

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS DE MUY BAJA FRECUENCIA.

Yanet E. Arcos Oviedo*
Claudia P. Cardona Vargas*
Germán Moreno Ospina**

RESUMEN

Se presentan las interacciones de los sistemas biológicos con los campos magnéticos de muy baja frecuencia (ELF): revisión de estudios, normatividad y mitigación; también mediciones en ambientes ocupacionales y residenciales de Medellín.

ABSTRACT

Biological systems interactions with ELF magnetic fields are presented: review of studies, standards and mitigation; also, measurements in occupational and residential environments in Medellín. .

INTRODUCCIÓN

Este artículo fue motivado por la gran controversia generada con respecto a si los campos magnéticos son peligrosos para la salud y por los pocos proyectos encontrados para caracterizar los ambientes magnéticos a los que se está expuestos por sistemas eléctricos de transmisión, industriales, de áreas de trabajo y en ambientes domésticos en el medio colombiano.

Se partió de esta inquietud, para realizar una búsqueda de la información existente respecto de los posibles efectos de los campos magnéticos de muy baja frecuencia (ELF por sus iniciales en Inglés), de sus mecanismos de interacción, de la normatividad disponible sobre exposición y de los sistemas de mitigación que se recomiendan.

Este trabajo contribuye a la caracterización de nuestro ambiente electromagnético y a la difusión del conocimiento existente sobre sus efectos potenciales.

* Ingenieras Electricistas, Universidad de Antioquia.

** Profesor de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia

2. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELF.

2.1 EFECTOS PROBABLES

Corrientes eléctricas inducidas.

Los campos eléctricos y magnéticos pueden inducir cargas superficiales en los humanos dando como resultado flujos de corriente dentro del cuerpo.

Una cantidad que es de interés al analizar las interacciones de los campos de ELF es la magnitud pico de la densidad de corriente inducida I_{pico} la cual puede ser calculada de la Ley de Ohm:

$$|I|_{\text{pico}} = \sigma |E|_{\text{pico}} = \sigma \pi r f |B_0| \quad (1)$$

Donde

B_0 : campo sinusoidal aplicado a un circuito circular

$|E|_{\text{pico}}$: valor pico del campo eléctrico inducido

r : radio del circuito

f : frecuencia

σ : conductividad eléctrica del medio.

La ecuación anterior ayuda a calcular la magnitud del campo de ELF que eventualmente perturbaría el funcionamiento de tejidos biológicos críticos tales como el corazón y el sistema nervioso central.

Se ha estimado que las densidades de corriente endógenas (que se originan en el interior del organismo) asociadas con la actividad eléctrica del cerebro y el corazón tienen límites inferiores de 1 mA/m^2 y 10 mA/m^2 , respectivamente [1]. Como ejemplo de estimación basado en la anterior ecuación, para un campo magnético sinusoidal de 60Hz, aplicado a un lazo circular de tejido con radio $r = 0.06 \text{ m}$ y una conductividad $\sigma = 0.2 \text{ S/m}$, comparables a los del corazón humano, encontramos que la densidad de flujo magnético que induciría una densidad de corriente de 10 mA/m^2 es de 4.4 mT .

Debido a que campos magnéticos de ELF con intensidades mayores a varias militeslas están presentes en la vecindad de ciertos tipos de aparatos

y maquinaria industrial, la inducción de campos en tejidos a niveles que podrían perturbar funciones biológicas es probable. Además, si existen grandes transitorios o se presentan armónicos de orden superior, es posible que se induzcan en el cuerpo corrientes eléctricas más fuertes que aquellas que ocurren en forma natural. Existen, también, parámetros que a menudo son omitidos en las investigaciones biológicas: la forma de onda, la frecuencia natural del campo y el espesor de la piel, que afectan significativamente el comportamiento del campo. [2]

Materiales biológicos magnéticos.

Se ha sugerido que la magnetita (Fe_3O_4) está presente en células de mamíferos y que los campos magnéticos industriales pueden causar efectos biológicos al activar directamente tales partículas. Los cálculos muestran que esto requeriría campos industriales de al menos $2\text{-}5 \mu\text{T}$ [3], de modo que esta hipótesis tiene relevancia para exposiciones ocupacionales. Hay mediciones que mostraron la presencia de un mínimo de 5 millones de cristales de magnetita por gramo en la mayoría de los tejidos del cerebro, pero hasta 1996 este trabajo no se había duplicado.

Reacciones en radicales libres.

Se ha concluido que campos magnéticos estáticos pueden influenciar los porcentajes de las reacciones químicas que involucran pares de radicales libres [4]. Como los radicales libres implicados en estas reacciones tienen tiempos de vida muy cortos (rango de microsegundos) comparados con el ciclo de tiempo de los campos de frecuencia industrial (rango de milisegundos), un campo de estos actúa como un campo estático durante el período de tiempo en que ocurre la reacción. Sin embargo, puesto que cualquier efecto de un campo de frecuencia industrial puede adicionarse al campo geomagnético entre 30 y $70 \mu\text{T}$, no se esperan efectos biológicos significativos por debajo de los $50 \mu\text{T}$. Además, los estudios que involucran carcinogénesis y campos estáticos han sido abrumadoramente negativos en sus resultados.

Teoría de la resonancia

Esta involucra la interacción de campos magnéticos de ELF con el campo geomagnético. La debilidad de esta teoría es la no existencia de mecanismos biofísicos que permitan establecer que las células (u organismos) sean especialmente sensibles a los campos de frecuencia industrial.[5]

Otro fenómeno recientemente propuesto es el de resonancia estocástica, la cual está relacionada con la recepción, transducción y ampliación de las señales impuestas a las membranas por los campos magnéticos de ELF [6]. Algunas de las incompatibilidades en su estudio se deben a las características biofísicas de las células y las condiciones requeridas para conseguir dichas resonancias.

Cáncer.

Se conjetura que los campos magnéticos pueden suministrar corrientes, torques o fuerzas en el cuerpo que podrían aumentar el riesgo de cáncer (por ejemplo, reducción de la melatonina de la glándula pineal) o que los campos magnéticos de ELF pueden ser parte de procesos biológicos de múltiples pasos.

Médicos e ingenieros coinciden en afirmar que un campo magnético de baja frecuencia no produce efectos o cambios biológicos significativos ya que ellos no involucran rupturas moleculares que llevarían al cáncer. A pesar de que todavía se conoce poco sobre las causas de cánceres específicos, sí se comprenden lo suficientemente bien los mecanismos de la carcinogénesis, como para que los estudios celulares y animales proporcionen información relevante con vistas a determinar si un agente causa o contribuye al cáncer.

Agentes genotóxicos y agentes epigenéticos.

Determinadas sustancias químicas presentan un alto potencial para causar mutaciones. Estas sustancias son llamadas *carcinógenos*, los cuales pueden ser *genotóxicos* (iniciadores) o *epigenéticos* (promotores). Si los campos magnéticos industriales

fuesen carcinogénicos, podrían ser o *genotóxicos* o *epigenéticos*.

Los agentes epigenéticos pueden contribuir al desarrollo de cáncer, aunque no sean capaces de originarlo por sí solos; ellos afectan indirectamente a la carcinogénesis al aumentar la probabilidad de que otros agentes genotóxicos causen un daño, o que el daño genotóxico causado por otros agentes produzca un cáncer.

Existen muchas formas de medir la genotoxicidad; en la Tabla 1 se muestran algunas pruebas de laboratorio que pueden usarse para evaluar su evidencia. La Tabla 2 hace referencia a estudios de exposición de organismos sanos a diferentes intensidades de campo y sus efectos. A pesar de los estudios publicados, no hay evidencias reproducidas para la genotoxicidad.

Aún antes de que se acumulara la evidencia de que los campos industriales no eran genotóxicos, existían suposiciones de que podrían ser promotores. En general, los campos industriales parecen no tener actividad epigenética y los pocos estudios que han mostrado alguna evidencia de esta actividad han usado intensidades de campo por encima de aquellas encontradas en la mayoría de los ambientes residenciales y ocupacionales (Tabla 3).

La investigación actual indica que la carcinogénesis es un proceso en varias fases, causada por una serie de daños en el material genético de las células. El modelo, conocido como «multi-step carcinogenesis model» (de múltiples etapas), reemplaza al llamado de *iniciación – promoción*, el cual proponía que la carcinogénesis era un proceso en dos fases, la primera un daño genotóxico (iniciación) y la segunda un proceso no genotóxico (promoción). Está claro que en muchos cánceres, si no en todos, suceden múltiples alteraciones genotóxicas; y que no en todos los tipos de cáncer debe haber promoción.

Hipótesis de la melatonina.

La *melatonina* (hormona producida por la glándula pineal del cerebro) es liberada para circular en el flujo de sangre, a niveles que aumentan con la oscuridad

de la noche y disminuyen con la luz del día. Se ha sugerido, sin probarlo, que los campos ELF podrían inhibir la producción de melatonina, y que esta tendría actividad preventiva del cáncer.

La componente de la hipótesis, de que niveles bajos de melatonina estén asociados con aumento de cáncer,

está también sin probar. A finales de los años setenta hubo interés de usarla como agente anticancerígeno, pero los ensayos clínicos siguen mostrando que, en general, no es efectiva. Hay informes de niveles de melatonina más bajos en pacientes con cáncer, en especial de mama, pero no hay evidencias de un nexo causal.

Tabla 1. Pruebas de laboratorio para evaluar la evidencia de la genotoxicidad

Prueba	Descripción
Inducción de cáncer (in vivo)	Analiza el aumento de cáncer en animales. Se expone a los animales a un agente durante un período largo y se analiza si hay un aumento en la tasa de cáncer.
Mutagénesis (in vivo)	Analiza cambios en el material biológico de óvulos o espermatozoides, que se pueden transmitir a la descendencia. Se expone a animales al agente, luego se aparean y se analiza su descendencia buscando efectos hereditarios.
Mutagénesis (in vitro)	Analiza los cambios en el material genético que puede ser transmitido a las células hijas. Se exponen las células al agente y se analizan los cambios hereditarios en la descendencia.
Intercambio de cromatinas homólogas (in vitro, in vivo)	Analiza la presencia de rupturas y reorganización de trozos de cromosomas. El análisis se puede aplicar a células blancas de organismos expuestos (incluyendo personas) o a células expuestas en cultivo.
Transformación celular (in vitro)	Analiza si las células que crecen en cultivo, cuando se exponen a un agente, sufren cambios que semejan la respuesta a un cancerígeno. Estos cambios incluyen: pérdida de inhibición de crecimiento, que hace que las células se apilen, y adquisición de la capacidad de crecer.

Tabla 2. Evaluación de la genotoxicidad de los campos de ELF

Prueba	Objetivo	Resultado
<i>In vivo</i>	<i>CARCINOGENESIS</i>	-Se encontraron efectos no significativos de tumores de piel y leucemia en ratones. -Se reportó aumento de cáncer en ratas después de dos años de exponerlas a un campo de 500 a 5000 μ T y 50Hz
	<i>ABERRACIONES CROMOSÓMICAS</i>	-En humanos expuestos se encontraron daños cromosómicos, resultado esperado ya que eran fumadores o habían sufrido alguna descarga eléctrica. -No se encontraron daños cromosómicos en plantas expuestas a 75Hz en un campo magnético o campos eléctricos y magnéticos combinados.
<i>In vitro</i>	<i>DAÑOS CROMOSÓMICOS</i>	- No hubo daños cromosómicos en células humanas expuestas a un campo magnético de 300 μ T. - Se observaron daños en humanos a nivel de linfocitos a un campo magnético de 75 a 150 μ T a 32Hz.
	<i>RUPTURAS DE ADN</i>	-Se encontró que los campos magnéticos no pueden causar rompimiento en el ADN. -No se encontraron daños en el ADN de células humanas expuestas a campos de pulsos.
Estudios realizados a 50- 60 Hz, a menos que se especifique lo contrario.		

Tabla 3. Evaluación de agentes Epigenéticos

Objetivo	Resultados
TUMORES EN LA PIEL INDUCIDOS POR DMBA	-No se encontró promoción de tumor en la piel a 50-500 μ T aplicados de forma intermitente o continua.
TUMORES MAMARIOS INDUCIDOS POR NMU	- Se encontró promoción de tumores mamarios a 20 μ T
LINFOMAS INDUCIDOS POR ENU	-No se encontraron linfomas por exposición continua a 2, 200 o 1000 μ T, o por exposición intermitente a 1000 μ T
AUMENTO EN LA TRANSFORMACIÓN	- Hubo aumento en la transformación inducida por TPA en células mamíferas expuestas a 100 μ T (efecto aún no reproducido).
AUMENTO EN LA GENOTOXICIDAD	-No se presentó aumento de la mutagénesis química en bacterias sometidas a 0.12 μ T.
DMBA : 7,12 - dimethylbenz(a)anthracine; NMU : nitrosomethyl urea; ENU : N - ethyl - N – nitrosoúrea	
Estudios realizados a 50- 60 Hz	

Ninguno de los componentes de la hipótesis de la melatonina tiene un sólido soporte experimental. En estudios en seres humanos tampoco existe evidencia para apoyarla. Los resultados sugieren que cualquier efecto estaría limitado al cáncer de mama y quizás a otros cánceres hormonodependientes, como el cáncer de próstata.

Interacción de los campos DC con la materia viva.

Los campos DC son una parte del espectro de ondas electromagnéticas cuya frecuencia de oscilación es 0 Hz. Cuando un fotón - paquete de energía - de una radiación ionizante atraviesa la materia, rompe los enlaces químicos (incluso sin que se produzca un calentamiento apreciable) y da lugar a que las moléculas neutras queden cargadas. Esta ionización puede dañar tejidos. En comparación, la energía de un fotón de DC supone tan sólo una milésima parte de la energía cinética que posee una molécula del cuerpo como resultado de la agitación térmica, y ni siquiera es capaz de romper el enlace químico más débil. Este hecho no excluye la posibilidad de que con DC se produzcan alteraciones directas en las moléculas de un tejido, pero no sugiere la existencia de un mecanismo por el que se induzcan cambios significativos en el mismo.

Mecanismos de interacción.

Los mecanismos conocidos y sugeridos de interacción de los campos magnéticos DC con la materia viva son:

- Interacciones electrodinámicas y magnetohidrodinámicas con electrolitos en movimiento. Es así como la ocurrencia del fenómeno magnetohidrodinámico en la sangre lleva a cambios en la presión dinámica obligando, en principio, a un esfuerzo cardiovascular.
- Efectos magnetomecánicos: orientación de partículas ferromagnéticas, incluyendo partículas de magnetita sintetizadas biológicamente.
- Generación de diferencias de potencial debido al movimiento de iones (efecto Hall) como resultado de una fuerza magnética.
- Cambios en los productos intermedios o arreglos estructurales en la transferencia de electrones a niveles de energía molecular y efectos en estructuras superfina. Las densidades de flujo magnético involucradas dependen de un sistema en particular y pueden ser tan altas como 200mT, pero también menores de 10mT. La fotosíntesis bacterial y los efectos sobre sistemas visuales son los primeros candidatos para este mecanismo.

- Inducción de campos eléctricos con diferencias de potencial y corrientes dentro de un organismo por el movimiento rápido a lo largo de un campo magnético intenso. Algunos fosfenos magnéticos son debidos a tales movimientos.
- En relación con los radicales libres: los autores B. Brocklehurst y K.A. McLauchlan publicaron en 1996 un artículo en el que afirman que «los sistemas de pares de radicales ven cualquier campo de menos de 10 MHz como estático». Los efectos son teóricamente posibles bajo campos de intensidad inferior a la del geomagnético; los autores demostraron que a 0.1mT la concentración de radicales libres se incrementaba en aproximadamente un 1%. Este 1% dicen ellos “es muy pequeño, y el cuerpo posee sofisticados mecanismos de defensa para soportar estos radicales bajo condiciones normales”.

Hipótesis de la Serotonina.

La *Serotonina* (5-HT), neurotransmisor humano, sirve de precursor para la síntesis de la melatonina. Los tumores carcinoides producen 5-HT y otras sustancias que provocan crisis de rubor facial y diarrea. Además, la serotonina interviene en la regulación de la temperatura. Los cambios en los niveles de serotonina producen también cambios significativos en el sistema nervioso central; por ejemplo, con altos niveles de iones positivos se incrementan los niveles de ansiedad cuando se está estresado.

El bloqueo de la síntesis de 5-HT en los animales afecta las reacciones motoras y emocionales y causa un aumento de la sensibilidad a los estímulos dolorosos.

Se ha mostrado que un incremento en la concentración de iones negativos reduce las cantidades de serotonina en las ratas y conejos, posiblemente al acelerar los procesos de oxidación enzimática.

En estudios realizados con animales se ha encontrado que el incremento en la concentración de iones positivos incluye una disminución en el porcentaje de supervivencia de ratones expuestos a una determinada

dosis, mientras que un incremento de iones negativos reduce el porcentaje de mortalidad.

Se destacan estos resultados porque fácilmente se cambia la concentración de iones en el aire al usar sistemas de alto voltaje DC, en los cuales una corriente de dispersión de $1\mu\text{A}$ correspondería a la generación de 10^{12} iones por segundo.

2.2 EFECTOS PROBADOS

Orientación.

Se ha encontrado que los campos magnéticos tienen efectos en la orientación de diversos grupos de organismos, tales como caracoles, abejas melíferas, salamandras, palomas mensajeras, petirrojos, ratas y humanos. Experimentos realizados con palomas mensajeras, tiburones y el atún demuestran la habilidad que tienen estos organismos para sentir los campos magnéticos.

Dos mecanismos de interacción se han establecido: los organismos detectan el campo eléctrico inducido por efecto Faraday cuando se mueven en un campo magnético o hay interacción del campo con materiales magnéticos que se encuentran en los organismos.

El primer mecanismo es aparente en los tiburones y rayas los cuales sienten campos eléctricos tan bajos como 5×10^{-7} V/m debidos a las corrientes del océano o al movimiento de animales en el campo geomagnético.

El segundo mecanismo se puede observar con las palomas mensajeras. Estas al ser puestas en libertad parecen usar el sol como una brújula, como se ha mostrado con experimentos; repetidos estos experimentos bajo cielo nublado, se encontró que las palomas no podían ver el sol a través de las nubes pero que sin embargo regresaban al palomar. Hay indicios de que esto puede involucrar el uso del campo magnético terrestre. Estudios realizados por Keeton, Larking y Windsor encontraron una correlación significativa entre la orientación de las palomas hacia sus hogares, cuando se midió la dirección en que volaban al ser liberadas en determinado punto, y la cantidad de fluctuaciones del campo magnético

terrestre que ocurrieron durante las 12 horas precedentes.

Las palomas tienen tejidos que son ricos en magnetita y existe evidencia experimental de que este tejido está involucrado de alguna forma con la sensibilidad de las palomas a los campos magnéticos; en estudios realizados por Keeton y por Walcott [12] se observó que al pegar pequeños magnetos en la parte trasera de la cabeza de la paloma y bajo cielo nublado estas palomas eran a menudo desorientadas por los magnetos, lo que no ocurría cuando se utilizaban barras de bronce (no magnéticas) de igual tamaño y peso.

Otra posible conexión entre la magnetita (Fe_3O_4) y el efecto del campo magnético en el comportamiento se ha encontrado en las abejas melíferas. [9,10,11]

Sistema visual.

Entre las interacciones de campos de ELF con tejidos vivos, la más ampliamente conocida y bien documentada es la sensación visual conocida como "fosfenos". En el sentido más amplio, el término significa producción de sensaciones luminosas en el ojo por agentes diferentes a la luz. El fenómeno ocurre como respuesta inmediata a la estimulación por campos magnéticos pulsados o sinusoidales y es completamente reversible sin influencia aparente en la agudeza visual.

Diferentes investigaciones muestran que los fosfenos son inducidos por campos magnéticos de ELF acoplados inductivamente y por campos eléctricos de ELF acoplados capacitivamente, aplicados en la cabeza en la región de los ojos. La observación inicial (d'Arsonval, 1896) realizada con un campo magnético de 42 Hz, se ha continuado en numerosos estudios con el fin de definir las características visuales de los magnetofosfenos, su dependencia con la frecuencia, la intensidad del campo aplicado y el punto exacto que afecta dentro del complejo camino visual.

A pesar de que varias investigaciones implican que la retina es el lugar donde el campo magnético conduce a fosfenos, no se ha logrado identificar si

son los fotorreceptores o los elementos neuronales de la retina los que responden al campo.

Sistema nervioso.

Los campos magnéticos que inducen densidades de corriente por encima de 1 A/m^2 en el tejido llevan a una excitación neural y son capaces de producir efectos biológicos irreversibles tales como la fibrilación cardíaca. También hay estudios que indican que el umbral de densidad de corriente para la estimulación neural puede ser tan baja como 100 mA/m^2 .

2.3 EFECTOS ESPECULATIVOS

Sistema cardiovascular.

Los investigadores especulan que debe existir una intensidad "ventana" en la cual el sistema cardíaco puede ser más sensible, como lo insinúan los resultados de la tabla 4, aunque no se conocen los mecanismos que expliquen esto. [5,1]

Tabla 4. Efecto del campo eléctrico y magnético en el ritmo de las pulsaciones del corazón

Frecuencia [Hz]	Campo eléctrico [kV/m]	Campo magnético [μT]	Efecto
50	10.2	15.4	No
60	9	20	Si
-	≤ 6 y ≥ 12	≤ 10 y ≥ 30	No

Comportamiento Animal.

Numerosas investigaciones sobre las alteraciones del comportamiento en animales expuestos a campos magnéticos de ELF han revelado que no se observan efectos en el comportamiento en estudios con roedores, monos y humanos expuestos a diferentes niveles de campo [3,8]. Aunque la respuesta en el comportamiento debido a campos de ELF débiles que exhiben varias especies animales, incluyendo abejas y aves, puede ser atribuida a la interacción del campo con los depósitos de magnetita biogénica, no existen bases biológicas claras para diferenciar la sensibilidad a bajos y altos niveles de campos magnéticos para otras especies.

3. NORMATIVIDAD Y MITIGACIÓN

La gran diversidad de la calidad de las investigaciones ha llevado a que cierto número de organizaciones profesionales y gubernamentales sólo haya publicado recomendaciones, mas no normas, sobre la exposición a campos de frecuencia industrial.

Las recomendaciones presentadas por diferentes organizaciones y en épocas diferentes son inconsistentes en varios aspectos [2], razón por la cual sólo se presentan como referencias. Las más relevantes son la emitidas por National Radiological Protection Board- United Kindom (NRPB-UK), International Comission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), y American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Valores sugeridos por éstas y otras organizaciones se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Límites para la exposición a campos de frecuencia industrial

Público en general		Trabajadores	
Organización	Campo [μ T]	Organización	Campo [μ T]
NRPB-UK	1330	NRPB-UK	1330
ICNIRP *	100	ACGIH	1000
ICNIRP **	1000	ICNIRP ***	500
		ICNIRP **	5000

* exposición por 24 h
 ** poco tiempo de exposición
 *** exposición continua

Se presentan a continuación diversas recomendaciones encontradas en la literatura, tendientes a la disminución de los niveles de campo en diversos ambientes.

Recomendaciones para minimizar los campos magnéticos producidos por las líneas de potencia.

- ⇒ Incluir la *proximidad a la línea*, de personas, como uno de los factores a considerar en nuevos diseños. Existen empresas que ya están tomando en consideración estas medidas.
- ⇒ *Incrementar los niveles de voltaje* usados en transmisión. Este método no es muy aplicable

porque implicaría rediseño y reubicación de cada pieza de los equipos involucrados en la transmisión en bloque de energía. Además, a medida que el flujo de corriente incrementa con el crecimiento normal de la carga, el campo magnético inevitablemente alcanzará los niveles que tenía para voltajes menores.

- ⇒ Utilizar *diferentes configuraciones* para los circuitos de las líneas. Existen arreglos de fases para cancelar parte del campo magnético de los circuitos de las líneas de transmisión.
- ⇒ *Disminuir la separación entre fases*: mientras más cerca estén los conductores entre sí, menor será el campo magnético en las vecindades. Este método puede presentar incremento del potencial para producir corona, radio interferencia y ruido audible.
- ⇒ *Utilizar líneas de transmisión subterráneas*: permitiría eliminar el campo magnético de un circuito, pero sólo bajo algunas circunstancias específicas; en otras, esta opción podría incrementarlo (la tierra por sí sola no proporciona apantallamiento magnético).

Recomendaciones para minimizar niveles de campo magnético en sistemas de distribución

- ⇒ Las prácticas de *aterramiento para sistemas* de bajo voltaje son una de las opciones para reducir el campo magnético alrededor de líneas de distribución y edificaciones. Mientras menor sea el flujo de corriente de desequilibrio residencial, menor será el campo magnético generado.
- ⇒ **Balanceo de circuitos**: revisar las redes y ubicar puntos en los que estén resultando flujos remanentes producidos por corrientes desbalanceadas con retorno por tierra; además, en lo posible tratar de que los circuitos trabajen balanceados.
- ⇒ **Disminución de carga**: trasladar cargas a otros alimentadores o circuitos puede disminuir la corriente de carga total con lo cual seguramente se disminuye también el flujo resultante.

- ⇒ **Utilizar tuberías de acero:** equivaldría a un blindaje magnético; reduciría el flujo resultante si se introducen en ellas los conductores de fase y neutro.
- ⇒ **Alejamiento físico de cables:** el flujo resultante en el exterior será menor mientras mayor sea la distancia a los conductores y menor sea la distancia entre ellos.

Las dos últimas opciones tienen implicaciones económicas considerables y limitaciones técnicas y físicas.

Opciones para reducir la exposición a campos magnéticos en ambientes laborales

- ⇒ Cambiar las prácticas laborales en las áreas donde se encuentren equipos que generen altos niveles de campo magnético. Limitar los tiempos para trabajadores con tareas en tales áreas, podría ayudar a reducir la exposición a los campos (exposición prudente).
- ⇒ Implementar equipos robóticos donde las densidades de campo sean lo suficientemente altas, que permitan a los trabajadores desde una distancia prudente realizar sus labores sin tener una exposición directa.
- ⇒ Utilizar equipos de control y sensores que monitoreen las condiciones del proceso, reduciría significativamente la necesidad del trabajador de inspeccionar o leer personalmente los datos de algunos componentes del sistema.

Reducción del campo magnético generado por electrodomésticos

Para ambientes ocupacionales influenciados por electrodomésticos, las recomendaciones que normalmente se encuentran en la literatura para minimizar la exposición a campos se basan principalmente, en el manejo de las distancias a los equipos. A continuación se enumeran algunas de las sugerencias que se podrían considerar si se desea controlar el ambiente magnético generado por los equipos de uso doméstico.

- ⇒ **Televisores:** ya que estos aparatos crean campos magnéticos a su alrededor, no únicamente frente a las pantallas, es conveniente sentarse a por lo menos 1 m de distancia y no colocar camas muy

próximas al otro lado del muro contra el cual está ubicado el aparato.

- ⇒ **Hornos microondas:** mantenerse por lo menos a un metro de distancia mientras el aparato está funcionando; también es recomendado verificar periódicamente el hermetismo de las puertas, para evitar fugas.
- ⇒ **Relojes electrónicos y teléfonos contestadores:** ubicarlos, si están situados en las mesas de noche, a una distancia de mínimo 1.5 m de la cama o cambiar el reloj por uno de pilas o mecánico.
- ⇒ **Secadores de cabello:** aunque la exposición a ellos sea corta, se aconseja utilizarlos lo menos posible.
- ⇒ **Neveras, lavadoras y secadoras:** producen campos magnéticos cuando están en funcionamiento, que en el caso de las neveras es, normalmente, la mayor parte del día. Tampoco deben colocarse camas al otro lado de muros contra los cuales están ubicados estos aparatos.

4. NIVELES DE CAMPO MAGNÉTICO EN MEDELLÍN

A continuación se ilustran algunos resultados de las mediciones realizadas en la vecindad de líneas de transmisión, subestaciones y artefactos eléctricos que hacen parte de ambientes laborales y residenciales de interés. Las mediciones se realizaron a frecuencia industrial (60 Hz).

Se presentan a continuación varias de las mediciones realizadas en el sistema Metro de Medellín, en donde se consideró particularmente importante realizarlas, por la congregación de población que se presenta y por lo singular del sistema; las tablas 9 a 12 y la figura 1 presentan algunos resultados interesantes; en esta figura se observa el perfil transversal del campo magnético, a 1 m sobre el piso, de una línea de transmisión de 220kV, en la cual el punto cero es exactamente debajo de la línea y las distancias negativas son acercándose hacia la estación Industriales del Metro. Actualmente se realiza otra tanda de mediciones, involucrando ahora la componente de corriente continua, lo que no se pudo hacer inicialmente por no disponer del equipo para ello; esos resultados serán presentados en un artículo posterior.

Fig 1. Perfil transversal del campo en el acceso nororiental de usuarios en la estación Industriales

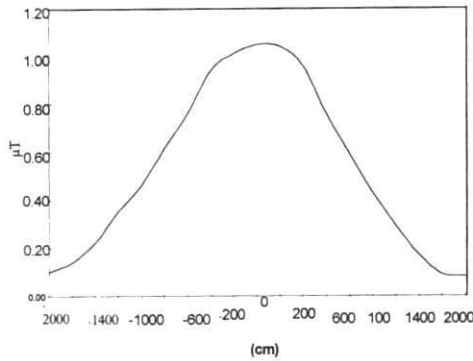


Tabla 9. Densidad de flujo magnético en vecindad de transformadores

Subestación	# fases	Capacidad kVA	B _{max} (μT)	D a B _{max}
Acevedo	3φ	50	15,6	45
Acevedo	3φ	50	14,5	75
Universidad	3φ	160	17,1	30
Universidad	3φ	50	1,28	120
San Antonio	3φ	160	33,0	50
San Antonio	3φ	315	21,0	60
Poblado	3φ	50	28,0	45
Ayurá	3φ	160	11,5	45
Ayurá	3φ	50	5,21	75
Itagüi	3φ	200	28,0	45

Notas :

D : distancia en cm, tomada a partir del borne más externo del transformador (y sobre la malla de seguridad). Corresponde al punto más próximo a que es posible el acceso por personal no específicamente autorizado.

- Mediciones en las subestaciones del Metro de Medellín, durante período pico. Transformadores secos

Tabla 10. Resultados obtenidos en la subestación San Antonio - hora pico

B _{max} (μT)	Condiciones
9.0 (5.0 a 10.0)	Sin tren en la plataforma de San Antonio.
12.0 (10.0 a 15.0)	Tren en plataforma abre y cierra puertas.
53.0 (40.0 a 69.0)	Tren se aproxima a plataforma, disminuyendo la velocidad.
80.0 (70.0 a 95.0)	Tren empieza a acelerar, saliendo de plataforma.
113.0 (102.0 a 124.0)	Tren se aproxima a su máxima velocidad.

- El transformador es de 3,5 MVA.

Valores entre paréntesis son el menor y el mayor medidos; el valor arriba del paréntesis es el promedio de los obtenidos. Las condiciones anotadas son de duración inferior a 1 min.

Tabla 11. Resultados de mediciones en el compartimiento de usuarios y en la cabina de conducción del tren

B _{max} (μT)	Condiciones
0.34 (0.06 a 1.32)	Sector derecho de la pared que divide la cabina de conducción y el compartimiento de usuarios. (d= 10 cm de la pared).
0.06 (0.04 a 0.15)	Promedio en el corredor del compartimiento de usuarios (sin ventilación ni iluminación)
0.46	En compartimiento de usuarios cuando pasa otro tren.
0.33 (0.23 a 0.51)	En el armario donde se encuentran los relés termomagnéticos (d= 10 cm).
1.8 (0.06 a 3.8)	En el armario donde se encuentran los relés "guardamotors" (d= 10 cm).
0.12 (0.03 a 0.23)	Armario donde se encuentran las computadoras del tren.
0.31 (0.2 a 0.43)	En el tablero del conductor, cuando el tren se acelera lentamente.
0.26 (0.16 a 0.35)	En el tablero del conductor, cuando el tren está frenando.
0.92	En el tablero del conductor, cuando el tren está acelerando a fondo.

Tabla 12. Máxima densidad de flujo magnético en los accesos de las estaciones del Metro de Medellín

Estación	Acceso	Perfil	B _{max} (μT)
Niquia	Oriental	Longitudinal	0,24
Industriales	Occidental	Transversal	1,05
Poblado	Occidental	Ninguno	1,50
Poblado	Oriental	Transversal	1,34
Ayurá	Oriental	Ninguno	0,16
Envigado	Nororiental	Transversal	2,81
Envigado	Suroriental	Ninguno	2,26

Se presentan sólo unas pocas mediciones en electrodomésticos ya que otras similares han sido publicadas [12, por ejemplo]. Las figuras 2 y 3 muestran el comportamiento del campo magnético en varias computadoras y su promedio, observándose que los valores tanto con pantalla filtro como sin esta son similares.

Fig 2. Densidad de flujo magnético en computadoras con pantallas filtro.

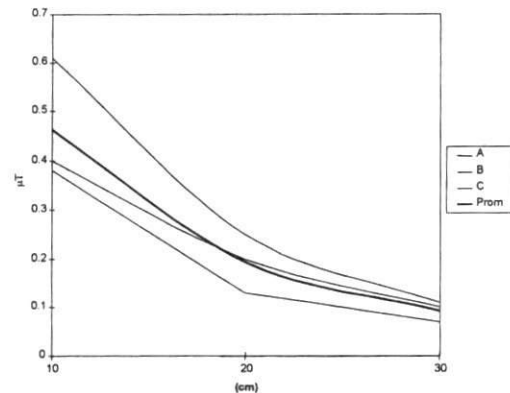
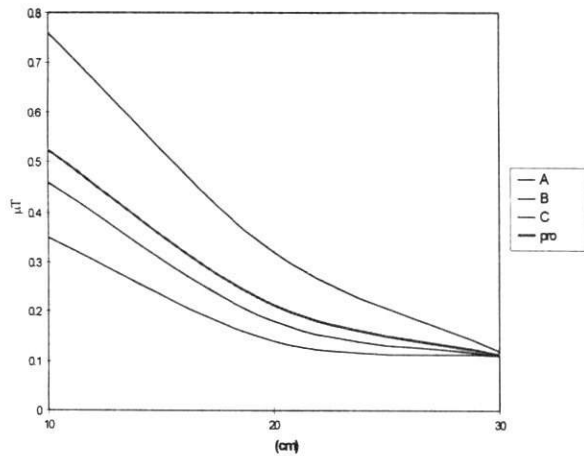
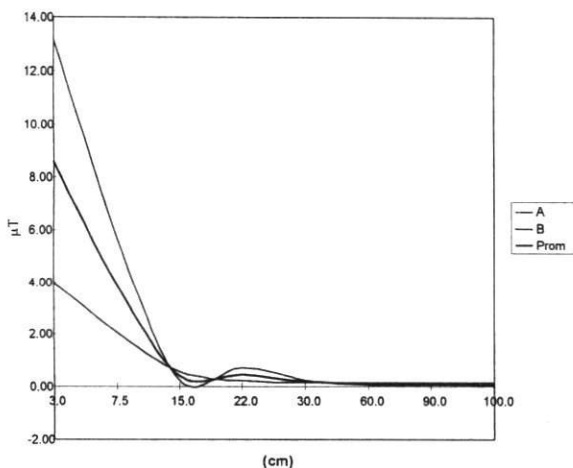


Fig 3. Densidad de flujo magnético en computadoras sin filtro de pantallas



En la figura 4 se aprecian los niveles de densidad de campo producidos por dos secadores de cabello y su promedio; se puede observar su alto valor, comparado con los niveles de las computadoras y de la línea de transmisión.

Fig 4. Densidad de flujo magnético en secadores



En general, se observa que los niveles de campo disminuyen a medida que el aparato de medición se aleja de la fuente del campo magnético.

CONCLUSIONES

- ☛ La exposición ocupacional a campos magnéticos, según a las mediciones, muestra una relación espacial; depende extremadamente y en forma inversa de la distancia de la fuente al punto de trabajo.
- ☛ Los máximos valores de campo magnético establecidos para protección de la salud humana no son excedidos en muchos de los lugares en que se realizaron las mediciones.
- ☛ Se deben tener en cuenta características de los campos magnéticos como armónicos, transitorios, cambios espaciales y temporales; estas características, hasta el momento, no han recibido suficiente atención.
- ☛ Dado que la seguridad de los trabajadores debe ser una de las prioridades operacionales en cualquier empresa y teniendo presente que la exposición ocupacional a campos magnéticos se está convirtiendo en una inquietud común entre los trabajadores, es necesario medir y analizar los valores a que están expuestos, pero clasificando los diferentes tipos de actividades.
- ☛ Se deben continuar realizando mediciones de campo magnético de baja frecuencia para caracterizar nuestros ambientes sin importar que sus efectos hayan sido hasta ahora prácticamente imposibles de demostrar, pues aún es necesario mayor estudio del asunto y es deseable la mayor disponibilidad posible de datos.
- ☛ Mientras la naturaleza “inconclusa” de la investigación de los efectos biológicos de los campos magnéticos continúe, es arriesgado tomar medidas definitivas al respecto, orientadas hacia la mitigación; las políticas más sensatas sugieren que mientras se esté pendiente de respuestas científicas concluyentes se deben tomar medidas razonables, esto es con mínimos inconvenientes tanto económicos como técnicos, para reducir la exposición a campos de baja frecuencia.

La preocupación del público se mantiene con base en las informaciones contradictorias que difunden los medios de comunicación y por la incapacidad de los científicos para garantizar que no existe riesgo.

Reconocimientos: Los autores agradecen la colaboración del Metro de Medellín por la autorización para la realización de las mediciones y al CODI, de la Universidad de Antioquia, por el soporte al proyecto dentro del cual se ha adelantado este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] STUCHLY, M. "Low Frequency Magnetic Fields: Dosimetry, Cellular, and Animal Effects". In The Biomedical Engineering Handbook. Edited by J. Bronzino. CRC Press and IEEE Press, Boca Raton, FL, 1995.
- [2] CARDONA, C. y ARCOS, Y. Efectos biológicos de los campos magnéticos de muy baja frecuencia y muy baja densidad. Proyecto de grado, Universidad de Antioquia, 1998.
- [3] MOULDER, J. "Biological Studies of Power-Frequency Fields and Carcinogenesis". IEEE Transactions on Engineering in Medicine and Biology. July/August 1996.
- [4] FOSTER, K. "Electromagnetic Field Effects and Mechanisms". IEEE Transactions on Engineering in Medicine and Biology. July/August 1996.
- [5] TENFORDE, T.S. "Interaction of ELF Magnetic Fields With Living Systems". Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields (2nd. Edition), Edited by C. Polk and E. Postow. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996.
- [6] HAFEMEISTER, D. "Power Lines Fields and Public Health". <http://www.calpoly.edu/~dhafemei>. March 29, 1996.
- [7] GUYTON, A. "Control Genético de la Síntesis de las Proteínas y la Reproducción Celular". Tratado de Fisiología Médica. Octava edición.
- [8] BARKER, A. "The Possible Biological Effects of Low-Frequency Electromagnetic Fields". IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol.11, No.1, January/February 1995.
- [9] WICKELGREN, I. "The Strange Sense of The Other Species". IEEE Spectrum, March 1996, N. York
- [10] WALCOTT, C. "Magnetic Orientation in Homing Pigeons". IEEE Transactions on Magnetics, Vol.16, No. 5, September 1980.
- [11] KALMIJN, A. "Electric and Magnetic Field Detection in Elasmobranch Fishes". Science, Vol. 218, November 1982.
- [12] OSPINA C. y BEDOYA, J. "Medición del campo magnético y eléctrico producido por las principales instalaciones del sistema de energía eléctrica", II Simp. Nal. de Mejoramiento Empresarial, Corp. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico CIDET, Bogotá, 1995.