

**IMPLEMENTACIÓN DE PROTOCOLOS PARA EL CONTROL DE LOS NIVELES DE  
EXPOSICIÓN A CEM-NI DE ALTA FRECUENCIA CON BASE EN LA RESOLUCIÓN 754  
DE LA ANE**

**SAMANTHA RÍOS HERNÁNDEZ**

**LIZA ZULUAGA CAÑAVERAL**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingenieras Físicas**

**Director**

**Luis Enrique Llamosa Rincón**

**M.Sc. en Física**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PEREIRA**

**2019**

## CONTENIDO

1	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	6
1.1	FRECUENCIA	8
1.2	LONGITUD DE ONDA	8
1.3	CAMPOS ELÉCTRICOS	8
1.4	CAMPOS MAGNÉTICOS	8
1.5	CAMPO ELECTROMAGNÉTICO (CEM)	8
1.6	MEDICIÓN DE INMISIÓN	9
1.7	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	9
1.7.1	CAMPOS DE FRECUENCIAS INFERIORES A 3 kHz ( $0 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$ )	11
1.7.2	CAMPOS DE RADIOFRECUENCIA RF Y MICROONDAS MO ( $3 \text{ kHz} < f < 300 \text{ GHz}$ )	12
1.8	RADIACIÓN IONIZANTE	12
1.9	RADIACIÓN NO IONIZANTE	12
1.10	DEFINICIONES	12
1.10.1	EXPOSICIÓN	13
1.10.2	NIVEL DE EXPOSICIÓN	13
1.10.3	NIVEL DE EXPOSICIÓN PORCENTUAL	13
1.10.4	NIVEL DE EMISIÓN	13
1.10.5	RELACIÓN DE EXPOSICIÓN (ER, EXPOSURE RATIO)	13
1.10.6	RELACIÓN DE EXPOSICIÓN TOTAL (TER, TOTAL EXPOSURE RATIO)	13
1.10.7	EXPOSICIÓN CONTINUA	13
1.10.8	EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN	14
1.10.9	EXPOSICIÓN NO UNIFORME/ EXPOSICIÓN CORPORAL PARCIAL	14
1.10.10	EXPOSICIÓN CONTROLADA/OCUPACIONAL	14
1.10.11	EXPOSICIÓN DE PÚBLICO EN GENERAL	14
1.10.12	EMISOR INTENCIONAL	14
1.10.13	EMISOR NO INTENCIONAL	15
1.10.14	ESTACIÓN BASE (BS, BASE STATIONS)	15
1.10.15	ESTACIÓN RADIOELÉCTRICA	15
1.10.16	EQUIPO BAJO PRUEBA (EUT, EQUIPMENT UNDER TEST)	15
1.10.17	“HOT SPOT”	15
1.10.18	ANTENA	15
1.10.19	ANTENA ISOTRÓPICA	15
1.10.20	ARREGLO DE ANTENAS	16
1.10.21	CENTRO DE RADIACIÓN	16
1.10.22	SONDA	16
1.10.23	DENSIDAD DE POTENCIA (S)	16
1.10.24	DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA (TEMPORAL)	16
1.10.25	DENSIDAD DE POTENCIA DE CRESTA	16
1.10.26	DENSIDAD DE POTENCIA DE ONDA PLANA EQUIVALENTE ( $S_{eq}$ )	16
1.10.27	ABSORCIÓN ESPECÍFICA (SA, SPECIFIC ABSORPTION)	17
1.10.28	TASA DE ABSORCIÓN ESPECÍFICA (SAR, SPECIFIC ABSORPTION RATE)	17

1.10.29	VALOR EFICAZ (RMS, ROOT MEAN SQUARE)	17
1.10.30	CORRIENTE DE CONTACTO	18
1.10.31	CORRIENTE INDUCIDA	18
1.10.32	DENSIDAD DE CORRIENTE (J)	18
1.10.33	TIEMPO DE PROMEDIACIÓN ( $T_{avg}$ )	18
1.10.34	PATRÓN DE RADIACIÓN	18
1.10.35	LÓBULO PRINCIPAL	18
1.10.36	LÓBULO LATERAL	18
1.10.37	POTENCIA EQUIVALENTE RADIADA (PER) - POTENCIA RADIADA APARENTE (PRA)	18
1.10.38	POTENCIA RADIADA ISÓTROPICA EQUIVALENTE (EIRP, EQUIVALENT ISOTROPICALLY RADIATED POWER)	18
1.10.39	POTENCIA MEDIA (TEMPORAL) ( $P_{avg}$ )	18
1.10.40	GANANCIA DE ANTENA	19
1.10.41	DIRECTIVIDAD	19
1.10.42	DIAGRAMA DE CAMPO RELATIVO	19
1.10.43	GANANCIA NUMÉRICA RELATIVA	19
1.10.44	FUENTE INHERENTEMENTE CONFORME	19
1.10.45	FUENTES NORMALMENTE CONFORMES	20
1.11	SISTEMA DE MEDICIÓN DE BANDA ANCHA	21
1.12	SISTEMA DE MEDICIÓN DE BANDA ANGOSTA	21
1.13	REGIONES DE CAMPO DE UN CEM-NI DE ALTA FRECUENCIA	21
1.13.1	REGIÓN DE CAMPO CERCANO	21
1.13.1.1	ZONA DE CAMPO CERCANO REACTIVO	21
1.13.1.2	ZONA DE CAMPO CERCANO REACTIVO RADIANTE	21
1.13.1.3	ZONA DE CAMPO CERCANO RADIANTE (ZONA DE FRESNEL)	22
1.13.2	REGIÓN DE CAMPO LEJANO	22
1.13.2.1	ZONA DE CAMPO LEJANO RADIANTE	22
1.14	ZONAS DE EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	23
1.14.1	ZONA DE PÚBLICO EN GENERAL	23
1.14.2	ZONA OCUPACIONAL	23
1.14.3	ZONA DE REBASAMIENTO	23
1.15	DECLARACIÓN CONFORMIDAD DE EMISIÓN RADIOELÉCTRICA (DCER)	24
2	METODOLOGÍA	25
3	DESARROLLO	27
3.1	REQUISITOS PARA QUIENES REALICEN LAS MEDICIONES	28
3.2	SITUACIONES TÍPICAS DE MEDICIÓN	28
3.3	CONDICIONES DE LAS MEDICIONES	29
3.4	CANTIDADES QUE DEBEN MEDIRSE	29
3.5	LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN	30
3.5.1	NIVELES DE DECISIÓN	33
3.5.2	MODIFICACIÓN DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN	33
3.5.2.1	POR CUESTIONES DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN	33
3.5.2.2	POR CUESTIONES DE DURACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	34
3.6	INSTRUMENTACIÓN PARA LAS MEDICIONES	34

3.6.1	CARACTERÍSTICAS	34
3.6.1.1	GAMA DE FRECUENCIAS	34
3.6.1.2	DIRECTIVIDAD DE LA ANTENA	35
3.6.1.3	CANTIDAD MEDIDA	35
3.6.2	SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO	35
3.6.3	SELECCIÓN DE LA SONDA	35
3.6.3.1	TAMAÑO DE LA SONDA	35
3.6.3.2	GAMA DE FRECUENCIAS	35
3.6.3.3	DIRECTIVIDAD	35
3.6.4	REQUISITOS DE CALIBRACIÓN	36
3.6.4.1	FACTOR DE CALIBRACIÓN	36
3.6.4.2	FACTOR DE ANTENA	36
3.6.4.3	ISOTROPÍA	36
3.6.4.4	LINEALIDAD	36
3.6.4.5	SEÑAL IMPULSIVA	37
3.6.4.6	INTEGRACIÓN DE MÚLTIPLES SEÑALES	37
3.6.4.7	RECHAZO AXIAL	37
3.7	CONSIDERACIONES DURANTE EL PROCESO DE MEDICIÓN	37
3.7.1	VARIABILIDAD DE LA FUENTE	37
3.7.1.1	VARIABILIDAD DE LA POTENCIA	37
3.7.1.2	VARIABILIDAD DE LA ANTENA	38
3.7.1.3	FUENTES INTERMITENTES	38
3.7.2	VARIABILIDAD TEMPORAL	38
3.7.3	PROMEDIO TEMPORAL	38
3.7.4	APANTALLAMIENTO Y DISPERSIÓN	38
3.7.5	VARIABILIDAD ESPACIAL	39
3.7.6	PROMEDIO ESPACIAL	39
3.7.7	MÚLTIPLES FUENTES Y FRECUENCIAS	40
3.7.8	SUPERACIÓN DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN	41
3.7.8.1	TÉCNICAS DE REDUCCIÓN	41
3.7.9	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD	42
3.7.10	EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES EN LA MEDICIÓN	42
3.8	PROTOCOLO DE MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN	42
3.9	IMPLEMENTACIÓN	53
4	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
4.1	REPORTE DE LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN	54
4.2	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MEDICIÓN CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS	55
5	CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES	56
6	BIBLIOGRAFÍA	58
7	ANEXOS	60

## RESUMEN

Con el aumento constante del desarrollo tecnológico generado en la sociedad, simultáneamente, crece el nivel de contaminación producida por campos electromagnéticos no ionizantes (CEN-NI), esto ha despertado en la misma sociedad la preocupación de que la salud pública sea vulnerada y aún el medio ambiente sufra las consecuencias de dicha contaminación. Colombia necesita de entidades acreditadas que verifiquen y certifiquen los niveles de radiación a las cuales están expuestos tanto el personal de las empresas de telecomunicaciones, como el público en general. Esta es la razón que hace apremiante el diseño y la implementación de protocolos que permitan la verificación de dichos niveles de intensidad de la manera adecuada y acorde con la normatividad existente para ello. Partiendo de esta problemática, han nacido importantes instituciones nacionales e internacionales que dedican esfuerzos y adelantan investigaciones alrededor de este tema; entre ellas se encuentra el grupo de electrofisiología de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual ha liderado y desarrollado varios proyectos para generar soluciones exigentes, que logren germinar un impacto positivo que contrarreste este problema. El actual proyecto titulado “Implementación de Protocolos Para El Control de Los Niveles de Exposición a CEM-NI de Alta Frecuencia Con Base En La Resolución 754 de La ANE”, hace parte de este grupo de proyectos del grupo de electrofisiología, en el cual han sido implementados protocolos de medición que tienen como objetivo controlar y regular los niveles de exposición a campos electromagnéticos no ionizantes (CEM-NI) de alta frecuencia, en ambientes altamente expuestos a la radiación emitida por las antenas de telefonía móvil celular que se encuentran en puntos estratégicos (con cercanía a zonas residenciales); esto teniendo como plataforma la normatividad nacional e internacional que existe para ello, como la Resolución 000754 de 2016 expedida por la Agencia Nacional del Espectro (ANE), la cual reglamenta las condiciones que deben cumplir las estaciones radioeléctricas y en la cual se dictan disposiciones relacionadas con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones, también la recomendación UIT- T K.52 (Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la cual está adoptada por el Estado Colombiano. Los protocolos diseñados e implementados también siguieron los estándares para laboratorios, contemplados en la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025 (“Requisitos generales para la competencia para los laboratorios de calibración y ensayos). Para la implementación de mencionados protocolos, se realizó un estudio piloto en la ciudad de Pereira, Colombia, en donde se realizaron mediciones en banda ancha sobre un predio ubicado en una zona habitacional, la cual cuenta con presencia de dos estaciones base ubicadas a menos de 100 metros de dicho predio. Las mediciones reportadas contaron con su respectiva incertidumbre de medición, para lo cual se implementó un protocolo basado en la GUM (Guía internacional para la expresión de la incertidumbre de la medición).

## 1 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El desarrollo de la tecnología en un nivel global, se ha convertido en un ente fundamental para el crecimiento de la sociedad en general. Como parte del dominante desarrollo tecnológico se encuentran las tecnologías de la comunicación y la información que han nacido a partir de los avances científicos, incluido dentro de éste, el ámbito de las telecomunicaciones; éstas tecnologías se han encargado en gran manera, sin duda alguna, de proporcionar crecimiento en la calidad de vida de las personas, y para esto han exigido el desarrollo de procesos que generan un impacto global, el cual debe ser objeto de análisis y regulación para minimizar las consecuencias indeseables.

Las tecnologías que tienen como fundamento para su funcionamiento, las radiofrecuencias (RF), tienen como parte un impacto en la generación de campos electromagnéticos no ionizantes (CEM-NI) producto de fuentes artificiales, éstos hacen parte de todo el colectivo que se hace necesario regular. Para dicha regulación existen instituciones eminentes como la Comisión Internacional sobre Protección Frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) que ha realizado investigaciones y ha instaurado las Directrices para la Limitación a la Exposición de los campos Eléctrico, Magnético y Electromagnético Variables con el Tiempo (hasta 300 GHz) y ha dado lugar a normas y recomendaciones adoptadas por el Estado colombiano, como la recomendación UIT-T K.52 (Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones; además estas tecnologías han cobrado interés para otras instituciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS) que vela por la protección de la salud de las personas.

Con el avance de las tecnologías, la normativa colombiana ha buscado estar constantemente actualizada para brindar seguridad al desarrollo de éstas, dentro del ámbito tratado, ha planteado normas para la regulación de la exposición a campos electromagnéticos no ionizantes, como los establecidos por la ICNIRP los cuales han sido aprobados por diferentes entidades internacionales y acogidas por más 50 países. Además, otras instituciones como el Ministerio de Comunicaciones, mediante decretos como el 195 de 2005 (por la cual se adoptan límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se adecúan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas y se dictan otras disposiciones) y teniendo como base la recomendación UIT T K.52 (Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, han realizado aportes para dicho desarrollo y regulación; esta resolución tiene como base, además, las “Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)” de 1998 de la ICNIRP, la “Recomendación 1999/519/EC” de 1999 del Consejo Europeo, relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos de 0 Hz a 300 GHz; y la Recomendación UIT-T K.52 del año 2000 con actualización en el 2018) del UIT-T; pudiendo suplir o adicionar a esta última, la Recomendación UIT-T K.61 “Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas” actualizada al año 2008, de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T); que a su vez plantea la necesidad de recurrir a la GUM (Guía para la expresión de la incertidumbre de medida) de 1995 con ajustes en 2008 o a su par nacional, la Norma Técnica Colombiana GTC 51 de 1997 “Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones”.

En el año 2016 La Agencia Nacional del Espectro (ANE), encargada de planear estratégicamente el uso del espectro radioeléctrico, así como de su vigilancia y control en todo el territorio nacional colombiano, mediante la Resolución 754 (Por la cual se reglamentan las condiciones que deben cumplir las estaciones radioeléctricas, con el objeto de controlar los niveles de exposición de las personas a los campos electromagnéticos y se dictan disposiciones relacionadas con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones) y derogando la Resolución 387 del mismo año, adoptó e integró en esta, las recomendaciones UIT-T K.70 “Técnicas para limitar la exposición humana a los campos electromagnéticos en cercanías a estaciones de radiocomunicaciones” de 2007, con actualización a 2018, la UIT-T K.83 “Supervisión de los niveles de intensidad del campo electromagnético” de 2011, y UIT-T K.100 “Medición de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia para determinar el cumplimiento de los límites de exposición de las personas cuando se pone en servicio una estación de base” de 2014, con actualización a 2018, todas del Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T), para de igual forma, proveer seguridad al desarrollo de las tecnologías.

Ante la preocupación que se genera en medio de la sociedad por causa de los campos electromagnéticos no ionizantes (CEM-NI), se hace necesario garantizar el cumplimiento de las normativas establecidas; es por esto que a nivel nacional e internacional se han levantado importantes instituciones que se enfocan en dedicar esfuerzos y realizar investigaciones relacionadas; dentro de estas, se encuentra el Grupo de Investigación de Electrofisiología (Categoría B en la clasificación de Colciencias) de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual ha realizado varias investigaciones para generar soluciones exigentes alrededor de este tema, dentro de dichas investigaciones, se encuentra el proyecto titulado “Implementación de Protocolos Para El Control de Los Niveles de Exposición a CEM-NI de Alta Frecuencia Con Base En La Resolución 754 De La ANE” que ha establecido la implementación de protocolos que controlan los niveles de exposición a CEM-NI de alta frecuencia, teniendo como base la Resolución 745 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) y las diferentes recomendaciones relacionadas; empleando el instrumento de medición banda ancha NBM 520 marca Narda el cual está diseñado para realizar la inspección general confiable de los campos electromagnéticos presentes en un punto de medición (en los rangos de 100 kHz a 3 GHz en campo eléctrico y de 27 MHz a 1 GHz en campo magnético para las sondas empleadas); para la implementación de los protocolos indicados, se realizó un estudio piloto en la ciudad de Pereira, tomando como muestra un predio ubicado en una zona habitacional, el cual contó con presencia de dos estaciones base ubicadas a menos de 100 metros de dicho predio; esto con el fin de obtener resultados auténticos.

### 1.1. FRECUENCIA ( $f$ )

El número de ciclos sinusoidales completados por las ondas electromagnéticas en un segundo; ésta, se expresa generalmente en hercios (Hz). [1].

### 1.2. LONGITUD DE ONDA

Distancia entre dos puntos sucesivos de una onda periódica en la dirección de propagación, en la cual la oscilación tiene la misma fase [1].

La longitud de onda de una onda electromagnética está relacionada con la frecuencia ( $f$ ) y la velocidad ( $v$ ) de esa onda mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

En el espacio libre, la velocidad es igual a la velocidad de la luz ( $c$ ), que es aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s [2].

### 1.3. CAMPOS ELÉCTRICOS

Se producen por la presencia de cargas eléctricas. Tienen su origen en la diferencia de Voltaje, o tensión, cuanto más elevado sea el voltaje, más fuerte será el campo que resulta. La intensidad del campo eléctrico ( $E$ ) se mide en Voltio/metro. Un campo eléctrico existe aunque no haya corriente. Los campos eléctricos se debilitan con la distancia al foco emisor. Algunos materiales como la madera o el metal apantallan sus efectos. Por consiguiente, las paredes, los edificios y los árboles reducen la intensidad de los campos eléctricos de las líneas de conducción eléctrica situadas en el exterior de las casas. Cuando las líneas de conducción eléctrica están enterradas en el suelo, los campos eléctricos que generan casi no pueden detectarse en la superficie [3].

### 1.4. CAMPOS MAGNÉTICOS

Los campos magnéticos ( $H$ ) tienen su origen en las corrientes eléctricas y se producen cuando las cargas eléctricas están en movimiento. Su intensidad se mide en amperios por metro (A/m), aunque en las investigaciones sobre campos electromagnéticos, se suele utilizar una magnitud relacionada; la inducción magnética, densidad de flujo magnético o campo  $B$  que se mide en teslas (T) y en el Sistema Cegesimal en Gauss (G).

Todo aparato conectado a una red eléctrica genera en torno suyo, si está encendido y circula corriente, un campo magnético proporcional a la cantidad de corriente que obtiene de la fuente que lo alimenta. La intensidad de estos campos es mayor en tanto más cerca se está del aparato, y disminuye con la distancia. Los materiales más comunes en general, no son un obstáculo para los campos magnéticos, pues los atraviesan fácilmente [4].

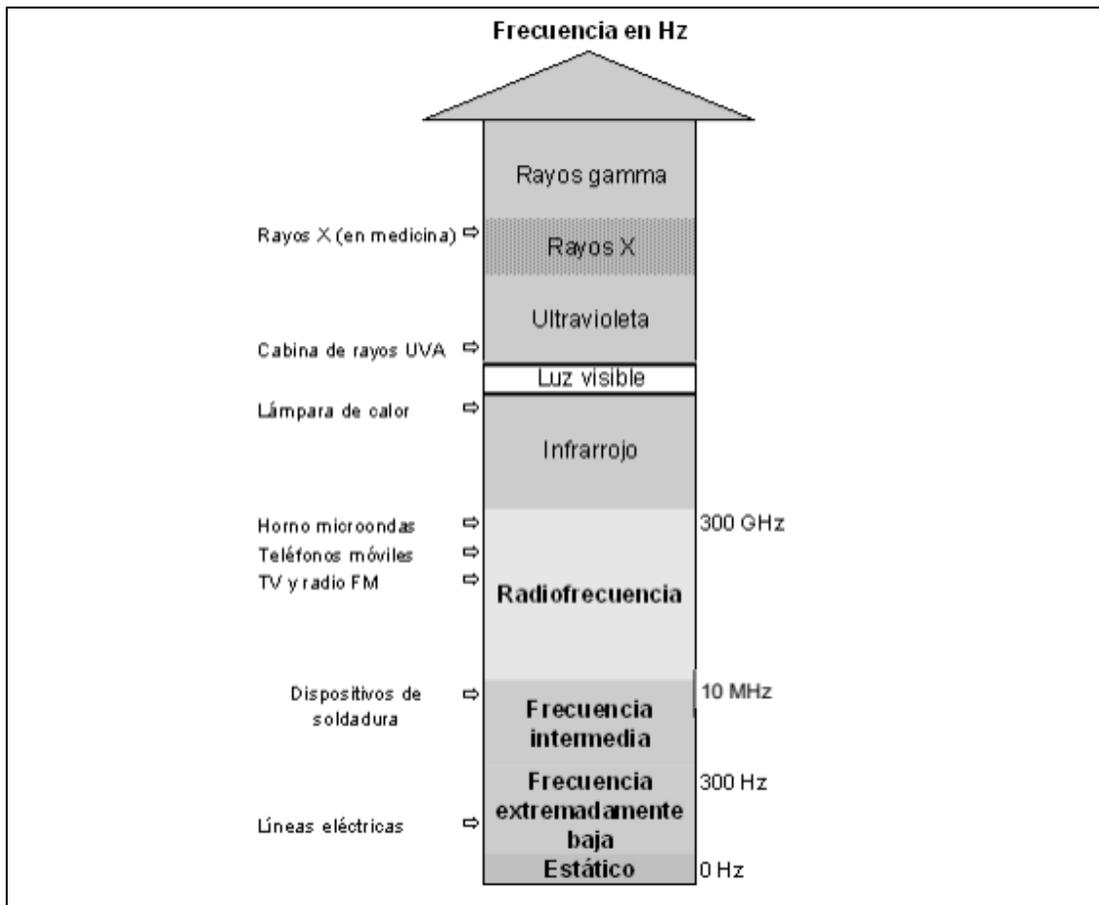
### 1.5. CAMPO ELECTROMAGNÉTICO (CEM)

Los campos electromagnéticos son una combinación de ondas eléctricas ( $E$ ) y magnéticas ( $H$ ) que se desplazan simultáneamente por el espacio, éstas se caracterizan por una frecuencia y una longitud de onda. Las ondas electromagnéticas que los conforman pueden tener origen tanto natural como artificial. Los campos naturales son perfectamente tolerables, dado que la evolución de todos los seres, incluido

el hombre, se produjo en su presencia; los campos artificiales generados por el hombre suelen tener intensidades superiores a los naturales, ante los cuales no se espera la misma adaptabilidad de los organismos [3].

La velocidad de la onda electromagnética en los materiales depende de las propiedades eléctricas de estos, es decir, de su permitividad ( $\epsilon$ ) y permeabilidad ( $\mu$ ). La permitividad está relacionada con las interacciones del material con el campo eléctrico, en tanto que la permeabilidad expresa las interacciones con el campo magnético [5].

**Figura 1.** Clasificación de los Campos Electromagnéticos.



**Fuente:** Campos Electromagnéticos y Efectos en la Salud [5].

### 1.6. MEDICIÓN DE INMISIÓN

Medición del campo electromagnético producto del aporte de múltiples fuentes de radiofrecuencia, que operan a distintas frecuencias. En este tipo de mediciones se utilizan equipos de banda ancha. [3]

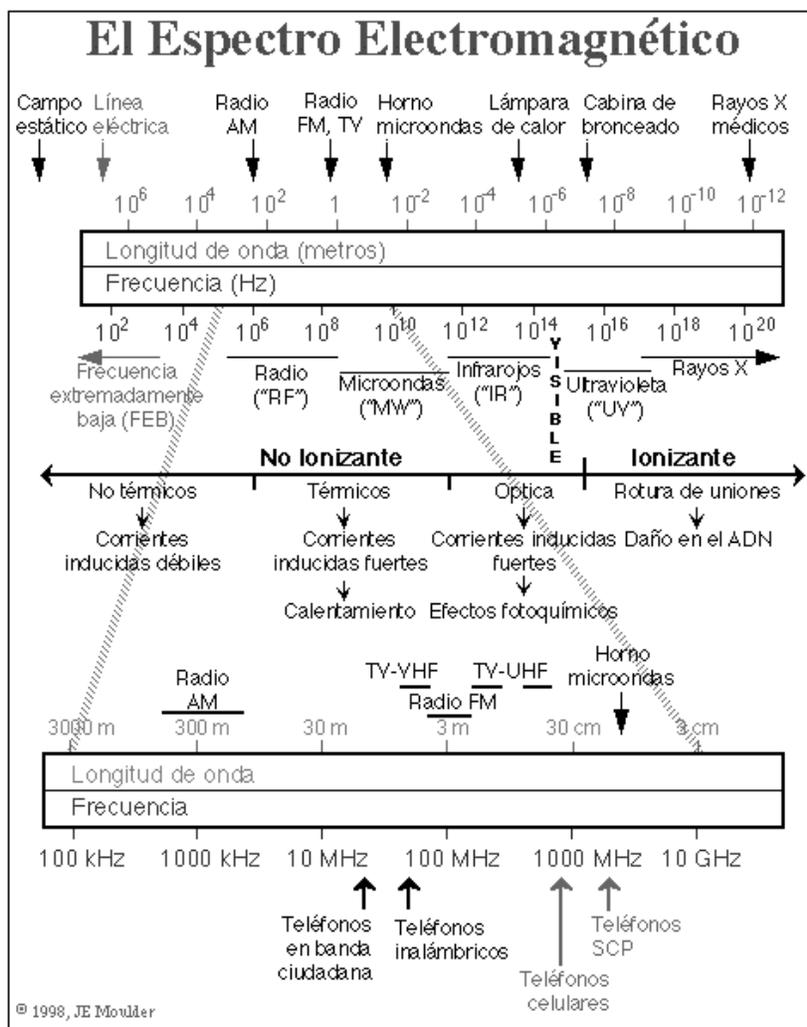
### 1.7. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las ondas electromagnéticas se encuentran clasificadas de acuerdo a su efecto al interactuar con la materia y a dos características muy importantes, que son la frecuencia y la longitud de onda, en lo que

se conoce como el espectro electromagnético [6]. Los principales campos de origen artificial y natural se clasifican según su rango de frecuencia en el espectro electromagnético de la siguiente forma:

- **Campos de frecuencias extremadamente bajas (FEB):** Ondas que están entre los 1 Hz y 300 Hz; se cuentan dentro de estas las instalaciones de transporte y distribución de energía eléctrica que actúan a 60 Hz para nuestro país. Los campos electromagnéticos (CEM) más significativos son debidos a tendidos de alta tensión y subestaciones eléctricas (S/E), estas constituyen los nodos del sistema de transporte. En las S/E los CEM más intensos son generados por líneas entrantes y salientes [7].
- **Campos de frecuencias intermedias (FI):** Entre 300 Hz y 10 MHz, que son los producidos por pantallas de computadoras, dispositivos antirrobo y sistemas de seguridad y transmisores de radio A.M [7].
- **Campos de radiofrecuencias (RF) y microondas (MO):** Con frecuencias de 10 MHz a 300 GHz, son producidas por telefonía móvil, hornos microondas, radares y sistemas de comunicación; la telefonía móvil o celular actualmente emplea bandas entre 800 MHz a 1.900 MHz (Microondas), con transmisión directa. Los elementos básicos de este sistema son dos: el terminal o teléfono móvil y la estación base [7].

**Figura 2.** Espectro electromagnético



**Fuente:** Radiaciones no Ionizantes – Wikitel [8]

Para comprender la ubicación de las distintas señales electromagnéticas se recurre al espectro electromagnético, que es un concepto en el cual gráficamente las radiaciones se pueden ver ordenadas por frecuencia (ver figura 2).

Se pueden distinguir dos grandes grupos de fuentes de exposición en el entorno:

### 1.7.1. CAMPOS DE FRECUENCIAS INFERIORES A 3 kHz ( $0 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$ )

- Fuentes de campos estáticos (0 kHz): trenes de levitación magnética, sistemas de resonancia magnética para diagnóstico médico y los sistemas electrolíticos en aplicación industrial y experimental.
- Fuentes de campos de frecuencia extremadamente baja FEB ( $1 \text{ Hz} < f < 300 \text{ Hz}$ ): equipos relacionados con la generación, transporte o utilización de la energía eléctrica de 60 (50) Hz, líneas de alta y media tensión y aparatos electrodomésticos (neveras, secadores de pelo, etc.).
- Fuentes de los campos de frecuencia intermedia FI ( $300 \text{ Hz} < f < 3 \text{ kHz}$ ): cocinas de inducción, antenas de radiodifusión modulada y equipos de soldadura de arco [5].

### **1.7.2. CAMPOS DE RADIOFRECUENCIA RF Y MICROONDAS MO (3 kHz < f < 300 GHz)**

Se utilizan para transmitir información a distancias largas y son la base de las radio comunicaciones. Entre ellas se pueden distinguir:

- 3 kHz a 30 kHz VLF: antenas de radionavegación, radiodifusión modulada, monitores de ordenador, sistema antirrobo.
- 30 kHz a 300 kHz LF: pantallas y monitores, antenas de radiodifusión, comunicaciones marinas y aeronáuticas, radiolocalización.
- 300 kHz a 3 MHz MF: radioteléfonos marinos, radiodifusión AM, termo-selladoras.
- 3 MHz a 30 MHz HF: antenas de radioaficionados, termo-selladoras, aparatos para diatermia quirúrgica, sistemas antirrobo.
- 30 MHz a 300 MHz VHF: antenas de radiodifusión, frecuencia modulada, antenas de estaciones de televisión, sistemas antirrobo.
- 300 MHz a 3 GHz UHF: teléfonos móviles, antenas de estaciones base de telefonía móvil, hornos microondas, aparatos para diatermia quirúrgica, sistemas antirrobo.
- 3 GHz a 30GHz SHF: antenas de comunicación vía satélite, radares, enlaces por microondas.
- 30 GHz a 300 GHz EHF: antenas de radionavegación, radares, antenas de radiodifusión [5].

### **1.8. RADIACIÓN IONIZANTE**

Las radiaciones ionizantes (electromagnéticas o particuladas) son aquellas con energía, longitud de onda y frecuencia tales que, al interactuar con un medio material, le transfieren energía suficiente para desligar a un electrón de su átomo [10]. En el instante en que el electrón es desprendido del átomo al que pertenecía, se produce un proceso que se llama ionización, que es la formación de un par de iones, el negativo (el electrón libre) y el positivo (el átomo sin uno de sus electrones). Como resultado de esta interacción, las funciones de las células pueden deteriorarse de forma temporal o permanente y ocasionar incluso la muerte de las mismas. La gravedad de la lesión depende del tipo de radiación, de la dosis absorbida, de la velocidad de absorción y de la sensibilidad del tejido frente a la radiación [11].

### **1.9. RADIACIÓN NO IONIZANTE**

Comprenden la porción del espectro electromagnético cuya energía no es capaz de romper las uniones atómicas, incluso a intensidades altas. No obstante, estas radiaciones pueden ceder energía suficiente, cuando inciden en los organismos vivos, como para producir efectos térmicos (de calentamiento) tales como los inducidos por las microondas. También, las radiaciones no ionizantes intensas de frecuencias bajas pueden inducir corrientes eléctricas en los tejidos, que pueden afectar al funcionamiento de células sensibles a dichas corrientes, como pueden ser las células musculares o las nerviosas [9].

### **1.10. DEFINICIONES**

En el actual trabajo, se tienen en cuenta las definiciones adoptadas por la Unión Internacional en Telecomunicaciones en la recomendación UIT-T K 52 [12], UIT-T K 61 y otras fuentes normativas, las cuales se relacionan las siguientes definiciones técnicas:

### **1.10.1. EXPOSICIÓN**

Se produce exposición siempre que una persona está sometida a campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos o a corrientes de contacto distintas de las originadas por procesos fisiológicos en el cuerpo o por otros fenómenos naturales [12].

### **1.10.2. NIVEL DE EXPOSICIÓN**

El nivel de exposición es el valor de la magnitud utilizada cuando una persona está expuesta a campos electromagnéticos o a corrientes de contacto [12].

### **1.10.3. NIVEL DE EXPOSICIÓN PORCENTUAL**

Valor ponderado de campo electromagnético (eléctrico o magnético) producto del aporte de energía de múltiples fuentes de radiofrecuencia, en cada una de las posibles zonas de exposición a campos electromagnéticos. Este valor se obtiene con un sistema de medición de banda ancha [13].

### **1.10.4. NIVEL DE EMISIÓN**

Valor promedio de la intensidad de campo eléctrico o magnético en la zona ocupacional para una fuente de radiofrecuencia determinada, la cual opera a una frecuencia específica. Este valor se obtiene con un sistema de medición de banda angosta [13].

### **1.10.5. RELACIÓN DE EXPOSICIÓN (ER, EXPOSURE RATIO)**

El parámetro de exposición evaluado en una ubicación especificada para cada frecuencia de funcionamiento de una fuente de radio, expresada como la fracción del límite relacionado. Para la evaluación frente a los niveles de referencia:

$$ER = \max [(E/E_{lim})^2, (H/H_{lim})^2] \quad (2)$$

En campo lejano:

$$ER = (E/E_{lim})^2 = H/H_{lim}^2 = S/S_{lim} \quad (3)$$

Donde  $S$ ,  $E$  y  $H$  son la raíz cuadrática media (RMS) de la densidad de potencia, intensidad de campo eléctrico y magnético medidos a la frecuencia  $f$ .  $S_{lim}$ ,  $E_{lim}$  y  $H_{lim}$  son el límite correspondiente a la misma frecuencia.

Cuando se evalúa la exposición para una banda de frecuencia determinada (la densidad de potencia total o la intensidad de campo dentro del intervalo de frecuencia  $[f_{min}, f_{max}]$  se evalúa).  $S_{lim}$ ,  $E_{lim}$  y  $H_{lim}$  son elegidos como los límites más estrictos dentro de la banda [14].

### **1.10.6. RELACIÓN DE EXPOSICIÓN TOTAL (TER, TOTAL EXPOSURE RATIO)**

La suma de las relaciones de exposición (ER) del equipo bajo prueba (EUT) y otras fuentes relevantes [14].

### **1.10.7. EXPOSICIÓN CONTINUA**

La exposición continua se define como la exposición durante un tiempo superior al correspondiente tiempo de promediación [12].

### **1.10.8. EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN**

La exposición durante un tiempo inferior al de promediación se denomina exposición de corta duración [12].

### **1.10.9. EXPOSICIÓN NO UNIFORME/EXPOSICIÓN CORPORAL PARCIAL**

Los niveles de exposición no uniforme/exposición corporal parcial se producen cuando los campos son no uniformes en volúmenes comparables al del cuerpo humano completo, lo cual puede deberse a fuentes altamente direccionales con ondas estacionarias, radiación dispersa o en el campo cercano [12].

### **1.10.10. EXPOSICIÓN CONTROLADA/OCUPACIONAL**

La exposición controlada/ocupacional o exposición ocupacional simplemente, se aplica a situaciones en las que las personas están expuestas como consecuencia de su trabajo y en las que las personas expuestas han sido advertidas del potencial de exposición y pueden ejercer control sobre la misma. La exposición controlada/ocupacional también se aplica cuando la exposición es de naturaleza transitoria de resultados del paso ocasional por un lugar en el que los límites de exposición puedan ser superiores a los límites no controlados, para la población general, ya que la persona expuesta ha sido advertida del potencial de exposición y puede controlar esta por algún medio apropiado [13], o abandonando la zona [12].

### **1.10.11. EXPOSICIÓN DE PÚBLICO EN GENERAL**

El público en general comprende individuos de todas las edades y de estados de salud variables, y puede incluir grupos o individuos particularmente susceptibles. En muchos casos los miembros del público no están conscientes de su exposición a los CEM. Más aún, no se puede esperar que los miembros individuales del público, tomen precauciones razonables para minimizar o evitar su exposición [1]. De ahí que la exposición de público en general o exposición no controlada de la población en general, se aplique a situaciones en las que las personas expuestas a ondas electromagnéticas no forman parte del personal que labora en una estación radioeléctrica determinada; no obstante, están expuestas a las emisiones de campo electromagnético de radiofrecuencia producidas por dichas estaciones [13]; o a situaciones en las que las personas expuestas como consecuencia de su trabajo pueden no haber sido advertidas del potencial de exposición y no pueden ejercer control sobre la misma [12].

Son las consideraciones anteriores las que soportan la adopción de restricciones más estrictas a la exposición del público que para la exposición de la población expuesta ocupacionalmente [1].

### **1.10.12. EMISOR INTENCIONAL**

Dispositivo que genera y emite intencionalmente energía electromagnética por radiación o inducción. Los emisores intencionales utilizan campos electromagnéticos para la transmisión de señales y producen un CEM que puede sobrepasar los límites de seguridad en algunas regiones, dependiendo de la potencia del funcionamiento, ganancia, frecuencia, orientación y directividad de la antena de transmisión. Es posible tener en cuenta estos parámetros y el entorno operativo de la instalación para determinar la necesidad y el procedimiento apropiado de evaluación de la exposición. Un emisor intencional suele estar asociado con una antena para la radiación de energía electromagnética [12].

### **1.10.13. EMISOR NO INTENCIONAL**

Dispositivo que genera intencionalmente energía electromagnética para utilización dentro del dispositivo, o que envía energía electromagnética por conducción a otros equipos, pero no destinado a emitir o a radiar energía electromagnética por radiación o inducción.

Los transmisores no intencionales pueden producir CEM debido a emisiones espurias. Hay normas de emisión de compatibilidad electromagnética (EMC, “electromagnetic compatibility”) que limitan la magnitud de estos campos espurios. Los campos producidos por equipo de telecomunicaciones que es un emisor no intencional, suelen estar apreciablemente por debajo de los límites de seguridad establecidos por las normas de la ICNIRP y las normas nacionales. Los límites establecidos de conformidad EMC están a órdenes de magnitud por debajo de los límites de seguridad del CEM. Aun si el equipo sobrepasase estos límites de emisión a ciertas frecuencias, la experiencia indica que los campos producidos se hallan sin embargo a órdenes de magnitud por debajo de los límites de seguridad. Por lo tanto, equipos de telecomunicaciones clasificados como emisores no intencionales, no necesitan una evaluación de seguridad del CEM para asegurar la conformidad con los límites de seguridad [12].

### **1.10.14. ESTACIÓN BASE (BS, BASE STATION)**

Equipo fijo para la transmisión de radio utilizada en la comunicación celular o instalación inalámbrica para redes de área local. El término estación base incluye los transmisores de radio y las antenas asociadas [14].

### **1.10.15. ESTACIÓN RADIOELÉCTRICA**

Son los elementos físicos que soportan y sostienen las redes de telecomunicaciones. Se compone de equipos transmisores o receptores, elementos radiantes y estructuras de soporte como torres, mástiles, azoteas, necesarios para la prestación del servicio o actividad de telecomunicaciones [13].

### **1.10.16. EQUIPO BAJO PRUEBA (EUT, EQUIPMENT UNDER TEST)**

Estación base que será puesta en servicio, incluyendo todas las antenas de transmisión (que operan en la banda de frecuencias de 100 MHz a 40 GHz) [14].

### **1.10.17. “HOT SPOT”**

Puntos del espacio en los cuales los niveles de campo son especialmente altos, debido al efecto de la superposición en fase de diversas ondas, provenientes de varios lugares [13].

### **1.10.18. ANTENA**

Dispositivo que sirve como un transductor entre una onda guiada (por ejemplo un cable coaxial) y una onda de espacio libre, o viceversa. Puede ser utilizado para emitir o recibir una señal de radio [14].

### **1.10.19. ANTENA ISOTRÓPICA**

Una antena hipotética, sin pérdidas que tiene una intensidad de radiación igual en todas las direcciones [14].

#### **1.10.20. ARREGLO DE ANTENAS**

Conjunto de antenas dispuestos y excitados a modo de obtener un patrón de radiación dado. Estos elementos operan en la misma frecuencia para conformar dicho patrón [13].

#### **1.10.21. CENTRO DE RADIACIÓN**

Punto equivalente desde donde radia una antena o arreglo de antenas. También se conoce como centro eléctrico de radiación [13].

#### **1.10.22. SONDA**

Elemento transductor que convierte energía electromagnética en parámetros eléctricos medibles mediante algún instrumento. Puede ser una antena u otro elemento que tenga la capacidad descrita [13].

#### **1.10.23. DENSIDAD DE POTENCIA (S)**

La densidad de flujo de potencia es la potencia por unidad de superficie normal a la dirección de la propagación de las ondas electromagnéticas, y suele expresarse en unidades de watt por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ).

NOTA: En las ondas planas, la densidad de flujo de potencia, la intensidad de campo eléctrico (E) y la intensidad de campo magnético (H) están relacionadas con la impedancia intrínseca del espacio libre,  $\eta_0 = Z_0 = 377 \Omega$ .

En particular,

$$S = \frac{E^2}{\eta_0} = H^2 \eta_0 = EH \quad (4)$$

Dónde:

S: Densidad de potencia.

$\eta_0$ : Impedancia del espacio libre

#### **1.10.24. DENSIDAD DE POTENCIA MEDIA (TEMPORAL)**

La densidad de potencia media es igual a la densidad de potencia instantánea integrada a lo largo de un periodo de repetición de origen.

NOTA: Esta promediación no debe confundirse con el tiempo de promediación de medición [12].

#### **1.10.25. DENSIDAD DE POTENCIA DE CRESTA**

La densidad de potencia de cresta es la máxima densidad de potencia instantánea que se produce cuando se transmite potencia [12].

#### **1.10.26. DENSIDAD DE POTENCIA DE ONDA PLANA EQUIVALENTE ( $S_{eq}$ )**

La densidad de potencia de onda plana equivalente es un término que suele utilizarse asociado con cualquier onda electromagnética, de igual magnitud que la densidad de flujo de potencia de una onda plana que tiene la misma intensidad de campo eléctrico (E) o magnético (H) [12].

### 1.10.27. ABSORCIÓN ESPECÍFICA (SA, SPECIFIC ABSORTION)

Energía absorbida por unidad de masa del tejido biológico. Cociente entre la energía incremental (dW) absorbida por (disipada en) una masa incremental (dm) contenida en un elemento de volumen (dV) de una determinada densidad ( $\rho_m$ ).

$$SA = \frac{dW}{dm} = \frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV} \quad (5)$$

La absorción específica se expresa en joule por kilogramo (J/kg), y es la integral del tiempo de la tasa específica de absorción de energía [1].

### 1.10.28. TASA DE ABSORCIÓN ESPECÍFICA (SAR, SPECIFIC ABSORTION RATE)

Indica la tasa en la cual la energía de la radiación de radiofrecuencia es absorbida por el cuerpo cuando este se expone a ellas. Se define como el índice de absorción de la energía por unidad de masa, y se expresa en unidades de watts por kilogramo (W/Kg) y está dado por la ecuación:

$$SAR = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dt} \frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV} \quad (6)$$

La SAR también puede ser calculada mediante:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho_m} = c \frac{dT}{dt} = \frac{j^2}{\rho_m \sigma} \quad (7)$$

Dónde:

$E$ : Es el valor de la intensidad de campo eléctrico en el tejido corporal en V/m,

$\sigma$ : Es la conductividad del tejido corporal en S/m,

$\rho_m$ : Es la densidad del tejido corporal en kg/m<sup>3</sup>,

$c$ : Es la capacidad térmica del tejido corporal en J/kg°C,

$dT/dt$ : Es la derivada con respecto al tiempo de la temperatura del tejido corporal en °C/s.

$j$ : Es el valor de la densidad de corriente inducida en el tejido corporal en A/m<sup>2</sup>.

La SAR es la medida dosimétrica que se ha adoptado extensamente en las frecuencias cerca de 100 kHz [1].

### 1.10.29. VALOR EFICAZ (RMS, ROOT MEAN SQUARE)

Es el valor equivalente de una fuente de corriente continua que produciría la misma cantidad de calor o energía (también se podría considerar potencia, dado que es por el mismo tiempo) sobre el ciclo completo de una señal dependiente del tiempo [15].

### **1.10.30. CORRIENTE DE CONTACTO**

La corriente de contacto es la corriente que circula por el cuerpo al tocar un objeto conductor en un campo electromagnético [12].

### **1.10.31. CORRIENTE INDUCIDA**

Corriente que se induce dentro del cuerpo de resultas de la exposición directa a los campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos [12].

### **1.10.32. DENSIDAD DE CORRIENTE (J)**

Es un vector del cual la integral sobre una superficie dada es igual a la corriente que atraviesa dicha superficie; la medida de la densidad de corriente en un conductor lineal es igual a la corriente sobre el área seccionada transversalmente del conductor. Se expresa en  $A/m^2$  [1].

### **1.10.33. TIEMPO DE PROMEDIACIÓN ( $T_{avg}$ )**

El tiempo de promediación es el periodo de tiempo apropiado en el que se promedia la exposición con el fin de determinar el cumplimiento de los límites [12]

### **1.10.34. PATRÓN DE RADIACIÓN**

Diagrama que describe la forma en cómo la antena radia la energía electromagnética al espacio libre. El patrón de radiación se describe en forma normalizada respecto al nivel de máxima radiación, cuyo valor es igual a 1 si se representa en forma lineal o 0 dB si se representa en forma logarítmica [13].

### **1.10.35. LÓBULO PRINCIPAL**

El lóbulo de radiación que se encuentra en la dirección de máxima radiación. En ciertas antenas, como multi-lóbulo o antenas de haz dividido, puede existir más de un lóbulo principal [14].

### **1.10.36. LÓBULO LATERAL**

Un lóbulo de radiación en cualquier dirección que no sea el lóbulo principal [14].

### **1.10.37. POTENCIA EQUIVALENTE RADIADA (PER) - POTENCIA RADIADA APARENTE (PRA)**

Es el producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia en relación a una antena dipolo de media longitud de onda en una dirección dada [14].

### **1.10.38. POTENCIA RADIADA ISÓTROPICA EQUIVALENTE (EIRP, EQUIVALENT ISOTROPICALLY RADIATED POWER)**

La EIRP o PIRE es el producto de la potencia suministrada a la antena  $P$  [W] por su ganancia con relación a una antena isótropa en una dirección dada (ganancia isótropa o absoluta)  $G_A$  [veces]. O potencia suministrada a la antena  $P$  [dBm] más su ganancia  $G$  [dBi] [13]

### **1.10.39. POTENCIA MEDIA (TEMPORAL) ( $P_{avg}$ )**

La tasa de transferencia de energía promediada en el tiempo viene definida por:

$$P_{avg} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (8)$$

Donde  $t_1$  y  $t_2$  son respectivamente los instantes inicial y final de exposición. El periodo  $t_1-t_2$  es el tiempo de exposición [12].

#### 1.10.40. GANANCIA DE ANTENA

La ganancia de antena  $G(\theta, \phi)$  es la relación entre la potencia radiada por unidad de ángulo sólido multiplicado por  $4\pi$  y la potencia de entrada total. La ganancia se expresa frecuentemente en decibelios con respecto a una antena isótropa (dBi). La ecuación define la ganancia [12]:

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi dP_r}{P_{in} d\Omega} \quad (9)$$

Dónde:

$\theta, \phi$ : Son los ángulos en un sistema de coordenadas polares,

$P_r$ : Es la potencia radiada a lo largo de la dirección  $(\theta, \phi)$ ,

$P_{in}$ : Es la potencia de entrada total

$\Omega$ : Es ángulo sólido elemental a lo largo de la dirección de observación.

#### 1.10.41. DIRECTIVIDAD

Directividad es la relación entre la potencia radiada por unidad de ángulo sólido y la potencia media radiada por unidad de ángulo sólido [12].

#### 1.10.42. DIAGRAMA DE CAMPO RELATIVO

El diagrama de campo relativo  $f(\theta, \phi)$  se define en este documento como la relación entre el valor absoluto de la intensidad de campo (que arbitrariamente se supone que es el campo eléctrico) y el valor absoluto de la intensidad de campo máxima. Está relacionado con la ganancia numérica relativa así,  $f(\theta, \phi) = (F(\theta, \phi))^{1/2}$  [12].

#### 1.10.43. GANANCIA NUMÉRICA RELATIVA

La ganancia numérica relativa  $F(\theta, \phi)$  es la relación entre la ganancia de antena en cada ángulo y la ganancia de antena máxima. Es un valor que varía de 0 a 1. Se denomina también diagrama de antena [12].

#### 1.10.44. FUENTE INHERENTEMENTE CONFORME

Son aquellas que producen campos que cumplen los límites de exposición pertinentes a pocos centímetros de la fuente. No son necesarias precauciones particulares. El criterio para catalogar una fuente como inherentemente conforme es una PIRE de 2W o menos, salvo para antenas de microondas de apertura pequeña y baja ganancia o antenas de ondas milimétricas cuando la potencia de radiación total de 100 mW o menos podrá ser considerada como inherentemente conforme [12].

En el caso de Colombia en la actualidad, para efectos del Decreto 1078 de 2015 y de la Resolución 000754 de 2016 (la cual se presenta en este trabajo como ANEXO A - Fuente: [14]), las características acabadas de mencionar resultan suficientes para definir una fuente como inherentemente conforme, por cuanto sus campos electromagnéticos cumplen con los límites de exposición pertinentes y no son necesarias precauciones particulares. Por lo tanto, estas estaciones no están obligadas a realizar cálculos teóricos ni a colocar avisos, realizar mediciones de campos electromagnéticos o presentar la Declaración de Conformidad de Emisión Radioeléctrica [14].

NOTA – Inicialmente, además de los emisores que cumplieran con los parámetros anteriormente estipulados, para los efectos del Decreto 195 de 2005 y de la Resolución 001645 de 2005, se definían como fuentes inherentemente conformes, los emisores que empleaban los siguientes sistemas y servicios, por cuanto sus campos electromagnéticos emitidos cumplían con los límites de exposición pertinentes y no eran necesarias precauciones particulares:

- Telefonía Móvil Celular.
- Servicios de Comunicación Personal, PCS.
- Sistema Acceso Troncalizado-Trunking.
- Sistema de Radiomensajes-Beeper.
- Sistema de Radiocomunicación Convencional Voz o Datos-HF.
- Sistema de Radiocomunicación Convencional Voz o Datos VHF.
- Sistema de Radiocomunicación Convencional Voz o Datos UHF.
- Proveedor de Segmento Espacial.

Por lo tanto, estos servicios no estaban obligados a realizar las mediciones que trata el Decreto 195 de 2005, ni a presentar la Declaración de Conformidad de Emisión Electromagnética. Sin embargo, esto no impedía al Ministerio de Comunicaciones de revisar periódicamente estos valores e incluir alguno de estos servicios cuando lo creyera conveniente o los niveles se superasen debido a cambios en la tecnología u otros factores [16].

#### **1.10.45. FUENTES NORMALMENTE CONFORMES**

Las instalaciones normalmente conformes contienen fuentes que producen un campo electromagnético que puede sobrepasar los límites de exposición pertinentes. Sin embargo, como resultado de prácticas de instalación normales y del uso típico de estas fuentes para fines de comunicación, la zona de rebasamiento de estas fuentes no es accesible a las personas en condiciones ordinarias. Ejemplos son las antenas montadas en torres suficientemente altas o las estaciones terrenas de haz estrecho apuntadas al satélite. Puede ser necesario que el personal de mantenimiento que tenga que acercarse mucho a los emisores tenga que adoptar precauciones en algunas instalaciones normalmente conformes.

Se consideran como fuentes normalmente conformes los siguientes tipos de estaciones radioeléctricas:

Estaciones que prestan servicios de telecomunicaciones móviles cuya PIRE es mayor de 2 W, siempre y cuando cumplan las condiciones establecidas en el numeral 2.4 del ANEXO N°1 de la Resolución 000754 de 20016 ( véase ANEXO A).

□ Estaciones radioeléctricas que prestan servicios diferentes a los de telecomunicaciones móviles y que cumplen con las condiciones establecidas en el numeral 2.5 del ANEXO N°1 de la Resolución 000754 de 20016 (véase ANEXO A).

Así, para efectos del Decreto 1078 de 2015 y de la Resolución 000754 de 2016, en el caso de Colombia, se define como fuente normalmente conforme a las estaciones cuyas condiciones cumplen con lo establecido en este numeral, por cuanto producen un campo electromagnético que puede sobrepasar los límites de exposición pertinentes en un área determinada, por lo que se requiere cumplir con condiciones particulares Sin embargo, estas estaciones no están obligadas a realizar mediciones de campos electromagnéticos o presentar la Declaración de Conformidad de Emisión Radioeléctrica [14].

### **1.11. SISTEMA DE MEDICIÓN DE BANDA ANCHA**

Conjunto de elementos para medir campos electromagnéticos, el cual ofrece una lectura de la variable electromagnética considerando el efecto combinado de todas las componentes de frecuencia que se encuentran dentro de su ancho de banda especificado [13].

### **1.12. SISTEMA DE MEDICIÓN DE BANDA ANGOSTA**

Conjunto de elementos que permite medir de forma selectiva en frecuencia, el cual permite conocer la magnitud de la variable electromagnética medida (intensidad de campo eléctrico, magnético o densidad de potencia), debida a una componente de frecuencia específica o a una banda muy estrecha de frecuencia [13].

### **1.13. REGIONES DE CAMPO DE UN CEM-NI DE ALTA FRECUENCIA**

En los CEM-NI de alta frecuencia existen dos regiones principales, que surgen de los cambios por los que pasa la simetría del CEM-NI a medida que este se dispersa por el espacio, estos son: la región de campo cercano y la región de campo lejano.

#### **1.13.1. REGIÓN DE CAMPO CERCANO**

La región de campo cercano existe en las proximidades de una antena u otra estructura radiante en la que los campos eléctrico y magnético no tienen un carácter fundamental de onda plana, sino que varían considerablemente de un punto a otro [12].

##### **1.13.1.1. Zona de campo cercano reactivo**

Es la parte de la región de campo cercano que rodea a la antena y donde predomina el campo reactivo. Contiene la mayoría o casi la totalidad de la energía almacenada [12]. Se supone generalmente que esta región se extiende hasta una distancia de una longitud de onda a partir de la antena [17].

##### **1.13.1.2. Zona de campo cercano reactivo radiante**

En el límite de la zona de campo cercano reactivo, puede definirse una región de transición donde el campo radiante comienza a ser importante en comparación con la componente reactiva. Esta región exterior se extiende hasta unas pocas longitudes de onda (por ejemplo,  $3\lambda$ ) a partir de la fuente electromagnética [17].

### 1.13.1.3. Zona de campo cercano radiante (zona de Fresnel).

Se trata de la región del campo de una antena situada entre el campo cercano reactivo y la región de campo lejano donde predomina el campo de radiación. Aunque la radiación no se propaga como una onda plana, las componentes eléctrica y magnética pueden considerarse localmente normales; además, la relación E/H puede suponerse constante (y casi igual a  $Z_0$ , que es la impedancia intrínseca del espacio libre). Esta región existe únicamente si la máxima dimensión D de la antena emisora es grande en comparación con la longitud de onda  $\lambda$  [17].

## 1.13.2. REGIÓN DE CAMPO LEJANO

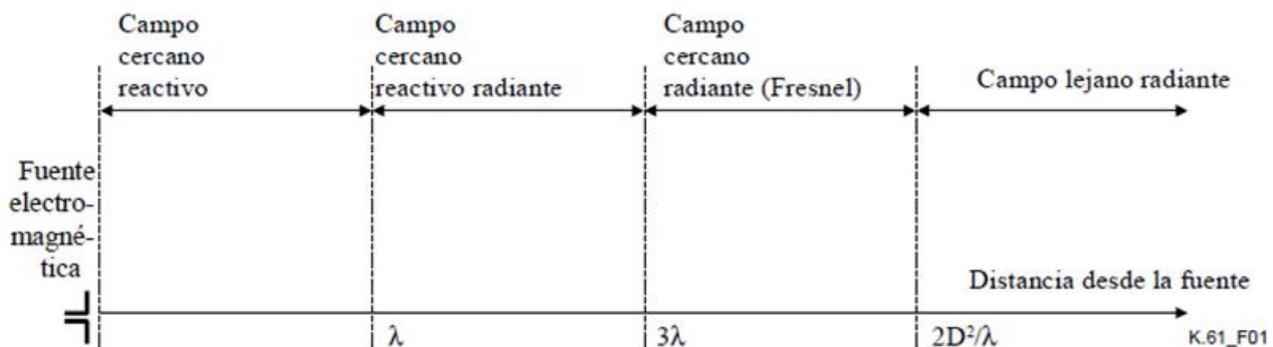
En la región de campo lejano la energía radiante domina al campo y las componentes del este son transversales y se propagan como una onda plana por el espacio.

### 1.13.2.1. Zona de campo lejano radiante

Región del campo de una antena donde la distribución de campo angular es fundamentalmente independiente de la distancia desde la antena y la densidad de potencia radiada es constante. La frontera interior de la región de campo lejano radiante viene determinada por el mayor valor entre  $3\lambda$  y  $2D^2/\lambda$  (el límite es  $2D^2/\lambda$  si la máxima dimensión D de la antena es grande en comparación con la longitud de onda).

Las regiones descritas anteriormente se muestran en la figura 3 (donde se supone que D toma un valor elevado en comparación con la longitud de onda  $\lambda$ ), y las propiedades de los CEM según sea la región de campo, se señalan en el cuadro 1 [17].

**Figura 3.** Regiones de campo en torno a la fuente electromagnética (se supone que la máxima dimensión de la antena D es grande comparada con la longitud de onda  $\lambda$ )



**Fuente:** Recomendación UIT-T K.61: “Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas”.

**Cuadro 1.** Principales propiedades del campo electromagnético en las distintas regiones de campo

	Campo cercano reactivo	Campo cercano reactivo radiante	Campo cercano radiante	Campo lejano radiante
Frontera interior	0	$\lambda$	$3\lambda$	$\text{Máx}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$
Frontera exterior	$\lambda$	$3\lambda$	$\text{Máx}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$	$\infty$
Densidad de potencia S [W/m <sup>2</sup> ]	$S \leq  E  H $	$S \leq  E  H $	$S \leq  E  H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0  H ^2$	$S \leq  E  H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0  H ^2$
$E \perp H$	no	no	Localmente	sí
$Z = E/H$	$\neq Z_0$	$\neq Z_0$	$\approx Z_0$	$= Z_0$

**Fuente:** Recomendación UIT-T K.61: “Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas.

## 1.14. ZONAS DE EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

### 1.14.1. ZONA DE PÚBLICO EN GENERAL

En la zona de público en general o zona de conformidad, la exposición potencial al CEM está por debajo de los límites aplicables a la exposición no controlada del público en general, y por lo tanto, también está por debajo de los límites aplicables a la exposición controlada/ocupacional, y que en el caso de múltiples fuentes, el nivel de exposición porcentual es menor al ciento por ciento (100%) [13].

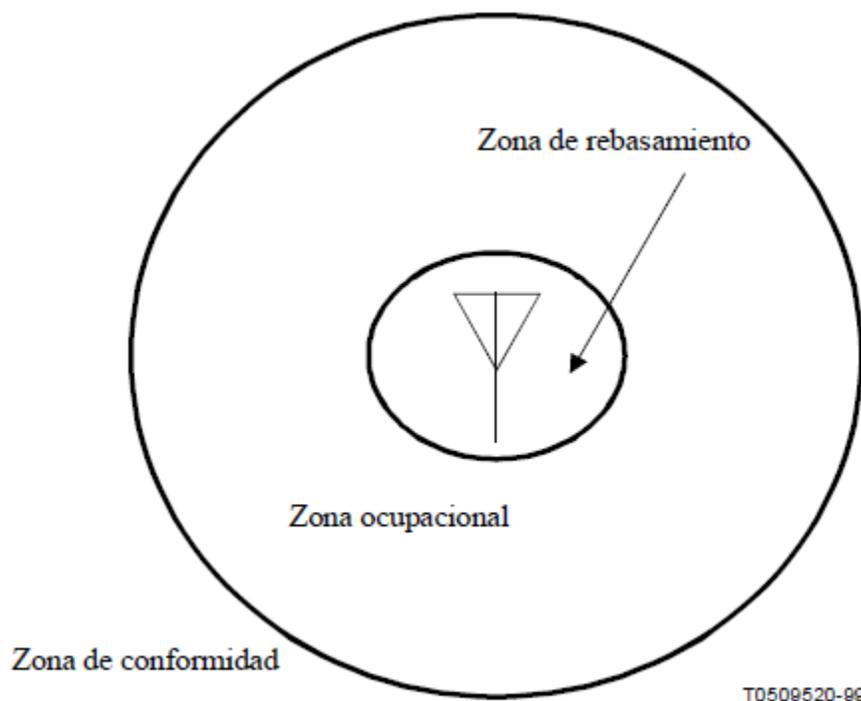
### 1.14.2. ZONA OCUPACIONAL

En la zona ocupacional, la exposición potencial al CEM está por debajo de los límites aplicables a la exposición controlada/ocupacional, pero sobrepasa los límites aplicables a la exposición no controlada del público en general [13].

### 1.14.3. ZONA DE REBASAMIENTO

En la zona de rebasamiento, la exposición potencial al CEM sobrepasa los límites aplicables a la exposición controlada/ocupacional y a la exposición no controlada del público en general [13].

**Figura 4.** Ilustración figurada de las zonas de exposición



**Fuente:** Recomendación UIT-T K.52 (08/2014) “Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos”

#### **1.15. DECLARACIÓN CONFORMIDAD DE EMISIÓN RADIOELÉCTRICA (DCER)**

Es el formato que contiene la información recogida por la persona natural o jurídica, pública o privada, que es responsable de la gestión de un servicio o actividad de telecomunicaciones en virtud de autorización o concesión o por ministerio de la ley, en la cual el representante legal manifiesta, bajo la gravedad de juramento, el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, el seguimiento de la metodología para asegurar la conformidad de los mismos, la adecuada delimitación de las zonas de exposición a campos electromagnéticos y las técnicas de mitigación, de acuerdo con lo establecido en el decreto 195 de 2005 de la República de Colombia [13].

El responsable de la declaración deberá definir autocontroles para asegurar continuidad en el cumplimiento de lo declarado, tales como los que se describen en el artículo 2.2.2.5.2.2 del Decreto 1078 del 2015 del MinTIC, particularmente para cualquier ampliación, extensión, renovación o modificación de las condiciones del uso de las frecuencias radioeléctricas [18].

NOTA – La resolución 001645 de 2005 de la República de Colombia que reglamentaba el Decreto 195 de 2005, contenía un formato para la DCER que fue sustituido por el de la Resolución 000754 de 2016 (véase ANEXO A).

## 2 METODOLOGÍA

Para efectos del presente proyecto, inicialmente se realizó una minuciosa revisión y recopilación de información bibliográfica esencial de los CEM-NI de alta frecuencia, como lo son su medición y la estimación de la incertidumbre; además, se revisó a profundidad las normas y recomendaciones nacionales e internacionales (tanto derogada como actualizada y vigente), que existen para regular los límites de exposición ante dicha radiación.

En una segunda etapa se realizó la familiarización con el equipo de medición de CEM-NI de alta frecuencia de banda ancha NBM 520 de la marca Narda (ver figura 5) y su software, con el que cuenta el grupo de investigación de Electrofisiología, estudiando el respectivo manual de funcionamiento y operación y llevando a cabo pruebas de laboratorio, que permitieron adquirir el conocimiento para realizar el correcto manejo de dicho equipo, y así luego se realizaron las mediciones correspondientes en el desarrollo del proyecto. Además, junto con los conocimientos base sobre metrología de campos electromagnéticos no ionizantes de alta frecuencia, se procedió a realizar el diseño de los protocolos de medición que condujeron al control de los niveles de exposición a CEM-NI de alta frecuencia, aplicados a ambientes altamente expuestos a la radiación emitida por las antenas de telefonía móvil celular.



**Figura 5.** Medidor de niveles de intensidad de CEM-NI de banda ancha NBM 520

Al tener el diseño de los protocolos de medición, se continuó con la identificación de puntos estratégicos, los cuales contaron con cercanía a las fuentes artificiales de emisión de CEM-NI de alta frecuencia, luego de identificados se procedió a obtener la autorización respectiva para poder realizar la

implementación de dichos protocolos en estos espacios y así, posteriormente, se realizó la toma de datos que fueron analizados.

Finalmente, con los datos obtenidos de las mediciones y su respectivo análisis (incluido la estimación de la incertidumbre), se complementó el informe final, teniendo en cuenta revisiones del director que otorgaron ajustar y completar los aspectos generales de dicho informe, lo cual permitió que se cumplieran a cabalidad los objetivos propuestos.

### 3 DESARROLLO

Después de determinarse la necesidad de evaluación de exposición al CEM, esta puede efectuarse a través de métodos de cálculo o de procedimientos de medición [12], con el fin de realizar la verificación. La verificación del cumplimiento versará al menos del cumplimiento con los límites de exposición y con la delimitación de las zonas: de público general, ocupacional, y de rebasamiento [13]; esto, para el caso de Colombia.

Existen varios métodos de cálculo o numéricos que son útiles para determinar la conformidad con los límites de exposición a partir de la predicción numérica de los campos electromagnéticos, como lo son:

- Diferencia finita en el dominio del tiempo (FDTD, finite-difference time-domain).
- Región múltiple de diferencia finita en el dominio del tiempo (MR/FDTD, multiple-region finite-difference time-domain).
- Modelo de trazado de rayos.
- Métodos híbridos de trazado de rayos/FDTD.
- Modelos de antena de campo cercano tales como el método de los momentos (MOM, method of moments) o el código electromagnético numérico (NEC, numeric electromagnetic code).

La selección del método numérico adecuado depende de los siguientes factores:

- La zona de campo donde se necesita evaluar la exposición.
- Las cantidades que van a evaluarse (SAR en función de los campos de referencia).
- La topología del entorno donde se produce la exposición.

En el cuadro 2 se resumen los criterios de selección [17].

**Cuadro 2.** Selección de técnicas numéricas

Zona de campo	Topología	Cantidad evaluada	Técnica numérica adecuada
Campo cercano	Abierta	Campos	FDTD, MOM
Campo cercano	Abierta	SAR	FDTD
Campo cercano	Cerrada, múltiples dispersores	Campo	FDTD, MOM
Campo cercano	Cerrada, múltiples dispersores	SAR	FDTD, MR/FDTD
Campo lejano	Abierta	Campo	Trazado de rayos, MOM
Campo lejano	Múltiples dispersores (Entorno urbano complejo)	Campo	Trazado de rayos

**Fuente:** Recomendación UIT-T K.61 (02/2008) “Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas”.

Por otra parte, las mediciones son útiles en casos en los que los campos son difíciles de calcular y en los que los cálculos arrojan valores cercanos al umbral del límite de exposición [12]. Otro ejemplo en

que pueden ser necesarias las mediciones es el caso de entornos de dispersión complejos o entornos con un número significativo de fuentes de radiación electromagnética [17].

### **3.1 REQUISITOS PARA QUIENES REALICEN LAS MEDICIONES**

Para el cumplimiento de los límites de emisiones radioeléctricas, los prestadores de servicios o actividades de telecomunicaciones deberán contratar sus mediciones con terceros, dichas mediciones deberán cumplir las siguientes condiciones:

- Indicar los sistemas de medición de banda ancha y banda angosta, especificando su número de serial y los certificados de calibración vigente. La fecha de última calibración no podrá haberse realizado en un período superior a un año.
- Garantizar que la presentación de las mediciones serán avaladas con la firma de un ingeniero eléctrico, electrónico, de telecomunicaciones u otra carrera con especialización afín, que haya tenido experiencia demostrada en mediciones relacionadas con este tipo de estudios. De todas formas el operador deberá garantizar la idoneidad de este profesional.
- Cumplir con los requisitos contemplados en el Programa de Salud Ocupacional de la empresa para la cual laboran.

En el caso de realizar las mediciones con terceros, estos deberán inscribirse previamente ante la autoridad competente, acreditando experiencia en mediciones del espectro radioeléctrico mediante una certificación de servicio prestado a satisfacción [18].

NOTA – Todo lo referente a la inscripción para mediciones CEM se encuentra en el numeral 2 del ANEXO N° 2 de la Resolución 000754 de 2016 de la ANE (véase ANEXO A).

### **3.2 SITUACIONES TÍPICAS DE MEDICIÓN**

En las mediciones normalmente aparece uno de los siguientes casos:

- Se conoce la fuente del campo electromagnético y al menos una de sus características. El campo electromagnético procedente de otras fuentes es despreciable a efecto de consideraciones de conformidad. El objetivo consiste en determinar las zonas de conformidad para esta fuente conocida.
- Las fuentes del campo electromagnético son desconocidas. El objetivo es determinar la conformidad en un emplazamiento concreto o verificar los campos electromagnéticos en la región fuera de banda para confirmar que pueden despreciarse otras fuentes electromagnéticas.
- El objetivo consiste en determinar la conformidad en un emplazamiento concreto y si se observa que no existe dicha conformidad, averiguar la contribución relativa de las fuentes a la no conformidad.

En el primer caso debe conocerse con precisión la banda de frecuencias de emisión. La potencia transmitida, la polarización y el diagrama de antena pueden conocerse de forma aproximada. Por consiguiente, las mediciones pueden centrarse en la gama de frecuencias de interés. Emplee una evaluación preliminar para obtener una estimación de la intensidad de campo a fin de determinar la instrumentación adecuada que hay que utilizar. En el segundo caso, puede que sea necesario comprobar todo el espectro de frecuencias. Una alternativa consiste en realizar una medición con una sonda de banda ancha que integre varias frecuencias. El tercer caso es una ampliación del segundo caso. Si las mediciones iniciales indican que no hay conformidad, es necesario realizar mediciones selectivas en frecuencia utilizando, por ejemplo, una antena y un analizador de espectro.

La medición selectiva normalmente es necesaria, entre otros casos, cuando:

- Existen múltiples fuentes con distintos límites.
- Existen múltiples fuentes para las que se recomiendan distintas técnicas de medición (por ejemplo post-procesamiento para GSM u otros).

- Es necesario determinar la contribución relativa de múltiples fuentes [17].

### **3.3 CONDICIONES DE LAS MEDICIONES**

Las mediciones deben estar soportadas por un reporte y memoria del cumplimiento de la metodología de las mismas. El reporte debe incluir:

- Los resultados de las mediciones realizadas del nivel de intensidad de campo eléctrico (E) o de la intensidad de campo magnético (H) y el nivel de exposición porcentual irradiado.
- Copia de los certificados de calibración con vigencia no mayor a un año, expedida por el fabricante o laboratorio debidamente autorizado por el fabricante, de todos los instrumentos de medida utilizados.
- Fotografías de la estación radioeléctrica objeto de medición, en las cuales se debe poder observar:
  - Las antenas transmisoras instaladas.
  - Las zonas de exposición a campos electromagnéticos respectivas.
  - Puertas o demás medios de acceso al sitio.
- Un plano del emplazamiento en el que delimiten las zonas de rebasamiento, zona ocupacional con su respectivo medio de encerramiento y la zona de público en general.
- Procedimiento o metodología utilizada para realizar las mediciones.

En caso de realizar modificaciones en las estaciones radioeléctricas instaladas, que impliquen la alteración de los niveles de campo electromagnético emitidos, los operadores de estaciones radioeléctricas deben realizar un nuevo reporte de mediciones. En el reporte de mediciones deben especificarse las modificaciones realizadas, destacando el impacto al nivel de exposición porcentual [18].

NOTA – Además de lo anterior, el Estado colombiano precisa el diligenciamiento de la Declaración de Conformidad de Emisión Radioeléctrica, cuyo formato se encuentra en el numeral 3 del ANEXO N° 2 de la Resolución 000754 de 2016 de la ANE, (véase ANEXO A). También se debe entregar de un mapa a color con la ubicación de la estación radioeléctrica objeto de evaluación, así como con los puntos de medición, anexando mínimo cinco fotografías donde se incluya una fotografía por cada cuadrante y otra correspondiente al punto donde se registra el mayor nivel de exposición a CEM [14].

### **3.4 CANTIDADES QUE DEBEN MEDIRSE**

La mayoría de los documentos establecen los límites de seguridad en términos de límites básicos y niveles de referencia (o derivados). Los límites básicos se refieren a cantidades fundamentales que determinan la respuesta fisiológica de las personas a los campos electromagnéticos y se aplican en situaciones en las que el cuerpo humano está presente en el campo electromagnético. Los límites básicos para la exposición de las personas a los campos electromagnéticos vienen expresados por la SAR, la SA y la densidad de corriente.

Como las cantidades básicas son difíciles de medir directamente, la mayoría de los documentos proporcionan niveles de referencia para la intensidad de campo eléctrico, la intensidad de campo magnético y la densidad de potencia. Los límites de referencia se aplican a situaciones en las que la evaluación del campo electromagnético no resulta influenciada por la presencia de un cuerpo.

La conformidad con las normas relativas a la exposición de las personas a la radiofrecuencia puede determinarse midiendo la intensidad de campo electromagnético, siempre que se utilicen instrumentos debidamente calibrados y se exprese correctamente la incertidumbre de la medición [17].

El proceso de medición descrito en este trabajo ofrece directrices para la medición de las magnitudes de campo electromagnético ligadas a los niveles de referencia provenientes de las recomendaciones de la ICNIRP, que a su vez suponen los límites máximos de exposición que adoptó Colombia por decreto; es por ello que aunque los niveles de referencia pueden rebasarse si se demuestra que la condición de

exposición produce unos valores de SAR, SA y densidad de corriente inducida inferiores a los límites básicos, para efectos legales nacionales no aplica.

Las magnitudes de campo electromagnético solo se miden individualmente cuando sea preciso a causa de las propiedades del campo relativas a las regiones de campo [15], cuando estas propiedades lo permitan, bastará solamente con la medición de una de las tres cantidades (E, H o S) para obtener las demás a partir de las ecuaciones que describe una onda electromagnética plana [13]. Cabe mencionar que, si bien muchos instrumentos indican unidades de densidad de potencia, las magnitudes reales medidas son E o H [12].

Como se mencionó, el parámetro que va a medirse (E o H) depende del lugar donde se encuentre el operador (campo reactivo o campo radiante) y de la impedancia de campo, como se muestra a continuación:

- Campo cercano reactivo: se miden las componentes E y H o se evalúa la SAR.
- Campo cercano reactivo radiante: si no se dispone de información sobre la impedancia de campo, deben medirse los campos E y H; si se dispone de dicha información, es posible medir únicamente una componente de campo siempre que se obtengan resultados conservadores:
  - Se mide únicamente la componente E si  $E/H > Z_0 = 120 * \pi [\Omega]$  es decir, campo electromagnético de alta impedancia.
  - Se mide únicamente la componente H si  $E/H < Z_0 = 120 * \pi [\Omega]$  es decir, campo electromagnético de baja impedancia.
- Campo cercano radiante: se mide únicamente la componente E o H; se supone una impedancia de espacio libre ( $Z_0$ ) (las diferencias son pequeñas en comparación con las incertidumbres medidas).
- Campo lejano radiante: se mide únicamente la componente E o H.

Para la exposición en lugares muy próximos a la fuente, puede ser preferible determinar la SAR en vez de realizar una medición del campo [17].

### **3.5 LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN**

Quienes presten servicios o actividades de telecomunicaciones deben asegurar que en las distintas zonas de exposición a campos electromagnéticos, el nivel de emisión de sus estaciones no exceda el límite máximo de exposición correspondiente a su frecuencia de operación, según los valores establecidos en el cuadro 3 [13].

**Cuadro 3.** Límites máximos de exposición según la frecuencia de operación (Niveles de referencia de la ICNIRP, valores RMS sin perturbaciones)

Tipo de exposición	Gama de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico, E (V/m)	Intensidad de campo magnético, H (A/m)	Densidad de potencia de onda plana equivalente, S (W/m <sup>2</sup> )
Ocupacional	9 - 65 KHz	610	24,4	-
	0,065 - 1 MHz	610	1,6/f	-
	1 - 10 MHz	610/f	1,6/f	-
	10 - 400 MHz	61	0,16	10
	400 - 2000 MHz	3f <sup>1/2</sup>	0,0008f <sup>1/2</sup>	f/40
	2 - 300 GHz	137	0,36	50
Público en general	9 - 65 KHz	87	5	-
	0,065 - 1 MHz	87	0,73/f	-
	1 - 10 MHz	87/f <sup>1/2</sup>	0,73/f	-
	10 - 400 MHz	28	0,073	2
	400 - 2000 MHz	1,375f <sup>1/2</sup>	0,0037f <sup>1/2</sup>	f/200
	2 - 300 GHz	61	0,16	10
<p>NOTA 1 – f es la indicada en la columna de gama de frecuencias.</p> <p>NOTA 2 – Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, el tiempo de promediado es de 6 minutos.</p> <p>NOTA 3 – Para frecuencias hasta 100 kHz, los valores de cresta pueden obtenerse multiplicando el valor eficaz por <math>\sqrt{2}</math> (<math>\approx 1,414</math>). Para impulsos de duración <math>t_p</math>, la frecuencia equivalente aplicable debe calcularse como <math>f = 1/(2t_p)</math>.</p> <p>NOTA 4 – Entre 100 kHz y 10 MHz, los valores de cresta de las intensidades de campo se obtienen por interpolación desde 1,5 veces la cresta a 100 MHz hasta 32 veces la cresta a 10 MHz. Para valores que sobrepasen 10 MHz, se sugiere que la densidad de potencia de onda plana equivalente de cresta, promediada a lo largo de la anchura del impulso, no sobrepase 1000 veces el límite <math>S_{eq}</math>, o que la intensidad de campo no sobrepase los niveles de exposición de intensidad de campo indicados en el cuadro.</p> <p>NOTA 5 – Para frecuencias superiores a 10 GHz, el tiempo de promediado es de <math>68/f^{1,05}</math> minutos (f en GHz).</p>				

**Fuente:** Decreto 195 de 2005 del Ministerio de Comunicaciones de la República de Colombia.

NOTA 1 – Es importante resaltar que los límites de exposición no son límites de emisión; se aplican a lugares accesibles a los operarios o miembros del público en general. Por tanto, es posible conseguir el cumplimiento limitando el acceso a zonas en las que se sobrepasan los límites de campo [12].

NOTA 2 - Aún cuando los niveles de emisión de las distintas estaciones radioeléctricas que se encuentran dentro de una determinada zona ocupacional, cumplan de manera individual con los límites señalados en el cuadro 4, se debe verificar que el nivel de exposición porcentual para campo eléctrico o magnético sea menor a la unidad, menor al ciento por ciento (100%), según la banda de frecuencia estudiada [13]. Véase el numeral 3.7.7 MÚLTIPLES FUENTES Y FRECUENCIAS.

**Cuadro 4.** Límites básicos de la ICNIRP para frecuencias hasta 10 GHz

Características de la exposición	Rango de frecuencias	Densidad de corriente para cabeza y tronco (mA/m <sup>2</sup> ) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (W/kg)	SAR localizada (cabeza y tronco) (W/kg)	SAR localizada (extremidades) (W/kg)
Exposición ocupacional	Hasta 1 Hz	40	-	-	-
	1 - 4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz - 1 kHz	10	-	-	-
	1 - 100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz - 10 MHz	f/100	0,4	10	20
	10 MHz - 10 GHz	-	0,4	10	20
Exposición al público en general	Hasta 1 Hz	8	-	-	-
	1 - 4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz - 1 kHz	2	-	-	-
	1 - 100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz - 10 MHz	f/500	0,08	2	4
	10 MHz - 10 GHz	-	0,08	2	4

NOTA 1 – f es la frecuencia en hertzios.

NOTA 2 – Debido a que el cuerpo humano no es eléctricamente homogéneo, las densidades de corriente deberían ser promediadas sobre una sección transversal de 1 cm<sup>2</sup> perpendicular a la dirección de la corriente.

NOTA 3 – Para frecuencias hasta 100 kHz, los valores de la densidad de corriente pico pueden obtenerse multiplicando el valor rms, de esta tabla, por  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1,414$ ).

NOTA 4 – Para frecuencias hasta 100 kHz y para campos magnéticos pulsantes, la densidad de corriente máxima asociada con los pulsos puede ser calculada de los tiempos de subida/bajada y la máxima tasa de cambio de la densidad de flujo magnético. Luego la densidad de corriente inducida puede ser comparada con la restricción básica apropiada.

NOTA 5 – Todos los valores de SAR, deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos.

NOTA 6 – La masa para promediar la SAR localizada es cualquier tejido contiguo de 10 g; la máxima SAR así obtenida debería ser el valor usado para la estimación de la exposición.

NOTA 7 – Para pulsos de duración  $t_p$ , la frecuencia equivalente a aplicarse en las restricciones básicas debería ser calculada como  $f = 1/(2t_p)$ . Adicionalmente en el rango de frecuencias de 0,3 a 10 GHz y para exposición localizada en la cabeza, con el objeto de evitar el efecto auditivo causado por la expansión termoelástica, se recomienda una restricción básica adicional. Esta restricción es que la SA promediada sobre 10 g de tejido no debe exceder 10 mJ/kg para trabajadores y 2 mJ/kg para el público en general.

**Fuente:** Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de la ICNIRP (1998).

**Cuadro 5.** Límites básicos de la ICNIRP para frecuencias de 10 GHz hasta 300 GHz

Características de la exposición	Densidad de potencia (W/m <sup>2</sup> )
Exposición ocupacional	50
Exposición al público en general	10

NOTA 1 – Las densidades de potencia deben ser promediadas sobre cualquier área expuesta de 20 cm<sup>2</sup> y sobre cualquier periodo de  $68/f^{1,05}$  minutos (f en GHz) para compensar la profundidad de penetración progresivamente corta conforme se incrementa la frecuencia.

NOTA 2 – Las densidades de potencia máximas espaciales, promediadas sobre 1 cm<sup>2</sup> no deberían exceder 20 veces los valores antes mencionados.

**Fuente:** Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos de la ICNIRP (1998).

### 3.5.1 NIVELES DE DECISIÓN

El nivel de decisión de campo eléctrico o magnético corresponde a la cuarta parte del límite máximo de exposición permitido para el caso respectivo, lo cual se muestra consignado en el cuadro 6. Este nivel de decisión será utilizado con el fin de definir la necesidad de realizar las mediciones de Fase 2 [14], descritas en el decimotercer ítem del numeral 3.8 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN.

**Cuadro 6.** Niveles de decisión

Niveles de Decisión - Zona Exposición Público en General		
Gama de Frecuencias	Intensidad de Campo Eléctrico E(V/m)	Densidad de potencia de onda plana, equivalente S (W/m <sup>2</sup> )
9 – 150 kHz	21,75	-
0,15 – 1 MHz	21,75	-
1 – 10 MHz	$21,75/f^{1/2}$	-
10 – 400 MHz	7	0,1
400 – 2.000 MHz	$0,34 f^{1/2}$	$f/3200$
2 – 300 GHz	15,25	0,6

**Fuente:** Resolución 000754 de 2016 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), Colombia.

### 3.5.2 MODIFICACIÓN DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN

#### 3.5.2.1 POR CUESTIONES DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Una incertidumbre de medición ampliada con un intervalo de confianza del 95% (es decir, un intervalo de  $\pm 2\sigma$ ) inferior o igual a 4 dB se considera suficiente para demostrar la conformidad.

Si la incertidumbre de la medición rebasa los 4 dB, los valores límites deben reducirse un valor igual a la mitad del margen por el que la incertidumbre rebasa los 4 dB, de manera que la conformidad viene dada por la fórmula:

$$X_{meas} \leq X_{lim} - \frac{1}{2}(U - 4) \quad (1)$$

Dónde:

- $U$ : es la incertidumbre de la medición,
- $X_{lim}$ : es el valor límite, y
- $X_{meas}$ : es el valor medido [17].

### 3.5.2.2 POR CUESTIONES DE DURACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

La mayoría de los documentos definen los límites de exposición en forma de magnitudes promediadas en un periodo de tiempo denominado tiempo de promediado. En caso de exposición de corta duración inferior al tiempo de promediado, el límite aplicable es:

$$\sum_i X_i^2 t_i \leq X_l^2 t_{avg} \quad (2)$$

Dónde:

- $X_i$ : es el campo (E o H) durante la exposición i,
- $t_i$ : es la duración de exposición i,
- $X_l$ : es el límite de referencia, y
- $t_{avg}$ : es el tiempo de promediación apropiado.

El límite de densidad de potencia es:

$$\sum_i S_i t_i \leq S_l t_{avg} \quad (3)$$

Dónde:

- $S_i$ : es la densidad de potencia durante la exposición i,
- $t_i$ : es la duración de exposición i,
- $S_l$ : es el límite de referencia, y
- $t_{avg}$ : es el tiempo de promediado apropiado [12].

## 3.6 INSTRUMENTACIÓN PARA LAS MEDICIONES

### 3.6.1 CARACTERÍSTICAS

Es importante considerar las siguientes características generales de los dispositivos de medición [17].

#### 3.6.1.1 Gama de frecuencias

Existen dos clases de instrumentos: de banda ancha y banda estrecha.

- Los dispositivos de banda ancha (tales como las sondas eléctricas y magnéticas comúnmente utilizadas) no proporcionan información sobre el espectro de frecuencias. No obstante es posible realizar mediciones selectivas en frecuencia en bandas amplias utilizando una pequeña antena de banda ancha (por ejemplo: bicónica, de bocina, etc.) o empleando dispositivos más sofisticados y costosos.
- Los dispositivos de banda estrecha normalmente son antenas con un factor de antena plano en una gama de espectro limitada (por ejemplo, antenas dipolo) y pueden utilizarse para efectuar mediciones selectivas en frecuencia. Es posible utilizar una combinación de antena y analizador de

espectro para verificar la frecuencia y el origen de las emisiones medidas con una sonda isótropa [17].

### **3.6.1.2 Directividad de la antena**

La respuesta de la antena puede ser isótropa o directiva.

En el caso de dispositivos isótropos, cabe esperar que la respuesta sea independiente de la dirección del campo electromagnético incidente.

Cuando el dispositivo es directivo, la respuesta será dependiente de dicha dirección. Los dispositivos directivos normalmente están polarizados y presentan una simetría axial en el diagrama de radiación. En consecuencia, es necesario realizar las rotaciones adecuadas del dispositivo para la reconstrucción del campo [17].

### **3.6.1.3 Cantidad medida**

La mayoría de los dispositivos miden el campo eléctrico o el campo magnético, esta distinción es importante en el caso de la región de campo reactivo.

En la región de campo lejano se prefiere normalmente los dispositivos de medición de la componente de campo eléctrico [17].

## **3.6.2 SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO**

La elección de los dispositivos para realizar las mediciones de campo electromagnético viene determinada por algunos factores, entre los que puede citarse:

- Las normas existentes que deben satisfacerse (por ejemplo, los límites pueden ser dependientes de la frecuencia).
- El número y las características de las fuentes de campo electromagnético.
- Las regiones de campo (es decir, campo cercano reactivo, campo cercano radiante, campo lejano) en las que se realiza la medición.

La elección del equipo de medición está estrechamente relacionada con el procedimiento de medición [17].

## **3.6.3 SELECCIÓN DE LA SONDA**

La sonda no debe producir una dispersión importante del campo electromagnético incidente y los cables que unen el sensor con el medidor no deben influir significativamente en el campo [17].

### **3.6.3.1 Tamaño de la sonda**

Si van a realizarse mediciones de campo cercano, las dimensiones de la sonda deben ser inferiores a la longitud de onda de la frecuencia de funcionamiento más elevada [17].

### **3.6.3.2 Gama de frecuencias**

Como consideración general, usar banda ancha siempre que sea posible (es más sencillo y corto), pero a menudo se ha de requerir realizar una medición selectiva en frecuencia (normalmente, cuando no es posible distinguir una fuente principal y cuando los resultados de la medición deben procesarse para compararlos con un límite del valor eficaz) [17], para lo cual, se debe emplear banda estrecha.

### **3.6.3.3 Directividad**

La sonda utilizada para las mediciones de campo externo a fin de determinar la conformidad, generalmente debe ser isótropa, no directiva y no polarizada; pero, entre otras situaciones, en entornos de dispersión complejos puede ser necesario medir los campos en varias direcciones con una antena directiva [17].

### 3.6.4 REQUISITOS DE CALIBRACIÓN

#### 3.6.4.1 Factor de calibración

Para sondas de banda ancha, el factor de calibración ( $CF$ ), se define mediante la siguiente fórmula:

$$CF = \frac{E_{ref}}{E_{med}} \quad (4)$$

Se trata de la relación entre la intensidad del campo eléctrico de referencia esperado ( $E_{ref}$ ) y el valor leído ( $E_{med}$ ) en el PC o en una unidad receptora especializada. Este factor es fundamentalmente función de la frecuencia y, en presencia de un error de no linealidad, de la intensidad de campo. El  $CF$  se determina en función de la frecuencia. Para cada frecuencia, el valor del  $CF$  deberá conocerse con una incertidumbre inferior a 1 dB. Los errores debidos a la interpolación de frecuencias se incluyen en la incertidumbre de tolerancia en el  $CF$  [17].

#### 3.6.4.2 Factor de antena

El factor de antena ( $AF$ ) se define para antenas y sondas selectivas en frecuencia como la relación:

$$AF = \frac{E_{ref}}{V} [m^{-1}] \quad (5)$$

Siendo  $E_{ref}$  [V/m] la intensidad de campo eléctrico en la sonda y  $V$  [V] la tensión medida en el analizador de espectro. Este factor es fundamentalmente función de la frecuencia pero en presencia de errores de no linealidad, puede depender también de la intensidad de campo. Para cada frecuencia, el valor de  $AF$  deberá conocerse con una incertidumbre ampliada (es decir, una confianza estadística del 95%) inferior a 2 dB. La máxima incertidumbre tolerable incluye también el error debido a la interpolación de frecuencias (cuando sea necesario) [17].

#### 3.6.4.3 Isotropía

Casi siempre es útil utilizar una sonda isótropa para realizar las mediciones de conformidad en una instalación de telecomunicaciones. La respuesta isótropa normalmente se logra mediante un sistema de antenas triaxial donde los tres ejes están dispuestos de forma que sean mutuamente ortogonales. La desviación con respecto a una respuesta isótropa ideal se mide en la prueba de isotropía. La desviación se llama error isotrópico y, por regla general, es función de la dirección de la onda incidente. Puede evaluarse:

- Midiendo la diferencia con respecto a la respuesta en coseno de cada eje si están claramente identificados espacialmente y se dispone de una señal de cada eje.
- Verificando toda la respuesta de la sonda si no es posible definir con claridad la posición de cada eje o cuando se dispone de una sola señal del eje.

La desviación media con relación a la respuesta isotrópica debe ser inferior a 1 dB [17].

#### 3.6.4.4 Linealidad

Es necesario obtener una respuesta lineal en función de la amplitud del campo. Un error de linealidad significaría que la antena y los factores de calibración son función de la intensidad del campo de prueba. Por consiguiente, la prueba de linealidad debe ser el punto de partida de todo el proceso de caracterización de la sonda. La prueba se lleva a cabo, en la gama dinámica lo más amplia posible, verificando la relación entre la potencia radiada y el campo eléctrico o tensión medidos. La relación es lineal en unidades logarítmicas: la banda de incertidumbre en la recta de regresión lineal deberá tener la misma magnitud que la incertidumbre de la medición. Si no se cumple esta condición, es probable que aparezca un error de linealidad y en ese caso se sugieren las siguientes medidas:

- En el proceso de caracterización: se mide el  $CF$  o el  $AF$  para distintas amplitudes de la onda de prueba y se obtienen diferentes resultados.

- En la verificación de la conformidad: las diferencias debidas a la intensidad de campo pueden controlarse ampliando la incertidumbre de la medición o considerando diferentes factores para distintas amplitudes de campo (cuando sea posible).

Puede ser útil verificar la linealidad en algunas frecuencias. La máxima desviación tolerable con respecto a una respuesta lineal es de 1 dB [17].

#### 3.6.4.5 Señal impulsiva

Debido a su modulación y a su acceso a múltiples medios, los sistemas digitales de radiocomunicaciones móviles tienen transmisiones impulsivas. Por lo tanto, cuando la caracterización se realiza con un campo de prueba de onda continua, es necesario verificar si un campo de prueba impulsivo introduce algún cambio en las características probadas.

Si las diferencias en el *CF* y el *AF*, determinadas por la onda de prueba impulsiva y la onda continua, son inferiores a las incertidumbres pertinentes, los instrumentos de medición pueden utilizarse independientemente del tipo de señal que vaya a medir [17].

#### 3.6.4.6 Integración de múltiples señales

La verificación de la correcta integración de distintas señales con frecuencias diferentes es una prueba importante de las sondas de banda ancha no selectivas. Supone verificar que el resultado de la medición viene dado correctamente por una fórmula de determinación del valor eficaz:

$$E_{RMS} = \sqrt{\sum_i E_i^2} \quad (6)$$

La prueba puede efectuarse fácilmente con dos fuentes de RF: los resultados deberán satisfacer la condición:

$$20 \log_{10} \left\{ \frac{E_{mes} - \sqrt{E_1^2 + E_2^2}}{E_{mes}} \right\} < 0,5 \text{dB} \quad (7)$$

Siendo:

$E_{mes}$ : el campo eléctrico medido, y

$E_1$  y  $E_2$ : los valores de campo reales, o menores que la incertidumbre de medición del campo eléctrico o la tensión [17].

#### 3.6.4.7 Rechazo axial

En la prueba se mide la respuesta de un eje irradiado por una onda incidente con polarización cruzada. Un rechazo axial bajo podría tener efectos importantes en la medición de la intensidad de campo eléctrico cuando se determina como el valor eficaz de las tres componentes ortogonales [17].

### 3.7 CONSIDERACIONES DURANTE EL PROCESO DE MEDICIÓN

#### 3.7.1 VARIABILIDAD DE LA FUENTE

Las fuentes de telecomunicaciones a veces son variables y la variabilidad de la potencia transmitida y del diagrama de antena son especialmente importantes. Esta variabilidad supone un obstáculo especial para las mediciones ya que puede que no se conozca el estado exacto en que se encuentra el transmisor en el instante de realizar la medición [17].

##### 3.7.1.1 Variabilidad de la potencia

Al evaluar la exposición debe tenerse en cuenta la máxima potencia radiada total por el transmisor. La potencia transmitida por un sistema de telecomunicaciones podría variar debido al control automático de potencia o a la variabilidad en la utilización del canal. El control automático de potencia ajusta la

potencia de salida para compensar las condiciones de propagación adversas. La variabilidad de canal puede ser de dos categorías:

- Atribución dinámica de canal, en la que los canales se activan o desactivan de la forma necesaria.
- Variación de la ocupación de canal, en la que el volumen de datos transmitidos por un canal varía; sin embargo, aun cuando no se transmitan datos, continúa emitiéndose la portadora de canal. La variación de la ocupación de canal afecta a la modulación de la señal pero cabe esperar que este efecto sea pequeño [17].

NOTA - El método preferido para efectuar mediciones de campos electromagnéticos en RF para emisores de estación base que proporcionen servicios de telecomunicaciones inalámbricos móviles consiste en garantizar que todos los canales radioeléctricos están ocupados durante la medición. Esto puede verificarse conociendo el funcionamiento del sistema o examinando la señal con una combinación de antena y analizador de espectro. Si no es posible realizar mediciones con todos los canales ocupados, debe utilizarse un procedimiento de extrapolación similar al indicado en el ANEXO M [17].

#### **3.7.1.2 Variabilidad de la antena**

Aunque es menos común que la variabilidad de la potencia, algunos sistemas de telecomunicaciones utilizan antenas activas que pueden modificar dinámicamente su diagrama de radiación [17].

#### **3.7.1.3 Fuentes intermitentes**

Algunas fuentes utilizadas en telecomunicaciones son intermitentes. Tales fuentes emiten energía de RF únicamente si necesitan transmitir alguna información.

Estas fuentes pueden funcionar de forma regular, transmitiendo datos a intervalos periódicos o según un horario definido. Dichas fuentes también pueden funcionar de forma irregular transmitiendo datos únicamente si son activadas por un operador o si se ha acumulado un volumen suficiente de datos como para activar la transmisión.

Ni la sonda de banda amplia isótropa ni un analizador de espectro puede medir la duración de una fuente intermitente. La sonda de campo mide el máximo valor del campo (valor de cresta) y el analizador de espectro mide la máxima densidad espectral en el dominio de la frecuencia. Para obtener un adecuado promedio en el tiempo, debe determinarse la duración de una transmisión intermitente a partir de los requisitos operativos del sistema [17].

### **3.7.2 VARIABILIDAD TEMPORAL**

En las zonas donde se espera la variabilidad en el tiempo de la fuente, las mediciones pueden necesitar efectuarse durante un amplio periodo de tiempo. Por ejemplo, en el caso de variabilidad de canal, las mediciones deben realizarse durante el momento de máxima utilización [17].

### **3.7.3 PROMEDIO TEMPORAL**

Los límites generalmente se expresan como valores eficaces de una onda continua promediada a lo largo de un periodo definido. Por ejemplo, los límites de referencia ICNIRP (es decir, el campo) deben promediarse a lo largo de cualquier periodo de seis minutos en frecuencias por debajo de 10 GHz y a lo largo de un periodo de  $68/f^{1.05}$  minutos en frecuencias superiores a 10 GHz (siendo  $f$  la frecuencia). Por lo tanto, en el caso de señales fuertemente dependientes del tiempo, puede que sea necesario elaborar los resultados de la medición (procedimientos de post-procesamiento) a fin de compararlos con el límite [17].

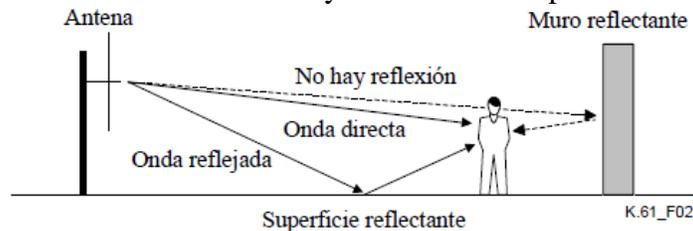
### **3.7.4 APANTALLAMIENTO Y DISPERSIÓN**

La intensidad del campo electromagnético varía con la posición espacial debido al efecto de la reflexión y la dispersión sobre las estructuras conductoras adyacentes. La escala de esta variabilidad es

función de la longitud de onda y es importante considerarla para determinar los emplazamientos de máxima exposición y utilizar el promediado espacial de manera adecuada.

Como las normas de exposición especifican los límites de la exposición de las personas, debe considerarse el efecto del propio cuerpo sobre el diagrama de campo. Por ejemplo, la figura 6 muestra una situación en la que la presencia de una persona absorbería la onda incidente creando una región de sombra e impidiendo una reflexión que, de producirse, incrementaría el campo en el emplazamiento donde se encuentra el cuerpo humano. Estos tipos de efectos, especialmente en las frecuencias de microondas, pueden dar lugar a una sobreestimación del campo durante las mediciones o los cálculos numéricos realizados cerca de objetos reflectantes [17].

**Figura 6.** Ilustración de una alteración multitrayecto debido a la presencia de un cuerpo humano



**Fuente:** Recomendación UIT-T K.61 (02/2008) “Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas”.

### 3.7.5 VARIABILIDAD ESPACIAL

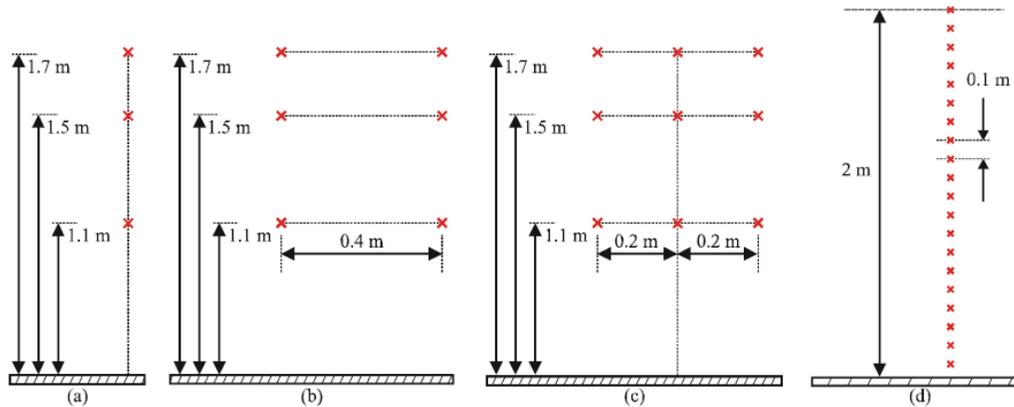
En las instalaciones de telecomunicaciones, los valores de campo más elevados aparecen en lugares próximos a las antenas en zonas donde los campos pueden variar apreciablemente a escala del tamaño de las personas. Por otra parte, las reflexiones multitrayecto pueden provocar distribuciones de campo no uniformes. En consecuencia, en estos casos resulta necesario realizar un promedio espacial para obtener un resultado más preciso y evaluar la exposición humana de cuerpo completo [17].

### 3.7.6 PROMEDIO ESPACIAL

Los límites de SAR normalmente comprenden dos categorías: límites de SAR localizados y límites de SAR medios en todo el cuerpo. Los primeros se refieren a exposiciones debidas a pequeños radiadores próximos al cuerpo humano tales como teléfonos móviles. Los límites de SAR medios en todo el cuerpo constituyen la base para los límites de referencia que también deben promediarse a lo largo de todo el cuerpo. Los niveles de referencia son generalmente valores promediados espacialmente sobre toda la extensión del cuerpo del individuo expuesto, pero con la importante salvedad de que no se sobrepasen las restricciones básicas de exposición localizadas.

Los valores de los campos deben ser determinados en N puntos como se describe en la figura 7. Se recomiendan básicamente tres puntos (figura 7a), pero si se requiere más precisión, el número de puntos puede ser aumentado a seis (figura 7b), nueve (figura 7c), veinte (figura 7d), etc., de acuerdo con las normas y reglamentos nacionales o regionales. En todos los casos, la incertidumbre de la evaluación debe ser determinada.

**Figura 7.** Puntos de medición para el promedio espacial



**Fuente:** Recomendación UIT-T K.61 (02/2008) “Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas”.

La fórmula para calcular los valores de campo espacialmente promediados es la siguiente:

$$(E \text{ o } H) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i \text{ o } H_i)^2}{N}} \quad (8)$$

Donde  $N$  es el número de puntos, es decir, tres, seis, nueve, veinte, etc.

La medición no debe llevarse a cabo en las inmediaciones de objetos metálicos para evitar el acoplamiento con la sonda, y en tal situación, debería efectuarse con el borde de la sonda situado a una distancia de dicho objeto metálico de al menos tres "longitudes de onda". Pueden aparecer grandes gradientes de campo en el campo cercano de un radiador. Las mediciones deben realizarse en emplazamientos lo suficientemente próximos como para determinar con precisión los límites de la zona de conformidad.

NOTA - Las mediciones iniciales cerca del radiador como se describe en este ítem proporcionan los máximos valores de campo en el punto. Estos valores representan la evaluación más conservadora de la exposición. Es posible definir las zonas de conformidad basándose en estos valores conservadores [16].

### 3.7.7 MÚLTIPLES FUENTES Y FRECUENCIAS

La mayoría de los documentos exigen que se consideren los efectos de múltiples fuentes. Debido al diferente efecto fisiológico de las fuentes de frecuencias más bajas y las fuentes de frecuencias más altas, deben considerarse por separado. En las frecuencias más bajas (ordinariamente inferiores a 10 MHz), los efectos fisiológicos importantes se deben a la densidad de corriente inducida, mientras que a las frecuencias más altas (ordinariamente superiores a 100 kHz), los efectos fisiológicos importantes se deben a la SAR [12].

Los efectos de múltiples fuentes funcionando a distintas frecuencias deben considerarse de acuerdo con la ICNIRP o la norma de exposición a campos de RF aplicable, normalmente en una suma ponderada, donde cada una de las fuentes se pondera de conformidad con el límite aplicable a su frecuencia [17]. En el ANEXO B se presenta el procedimiento estipulado por la reglamentación colombiana (basado en las directrices de la ICNIRP, recogidas también en la recomendación UIT-T K.52), para el cálculo del nivel de exposición porcentual; tenga en consideración que también se puede obtener a través de medición con equipo banda ancha.

### **3.7.8 SUPERACIÓN DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN**

El parámetro que determina el cumplimiento, o incumplimiento, de una estación de radio fija es el nivel de exposición porcentual o acumulativa; este puede ser medido con un dispositivo de banda ancha [17].

En caso de que en alguna zona ocupacional el nivel de exposición porcentual llegase a ser mayor a la unidad, debe medirse el nivel de emisión de cada fuente radiante o estación radioeléctrica usando un medidor de banda angosta, e identificar cuáles de ellas superan el límite máximo de exposición correspondiente a su frecuencia de operación [13]. Ya que una sonda isótropa no puede diferenciar entre fuentes distintas, es necesario realizar mediciones selectivas en frecuencia o directivas para identificar la contribución de las distintas fuentes. Por ejemplo, una combinación de antena y analizador de espectro permite llevar a cabo una medida más precisa para distintas frecuencias, direcciones y componentes del campo de polarización. Sin embargo, ello hace que la medición sea más complicada puesto que es necesario medir y sumar tres polarizaciones por separado. Además, en entornos de dispersión complejos, puede ser preciso medir los campos en varias direcciones. También es posible utilizar una combinación de antena y analizador de espectro para verificar la frecuencia y el origen de las emisiones medidas con la sonda isótropa [17].

Aquellas fuentes radiantes o estaciones radioeléctricas que superen el límite deben ajustarse empleando técnicas de mitigación que permitan mantener los niveles de emisión dentro de los márgenes permitidos, tales como: aumentar la altura de las antenas, uso de apantallamientos o mecanismos similares de protección, limitar la accesibilidad de personas a la zona ocupacional en cuestión, reducir la potencia de emisión, trasladar la fuente de radiación a otro sitio, entre otras, hasta que cada una de ellas emita por debajo de su respectivo límite. Cuando el tamaño del predio lo permita, se podrá trasladar la delimitación de las zonas de exposición a campos electromagnéticos, siempre y cuando la nueva delimitación entre la zona ocupacional y la de público en general siga estando dentro del predio donde se encuentran las estaciones radioeléctricas.

Si una vez cumplido lo anterior, el nivel de exposición porcentual continuase siendo mayor a la unidad, todas las fuentes radiantes deben mitigarse proporcionalmente al aporte que realiza dicha fuente radiante a la sumatoria del cálculo del nivel de exposición porcentual [13]. A continuación se establecerá un procedimiento de ayuda para definir el porcentaje de mitigación con varias fuentes radiantes, con el fin de reducir en forma porcentual las radiaciones:

- Determinar el nivel promedio de contribución normalizada y determinar cuáles son las contribuciones menores al campo total.
- Reducir según el grado de mayor a menor y en forma lineal las contribuciones de cada señal de tal manera que se reduzca la suma de las componentes, sin afectar significativamente las de menor contribución.
- Realizar nuevamente la agregación normalizada de las componentes, y en caso de que siga superando la unidad, multiplicar por la fracción inversa de la suma cada componente para realizar una reducción plana para cada componente.
- Realizar nuevamente los pasos de iteración anterior hasta una reducción objetivo para las fuentes [14].

#### **3.7.8.1 Técnicas de reducción**

Es necesario controlar la exposición al CEM en lugares accesibles a personas cuando el campo sobrepasa los límites de seguridad de exposición. Una forma efectiva de controlar la exposición, cuando no es posible cambiar otras características de la instalación, es restringir el acceso a las zonas en las que se sobrepasan los límites. Según sea la zona, tenemos:

- Zona ocupacional: Si el CEM sobrepasa los límites de exposición no controlada del público en general, pero no los límites de exposición ocupacional, debe entonces restringirse el acceso al

público en general, pero puede permitirse a los operarios penetrar en la zona. La restricción de acceso puede conseguirse con barreras físicas, procedimientos de cierre o letreros adecuados. Debe informarse a los operarios que penetren en la zona ocupacional.

Se recomienda no colocar un puesto de trabajo permanente en la zona ocupacional.

- Zona de rebasamiento: Cuando el CEM sobrepasa los límites de exposición ocupacional, debe restringirse el acceso a los operarios y al público en general. Si es necesario que entren operarios en la zona, deben adoptarse medidas para controlar la exposición de los mismos. Dichas medidas incluyen:
  - Reducción temporal de la potencia del emisor.
  - Control de la duración de la exposición de manera que la exposición promediada en el tiempo se halle dentro de los límites de seguridad.
  - Blindaje o utilización de ropas de protección [12].

NOTA – Para el caso de Colombia, independientemente del cumplimiento de los niveles, quienes operen estaciones radioeléctricas, deben incluir dentro de las medidas de protección para los trabajadores, controles de ingeniería y administrativos, programas de protección personal y vigilancia médica, conforme lo establecido en la normatividad vigente de atención y prevención de riesgos profesionales o las que establezcan las autoridades competentes en salud ocupacional, en especial, las contenidas en el Decreto-ley 1295 de 1994 y demás normas que lo modifiquen, adicionen o sustituyan [12].

### **3.7.9 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD**

El personal debe tomar las precauciones de seguridad adecuadas al realizar las mediciones. Es imperativo antes de llevar a cabo una medición potencialmente peligrosa de un campo electromagnético, realizar una evaluación aproximada como la descrita en el octavo Ítem del numeral 3.8 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN. Ello permitirá efectuar una estimación de la intensidad de campo esperada, determinar los límites de la zona de conformidad y, en consecuencia, ayudar a seleccionar los instrumentos y procedimientos de prueba apropiados.

Si las mediciones se van a realizar en la zona de rebasamiento, deben seguirse las precauciones especificadas en la Rec. UIT-T K.52 como medidas para controlar la exposición a personas que requieran estar presentes en este lugar (presentadas en este documento como el segundo ítem del numeral 3.7.8.1 TÉCNICAS DE REDUCCIÓN). Además, también deben observarse las precauciones contra efectos indirectos tales como las corrientes de contacto [17].

### **3.7.10 EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES EN LA MEDICIÓN**

Las incertidumbres de medida para las mediciones de campo son los resultados de los errores debido a la instrumentación del sistema, la respuesta y calibración de la sonda de campo, y los algoritmos de extrapolación, interpolación e integración utilizados para determinar el valor medio del campo [15]. En este trabajo se describe la evaluación y figuran las expresiones de las incertidumbres, apoyados en la GUM [19] y por ende en la Norma Técnica Colombia GTC 51 [20], en: PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN (véase ANEXO C).

## **3.8 PROTOCOLOS DE MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN**

El siguiente método de medición y verificación se utiliza para determinar la conformidad con los límites de exposición por parte de fuentes de radiación electromagnética no ionizante de alta frecuencia.

La metodología de mediciones se compone de tres fases que se explican a continuación (Fase Preliminar, Fase 1 y Fase 2). En ellas se detalla el procedimiento que se debe seguir para evaluar el cumplimiento de los niveles de exposición a campos electromagnéticos [14].

- **Determinar si es necesaria la evaluación de la exposición al CEM para la instalación o el equipo en cuestión.**

Así inicia la Fase Preliminar. El equipo de telecomunicaciones debe clasificarse como emisor de CEM intencional o no intencional de acuerdo con las definiciones provistas en este documento (véase los numerales 1.10.12 y 1.10.13, respectivamente). A partir de esta clasificación se podrá determinar la necesidad de una evaluación de la exposición [12]. Emisores no intencionales no precisan de evaluación, los emisores intencionales sí; a no ser que se trate de un sistema radiante inherentemente conforme o normalmente conforme (véase los numerales 1.10.44 FUENTE INHERENTEMENTE CONFORME y 1.10.45 FUENTE NORMALMENTE CONFORME), en cuyos casos la evaluación está exenta de realizarse [13].

NOTA 1 – Mediante la Resolución 000754 de 2016 de la ANE, Colombia ofrece la opción de presentar un estudio denominado “cálculo simplificado”, donde se aplique lo indicado en los numerales 2.4 o 2.5 del ANEXO N°1 de dicha resolución, según corresponda; esto con el fin de declarar un emisor intencional como fuente normalmente conforme que cumple con los límites de exposición establecidos sin necesidad de realizar mediciones de CEM. Si el resultado del estudio es contrario, se deberá escoger entre instalar equipos de monitoreo continuo o realizar mediciones (alternativas descritas en los numerales I y II del artículo séptimo de la resolución, véase ANEXO A), pero el país también ofrece la posibilidad de optar por cualquiera de ellas sin necesidad de efectuar los cálculos simplificados, eso sí, manteniendo los plazos de presentación de resultados ante la ANE que estaban estipulados para estos [14].

Debido a que este proyecto trata sobre medición y verificación CEM, se tomará en adelante la información de la normatividad concerniente únicamente a estos aspectos, suponiendo que no se recurrirá al estudio de cálculo simplificado, ni a la instalación de monitoreo continuo.

NOTA 2 - En el caso de Colombia, para efectos de la Declaración de Conformidad de Emisión Radioeléctrica, quienes presten servicios o actividades de telecomunicaciones, podrán tipificar antenas para homologar las mediciones, siempre y cuando las condiciones de propagación e instalación sean equivalentes. Independientemente de la tipificación se deben medir todas las estaciones radioeléctricas que se encuentren a menos de 150 metros de centros educativos, centros geriátricos y centros de servicio médico. De la misma forma, si adyacentes a la estación radioeléctrica existen edificios cuya altura sea comparable a la altura de la fuente radiante, deberán buscarse “hot spots” en dichos edificios también [13]. La responsabilidad de los representantes legales se mantendrá en los términos establecidos en el numeral 3 del artículo 2.2.2.5.1.3 del Decreto 1078 (o véase la definición 2.13 DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD DE EMISIÓN RADIOELÉCTRICA – DCER) [18].

- **Desarrollar la evaluación de la exposición al CEM.**

Si se determina que se necesita una evaluación de la exposición al CEM debido a la presencia de transmisores intencionales, esta puede realizarse mediante medición, y debe realizarse para todos los lugares en los que las personas podrían estar expuestas [12].

- **Caracterizar la fuente.**

Para el inicio de las actividades de medición en una estación de telecomunicaciones, se recomienda tener la información técnica básica sobre los sistemas y servicios de las fuentes radiantes que se encuentren en la misma, mediante el diligenciamiento del cuadro 7.

**Cuadro 7. Información técnica básica de estaciones.**

DATOS DEL TITULAR	
Nombre del titular	
Dirección del titular	
<b>SERVICIOS DE TELECOMUNICACIONES</b>	
Clase de sistema o servicio	
<b>ESPECTRO RADIOELÉCTRICO</b>	
Banda de frecuencia (MHz)	
Tipo de modulación y ancho de banda	
<b>DATOS DE LA FUENTE RADIANTE</b>	
Nombre del sitio	
Municipio/Departamento	
Dirección	
Coordenadas geográficas (WGS84) (GGMSS)	
Tipo de elemento radiante (Marca, modelo)	
Eficiencia	
Ganancia	
Altura, Acimut e Inclinación de la antena	
Configuración del sistema (N° Caras, N° elementos por cara)	
Altura de la torre	
Patrón de Radiación (Horizontal y Vertical)	
PIRE (W)	

**Fuente:** Resolución 000754 de 2016 de la Agencia Nacional del Espectro de la República de Colombia.

En el caso de estaciones de telecomunicaciones móviles que usan sistemas sectorizados. La PIRE deberá discriminarse por sector.

Estos datos son esenciales para caracterizar los parámetros de cumplimiento de las fuentes radiantes y como datos iniciales de entrada para las simulaciones que se requieran en análisis posteriores [14].

NOTA – Como lo dispone el Decreto 195 de 2005 y a su vez el Decreto 1078 de 2016: Si la fuente radiante utiliza frecuencias menores a los 300 MHz y por lo tanto las regiones de campo cercano poseen varios metros de diámetro, se utilizarán los parámetros que el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones determine mediante resolución motivada [18]. En su momento, la Resolución 001645 cumplía dictando los siguientes parámetros, pero en la resolución que la derogó, no se evidencia manifestación al respecto.

- Clase de estación (tipo de servicio).
- Frecuencia de la portadora (frecuencia central).
- Nivel de modulación y ancho de banda.
- Localización del elemento radiante.
- Potencia nominal de la aplicación.
- Contornos de protección e intensidad de campo.
- Ubicación de la estación respecto a la torre de emisión.
- Sistema de Antena (ganancia de la antena, patrón de la antena, altura del centro de radiación, inclinación, número de portadoras presentes de igual nivel, factor de reducción por tráfico: dependiendo de los niveles de tráfico estimados respecto al máximo para la configuración bajo estudio).
- Medidas de intensidad de campo-Campo efectivo a un kilómetro, establecido por la FCC.

Estos parámetros aparecen en el software de simulación que estará disponible en la página web del Ministerio de Comunicaciones del Estado colombiano [16].

- **Señalar la gama de frecuencias de estudio.**

Cuando se mide el CEM es necesario determinar la gama de frecuencias en la que se requiere la determinación del campo basándose en las características de los emisores pertinentes.

NOTA - Cumplimiento de los teléfonos móviles: Para los teléfonos móviles u otros dispositivos radiantes que operan en la gama de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz y se utilizan contra la cabeza, el cumplimiento de los límites de seguridad ICNIRP se puede lograr mediante la aplicación de los procedimientos de medición de SAR establecidos en la norma IEC 62209-1. Además, en ciertos casos, agencias reguladoras u organismos de normalización locales o nacionales, pueden recomendar prácticas nacionales o regionales de medición basadas en dicha norma, con el fin de obtener un valor de SAR para teléfonos móviles utilizados en contra de la cabeza [12].

- **Identificar los límites de conformidad adecuados.**

En muchos casos los organismos de reglamentación o de normalización locales o nacionales publican los límites de seguridad de CEM (véase el numeral 3.5 LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN). Si no existen estos límites o si no cubren las frecuencias de interés, deben utilizarse los límites de la ICNIRP [12].

- **Establecer las regiones de campo.**

Con la finalidad de reconocer las magnitudes electromagnéticas a ser medidas y los dispositivos apropiados para hacerlo, se deben establecer las regiones de campo (zona de campo cercano reactivo, región de campo cercano reactivo radiante, zona de campo cercano radiante, zona de campo lejano radiante) en el espacio circundante de la fuente emisora. Véase el numeral 1.13 REGIONES DE CAMPO DE UN CEM-NI DE ALTA FREUCENCIA.

- **Reconocer las cantidades a medir.**

Una vez establecidas las regiones de campo, se tienen que considerar las propiedades de los CEM según su ubicación; de esta manera se logrará un reconocimiento de las cantidades que se someterán al proceso de medición. Véase el numeral 3.4 CANTIDADES QUE DEBEN MEDIRSE.

- **Ejecutar una evaluación preliminar.**

A priori debe realizarse una evaluación aproximada para hacer estimaciones del campo y delimitar temporalmente las zonas de exposición. Según sea la región, esta evaluación puede elaborarse mediante métodos de cálculo así:

- Región de campo cercano reactivo. En la región de campo reactivo, los campos eléctrico y magnético deben considerarse por separado. En ausencia de objetos distorsionantes del campo, los campos pueden calcularse utilizando fórmulas cuasi estáticas si se conoce una distribución en curso [12].
- Región de campo lejano. A continuación se presenta un método para estimar los niveles de intensidad de campo y de densidad de potencia.

Para una antena radiante simple, la densidad de potencia aproximada radiada en la dirección descrita por los ángulos  $\theta$  (complementario del ángulo de elevación) y  $\phi$  (ángulo de acimut) pueden evaluarse por la siguiente expresión:

$$S(R, \theta, \phi) = \frac{EIRP}{4\pi} \left[ f(\theta, \phi) \frac{1}{R} + \rho f(\theta', \phi') \frac{1}{R'} \right]^2 \quad (9)$$

Dónde:

- $S(R, \theta, \phi)$ : es densidad de potencia en W/m<sup>2</sup>,
- $f(\theta, \phi)$ : es el diagrama de radiación relativo de la antena (número positivo entre 0 y 1),
- $EIRP$ : es la EIRP de la antena en W u otra unidad relacionada,
- $P$ : es el valor absoluto del coeficiente de reflexión y tiene en cuenta la onda reflejada por el suelo. En algunos casos puede bloquearse la exposición a la onda reflejada, por lo que  $\rho$  debe fijarse a 0.

- $R$ : es la distancia entre el punto central de la fuente radiante y la supuesta persona expuesta, y
- $R'$ : es la distancia entre el punto central de la imagen de la fuente radiante y la supuesta persona expuesta.

A nivel próximo al suelo, los valores de las variables primas son aproximadamente iguales a las que no tienen prima, por lo que la potencia puede calcularse por:

$$S_{gl}(R, \theta, \phi) = (1 + \rho)^2 \frac{EIRP}{4\pi R^2} F(\theta, \phi) \quad (10)$$

Dónde:

- $F(\theta, \phi)$ : es la ganancia numérica relativa de la ganancia con respecto a un radiador isótropo (número positivo entre 0 y 1).

El coeficiente de reflexión  $\rho$  de una tierra de conductividad  $\sigma$ , permitividad  $\epsilon = \kappa\epsilon_0$  ( $\epsilon_0 =$  permitividad de vacío) y un ángulo rasante de incidencia  $\Psi$  es:

$$\rho = \frac{(\kappa - j\chi) \sin \Psi - \sqrt{(\kappa - j\chi)^2 - \cos^2 \Psi}}{(\kappa - j\chi) \sin \Psi + \sqrt{(\kappa - j\chi)^2 - \cos^2 \Psi}} \quad \text{polarización vertical} \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\sin \Psi - \sqrt{(\kappa - j\chi)^2 - \cos^2 \Psi}}{\sin \Psi + \sqrt{(\kappa - j\chi)^2 - \cos^2 \Psi}} \quad \text{polarización horizontal} \quad (12)$$

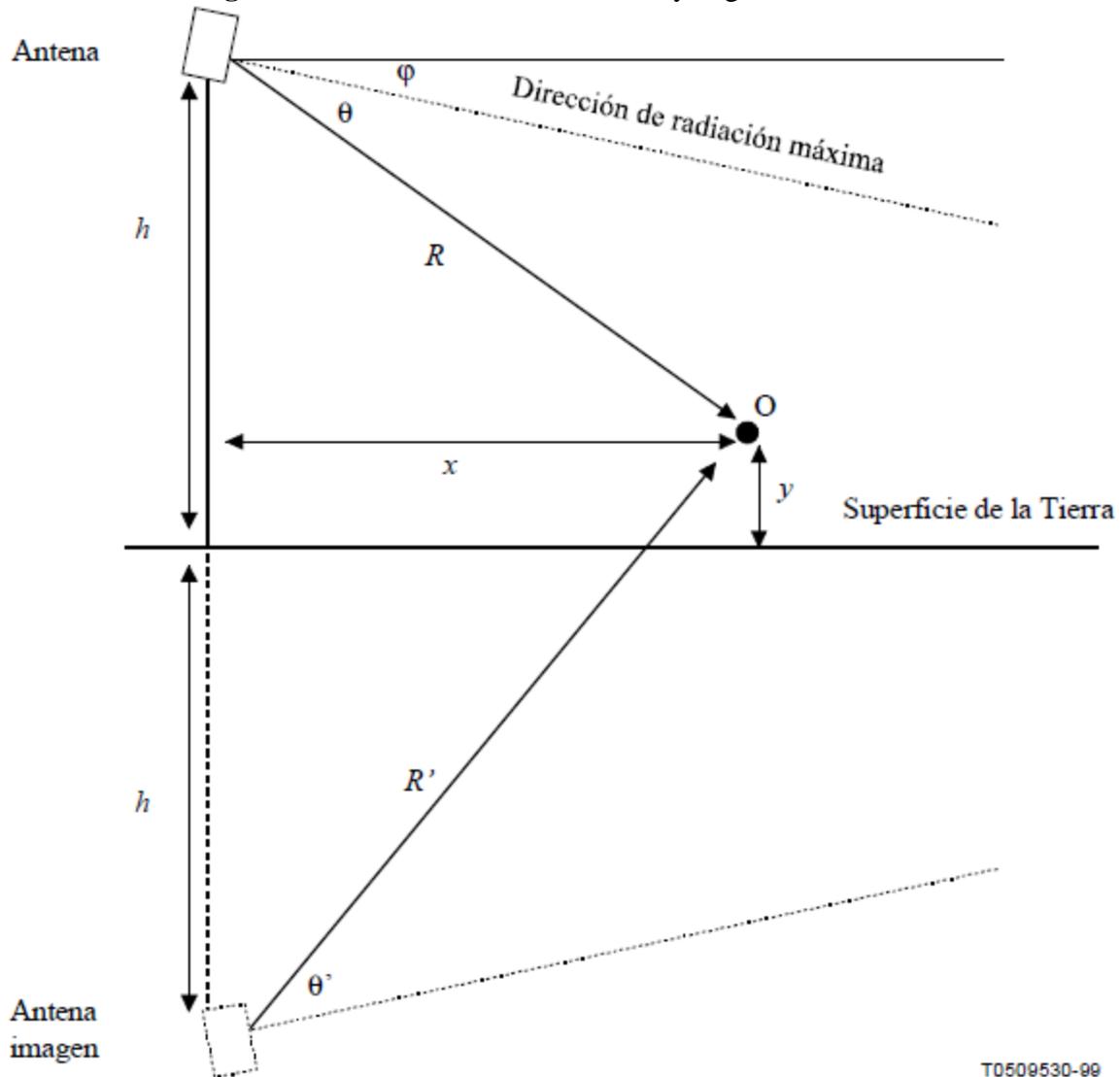
Dónde:

$$\chi = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (13)$$

En general, la onda reflejada contiene componentes en polarización vertical u horizontal que varían con el ángulo de incidencia. Sin embargo en muchas aplicaciones es suficiente considerar sólo la polarización predominante de la onda incidente al calcular el coeficiente de reflexión.

Las distancias y ángulos se definen en la figura 8. El punto O corresponde al punto en que se evalúa la exposición.

**Figura 8.** Definición de las distancias y ángulos verticales



T0509530-99

**Fuente:** Recomendación UIT-T K.52 (08/2014) “Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos”.

Para emplazamientos situados en tejados, la atenuación causada por los materiales de construcción de las paredes y el tejado puede reducir la exposición dentro de un edificio al menos en 10-20 dB.

Los campos eléctrico y magnético se calculan utilizando:

$$E = \sqrt{S\eta_0} \quad H = \sqrt{S/\eta_0} \quad (14)$$

Dónde:

$\eta_0 = 377 \Omega$  es la impedancia intrínseca del espacio libre.

Las ecuaciones anteriores son válidas para la región de campo lejano. Su utilización en la región de campo cercano puede arrojar resultados inexactos (excesivamente conservadores) [12].

NOTA – Para ejemplos de la aplicación de la evaluación preliminar en la región de campo lejano remítase al ANEXO N.

- **Delimitar temporalmente las zonas de exposición.**

Se toman los resultados obtenidos en la evaluación preliminar y se comparan con los límites máximos de exposición para dar paso a una delimitación provisional de las tres zonas de exposición a campos electromagnéticos (véase el numeral 1.14 ZONAS DE EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS).

- **Fijar una hora adecuada de medición.**

Hacerlo de tal manera que refleje en lo posible un nivel nominal de alto nivel de tráfico o de utilización [13]. Véase 3.7.1 VARIABILIDAD DE LA FUENTE y 3.7.2 VARIABILIDAD TEMPORAL.

- **Definir los trayectos y puntos a medir.**

Para levantar las mediciones, describir en lo posible dos trayectos perpendiculares en forma de cruz con respecto a la fuente radiante.

En caso de que la estación se encuentre ubicada en áreas circunvecinas de público general, se recomienda realizar un recorrido de medición por las áreas limítrofes registrando el nivel indicado por el instrumento.

En cada estación se deben analizar las características del emplazamiento para ubicar los puntos de medición más estratégicos tales como: salón de equipos, caseta del operador, puntos cercanos a la torre de la antena y área de público general, en caso que amerite por su cercanía.

Para el caso de estaciones que se encuentren a menos de 150 metros (distancia medida desde el punto medio del sistema irradiante de la estación objeto de estudio) de sitios o áreas tales como centros educativos, centros geriátricos y hospitales, deberán realizarse mediciones en estas áreas especiales siempre y cuando el lóbulo principal de la antena esté dirigido hacia ellas. Igualmente, se recomienda ubicar puntos de medición adicionales en los casos en donde exista concentración poblacional.

Se recomienda que en los puntos de medición exista visibilidad con los sistemas irradiantes de la estación radioeléctrica objeto de la medición.

En caso de que las mediciones se realicen en un espacio cerrado, como por ejemplo, al interior de un conjunto residencial, escuela, hospital u otro espacio cerrado; se distribuirán los puntos de medición de manera uniforme de manera que se cubra toda el área expuesta a la fuente radiante.

NOTA 1 – La resolución 000754 de la ANE, recomienda realizar 20 mediciones en las direcciones donde se registren los niveles máximos de intensidad de campo, y que en dichas direcciones, se realicen cinco mediciones por cuadrante o sector siempre y cuando se tenga acceso [14].

NOTA 2 - El diligenciamiento del registro de mediciones demanda las coordenadas geográficas (WGS-84) respectivas a cada punto de medición.

- **Realización de mediciones en banda ancha.**

Aquí finaliza la Fase preliminar y comienza la Fase 1. En esta fase se realiza una medición de CEM en banda ancha, la cual se utiliza para obtener el nivel de campos electromagnéticos total, independientemente del número de fuentes existentes, en forma de intensidad de campo eléctrico en la banda de frecuencias de interés, promediada durante un cierto período. Si se realizan mediciones en campo cercano, será necesario realizar la medición del nivel de radiación total de la intensidad de campo magnético (H).

Si una vez realizada la medición, el resultado es menor a los "niveles de decisión" se considera que el sistema en evaluación cumple con los límites de exposición de campos electromagnéticos. Si en el emplazamiento de medición hay varias estaciones de radiocomunicaciones, se tomará como referencia el nivel de decisión más estricto de acuerdo con las frecuencias de operación de estas estaciones.

En caso de que los resultados de medición superen los niveles de decisión o el procedimiento de Fase 1 no pueda ser aplicado, se debe continuar con la Fase 2 de mediciones.

A continuación se presentan consideraciones generales que es necesario tener en cuenta para la realización de las mediciones:

- Iniciar la toma de medidas con la sonda de campo eléctrico a una distancia que presente una lectura significativa, recorriendo los trayectos dispuestos con antelación, con la sonda de medición ubicada a 1,50 m de altura.
- En caso de que los valores medidos superen en los recorridos los límites de exposición de la norma K 52. se realizarán mediciones tomadas en RMS de promediación de 6 minutos, con el fin de estudiar su estabilidad en el tiempo.
- Con la información tomada, se podrán realizar gráficas de toma de medidas, indicando los niveles de campo normalizados respecto a los límites establecidos de exposición [13].

Registre los valores asociados al campo que fueron medidos con el equipo de banda ancha, junto con el nivel de exposición porcentual, en la tabla dispuesta para tal fin en la hoja N° 47 de la Resolución 000754 de 2016 de la ANE (véase ANEXO A).

En cuanto a los equipos de medición utilizados, deben cumplir mínimo con las características indicadas a continuación:

- La banda de operación del equipo de medición debe ser mínimo de 500 kHz a 4 GHz. Se aceptarán equipos de medición que cubran el rango de frecuencias de 500 kHz a 3 GHz, hasta cuando el MinTIC realice la asignación de la banda de 3.5 GHz proyectada dentro de la planeación de espectro, momento en el cual deberán empezar a utilizar equipos de medición que cubran mínimo hasta 4 GHz.
- Para el caso de mediciones con sondas de campo eléctrico, la banda de frecuencias debe ser mínimo de 500 kHz a 4 GHz. Se aceptarán mediciones de campos electromagnéticos de banda ancha que cubran el rango de frecuencias de 500 kHz a 3 GHz, hasta cuando el MinTIC realice la asignación de la banda de 3.5 GHz proyectada dentro de la planeación de espectro, momento en el cual deberán empezar a utilizar equipos de medición que cubran mínimo hasta 4 GHz.
- Para el caso de mediciones con sondas de campo magnético, el rango de frecuencias de las mismas podrá ser menor siempre y cuando se garantice que con varias sondas se cubre la banda de frecuencias de 500 kHz a 4 GHz o que se utilizará para medir campo cercano, caso en el cual las sondas deberán cubrir mínimo la banda de frecuencias de interés.
- Se podrán utilizar sondas ponderadas, las cuales deben estar referenciadas a las curvas definidas por el ICNIRP.
- Proporcionar el valor RMS (valor cuadrático medio) de la intensidad de campo eléctrico y magnético.
- Se recomienda el uso de sondas y antenas con respuesta isotrópica. Antenas de un solo eje (ejemplo: dipolo) y antenas directivas pueden ser usadas siempre y cuando se realice el post-procesamiento de los datos para obtener la intensidad de campo total (equivalente a la medida con una antena o sonda isotrópica).
- Para el caso de mediciones de campo eléctrico, el rango de medición de intensidad de campo eléctrico RMS mínimo es 1 a 153 V/m.
- Para el caso de mediciones de campo magnético, el rango de medición de intensidad de campo magnético RMS mínimo es 0.03 a 0.8 A/m [14].

- **Realización de mediciones en banda angosta.**

Aquí finaliza la Fase 1 y comienza la Fase 2. Este método se utiliza para poder evaluar la contribución individual de cada uno de los sistemas presentes en un emplazamiento.

La evaluación selectiva de frecuencias se debe aplicar para este caso debido a que es necesario conocer el nivel de radiación no ionizante para cada frecuencia dentro de la banda explorada.

La mejor forma de realizar una evaluación selectiva con la frecuencia es mediante un receptor o un analizador de espectro alimentado con una batería ligera. Puesto que en ocasiones los receptores o analizadores deben funcionar en presencia de campos electromagnéticos intensos, para que los resultados sean fiables y repetibles es fundamental disponer de un buen margen dinámico y de buenas prestaciones en términos de intermodulación.

- Se recomienda el uso de antenas isotrópicas de 3 ejes.
- Se podrán utilizar antenas con respuesta de un solo eje y direccionales. Sin embargo, los resultados se deberán procesar para obtener la promediación de los 3 ejes.
- Las sondas o antenas de medición serán las encargadas de detectar el campo eléctrico o magnético, por lo cual la zona de captación de estas debe estar suficientemente separada de la unidad de lectura (Unidad Principal) a través de una conexión de alta impedancia y materiales de baja permitividad que reduzcan al mínimo la interacción entre el campo y los circuitos de conexión.
- El equipo deberá capturar las coordenadas geográficas del sitio donde se está midiendo y relacionarlas con los datos de campos detectados.

La distancia mínima entre la antena y cualquier obstáculo (por ejemplo, una pared o una elevación del terreno) en la dirección del transmisor debe ser de al menos  $1 \lambda$ . Las mediciones en frecuencias inferiores a 600 MHz realizadas a una altura de 50 cm por encima del nivel del suelo. El personal debe mantenerse alejado de la antena durante las mediciones, y las antenas deben montarse sobre trípodes no conductivos para no perturbar el campo electromagnético.

El software de control del receptor/analizador es fundamental debido a la gran cantidad de datos que deben recopilarse. El software debe permitir corregir factores de antena y pérdidas del cable en el rango de frecuencias de interés. Es recomendable utilizar software de automatización que permita diversos ajustes de conformidad con los servicios sujetos a comprobación técnica.

Se procede a realizar las mediciones en banda angosta, a fin de evaluar la procedencia de las contribuciones para el campo medido. Por lo tanto, ubicando el equipo en el punto detectado, y constituido por analizador de espectro y antena calibrada en el rango de frecuencia adecuado, se realizan los barridos de medición con el analizador de espectro (empleando el promediado espacial especificado en el numeral 3.7.6), determinando los niveles más importantes para ser registrados en el computador portátil y posteriormente ser objeto de análisis [14]. Para los tiempos de promediación, deberán tenerse en cuenta las notas 2 y 5 del artículo 4º del Decreto 195 de 2005 (especificados en el numeral 3.7.3 PROMEDIO TEMPORAL) [16].

Deberá realizarse la medición de la fuente de interés así como de otras fuentes de RF cercanas que puedan estar contribuyendo significativamente con el valor obtenido.

Si las bandas de operación de las fuentes radioeléctricas cercanas no se conocen, pueden ser deducidas mediante la evaluación de los picos significativos que se visualicen utilizando un analizador de espectro.

Si el resultado producto de la verificación realizada es menor que los niveles de referencia y la Relación de Exposición Total TER (véase el numeral 2.8.6) es menor o igual a la unidad se considera que el sistema objeto de verificación cumple y por tanto no serán necesarios más estudios.

En caso contrario, deberán informar inmediatamente a la ANE y aplicar técnicas de mitigación siguiendo las descritas en la Recomendación UIT-T K.70, y el procedimiento indicado en el numeral 2.6.1.4 del ANEXO N°1 de la Resolución 000754 (o bien, remítase al numeral 3.7.8 SUPERACIÓN DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN, al procedimiento de ayuda para definir el porcentaje de mitigación con varias fuentes radiantes). Así mismo, deberán apagar inmediatamente la fuente de emisión hasta que se apliquen las técnicas de mitigación que garanticen el cumplimiento de los niveles de exposición a campos electromagnéticos [14].

Registre los valores asociados al campo que fueron medidos con el equipo de banda angosta, junto con el nivel normalizado de exposición (valor máximo de intensidad de campo medido/valor de referencia límite de intensidad de campo a esa frecuencia), en la tabla dispuesta en la hoja N° 48 de la Resolución 000754 de 2016 de la ANE (véase ANEXO A).

En cuanto a los equipos de medición utilizados, deben cumplir mínimo con las características indicadas a continuación:

- La banda de operación del equipo de medición debe ser mínimo de 500 kHz a 4 GHz. Se aceptarán equipos de medición que cubran el rango de frecuencias de 500 kHz a 3 GHz, hasta cuando el MinTIC realice la asignación de la banda de 3.5 GHz proyectada dentro de la planeación de espectro, momento en el cual deberán empezar a utilizar equipos de medición que cubran mínimo hasta 4 GHz.
- Proporcionar el valor RMS (valor cuadrático medio) de la intensidad de campo eléctrico y magnético.
- Se recomienda el uso de sondas y antenas con respuesta isotrópica. Antenas de un solo eje (ejemplo: dipolo) y antenas directivas pueden ser usadas siempre y cuando se realice el post-procesamiento de los datos para obtener la intensidad de campo total (equivalente a la medida con una antena o sonda isotrópica).
- Se podrán utilizar analizadores de espectro
- Para el caso de mediciones de campos electromagnéticos donde se requiera evaluar la contribución de estaciones del servicio de telecomunicaciones móviles deberá contarse con equipos que sean capaces de medir o calcular el nivel total de campo electromagnético a máximo tráfico en las bandas de frecuencias usadas para estos servicios, de acuerdo con los procedimientos establecidos en la Recomendación UIT-T K 100 [14].

NOTA – El dispositivo de medición a utilizar en este proyecto es el medidor de banda ancha NBM 520 de la marca Narda (Ver figura 5).

El NBM 520 es un dispositivo portátil, pequeño y ligero, capaz de medir directamente la intensidad del campo electromagnético no ionizante en banda ancha con gran precisión en las proximidades de transmisores y equipos industriales de alta frecuencia. Este equipo puede operar como extensor de sonda y permite llegar a lugares de difícil acceso. El equipo dispone de antenas receptoras o sondas que están en capacidad de cubrir un amplio rango de frecuencias.

EL NBM 520 permite realizar mediciones tanto instantáneas como en intervalos de tiempos similares a los sugeridos o que se puedan configurar, además de modo de promediación espacial, de manera que permita visualizar los resultados y realizar registros de los mismos para análisis.

Las especificaciones generales del equipo son las siguientes:

- Disponible con sondas isotrópicas desde 100 KHZ hasta 60 GHZ
- Interfaz plug-and-play con detección automática de los parámetros de la sonda.

- Ajuste de cero automático
- Pequeño y ligero
- Sencillo manejo, solo cuatro teclas
- Control remoto a través del enlace óptico
- Interoperatividad con el NBM-550 (controlador)

Consulte el datasheet (Fuente: [21]) de este equipo y su manual (Fuente: [22]) en los anexos D y G respectivamente.

- **Aplicar medidas de reducción o evitación.**

Si la evaluación de la exposición al CEM indica que pueden sobrepasarse los límites de exposición pertinentes en zonas en las que puede haber presentes personas, deben aplicarse medidas de reducción o de evitación [12]. Véase 3.7.8 SUPERACIÓN DE LOS LÍMITES MÁXIMOS DE EXPOSICIÓN.

- **Verificar de nuevo el nivel de exposición porcentual.**

Tras el empleo de las técnicas de mitigación, se debe verificar que el nivel de exposición acumulativa no supera el 100%.

- **Delimitar oficialmente las zonas de exposición.**

Atendiendo los resultados obtenidos en las mediciones, se procede a delimitar de manera oficial, tanto físicamente (por letreros o cualquier otro medio visible), como en un plano del emplazamiento, las zonas de exposición con respecto al sistema radiante objeto de estudio.

- **Completar los formatos de entrega.**

Se debe terminar de diligenciar los formatos de entrega de información necesarios para el cumplimiento de los lineamientos establecidos por la ley colombiana que se encuentran en el numeral 3 del ANEXO N°2 de la Resolución de la ANE 000754 de 2016, tales como la DCER, entre otros. Véase ANEXO A.

- **Colocación de avisos visibles.**

Se deben colocar avisos visibles en las estaciones radioeléctricas, los cuales deberán indicar si las antenas instaladas cumplen con los límites máximos permitidos de conformidad con lo definido en el capítulo 5 del Título 2 de la parte 2 del libro 2 del Decreto 1078 de 2015 o el que lo adicione, complemente, modifique o sustituya.

Las condiciones o diseño que se deben tener en cuenta en estos avisos se definen en el numeral 4 del ANEXO N° 2 de la Resolución 000754 (véase ANEXO A de este trabajo).

NOTA 1 – Este ítem aplica para todas las estaciones en Colombia, con excepción de aquellas consideradas como fuentes inherentemente conformes, las picoceldas y microceldas, y aquellas en donde se apliquen técnicas de mimetización, así como las instaladas en ambientes interiores (“indoor”).

NOTA 2 - En caso de compartición de infraestructura en el país, se podrán realizar acuerdos para la instalación de los avisos. Los plazos para la instalación del aviso empezarán a correr desde el momento en que se presente el último cálculo simplificado, es decir, cuando la ANE haya recibido la totalidad de cálculos de las estaciones que se encuentran co-localizadas en el sitio [14].

En este trabajo se presentan los protocolos de medición de estaciones base de telefonía móvil y medición de teléfonos móviles y su implementación (Ver Anexo H y Anexo I).

### 3.9 IMPLEMENTACIÓN

Teniendo como base el protocolo de medición de campos electromagnéticos no ionizantes de alta frecuencia (CEM-NI) (Ver ANEXO H), se llevó a cabo el desarrollo de la implementación de dicho protocolo en un espacio residencial ubicado en la ciudad de Pereira, el cual cuenta con la presencia de dos estaciones de radiocomunicaciones ubicadas a menos de 50 metros del predio. Para ello, se realizó una medición por inmisión en banda ancha, en donde se presentó el aporte de múltiples fuentes frecuenciales; por lo que se llevó a cabo la verificación de la intensidad de campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$  con el medidor de CEM-NI de banda ancha NBM 520 de la marca Narda y las sondas apropiadas para la medición de cada una de las magnitudes (sonda de campo eléctrico y sonda de campo magnético respectivamente), teniendo en cuenta que las mediciones se realizaron en una región de campo cercano.

La medición de la intensidad de campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$ , fue antecedida por la identificación de los puntos que presentaron un mayor aporte de información para la realización de la verificación de los niveles de intensidad de CEM. Luego de identificados estos puntos, se seleccionó la sonda a utilizar según la magnitud a medir, se ajustó la frecuencia en el software del medidor de banda ancha NBM 520, correspondiente a la frecuencia de operación más representativa de las antenas de radiocomunicaciones presentes, que para este caso fue de 105,2 MHz. Posterior a este ajuste, se llevó a cabo la medición de la intensidad de campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$  en un total de 11 puntos (8 puntos en la parte externa del predio y 3 puntos distribuidos al interior de la construcción), para cada punto se obtuvieron un total de 240 datos que corresponden a un tiempo de muestreo del instrumento de 1 segundo y 2 mediciones de promediación de una duración de 2 minutos. Con la obtención de la medición de intensidad de campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$  fue posible realizar los cálculos para determinar la densidad de potencia  $S$ , posterior a esto, se verificó si dichos niveles de intensidad se encontraron dentro de los límites de referencia para la exposición, recomendados por la ICNIRP para el público en general. (Ver ANEXO I).

NOTA – Se debe tener en cuenta que en los formatos para el reporte de mediciones de banda ancha, consignados en la resolución 754 de 2016 de la ANE, no se encuentra el campo para la medición de densidad de potencia ni el nivel de exposición porcentual de la misma, sin embargo, si se requiere asentar la información concerniente a dicha magnitud, queda abierto para su registro.

## 4 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente proyecto hace parte de la línea de trabajos del grupo de Electrofisiología de la Universidad Tecnológica de Pereira, dedicados a la verificación de los niveles de intensidad de campos electromagnéticos no ionizantes; tiene su parte en complementar el trabajo titulado “Verificación y Certificación de Niveles de Intensidad de CEM-NI en el rango de telefonía celular con base en la norma UIT T-K.52” teniendo como fundamento la resolución 754 de 2016 de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) y a su vez, la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025 (“Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los protocolos diseñados e implementados para el desarrollo del presente proyecto, son producto de realizar un profundo análisis de las normas nacionales e internacionales características de las radiaciones de CEM-NI de alta frecuencia. Dentro de éstas se encuentran recomendaciones dispuestas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y la Comisión Internacional de Protección de Radiación No Ionizante (ICNIRP), adoptadas por la ANE, las cuales están relacionadas directamente con establecer los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, además, se han tenido en cuenta los ambientes que involucran alta exposición a antenas de telecomunicaciones, en los cuales se ha realizado la implementación de los protocolos formulados, para generar un estudio piloto que respalde este proyecto.

El protocolo de medición de CEM-NI de alta frecuencia (Ver ANEXO H), fue implementado en un predio ubicado en zona residencial de la ciudad de Pereira, el cual cuenta, en su área adyacente, con la presencia de dos estaciones base de radiocomunicaciones, esto hizo apremiante realizar dicha implementación en este espacio.

Nota – Con la medición preliminar, medición por inmisión de banda ancha, se verificó que las mediciones se encuentran por debajo de los límites de exposición, por lo que no se hace necesario tener acceso a los datos técnicos de las antenas, ya que no se procede a realizar mediciones de banda angosta, de lo contrario sí requeriría dicha información.

### 4.1 REPORTE DE LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Este trabajo cuenta con el reporte de evaluación y expresión de la incertidumbre de medición, para la intensidad de campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$  (Ver ANEXO L), teniendo como base el PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN (Ver ANEXO C). En dicho reporte se presenta la estimación de incertidumbres para medidas directas (campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$ ); sin embargo, queda abierta la posibilidad de poder realizar la estimación de la incertidumbre de medidas indirectas, como lo es la densidad de potencia  $S$ , tratándose de una región de campo cercano.

Para el reporte de la estimación de incertidumbre para medidas indirectas se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Especificar el mensurado  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , donde  $Y$  es el mensurado,  $f$  es la función que relaciona la magnitud medida con los factores que la afectan y  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son las magnitudes de entrada.
- Estimar la incertidumbre combinada  $u_c$  y los grados de libertad  $\nu_{eff}$  de todas las magnitudes directas que intervienen en el cálculo de la magnitud de interés.
- Calcular los coeficientes de sensibilidad  $C_i = \frac{\partial f}{\partial X_i}$ .
- Determinar si las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_n$  están correlacionadas.
- Calcular la incertidumbre combinada  $u_c(Y)$ , teniendo en cuenta que para medidas indirectas no correlacionadas  $u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(X_i)}$  y para medidas indirectas correlacionadas  $u_c(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i c_j u(X_i, X_j)}$ , donde  $C_i$  y  $C_j$  son los coeficientes de sensibilidad,  $u(X_i)$  es la incertidumbre combinada de cada una de las magnitudes de entrada y  $u_i(X_i, X_j)$  es la covarianza entre  $X_i$  y  $X_j$ .
- Calcular la incertidumbre expandida  $U = k \cdot u_c(Y)$ , donde  $k$  es el factor de cobertura y  $u_c(Y)$  es la incertidumbre combinada.

El reporte de estimación de la incertidumbre para dichas medidas, se debe consignar en el cuadro titulado CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN PARA ANTENAS DE TELEFONÍA MÓVIL (MEDIDAS INDIRECTAS) contenido en el ANEXO C.

## 4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE MEDICIÓN CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS

Los resultados de medición obtenidos en la implementación del protocolo de medición de estaciones base de telefonía móvil (Ver ANEXO I) se expresan con su correspondiente incertidumbre en el reporte de evaluación y expresión de la incertidumbre de medición (Ver ANEXO L), por lo que al analizar estos datos y compararlos con los límites máximos permitidos, se determinó que los valores más altos registrados fueron de  $(3,2204 \pm 0,0308)$  V/m para Campo Eléctrico ( $E$ ), de  $(0,0239 \pm 0,0003)$  A/m para Campo Magnético ( $H$ ) y  $0,0695$  W/m<sup>2</sup> para Densidad de Potencia ( $S$ ), estos resultados corresponden a valores de exposición porcentual de  $(11,5014 \pm 0,1100)\%$ ,  $(32,7397 \pm 0,4110)\%$  y  $3,4750$  % respectivamente, para los límites de referencia para la exposición recomendados por la ICNIRP para el público en general a una frecuencia de 105,2 MHz, siendo esta la frecuencia de operación de la antena emisora con el límite máximo de exposición más estricto. Los niveles de intensidad encontrados están muy por debajo de los límites máximos permitidos y están también por debajo de los niveles de decisión presentados en la resolución 754 de 2016 de la ANE (para este caso de 9,8249 V/m o 24,7291%), por lo que bajo dicha normatividad no sería necesario realizar mediciones de banda angosta para analizar la contribución individual de cada componente espectral en los niveles de intensidad encontrados en el predio de estudio.

## 5 CONCLUSIONES, APORTES Y RECOMENDACIONES

- El análisis de las normas nacionales e internacionales relacionadas con la exposición de las personas a CEM-NI, permitieron el diseño de protocolos de medición para llevar a cabo el control y la regulación de los niveles de exposición de dicha radiación, teniendo en cuenta los ambientes que se encuentran altamente expuestos a antenas de radiocomunicaciones como lo son las de telefonía celular. Con esto se logra realizar un estudio piloto que favorece la acreditación de un laboratorio de metrología electromagnética dispuesto por el grupo Electrofisiología de la Universidad Tecnológica de Pereira, en la cual se tiene en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025 (“Requisitos generales para la competencia para los laboratorios de calibración y ensayos”).
- Con el desarrollo del presente trabajo, se logró llevar a cabo la correcta implementación de los protocolos diseñados para la verificación de los niveles de intensidad de campos electromagnéticos no ionizantes (CEM-NI) en una zona residencial, la cual contó con una alta cercanía a dos estaciones de radiocomunicaciones, con esto, se comprobó que dichos niveles se encuentran muy por debajo de los límites de referencia establecidos por las normativas nacionales e internacionales, por lo cual el sistema en evaluación cumple con los límites de exposición de CEM.
- Con este trabajo se verifica la necesidad de que en Colombia hayan entidades acreditadas para realizar la verificación y certificación de los niveles de exposición a CEM-NI, que controlen y regulen dicha exposición del público en general y de operarios que realicen actividades en la zona ocupacional, teniendo en cuenta, no solo las normas que reglamentan los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, sino también las normas para llevar a cabo procedimientos que posean un sistema de gestión y calidad que proporcionen resultados técnicamente válidos.
- El diseño de los protocolos de medición de CEM-NI y su implementación, realizan un aporte al grupo de investigación de Electrofisiología, fortaleciendo así, el proyecto de dar apertura a un laboratorio de medición para el control de los niveles de exposición a CEM-NI de alta frecuencia teniendo como fundamento la resolución 754 de 2016 de la ANE.
- La Comisión Internacional de Protección de Radiación no Ionizante (ICNIRP), recientemente ha publicado un borrador para actualizar el apartado de radiofrecuencia de las “Directrices para la Limitación a la Exposición de los campos Eléctrico, Magnético y Electromagnético Variables con el Tiempo (hasta 300 GHz) de 1998”; para el desarrollo de futuros proyectos, es pertinente tener en cuenta dicha actualización ya que con los avances en los conocimientos científicos dichas actualizaciones se llevarán a cabo y dejarán de lado las pautas más antiguas.

- Cada año se debe realizar una revisión minuciosa de las recomendaciones internacionales y normas nacionales, ya que frecuentemente se realizan actualizaciones sobre estas, lo cual hace que los protocolos que tienen como base dichas recomendaciones, queden desactualizados.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)," 1998. [En línea]. Disponible en: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdlesp.pdf>. [Último acceso: 20 septiembre 2018].
- [2] Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T), "Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos". Recomendación UIT-T K.52. 3 ed. 2014. 46 p.
- [3] G. Aponte, A. Escobar, C. Pinedo y G. Arizabaleta, «Medición de Campos Electromagnéticos en la Ciudad de Cali, Colombia,» Información Tecnológica, vol. 18, n° 3, pp. 39-47, 2007.
- [4] Organización Mundial de la Salud (OMS), «Nota descriptiva N° 205,» Noviembre 1998. [En línea]. Disponible en: [http://www.etsist.upm.es/estaticos/catedra-coitt/web\\_salud\\_medioamb/seminario\\_cancer/documentacion/OMS1.DOC](http://www.etsist.upm.es/estaticos/catedra-coitt/web_salud_medioamb/seminario_cancer/documentacion/OMS1.DOC). [Último acceso: 20 septiembre 2016].
- [5] E. Alonso Fustel, R. García Vázquez y C. Onaindia Olalde, «Campos electromagnéticos y efectos en salud,» Subdirección De Salud Pública De Biskaia, p. 70, 2011.
- [6] LLAMOSA, Luis; NIETO, Natalia y VILLADA, Julián. Fundamentos para el sistema de gestión de un laboratorio de metrología de campos electromagnéticos no ionizantes. Pereira, Comité Editorial de la UTP, 2011. 168 p. I.S.B.N. 978-958-722-130-5.
- [7] J. I. Torres y L. H. Alzate, «Efectos de las radiaciones electromagnéticas no ionizantes en sistemas biológicos,» 12 Noviembre 2006. [En línea]. Available: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistamedica/article/view/985/4159>. [Último acceso: 24 Septiembre 2018].
- [8] Wikitel, «Radiaciones no ionizantes,» [En línea]. Disponible en: [http://wikitel.info/wiki/Radiaciones\\_no\\_ionizantes](http://wikitel.info/wiki/Radiaciones_no_ionizantes). [Último acceso: 24 septiembre 2018].
- [9] [http://www.mincotur.gob.es/telecomunicaciones/inspeccion-telecomunicaciones/niveles-exposicion/DocumentacionOtros/2001\\_SANIDAD\\_EfectosSaludExposicionCEM\\_InformeTecnico.pdf](http://www.mincotur.gob.es/telecomunicaciones/inspeccion-telecomunicaciones/niveles-exposicion/DocumentacionOtros/2001_SANIDAD_EfectosSaludExposicionCEM_InformeTecnico.pdf).
- [10] S. Garcia, «La salud humana y los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja (CEM - FEM),» 2005.
- [11] L. E. Llamosa Rincón, M. I. Pérez Camacho y J. A. Cano Uribe, «Telefonía celular medio ambiente y salud pública – Análisis termografico y electromagnético,» Pereira, 2013.

- [12] Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T), Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos.
- [13] COLOMBIA. MINISTERIO DE COMUNICACIONES, «Decreto 195 (31, enero, 2005). Por el cual se adopta límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se adecuan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas y se dictan otras disposiciones,» Bogotá, 2005.
- [14] AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO (ANE), Resolución 000754 (20, octubre, 2016). Por la cual se reglamentan las condiciones que deben cumplir las estaciones radioeléctricas, con el objeto de controlar los niveles de exposición de las personas a los campos electromagnéticos y se dictan disposiciones relacionados con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones, en virtud de lo establecido en los artículos 43 y 193 de la Ley 1753 de 2015, Bogotá D.C., 2016, p. 49.
- [15] J. Fernández Hernández, «Cálculo simplificado del valor medio y eficaz de una forma de onda,» octubre 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-486-Calculo-simplificado-medio-eficaz-forma-onda.aspx>. [Último acceso: 24 septiembre 2018].
- [16] COLOMBIA. MINISTERIO DE COMUNICACIONES, «Resolución 001645 (29, julio, 2005). Por la cual se Reglamenta el Decreto 195 de 2005,» Bogotá D.C., 2005.
- [17] Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T), Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas. Recomendación UIT-T K.61, 2 ed., 2008, p. 30.
- [18] COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES (MINTIC), «Decreto 1078 (26, mayo, 2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones,» Bogotá D.C., 2015.
- [19] Comité Conjunto de Guías en Metrología JCGM, Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida GUM, Centro Español de Metrología, 2008.
- [20] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), Norma Técnica Colombiana GTC 51: Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones, 1997.
- [21] Narda - Safety Test Solutions, «Datasheet NBM 520,» [En línea]. Available: [http://www.narda-sts.us/pdf\\_files/DataSheets/NBM520\\_DataSheet.pdf](http://www.narda-sts.us/pdf_files/DataSheets/NBM520_DataSheet.pdf). [Último acceso: 14 Marzo 2019].
- [22] Narda - Safety Test Solutions GmbH, «NBM-520 Narda Broadband Field Meter - Operating Manual,» 2009. [En línea]. Available: [http://www.narda-sts.us/pdf\\_files/OperatingManuals/NBM-520\\_Manual.pdf](http://www.narda-sts.us/pdf_files/OperatingManuals/NBM-520_Manual.pdf). [Último acceso: 14 Marzo 2019].

## 7 ANEXOS

- ANEXO A - RESOLUCIÓN 000754 DE 2016 DE LA ANE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA
- ANEXO B - CÁLCULO DEL NIVEL DE EXPOSICIÓN PORCENTUAL (EXPOSICIÓN SIMULTÁNEA A MÚLTIPLES FUENTES)
- ANEXO C - PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN
- ANEXO D - DATASHEET MEDIDOR DE CEM-NI DE BANDA ANCHA NBM 520 NARDA SAFETY TEST SOLUTIONS GmbH
- ANEXO E - DATASHEET SONDA DE CAMPO ELÉCTRICO\_EF0391
- ANEXO F - DATASHEET SONDA DE CAMPO MAGNÉTICO\_HF0191
- ANEXO G - MANUAL DE OPERACIÓN MEDIDOR DE CEM-NI DE BANDA ANCHA NBM 520 NARDA SAFETY TEST SOLUTIONS GmbH
- ANEXO H - PROTOCOLO DE MEDICIÓN DE CEM-NI de ALTA FRECUENCIA
- ANEXO I - IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOCOLO DE MEDICIÓN DE ESTACIONES BASE DE TELEFONÍA MÓVIL
- ANEXO J - CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO DE BANDA ANCHA NBM 520
- ANEXO K - SUB-BANDAS DE FRECUENCIA DE OPERADORES MÓVILES EN COLOMBIA
- ANEXO L - REPORTE DE EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN
- ANEXO M - EJEMPLO DE PROCEDIMIENTO DE EXTRAPOLACIÓN
- ANEXO N - EJEMPLOS DE EVALUACIÓN SIMPLE DE LA EXPOSICIÓN AL CEM