos-Alfano G. 2000. Evaluación del Potencial Genotóxico y Citotóxico de los Campos Electromagnéticos de 60 Hz sobre Eritrocitos de Médula Ósea de Ratón *Mus musculus* línea BALB/c *in vivo*. Tesis inédita, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- 52.- Heredia-Rojas J.A., D.E. Caballero-Hernandez, A.O. Rodríguez-De la Fuente, G. Ramos -Alfano and L. Rodríguez-Flores 2002. Lack of alterations on meiotic chromosomes and morphological characteristics of male germ cells in mice exposed to a 60 Hz and 2.0 mT magnetic field. *Bioelectromagnetics* (in press).
- 53.- Jacobi-Elizondo J.S., R. Gomez-Flores, R. Tamez-Guerra, C. Rodríguez-Padilla and J.A. Heredia-Rojas 2001. Acute effects of 60 Hz electromagnetic fields on *ex vivo* murine lymphocyte and macrophage functions and *in vitro* tumor cell growth. *Rev. Lat. Microbiol.* 43(3): 130-134.
- 54.- Trosko J.E. 2000. Human health consequences of environmentally-modulated gene expression: potential roles of ELF-EMF induced epigenetic versus mutagenic mechanisms of disease. *Bioelectromagnetics.* 21: 402-406.
- 55.- Jacobi-Elizondo J.S., J.A. Heredia-Rojas, C. Rodríguez-Padilla, R. Tamez-Guerra y R. Gómez-Flores 2000. Los Campos Electromagnéticos y el Sistema Inmune. *Ciencia UANL.* Vol III No.2: 166-175.