



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Estudio y Verificación de los Niveles de Referencia de  
Campos Electromagnéticos Generados por Antenas en  
las Bandas de Telefonía Móvil, Banda FM y Banda de  
TV en Bogotá**

**Henry Molina Gómez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Bogotá D. C., Colombia  
2018



# Estudio y Verificación de los Niveles de Referencia de Campos Electromagnéticos Generados por Antenas en las Bandas de Telefonía Móvil, Banda FM y Banda de TV en Bogotá

**Henry Molina Gómez**

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica**

Director:

Ing. Javier Leonardo Araque Quijano PhD  
Profesor Asociado DIEE, Universidad Nacional de Colombia

Línea de Investigación:

Protección de Personas a Campos Electromagnéticos

Grupo de Investigación:

Electrónica de Alta Frecuencia y Telecomunicaciones

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá D. C., Colombia

2018



## Dedicatoria

A Johannita por su apoyo incondicional.

A mi núcleo familiar quienes desde sus capacidades siempre aportaron lo que estuvo a su alcance para alcanzar esta meta.

A todas aquellas personas que algún aporte hicieron a esta noble tarea.



# Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente a mi Director, el ingeniero Javier Leonardo Araque Quijano profesor de la Universidad Nacional, quien me brindó todo su apoyo durante el desarrollo del Trabajo Final de Maestría, y me guió para alcanzar este objetivo.

A Juan Domingo Baena Doello, profesor adscrito al Departamento de Física - Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, quien tiene a cargo el analizador de redes y siempre lo facilitó oportunamente en el ejercicio de este trabajo académico.

A la Universidad Nacional de Colombia que ha sido mi alma mater, en donde he aprendido lo valioso de poder contribuir a una mejor sociedad, a ella le debo gran parte de mis logros.

A los ingenieros Óscar Duarte y Antonio Garzón, quienes creyeron y recomendaron la realización de los estudios de Maestría.

A los habitantes de los barrios La Esmeralda, Nicolás de Federmán, Chapinero y Chicó que permitieron el ingreso a sus viviendas para la realización de las mediciones y a los funcionarios del Laboratorio del Grupo de Investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones -CMUN que permitieron el ingreso para la realización de pruebas y mediciones.

A Johannita, mi núcleo familiar y a Dios, como guía espiritual, por el continuo apoyo en la realización de este trabajo a pesar de las diferentes adversidades.

A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en el desarrollo y finalización de este trabajo.



## Resumen

En este trabajo se presenta el estudio y verificación de los niveles de referencia de campos electromagnéticos para algunos barrios en la ciudad de Bogotá, partiendo de mediciones de campo eléctrico en sitios comunes de permanencia del público general, particularmente de las radiaciones emitidas por antenas de telecomunicaciones en las bandas de telefonía móvil, banda FM y banda de TV, con base en las recomendaciones de la Comisión Internacional sobre Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) y también en las metodologías de algunas de las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

En el desarrollo del trabajo se empleó equipo de medición de propiedad de la Universidad Nacional, Analizador de Espectro y Antena Isotrópica, accesorios creados artesanalmente para ayudar en la realización de los montajes requeridos para las mediciones y equipo portátil de cómputo para la obtención, almacenamiento y procesamiento de la información. En tal sentido, fue también necesario la creación de un aplicativo desarrollado en el ambiente de MATLAB® para interactuar con el analizador de espectro. Los resultados obtenidos indican conformidad de los puntos objeto de investigación con las recomendaciones de la ICNIRP.

**Palabras clave:** campo eléctrico, ICNIRP, telefonía móvil, radiación no ionizante, niveles de referencia, analizador de espectro, antena, medición.

## Abstract

This work presents the study and verification of the reference levels of electromagnetic fields for some neighborhoods in the city of Bogotá, based on measurements of electric field in common places of permanence of the general public, particularly of the radiations emitted by antennas of telecommunications in the bands of mobile telephony, FM band and TV band, based on the recommendations of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) and also the methodologies of some of the recommendations of the International Telecommunication Union (ITU).

In the development of the work it was used measurement equipment owned by the National University, Spectrum Analyzer and Isotropic Antenna, accessories created by hand to help in the realization of the assemblies required for measurements and portable computer equipment for acquisition, storage and information processing. In this regard, it was also necessary to create an application developed in the MATLAB® environment to interact with the spectrum analyzer. The results obtained indicate compliance of the points of research with the recommendations of the ICNIRP.

**Keywords:** electric field, ICNIRP, mobile telephony, non-ionizing radiation, reference levels, spectrum analyzer, antenna, measurement.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Contexto y Normatividad</b>	<b>3</b>
2.1 Estudios relacionados con esta temática en el ámbito internacional . . . . .	3
2.2 Estudios relacionados con esta temática en Colombia . . . . .	5
2.3 Normatividad Internacional . . . . .	8
2.3.1 Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes – ICNIRP . . . . .	10
2.3.2 Unión Internacional de Telecomunicaciones – UIT . . . . .	14
2.3.3 Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos – IEEE . . . . .	16
2.4 Normatividad Nacional . . . . .	16
<b>3 Metodología de la Campaña de Medición de Radiaciones</b>	<b>20</b>
3.1 Selección de Sitios de Medición . . . . .	20
3.2 Presencia de Fuentes de Campos Electromagnéticos . . . . .	22
3.3 Variables Objeto de Medición . . . . .	26
3.4 Hardware y Software de Medición . . . . .	26
3.4.1 Equipos Utilizados en la Medición . . . . .	26
3.4.2 Aplicativo de Medición . . . . .	27
3.5 Protocolo de Medición . . . . .	29
3.5.1 Definición del Momento de Realización de las Mediciones . . . . .	31
3.5.2 Selección de los Puntos de Medición . . . . .	34
3.5.3 Configuración del Equipo de Medición . . . . .	35

---

3.5.4	Procesamiento de las Mediciones . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>37</b>
4.1	Mediciones en Diferentes Sitios de Bogotá . . . . .	37
4.2	Análisis de los Resultados Obtenidos de las Mediciones y Comparación con los Resultados de los Estudios en el numeral 2.2 de este Trabajo . . . . .	54
4.3	Evaluación Simplificada del Campo Eléctrico . . . . .	56
4.4	Conformación de un Laboratorio de Medición de Radiaciones No Ionizantes .	59
<b>5</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>62</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	62
5.2	Recomendaciones . . . . .	62
<b>A</b>	<b>Anexo: Plegable de Promoción de Campañas de Medición</b>	<b>64</b>
<b>B</b>	<b>Anexo: Límites de Referencia ICNIRP</b>	<b>65</b>
<b>C</b>	<b>Anexo: Guía Rápida de Uso del Aplicativo AMCEM</b>	<b>66</b>
<b>D</b>	<b>Anexo: Certificado de Calibración</b>	<b>67</b>
<b>E</b>	<b>Anexo: Formato de Medición</b>	<b>68</b>
<b>F</b>	<b>Anexo: Autorización de las Mediciones</b>	<b>69</b>
<b>G</b>	<b>Anexo: Aspectos Teóricos Complementarios</b>	<b>70</b>
G.1	Aspectos Fundamentales de Electromagnetismo . . . . .	70
G.2	Mecanismos de Interacción de las Radiofrecuencias / Microondas en los Materiales Biológicos . . . . .	75
G.3	Efectos Biológicos . . . . .	81
	<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>

# Lista de Figuras

Figura 2-1	Comparación cualitativa de la contribución a la exposición por diferentes fuentes de radiofrecuencia a exposición del público general. . . . .	4
Figura 2-2	Pantallazo con el histórico de medición correspondiente al 9 de mayo de 2018. . . . .	6
Figura 2-3	Comparación entre los niveles de referencia de las recomendaciones ICNIRP de 1998 y 2010 para el rango entre 1 Hz y 10 MHz. . . . .	13
Figura 2-4	Comparación entre los niveles de referencia de las recomendaciones ICNIRP de 1998 y 2010 e IEEE C95.1 para el rango entre 1 Hz y 300 GHz. .	17
Figura 3-1	Ilustración figurada de las zonas de exposición . . . . .	20
Figura 3-2	Ubicación en el mapa de Bogotá D.C. de los sitios objeto de medición	21
Figura 3-3	Registro Fotográfico de las Fuentes Electromagnéticas en inmediaciones de los barrios La Esmeralda (subfiguras (a) a (e)) y Nicolás de Federmán (subfigura (f)). . . . .	23
Figura 3-4	Registro Fotográfico de las Fuentes Electromagnéticas en inmediaciones de los barrios Nicolás de Federmán (subfiguras (a) a (d)) y Chapinero Central (subfiguras (e) y (f)). . . . .	24
Figura 3-5	Ubicación de las fuentes electromagnéticas en inmediaciones de los barrios objeto de medición respecto de los sitios de medición. . . . .	25
Figura 3-6	Diferentes Vistas de la Interfaz del Aplicativo. . . . .	29
Figura 3-7	Diagrama de bloques de la evaluación de la exposición a campos electromagnéticos indicando la ruta del procedimiento de medición. . . . .	30
Figura 3-8	Patrones de tráfico móvil. . . . .	33
Figura 3-9	Puntos de Medición para Promediación Espacial . . . . .	34
Figura 4-1	Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 1 barrio La Esmeralda . . . . .	39
Figura 4-2	Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 2 barrio La Esmeralda . . . . .	40
Figura 4-3	Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 1 barrio Nicolás de Federmán . . . . .	42
Figura 4-4	Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 2 barrio Nicolás de Federmán . . . . .	43

---

Figura <b>4-5</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 1 Laboratorio CMUN Universidad Nacional . . . . .	45
Figura <b>4-6</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 2 Laboratorio CMUN Universidad Nacional . . . . .	46
Figura <b>4-7</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 1 barrio Chapinero Central . . . . .	48
Figura <b>4-8</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 2 barrio Chapinero Central . . . . .	49
Figura <b>4-9</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 3 barrio Chapinero Central . . . . .	50
Figura <b>4-10</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 1 barrio Chicó Norte . . . . .	52
Figura <b>4-11</b> Resultado Gráfico y Numérico Punto de Medición Nro. 2 barrio Chicó Norte . . . . .	53
Figura <b>4-12</b> Configuración para calcular la exposición en un edificio adyacente . .	56
Figura <b>4-13</b> Montaje para Medición de Radiaciones No Ionizantes . . . . .	61
Figura <b>A-1</b> Plegable para realizar mediciones . . . . .	64
Figura <b>B-1</b> Niveles de Referencia de la Recomendación ITU-T K.52. . . . .	65
Figura <b>D-1</b> Certificado de Calibración del Analizador de Espectros . . . . .	67
Figura <b>E-1</b> Formato de Medición. . . . .	68
Figura <b>F-1</b> Carta de Descargo de Responsabilidad . . . . .	69
Figura <b>G-1</b> Modelo de la membrana de Hodgkin-Huxley. . . . .	78

# Lista de Tablas

Tabla 3-1	Características configuradas en el Analizador de Espectros. . . . .	35
Tabla 4-1	Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, barrio La Esmeralda.	38
Tabla 4-2	Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, barrio Nicolás de Federmán. . . . .	41
Tabla 4-3	Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, Laboratorio CMUN Universidad Nacional. . . . .	44
Tabla 4-4	Resultados Finales Puntos de Mediciones Nros. 1, 2 y 3, barrio Chapinero Central. . . . .	47
Tabla 4-5	Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, barrio Chicó Norte.	51
Tabla 4-6	Resumen de los Resultados Finales de los Puntos de Medición . . . . .	54
Tabla 4-7	Valores de entrada obtenidos en la medición. . . . .	57
Tabla 4-8	Resumen de Cálculos de las Evaluaciones Simplificadas de Campo Eléctrico . . . . .	59
Tabla 4-9	Descripción del Laboratorio Portátil de Medición. . . . .	60

# Lista de símbolos

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
$c$	Velocidad de la luz	m/s
B	Densidad de Flujo Magnético	Tesla (T)
E	Intensidad de Campo Eléctrico	V/m
$f$	Frecuencia	Hz
H	Intensidad de Campo Magnético	A/m
L	Longitud	m
t	Tiempo	s
V	Volumen	m <sup>3</sup>

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
$\epsilon$	Permitividad	F/m
$\eta$	Impedancia Intrínseca	$\Omega$
$\mu$	Permeabilidad	H/m
$\nu$	Velocidad de fase	m/s
$\rho_v$	Densidad volumétrica de carga	C/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Conductividad	S/m
$\lambda$	Longitud de Onda	m

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

---

<i>AMCEM</i>	Aplicativo para la Medición de Campos Electromagnéticos
<i>DCER</i>	Declaración de Conformidad de Emisión Radioeléctrica
<i>FM</i>	Frecuencia Modulada
<i>GSM</i>	Sistema Global para Telecomunicaciones Móviles
<i>ICNIRP</i>	Comisión Internacional sobre Protección contra Radiaciones No Ionizantes
<i>IEEE</i>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
<i>ITU</i>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<i>LTE</i>	Long Term Evolution (4G)
<i>SAR</i>	Tasa Específica de Absorción
<i>UMTS</i>	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (3G)

# 1. Introducción

El creciente desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones en las últimas décadas, necesariamente, ha implicado el crecimiento de la infraestructura que soporta tales tecnologías. Parte de la infraestructura de comunicaciones son las antenas<sup>1</sup>, dispositivos que intencionalmente emiten energía electromagnética en la banda de radiofrecuencias, aproximadamente entre los 3 kHz y los 300 GHz. La característica de las radiaciones en este rango es que corresponden al tipo de radiaciones no ionizantes, que son aquellas que no tienen la capacidad para perturbar la estructura molecular o atómica de un material.

Varias investigaciones y estudios epidemiológicos se han adelantado sobre los posibles efectos en la salud humana de estas radiaciones; esos resultados son la base de las Recomendaciones de la Comisión Internacional sobre Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), por sus siglas en inglés, sobre la limitación de la exposición a los campos electromagnéticos hasta 300 GHz.

El crecimiento de la telefonía móvil celular en Colombia ha sido muy superior al de otras tecnologías de comunicaciones como la radio y la televisión, lo que ha generado para ésta un fuerte impulso gubernamental desde el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC) mediante la expedición de normas que regulan aspectos de infraestructura, cobertura y calidad del servicio<sup>2</sup>.

El crecimiento de la infraestructura de comunicaciones también ha suscitado preocupación de los habitantes en el país, por lo que varias entidades se han encargado de monitorear el nivel de campo electromagnético y también de la realización de mediciones en diferentes ciudades. La importancia de conocer el nivel del campo electromagnético en un determinado lugar radica en la necesidad de adelantar actividades de mitigación mediante la intervención directa en la operación de la fuente, modificaciones estructurales, o restricciones al acceso, entre otras.

Planteado el panorama, el principal objetivo trazado en este trabajo consistió en verificar si los niveles de radiación emitidos en las bandas de telefonía móvil celular, radiodifusión FM y

---

<sup>1</sup>Véanse las definiciones 3.1.1 Antena, 3.1.23 Emisor Intencional y 3.1.24 Radiación Intencional en la Recomendación K.91 de la UIT-T [1]

<sup>2</sup>Véanse las consideraciones del Decreto 195 de 2005 [2]

de televisión, por antenas de estos sistemas de comunicación, estaban de conformidad con los límites establecidos por la ICNIRP y consecuentemente, apropiar la metodología aplicada a fin de establecer el protocolo de medición de este tipo de radiaciones en el laboratorio CMUN de la Universidad Nacional, sede Bogotá.

Las normas de referencia utilizadas en la realización de las mediciones son: la ICNIRP de 1998 [3], y las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones - ITU, [1, 4, 5]. La primera, suministra los niveles de referencia de exposición ocupacional y para público general, mientras que las últimas, brindan las pautas de los procedimientos requeridos en la ejecución de las medidas.

La verificación de los niveles de referencia se realizó en viviendas u oficinas ubicadas en los barrios La Esmeralda, Nicolás de Federmán, Chapinero Central, Chicó Norte y en el Laboratorio del Grupo en Electrónica de Alta Frecuencia y Telecomunicaciones - CMUN (Edificio 411, 200B) de la Universidad Nacional.

Se precisa mencionar que, en este trabajo se consideraron niveles de referencia de exposición para el público general puesto que la exposición en viviendas u oficinas puede ser prolongada en el tiempo, y no se espera que las personas sean conscientes o puedan mitigar el riesgo derivado de un nivel excesivo de campo electromagnético.

También, es pertinente señalar que el alcance de este trabajo consiste en establecer a qué niveles de exposición están sometidas las personas como resultado de las radiaciones de los diferentes sistemas de comunicación inalámbricos que funcionan en el rango de 30 a 3000 MHz, para los sitios y horas de realización de las mediciones, identificando si están de conformidad con los niveles de referencia, sin que ello implique una conclusión sobre la seguridad o no de dichos niveles respecto a la salud humana, dado que, si bien las bases para la definición de dichos niveles de referencia corresponden al criterio médico más ampliamente aceptado en la actualidad, no pueden descartarse nuevos resultados que modifiquen las conclusiones, especialmente si se tiene en cuenta que estas se refieren a una tecnología que se difundió solo en años recientes, lo que dificulta determinar relaciones causales con efectos de largo plazo.

En los siguientes capítulos se hará una revisión de la literatura relacionada con trabajos similares y normatividad, se planteará una metodología de medición, se mostraran los resultados de las mediciones realizadas en campo con su posterior análisis y se expondrán al final unas conclusiones y recomendaciones. Adicionalmente, en el anexo G se incluye un complemento teórico sobre aspectos relacionados con las radiaciones no ionizantes, tales como, algunos fundamentos, interacciones y efectos de estas radiaciones con los materiales biológicos.

## 2. Contexto y Normatividad

En las secciones siguientes, se mencionarán las principales características de algunos estudios similares al de éste trabajo, desarrollados tanto en el ámbito internacional como en el nacional, los que tienen como marco de referencia recomendaciones o estándares, cuyo objeto es proteger a las personas contra radiaciones electromagnéticas no ionizantes, razón por la cual, se hará mención de algunas recomendaciones internacionales y de las que han sido adoptadas en Colombia.

### 2.1. Estudios relacionados con esta temática en el ámbito internacional

El interés por conocer los niveles de radiación electromagnética a los que se encuentra sometido el público general a causa de las emisiones de diferentes sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, ha suscitado varios estudios relacionados con los niveles de campo eléctrico emitido por los diferentes sistemas de comunicaciones, a continuación se mencionan algunos de ellos:

- El estudio realizado en las ciudades europeas de Amsterdam, Basel, Ghent y Bruselas [6], entre 2011 y 2012, con el objeto de comparar los niveles de exposición para el público general en áreas exteriores, encontró que todos los niveles estaban por debajo de los establecidos por la ICNIRP y, no hallaron indicios que permitieran concluir que al bajar los límites regulatorios se incidiera en mayores niveles de exposición a estaciones base de telefonía móvil.

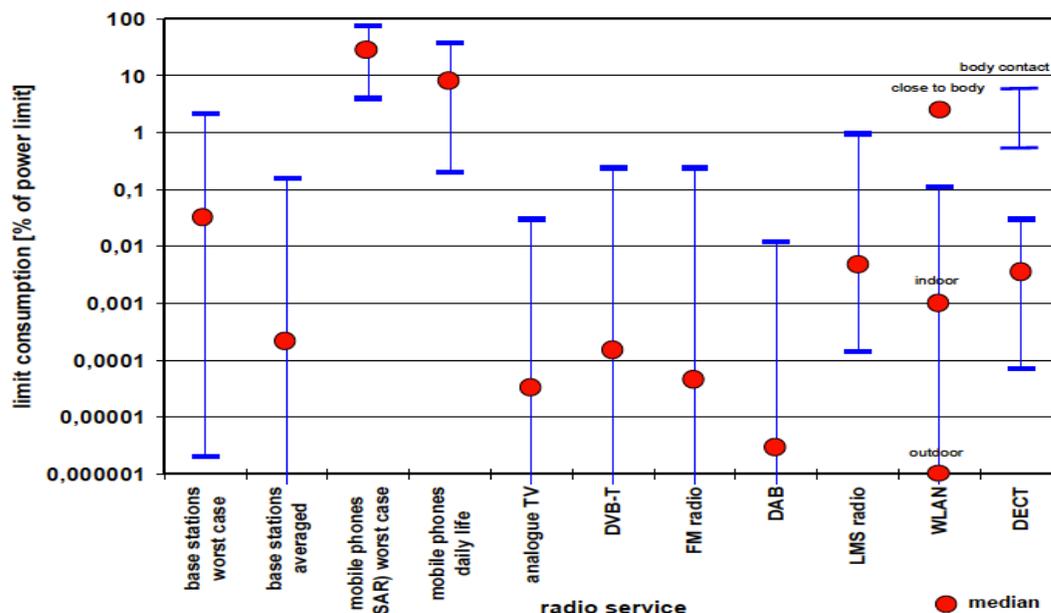
Las mediciones se efectuaron durante 12 días, cada 4 s y a alturas de 1 metro, en los centros de las ciudades, en zonas residenciales centrales y periféricas, por aproximadamente 15 a 30 minutos por área, emplearon un dispositivo de medida de exposición portátil, en algunos casos portado en un coche adherido a un carro, en otros, adherido a una bicicleta, e incluso portado en un morral. Los cálculos fueron realizados usando densidad de flujo de potencia y luego la transformaron a campo eléctrico.

- En Konia, Turquía [7], en donde los límites de prevención a radiaciones electromagnéticas se fijaron en un 1/4 de los establecidos por ICNIRP, se adelantó un estudio de mediciones de radiaciones electromagnéticas producidas por fuentes que operan en la banda

de 100 kHz a 3 GHz, durante una semana en abril de 2012, cuyos resultados arrojaron que los niveles de radiación en la banda mencionada estaban considerablemente por debajo de los valores límite especificados.

Las mediciones se realizaron en el segundo piso de un apartamento, aleatoriamente seleccionado; durante una semana, 24 horas al día con un periodo de muestreo de 4 s durante todos los días; el área de la habitación era de alrededor de 12 m<sup>2</sup>, la altura de medición fue de 80 cm, se registraron valores instantáneos de campo eléctrico.

- En Curitiba, Brasil [8], un análisis teórico de los campos electromagnéticos radiados por estaciones base celular se realizó con simulaciones, usando la ecuación de transmisión de Friis, para calcular la densidad de potencia radiada para cada punto 3 D en el espacio, las cuales fueron posteriormente validadas con mediciones que se confrontaron con los límites ICNIRP obteniendo como resultado que los valores se encontraron 50 dB por debajo de los mencionados límites.
- La referencia [9], presenta un resumen de las exposiciones típicas del público general a diferentes fuentes de campos electromagnéticos de radiofrecuencias comunes en la vida diaria. Los valores son resultado de simulaciones y mediciones de investigaciones del Programa de Investigación Alemán en Telecomunicaciones Móviles. La figura 2-1, da una buena idea acerca de la relevancia de varias fuentes de exposición.



**Figura 2-1.:** Comparación cualitativa de la contribución a la exposición por diferentes fuentes de radiofrecuencia a exposición del público general.

Fuente: Imagen extraída de [9]

- Otra investigación realizada en grandes ciudades de Malasia [10], como Kuala Lumpur y Johor Bahru, para estudiar la exposición electromagnética emitida por estaciones base de telefonía móvil en áreas públicas, usó los métodos conocidos de medición en banda ancha y en banda angosta para éste propósito<sup>1</sup>. Los datos de densidad de potencia registrados los compararon con las recomendaciones de la ICNIRP y encontraron que las mediciones estaban muy por debajo de los límites de la ICNIRP.

La altura de las mediciones fue de 1.5 m en correspondencia a la posición de la cabeza de un adulto promedio; el medidor fue configurado para realizar mediciones por 6 minutos; se midió el campo eléctrico, que luego fue transformado a densidad de potencia.

- Finalmente, en otro estudio realizado a inicios y mediados de 2013, en siete áreas diferentes de la ciudad de Brasov, Rumania, investigaron las características del ambiente electromagnético [11] en espacios abiertos de áreas urbanas, con la finalidad de determinar la tendencia en términos de radiaciones electromagnéticas. Las mediciones fueron hechas con un analizador de espectro y una antena isotrópica Rhode & Schwarz y un computador portátil, en el rango de 80 MHz a 3000 MHz. Los resultados obtenidos indican que los valores para intensidad de campo eléctrico y relaciones de exposición de campo electromagnético están por debajo de los establecidos por ICNIRP.

## 2.2. Estudios relacionados con esta temática en Colombia

En Colombia ya se han adelantado algunos estudios relacionados con mediciones de campos electromagnéticos en el rango de las radiofrecuencias y las microondas, a continuación se mencionan algunos de ellos resaltando sus características más importantes:

- El estudio titulado «An IoT-based Open Platform for Monitoring Non- Ionizing Radiation Levels in Colombia» [12], realizado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia y de la Agencia Nacional del Espectro, presenta el diseño, prueba y validación de un prototipo de plataforma IoT (Internet de las cosas) para medición remota, almacenamiento, procesamiento y visualización georreferenciada de datos de radiación no ionizante (NIR). Para la medición de las NIR, el estudio siguió las recomendaciones ITU K.52, K.83 y K.91. El estudio indica que las sondas miden el valor de la integral de la densidad de potencia a lo largo del ancho de banda de operación. El estudio incluye una tabla que contiene los datos registrados en diciembre de 2015 por dos sensores, Lutron EMF-819 y Narda EMR-300, para densidad de potencia en  $[W/cm^2]$ , en la cual se observa que ninguno de los datos supera los límites establecidos por las recomendaciones ITU, previamente listadas.

---

<sup>1</sup>Las definiciones de estos dos métodos se incluyen en la sección 2.4 de este trabajo, particularmente en los aspectos listados para la resolución 1645.

- La Agencia Nacional del Espectro (ANE), entidad del orden nacional encargada de realizar la planeación, atribución, vigilancia y control del Espectro Radioeléctrico en Colombia, cuenta en su página web, <https://www.ane.gov.co/index.php>, con un sistema de monitoreo de campos electromagnéticos en el que se puede observar, de manera continua, los niveles de exposición por medio de varias estaciones sensoras instaladas en diferentes ciudades del país, y consultar los niveles históricos. El procedimiento de consulta es el siguiente: seleccionar el aplicativo de monitoreo, escoger departamento y municipio, elegir el sensor que se quiere consultar e indicarle la fecha de consulta. Una vez hechos los pasos anteriores, se despliega una gráfica con los resultados, obsérvese como ejemplo la figura 2-2 correspondiente al histórico de 9 de mayo de 2018, en donde el límite máximo (línea roja) fue calculado considerando el más restrictivo para la zona de público general, en el rango de frecuencias de 9 kHz a 300 GHz (28 V/m) y la línea azul indica los valores medidos, encontrándose que estos últimos son inferiores a los fijados por la ICNIRP. Nótese, que los valores de campo eléctrico son 6.44 y 5.18 V/m, para el máximo y el mínimo, respectivamente.

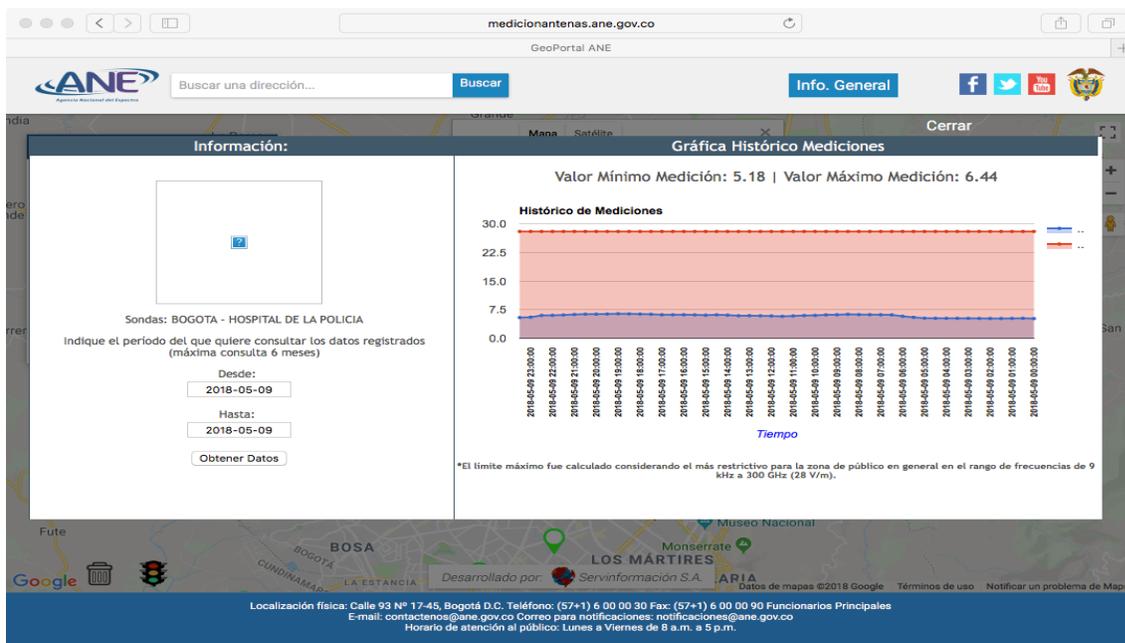


Figura 2-2.: Pantallazo con el histórico de medición correspondiente al 9 de mayo de 2018.

Fuente: Imagen extraída de la página web de la Agencia Nacional del Espectro

- El estudio titulado «Medición de Campos Electromagnéticos en la Ciudad de Cali, Colombia» [13], realizado por investigadores de la Universidad del Valle y del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente de Cali (DAGMA), presenta una metodología de medición de campos electromagnéticos producidos por instalaciones de radio y telecomunicaciones, e indica que en general los valores medidos fueron

inferiores al 0.5 % del límite establecido por la ICNIRP,  $0.2 \text{ mW/cm}^2$ ; sin embargo, en dos casos los niveles encontrados superaron dicho límite; uno, correspondiente a un sistema de telefonía celular; y el otro, a un sistema de radio AM. Los procedimientos de medición que se siguieron están acordes con recomendaciones y normas internacionales (CNC 2003, IEEE 2002, ICNIRP) y nacionales como el Decreto 195 de 2005. Se consideraron condiciones de campo lejano y mediciones de inmisión<sup>2</sup> coherentemente con la idea de que el público general recibe muchas radiaciones.

Se evaluaron 50 sitios en la ciudad de Cali, las mediciones consideraron las cuatro direcciones ortogonales respecto de las estaciones base, a distancias aproximadas de 2, 12, 50 y 100 m, la altura de medición sobre el suelo fue de 1.8 m, y la duración de las mediciones fue períodos de 6 minutos.

- El estudio denominado «Caracterización de Campos Electromagnéticos de Alta Frecuencia en Ambientes Urbanos» [14], realizado por investigadores del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín y de la Universidad del Valle, se caracterizó el campo electromagnético producido por sistemas de comunicación inalámbrico, como: estaciones base de telefonía móvil celular y, antenas de radio y de TV en la ciudad de Cali. La caracterización se realizó en 110 sitios de Cali durante tres campañas de medición. En general los valores encontrados fueron inferiores al 5 % de los límites de la ICNIRP,  $0.2 \text{ mW/cm}^2$ . Sin embargo, en tres mediciones los resultados fueron cercanos a los límites y en dos los límites fueron superados; los resultados de nivel máximo de campo electromagnético de los tres sitios medidos, correspondientes a regiones en los cerros tutelares donde había una gran concentración de antenas, estuvieron entre el 30 % y el 70 % del valor de referencia más bajo de densidad de potencia; en los otros dos sitios medidos, correspondientes a una antena de telefonía celular montada en una terraza y a una antena de radio AM, encontraron que se superó el nivel máximo de campo electromagnético.

Las mediciones se realizaron por períodos de 6 minutos, se emplearon dos sondas: una de campo eléctrico en el rango de 100 kHz a 3 GHz y, otra para campo magnético con rango de medición de 3 kHz a 3 MHz. Las mediciones consideraron las cuatro direcciones ortogonales respecto de las estaciones base y, en el caso de estaciones de telefonía móvil celular se cubrieron sectores de  $120^\circ$ , a distancias aproximadas de 2, 12, 50 y 100 m, la altura de medición sobre el suelo fue de 1.8 m.

- El estudio titulado «Medidas de parámetros de incidencia de campos electromagnéticos sobre sistemas biológicos en el rango de frecuencia de 50 MHz A 1 GHz» [15], realizado

---

<sup>2</sup>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. Para evaluar la exposición poblacional se realiza la medición de inmisión, ya que las personas están expuestas simultáneamente a muchas fuentes de radiación.

en el 2004 por investigadores de TES América Andina Ltda. y de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se hacen aportes en cuanto a la metodología de medición de las emisiones en un rango de frecuencias (50 MHz a 1 GHz cuyos servicios son de TV, radio y comunicaciones inalámbricas fijas y móviles) que cubre gran parte de las aplicaciones de telecomunicaciones, en condiciones de exposición poblacional, se escogieron dos lugares de Bogotá dada su alta concentración de antenas y estaciones base, en ese rango se observó que se cumplen con los límites de exposición para la población.

Se realizaron mediciones selectivas con sonda de rango 25 MHz a 1300 MHz, y mediciones de banda ancha con sonda de rango 100 kHz a 3 GHz, todas se efectuaron a alturas de 2 m sobre el nivel del suelo, y durante 6 minutos.

- El estudio titulado «Análisis de los límites de exposición humana a campos electromagnéticos de acuerdo a la norma UIT-K.52 para frecuencias entre 10 kHz y 3 GHz en áreas urbanas de Bucaramanga» [16], desarrollado por investigadores de la Universidad Industrial de Santander y de la Universidad del Valle, tomó como referencia el Decreto 195 de 2005, e incluyó bandas de telefonía móvil, radio AM, FM Y TV, en las cuales se constató que el nivel máximo de radiación de campo eléctrico fue de  $139 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , esto es por debajo de los límites de exposición fijados por la norma en los tres sitios (zona residencial, aeropuerto y zona al oriente de la ciudad con alta concentración de antenas) por tener la mayor influencia de radiaciones. En las mediciones se emplearon antenas con anchos de banda de 9 kHz a 20 MHz, 20 MHz a 330 MHz y 20 MHz a 3 GHz.
- Por último, en el «Estudio de los niveles de radiación electromagnética no ionizante en varias zonas de la ciudad de Bucaramanga» [17], realizado por investigadores de la Universidad Industrial de Santander, las mediciones fueron desarrolladas en diferentes sitios de la ciudad considerando tipo de zona y cantidad de antenas, con el fin de determinar si se cumplían los límites de exposición permitidos para público general, que establece la Recomendación Internacional UIT-T K.52. Se determinó que todos los sitios medidos cumplían con los límites de exposición establecidos por la recomendación UIT-T K.52. Las mediciones se realizaron entre enero y febrero de 2011, el tiempo de medición fue de 6 minutos por estación, se totalizaron 25 sitios de medición.

### 2.3. Normatividad Internacional

En esta sección se mencionarán algunos aspectos de interés relacionados con los estándares y las recomendaciones para la protección de las personas a radiaciones electromagnéticas provenientes de radiofrecuencias y de microondas, luego, se listarán varias de las recomendaciones establecidas por las entidades más reconocidas que se han preocupado por fijar

reglamentaciones, se indicaran algunas de sus principales características, las referencias particulares se harán en el capítulo 3:

### **Estándares y Recomendaciones**

En 1975, la relación entre los estándares de Estados Unidos y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (USSR), era de 1000. La diferencia radicó en que la USSR incluyó efectos térmicos e isotérmicos. Hoy, el panorama sigue siendo complejo, si se considera que las recomendaciones para limitar la exposición a campos electromagnéticos se encaminan a proteger la salud contra los efectos biológicos adversos conocidos.

Las recomendaciones actuales consideran dos tipos de limitaciones: restricciones básicas, que siempre deben ser respetadas, se expresan en cantidades que son internas al cuerpo y por tanto no se miden, como la SAR; y niveles de referencia, que podrían ser excedidos cuando los límites básicos no son superados, se expresan en cantidades que son medidas en sitios sin presencia de seres humanos, como el campo eléctrico.

Solo un efecto biológico de las microondas es bien conocido: el calentamiento. Por lo tanto las actuales recomendaciones, sustentadas en evidencia científica, se focalizan en procesos de calentamiento.

Las recomendaciones están basadas en una fuente: las originales vienen de la Organización Mundial de la Salud (OMS), 1993. Las actuales, están basadas en documentos producidos por la Comisión Internacional sobre Protección contra Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP), cuyo documento principal fue establecido en 1998 para limitar la exposición a campos electromagnéticos hasta 300 GHz. Hay ambigüedades en los textos básicos: El texto de la OMS fija que un efecto biológico se produce desde 1 a 4 W/kg, pero calcula el factor de seguridad desde 4 y no desde 1 W/kg, un factor extra de seguridad de 5 para el público general produce factores de 12.5 y 50, sin embargo, varios documentos refieren como factor de seguridad 50.

El texto de la OMS es basado en el conocido efecto de «incremento de la temperatura central del cuerpo por menos de 1°C cuando adultos saludables se exponen por 30 minutos a una exposición microondas de 1-4 W/kg», de lo cual hay que tener en cuenta que el factor de seguridad debería considerar: el incremento de temperatura debería ser menor que 1°C, la exposición 24 horas al día, no hay niños y todos no son saludables, que los adultos no todos son saludables, y que hay posibles efectos desfavorables, térmicos, ambientales y de largo plazo.

Es interesante observar que el calentamiento externo por microondas y las pruebas de máximo ejercicio producen cerca de la misma elevación de temperatura.

Se considera importante resaltar que la OMS, la ICNIRP y la Unión Europea han recomendado unos valores límite, sin embargo algunas naciones europeas han adoptado valores más bajos.

### 2.3.1. Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes – ICNIRP

En 1998, la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) estableció las recomendaciones para limitar la exposición a los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo (hasta 300 GHz) [3], las que proveen protección a la salud contra efectos adversos conocidos, aplicables a población ocupacional y al público general, y fijó dos clases de recomendaciones: las restricciones básicas y los niveles de referencia. Las primeras, se relacionan con las restricciones sobre la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo que se basan en efectos a la salud establecidos, y los niveles de referencia son previstos para evaluar en forma práctica la exposición y determinar si hay probabilidad de exceder las restricciones básicas.

A continuación se precisan y resaltan otros aspectos de interés considerados en la recomendación ICNIRP:

- **Bases para limitar la exposición.** Se basan en la revisión de la literatura científica, solo efectos establecidos fueron usados como las bases para las restricciones a la exposición propuesta. Las recomendaciones se fundamentan en efectos de corto plazo con efectos inmediatos a la salud tales como estimulación de nervios periféricos y músculos, y temperaturas elevadas de tejidos resultantes de la absorción de energía durante la exposición. Los efectos de largo plazo no fueron tenidos en cuenta por no tener datos suficientes para fijar restricciones.
- **Mecanismos de acople entre campos y el cuerpo.** Hay tres mecanismos de acople establecidos por campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo que interactúan directamente con material vivo:
  - *Acople a campos eléctricos de baja frecuencia.* Esta interacción resulta en corrientes eléctricas y formación de dipolos eléctricos, cuya magnitud depende de las condiciones de exposición, de la forma y tamaño del cuerpo y de la posición en el campo, así como, de las propiedades eléctricas del cuerpo, conductividad y permitividad.
  - *Acople a campos magnéticos de baja frecuencia.* Esta interacción resulta en campos eléctricos inducidos y corrientes eléctricas circulantes, sus magnitudes son proporcionales al radio del lazo, la conductividad eléctrica del tejido y la tasa de cambio de la densidad de flujo magnético.

- *Absorción de energía de campos electromagnéticos.* La absorción de energía en bajas frecuencias es despreciable, sin embargo, para frecuencias superiores a 100 kHz puede conllevar absorción significativa de energía e incremento de temperatura, así: de 100 kHz a 20 MHz, absorción significativa en cuello y piernas; de 20 a 300 MHz, alta absorción en todo el cuerpo y resonancias; de 300 MHz a varios GHz, no hay absorción uniforme; y en frecuencias superiores a 10 GHz, la absorción ocurre en la superficie del cuerpo.
- **Bases biológicas para limitar la exposición hasta 100 kHz.** En este rango, el mayor mecanismo de interacción es la inducción de corrientes en tejidos y se observan efectos de corto plazo, tales como estimulación de músculos y nervios pero no se evidencian efectos de largo plazo.
- **Bases biológicas para limitar la exposición desde 100 kHz hasta 300 GHz.** La exposición de humanos a campos electromagnéticos por aproximadamente 30 minutos producen una SAR de entre 1 a 4 W/kg, resultando en un incremento de temperatura de menos de 1°C. Las investigaciones indican que elevaciones de temperatura superiores a 1°C pueden causar efectos adversos a la salud.
- **Limitación a la exposición ocupacional y del público general.** En el término ocupacional se incluyen las personas que tienen entrenamiento y pleno conocimiento o están advertidos del riesgo de exposición y pueden tomar medidas preventivas, mientras que, en el público general se encuentran las demás personas por lo que los niveles de exposición son más restringidos.
- **Verificación de la conformidad.** Para la protección de las personas a la exposición de campos electromagnéticos, la recomendación de la ICNIRP [3] estableció los siguientes criterios:
  - *Límites máximos de exposición:* corresponden a los valores máximos de las intensidades de campo eléctrico y magnético, o a la densidad de potencia asociada con estos campos, a los cuales una persona puede estar expuesta, véase en el Anexo B los límites máximos de exposición. Se indican a continuación los tipos de límites, los efectos de los que se buscan proteger a las personas, el rango de frecuencia correspondiente y las magnitudes físicas en las que son provistos:
    - **Restricciones básicas.** Los rangos y unidades para fijar las restricciones son: entre 1 Hz y 10 MHz, para prevenir efectos sobre las funciones del sistema nervioso, se proveen en densidad de corriente; entre 100 kHz y 10 GHz, para prevenir calentamiento del cuerpo y también el excesivo calentamiento de tejidos localizados, se proveen en densidad de corriente y SAR; y entre 10 y 300 GHz para prevenir calentamiento en tejidos o cerca a la superficie del cuerpo, se proveen en densidad de potencia.

- **Niveles de referencia.** Realizan las siguientes consideraciones: hasta 1 kHz, fijan en la mitad los límites de campo eléctrico para público general respecto de los establecidos para ocupacional, para prevenir efectos de estimulación por corrientes de contacto; hasta los 100 kHz fijan los niveles a un factor de 5 por debajo para el público general respecto de los ocupacionales; de los 100 kHz hasta los 10 MHz usan niveles conservativos ya que no contribuyen significativamente a riesgos de choques o quemaduras; de 10 MHz a 10 GHz se diferencian en un factor de 2.2 los niveles de campo eléctrico y magnético para público general frente al ocupacional; y entre 10 y 300 GHz los niveles para público general están definidos por la densidad de potencia y están por debajo de los ocupacionales en un factor de 5. Obsérvese en el Anexo B los límites de referencia de la ICNIRP.
- *Nivel de exposición Porcentual:* corresponde al valor ponderado de campo eléctrico, magnético o electromagnético producto del aporte de energía de múltiples fuentes de radiofrecuencia, en cada una de las posibles zonas de exposición a campos, valor que se obtiene con un sistema de banda ancha. Para el caso de la exposición simultánea a campos de múltiples frecuencias y de múltiples fuentes, la ICNIRP indica las ecuaciones que permiten calcular los efectos aditivos, de forma separada por los efectos de estimulación eléctrica y térmica, tanto para las restricciones básicas, véanse las ecuaciones 2-1 y 2-2, como para los niveles de referencia, véanse las ecuaciones 2-3 y 2-4. La recomendación también fija ecuaciones en función de la intensidad de campo magnético.

$$\sum_{i=1Hz}^{10MHz} \left( \frac{J_i}{J_{L,i}} \right) \leq 1 \quad (2-1)$$

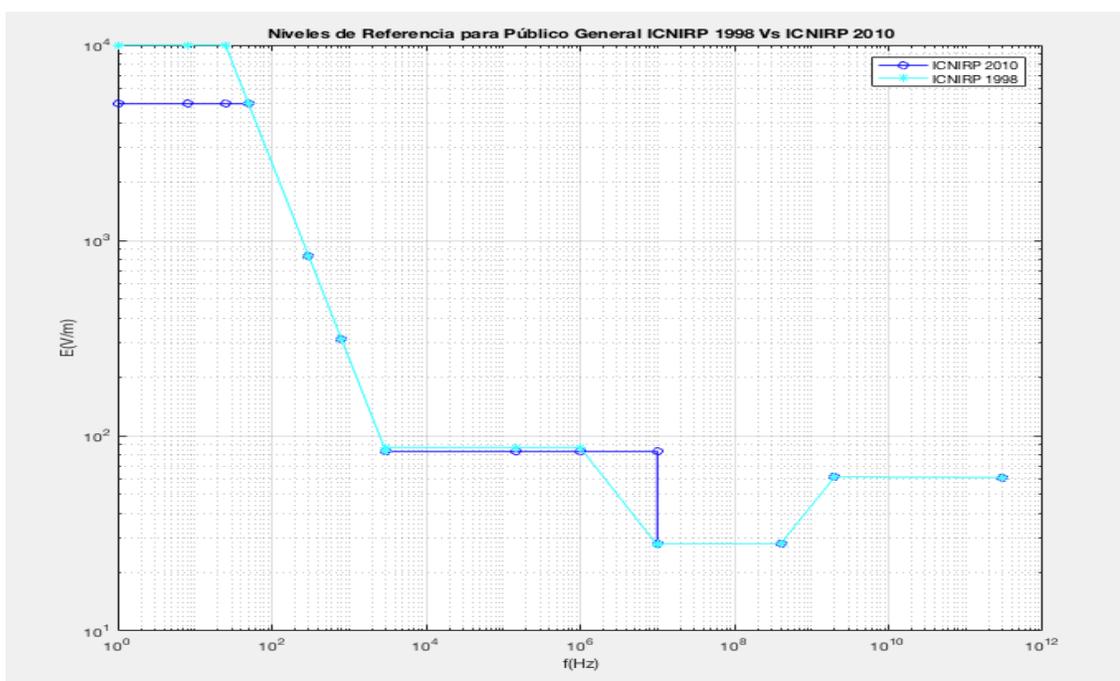
$$\sum_{i=100kHz}^{10GHz} \left( \frac{SAR_i}{SAR_L} \right) + \sum_{i>10GHz}^{300GHz} \left( \frac{S_i}{S_L} \right) \leq 1 \quad (2-2)$$

$$\sum_{i=1Hz}^{1MHz} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right) + \sum_{i=1MHz}^{10MHz} \left( \frac{E_i}{E_a} \right) \leq 1 \quad (2-3)$$

$$\sum_{i=100kHz}^{1MHz} \left( \frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i=1MHz}^{300GHz} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (2-4)$$

Hacia 2009, la ICNIRP publicó una declaración en la que indicó que en razón a que la literatura científica publicada desde las recomendaciones de 1998 no había provisto evidencia alguna sobre efectos adversos a la salud por debajo de las restricciones básicas no se necesitaba una revisión inmediata de tales recomendaciones. Así mismo, y de acuerdo con estudios de genotoxicidad y carcinogenicidad in vitro y en animales que indican que los efectos no térmicos probablemente se presentan a bajos niveles de exposición, por esta razón confirmó las recomendaciones de 1998 en el rango desde los 100 kHz a los 300 GHz, hasta tener nuevas evidencias.

Obsérvese en la figura 2-3 los cambios introducidos por la ICNIRP a los niveles de referencia para exposición del público general, desde 1 Hz hasta 10 MHz. Los cambios se sustentan en observaciones tales como las siguientes: la respuesta biológica a campos eléctricos de baja frecuencia (50-60 Hz), va desde la percepción (umbrales 2-5 kV/m) hasta la molestia (15-20 kV/m), a través de los efectos de carga superficial; los efectos de estimulación de los tejidos nerviosos centrales y periféricos y la inducción de fosfenos en la retina, con umbral mínimo de alrededor de los 5 mT a 20 Hz y en el campo eléctrico el umbral se estima entre 50-100 mV/m, por lo que la recomendación ajusta los niveles de referencia a fin de proteger.



**Figura 2-3.:** Comparación entre los niveles de referencia de las recomendaciones ICNIRP de 1998 y 2010 para el rango entre 1 Hz y 10 MHz.

### 2.3.2. Unión Internacional de Telecomunicaciones – UIT

Entre las recomendaciones que se consultaron de la Unión Internacional de Telecomunicaciones están las siguientes:

#### La Recomendación UIT-T K.52 [4]

Corresponde a la SERIE K, PROTECCIÓN CONTRA LAS INTERFERENCIAS, SECTOR DE NORMALIZACIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES DE LA UIT. La última versión publicada en el 2018, titulada «Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos», presenta técnicas y procedimientos para la evaluación del cumplimiento, cuya finalidad es facilitar el cumplimiento por parte de las instalaciones de telecomunicaciones en la gama de 8.3 kHz a 300 GHz<sup>3</sup> de los límites de seguridad establecidos por la ICNIRP, ayudando a los usuarios en la determinación de la probabilidad de cumplimiento de la instalación, basados en criterios de: accesibilidad, propiedades de las antenas y potencia emitida. La recomendación presenta:

- Orientación general, que incluye: un listado de términos y definiciones, los principios generales, la necesidad de incluir los efectos de múltiples fuentes y frecuencias, los límites de seguridad a campos electromagnéticos, la clasificación de los emisores y de las zonas de exposición.
- Un método de cálculo del campo electromagnético para la región de campo lejano en función de las magnitudes siguientes: potencia radiada isotrópica equivalente (EIRP), el coeficiente de reflexión ( $\rho$ ), la distancia entre la fuente radiante y el punto de exposición (R), la densidad de potencia (S) y la ganancia numérica relativa ( $F(\theta, \phi)$ ), y
- Un procedimiento de evaluación de las instalaciones (estaciones base) que se fundamenta en los límites de seguridad de la ICNIRP para el cual se deben considerar las condiciones de emisión más desfavorables y la presencia de múltiples fuentes e incluso a diferentes frecuencias y los parámetros de EIRP, ganancia de antena (G), ganancia numérica relativa (F) y otras características de la instalación como: altura de la antena, y dirección e inclinación del haz.

#### La Recomendación UIT-T K.61 [5]

Corresponde a la SERIE K, PROTECCIÓN CONTRA LAS INTERFERENCIAS, SECTOR DE NORMALIZACIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES DE LA UIT, publicada en el 2018, titulada «Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites

---

<sup>3</sup>En el apéndice I de la recomendación [4] también se incluyen los límites de la ICNIRP para frecuencias más bajas.

de exposición de las personas», cuya finalidad es ayudar a los operadores para verificar el cumplimiento de las normas de exposición en la gama de 9 kHz a 300 GHz, proporcionando orientación sobre los métodos de medición y directrices sobre la selección de métodos numéricos para predecir la exposición. Para ello, define herramientas, métodos y procedimientos utilizables para evaluar el cumplimiento de los límites. La recomendación brinda:

- Orientación general, que incluye: un listado de términos y definiciones, los principios generales, las cantidades que deben medirse, tales como, campo eléctrico y campo magnético, y la identificación de situaciones típicas en las mediciones, como son: conocer la fuente electromagnética, al menos alguna de sus características, o no conocer las fuentes electromagnéticas.
- Consideraciones técnicas para las mediciones y para los equipos de medición, tales como: la necesidad de tener en cuenta la promediación temporal y espacial, en razón de la existencia de múltiples fuentes y de reflexiones multiruta, la expresión matemática de cálculo y los puntos de medición recomendados. Además, hace la distinción entre zonas de campo cercano y lejano, y menciona la gama de frecuencias de medición en banda ancha o en banda estrecha.
- En los apéndices, y no como parte integral de la recomendación, menciona algunos de los métodos de cálculo para evaluar la conformidad con los niveles de campos electromagnéticos, como son: diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), región múltiple de diferencias finitas en el dominio del tiempo (MR/FDTD), modelo de trazado de rayos y el método de los momentos. También señala el tratamiento de los casos con no conformidades.

### **La Recomendación UIT-T K.91 [1]**

Corresponde a la SERIE K, PROTECCIÓN CONTRA LAS INTERFERENCIAS, SECTOR DE NORMALIZACIÓN DE LAS TELECOMUNICACIONES DE LA UIT, publicada en el 2018, titulada «Orientación para el cálculo, evaluación y monitoreo de la exposición humana a campos electromagnéticos de radiofrecuencia», cuya finalidad es dar orientación sobre cómo evaluar y monitorear la exposición humana a campos electromagnéticos de radiofrecuencia en áreas circundantes a estaciones de radiocomunicaciones en la gama de 9 kHz a 300 GHz, y está orientada al examen de las áreas accesibles para personas en ambientes reales de servicios operados comúnmente con diferentes fuentes de campos electromagnéticos de radiofrecuencias. La recomendación, trata sobre:

- Orientación general, incluye: un listado de términos y definiciones, una descripción general del procedimiento de evaluación de la exposición, la distinción entre exposición de público general y exposición ocupacional e indicación de los datos que se requieren para realizar mediciones o para realizar cálculos.

- Otros aspectos contenidos en la recomendación son: la expresión matemática que permite determinar la exposición total debida a la radiación de múltiples fuentes electromagnéticas, los límites de exposición de la ICNIRP y las características generales de fuentes típicas de radiación.
- Existen dos opciones para evaluar los niveles de campo electromagnético; la primera por mediciones, en las que son claves la selección de los puntos de medición, la aplicación de promediación espacial y temporal y las mediciones en banda ancha y banda estrecha; la segunda por cálculos, en los que dependiendo de la distancia a la fuente electromagnética, los métodos de cálculo variarán desde modelos simplificados como el caso del modelo fuente - punto, hasta unos más sofisticados tales como: el método de los momentos o el de diferencias finitas en el dominio del tiempo.

### 2.3.3. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos – IEEE

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) tiene el estándar IEEE C95.1 2005 [18], titulado «Estándar para niveles de seguridad con respeto a la exposición humana a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia, 3 kHz a 300 GHz», en el que da recomendaciones para prevenir efectos nocivos en seres humanos expuestos a campos electromagnéticos en el rango mencionado, y son indicadas para ambientes controlados y no controlados. En el estándar, se establecen los valores para la exposición máxima permisible (MPE)<sup>4</sup>, de cuyos valores se resalta que para ambientes con público general en el rango de 30 a 400 MHz, se fija un MPE en el campo eléctrico de 27.5 V/m, mientras que, en ICNIRP es un valor de 28 V/m. Obsérvese en la figura 2-4 los rangos de protección para las recomendaciones ICNIRP 1998 y 2010 e IEEE C95.1.

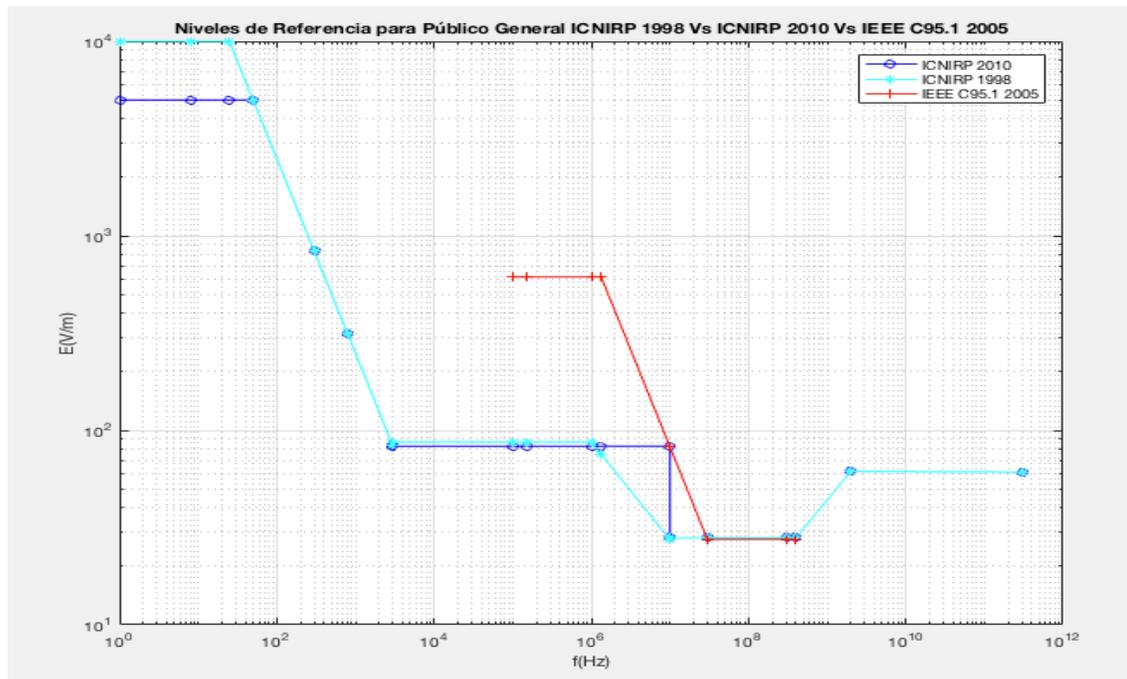
## 2.4. Normatividad Nacional

Se listan los decretos y resolución expedidos por el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MINTIC), entidad que tiene a cargo la reglamentación en lo referente a las radiaciones no ionizantes, y se mencionan algunas de sus características, otras referencias particulares se harán en el capítulo 3:

### Decreto Nro. 195 de 31 de enero de 2005

Mediante Decreto Nro. 195 de 31 de enero de 2005 [2] el MINTIC adoptó los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos producidos por estaciones radioeléctricas en la gama de frecuencias de 9 kHz a 300 GHz, adecuó procedimientos para la instalación de

<sup>4</sup>Se refiere a la intensidad de campo magnético, eléctrico y densidad de potencia asociados con esos campos a los cuales las personas podrían estar expuestos sin efectos nocivos y con un aceptable factor de seguridad.



**Figura 2-4.:** Comparación entre los niveles de referencia de las recomendaciones ICNIRP de 1998 y 2010 e IEEE C95.1 para el rango entre 1 Hz y 300 GHz.

estaciones radioeléctricas y fijó otras disposiciones. El decreto se fundamentó en las recomendaciones UIT-T K.52 del Consejo Europeo 1999/519/EC (julio 1999) y las de la ICNIRP. En esta norma se establecen los límites máximos de exposición según la frecuencia de operación, el cálculo del nivel de exposición porcentual y se fijó que los prestadores de servicios y/o actividades de telecomunicaciones deben dar constancia del cumplimiento de los límites y condiciones del Decreto mediante un documento denominado Declaración de Conformidad de Emisión Radioeléctrica (DCER).

### Decreto Único Reglamentario del Sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

Posteriormente, el MINTIC con la finalidad de compilar y racionalizar las normas reglamentarias del Sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, recopiló el Decreto Nro. 195 de 2005 en el Capítulo 5 Radiaciones No Ionizantes del Título 2 Uso de Espectro Radioeléctrico de la Parte 2 Reglamentaciones correspondiente al Libro 2 del Decreto Único Reglamentario del Sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones [19].

### Resolución Nro. 001645 de 29 de julio de 2005

Mediante la Resolución Nro. 001645 de 29 de julio de 2005 [20] el MINTIC reglamentó el

Decreto 195 de 2005. Otras reglamentaciones en ésta resolución se listan a continuación:

- Las categorías de accesibilidad 1, 2, 3a, 3b y 4, relacionadas con la ubicación de las antenas frente a las edificaciones circundantes.
- La definición de los servicios inherentemente conformes, entre los que se encuentra el de telefonía móvil celular, a los que no se les obliga a que realicen las mediciones del Decreto 195 ni la declaración DCER
- Indica una metodología de medición, enfocada a evaluar la conformidad de estaciones radioeléctricas, que incluye lo siguiente:
  - Fijar la hora adecuada de medición
  - Realizar las mediciones desde la zona ocupacional
  - Realizar mediciones de 6 minutos en los casos en que se observe que se han superado los límites de exposición
  - Realizar reportes gráficos de las mediciones que permitan compararlas contra los límites establecidos.
  - Evaluación preliminar de la estación
  - Ubicación de los puntos a medir
  - Configuración de los equipos de medición
  - Mediciones en Banda Ancha: es un tipo de medición que permite evaluar entornos independientemente del número de fuentes existentes. Si se tiene un medidor de campo de registro directo, debe tenerse en cuenta la frecuencia de la(s) fuente(s) con el fin de ajustar o considerar el nivel de campo respecto al valor límite de la norma ICNIRP, a la frecuencia central del sistema. Al realizar estas mediciones, se debe considerar que, tanto el medidor como la sonda correspondan con el ancho de banda objeto de medición.
  - Mediciones en Banda Angosta: es una medición cuyo propósito es detectar las fuentes de mayor contribución, generalmente se realizan este tipo de mediciones cuando las de banda ancha superan los valores límites de exposición.
- Señalan el procedimiento para el porcentaje de mitigación con varias fuentes radiantes y fijan los parámetros a usar para fuentes radiantes de menos de 300 MHz.

Finalmente, se precisa mencionar que este trabajo se fundamentó en las recomendaciones de la ICNIRP en razón a que, es el ente que tiene aceptación mundial en cuanto a la definición de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, y para el caso de la definición del protocolo de medición se recurrió a las pautas que brindan las normas de la UIT. Adicionalmente, se tuvo en cuenta que en el ordenamiento jurídico del país las señaladas

recomendaciones fueron adoptadas a través de los decretos y resoluciones ya mencionados, los cuales se encuentran vigentes. En tal sentido, el trabajo realizado parte de estas bases y no pretende establecer juicios de valor relativo entre las normas o recomendaciones dado que estas se fundamentan en el conocimiento aceptado actualmente, que podría ser refinado a futuro.

## 3. Metodología de la Campaña de Medición de Radiaciones

Con la finalidad de verificar si los niveles de radiación emitidos en las bandas de telefonía móvil celular, radiodifusión FM y de televisión, por las antenas de estos sistemas de telecomunicación, están a conformidad con los límites establecidos por la ICNIRP de 1998 [3], se planteó como metodología para las campañas de medición considerar: la definición de los sitios objeto de medición, establecer las fuentes de campos electromagnéticos existentes en inmediaciones de los puntos de medición elegidos, seleccionar las magnitudes a medir, determinar el equipo requerido o disponible para realizar las mediciones y finalizar con un protocolo de medición.

### 3.1. Selección de Sitios de Medición

En la selección de los sitios de medición es importante tener en cuenta las zonas de exposición a campos electromagnéticos definidas en el Decreto Nro. 195 [2], que corresponden a: zona de público general, zona ocupacional y zona de rebasamiento, obsérvese la figura 3-1.



Figura 3-1.: Ilustración figurada de las zonas de exposición

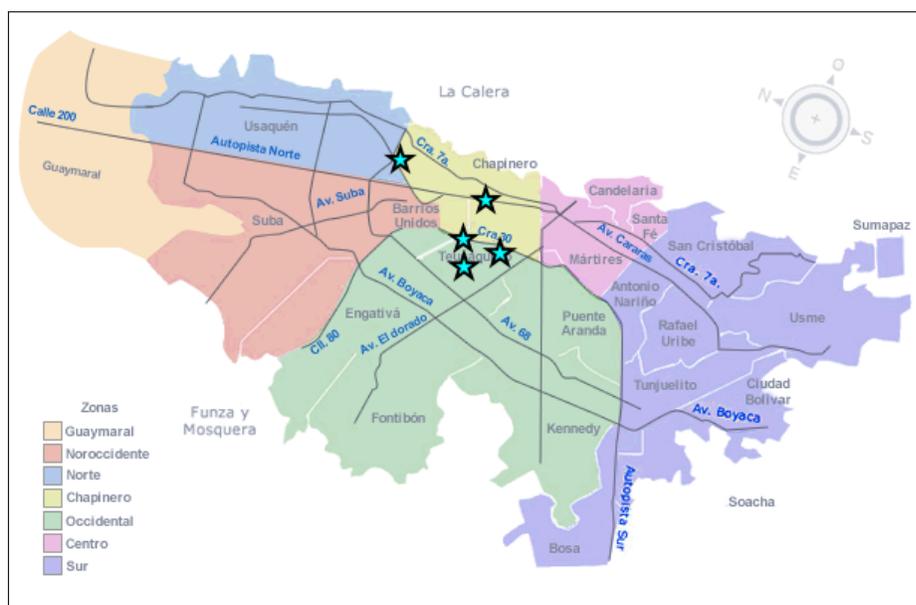
Se precisa mencionar que, por razones de accesibilidad e ingreso a instalaciones, así como el desplazamiento de equipos y accesorios requeridos en las mediciones, se optó por realizar

las diferentes mediciones en la denominada zona de público general. También, fue un factor decisivo la existencia de varias antenas de telecomunicaciones en cercanía de los sitios a definir como objeto de medición. En tal sentido, se realizaron campañas de divulgación en áreas aledañas a la Universidad Nacional, sede Bogotá, particularmente en los barrios La Esmeralda y Nicolás de Federmán. Obsérvese en el Anexo A el plegable entregado a algunos habitantes de los barrios mencionados.

Posteriormente, se realizaron mediciones en los barrios:

- La Esmeralda
- Nicolás de Federmán
- Universidad Nacional, sede Bogotá
- Chapinero Central
- Chicó Norte

Obsérvese en el mapa de Bogotá D.C., figura 3-2, la ubicación de los cinco sitios de medición, señalados con estrella.



**Figura 3-2.:** Ubicación en el mapa de Bogotá D.C. de los sitios objeto de medición

Fuente: Mapa obtenido de [http://4.bp.blogspot.com/-RwVBEvhmBQs/VF9\\_BYfsfEI/AAAAAAAAACo/Q0-kgwDL12k/s1600/mapabogota2.png](http://4.bp.blogspot.com/-RwVBEvhmBQs/VF9_BYfsfEI/AAAAAAAAACo/Q0-kgwDL12k/s1600/mapabogota2.png)

## 3.2. Presencia de Fuentes de Campos Electromagnéticos

La recomendación K.52 [4], indica que el nivel de exposición debe considerar la presencia simultánea de varias fuentes de campos electromagnéticos, por tal razón se verificó la existencia de instalaciones de antenas de telecomunicaciones en los barrios en que se realizaron las mediciones.

La visualización de las antenas existentes en los barrios La Esmeralda, Nicolás de Federmán y Chapinero Central se realizó con las aplicaciones Google Earth y Street View, de propiedad del fabricante Google Inc., la mayoría corresponden principalmente a antenas de telefonía celular.

Las figuras **3-3** y **3-4**, muestran algunas de las fuentes de campos electromagnéticos presentes en los barrios en que se realizaron las mediciones.



(a) Antena de telefonía móvil



(b) Antena de telefonía móvil



(c) Antena de telefonía móvil



(d) Antena de microondas

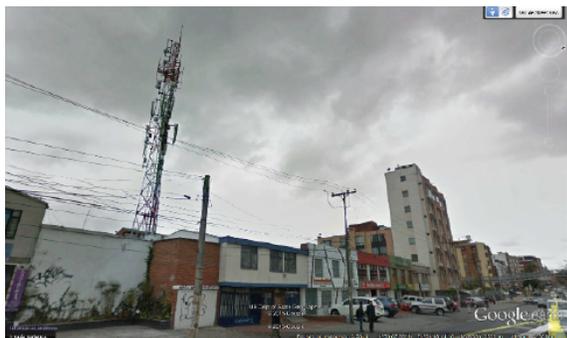


(e) Antena de telefonía móvil



(f) Antena de telefonía móvil

**Figura 3-3.:** Registro Fotográfico de las Fuentes Electromagnéticas en inmediaciones de los barrios La Esmeralda (subfiguras (a) a (e)) y Nicolás de Federmán (subfigura (f)).



(a) Antena de telefonía móvil



(b) Antena de telefonía móvil



(c) Antena de radiodifusión



(d) Antena de telefonía móvil



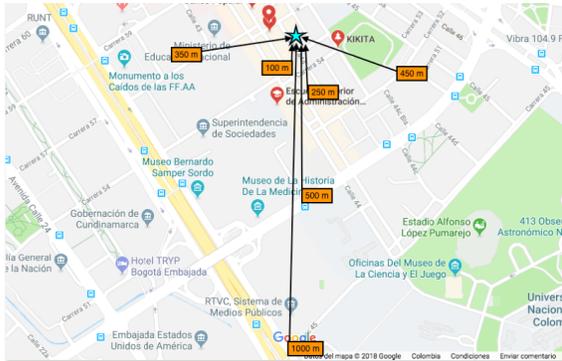
(e) Antena de microondas



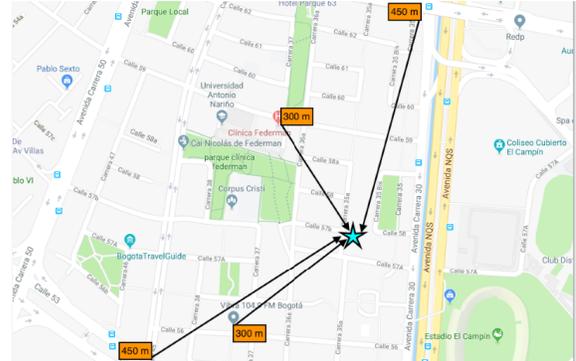
(f) Antena de telefonía móvil

**Figura 3-4.:** Registro Fotográfico de las Fuentes Electromagnéticas en inmediaciones de los barrios Nicolás de Federmán (subfiguras (a) a (d)) y Chapinero Central (subfiguras (e) y (f)).

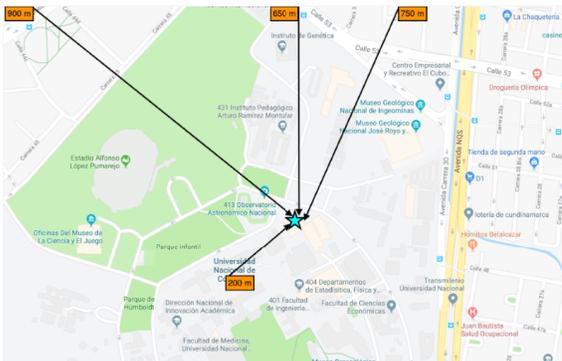
Obsérvese en la figura 3-5 la ubicación de los diferentes sitios objeto de medición y algunas de las fuentes de campos electromagnéticos presentes en las zonas aledañas.



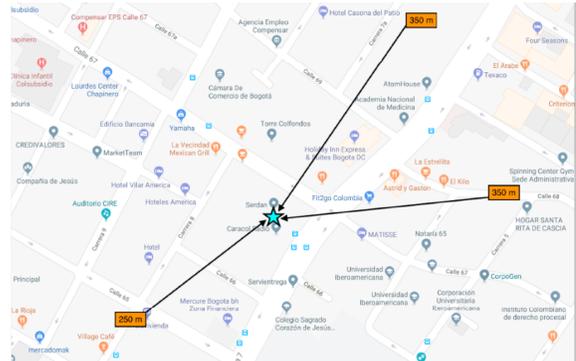
(a) Ubicación fuentes electromagnéticas en el barrio La Esmeralda



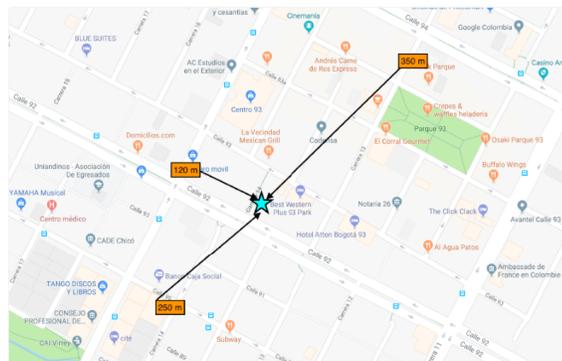
(b) Ubicación fuentes electromagnéticas en el barrio Nicolás de Federmán



(c) Ubicación fuentes electromagnéticas en la Universidad Nacional



(d) Ubicación fuentes electromagnéticas en el barrio Chapinero Central



(e) Ubicación fuentes electromagnéticas en el barrio Chicó Norte

Figura 3-5.: Ubicación de las fuentes electromagnéticas en inmediaciones de los barrios objeto de medición respecto de los sitios de medición.

### 3.3. Variables Objeto de Medición

Las mediciones se realizaron en condiciones de campo lejano, situación usual para evaluar los riesgos debidos a la exposición a radiofrecuencias/microondas en seres humanos. Para establecer si el punto de medición efectivamente se encuentra en la zona de campo lejano, la distancia del punto a la fuente de radiación debe ser mayor al resultado de la expresión  $2 \cdot D^2/\lambda$ , en la cual  $D$  corresponde a la mayor dimensión de las antenas y  $\lambda$  a la longitud de onda de la frecuencia de la fuente de radiación.

Por otra parte, las distancias entre las fuentes de campos electromagnéticos existentes y los puntos de medición seleccionados varían entre los 100 y los 1000 m, téngase en cuenta, adicionalmente, que para estimar las distancias y ubicación de las fuentes de radiación se hizo uso del software Google Maps. Obsérvese, por ejemplo, que considerando las distancias mencionadas y empleando la expresión  $2 \cdot D^2/\lambda$ , con valores para  $\lambda$  de 0,15 m (telefonía móvil GSM de 1900 MHz) y 2 m para  $D$ , se obtiene una distancia aproximada de 55 m, con lo cual se constata que los puntos de medición se encuentran en la región de campo lejano.

Teniendo en cuenta las características de campo lejano, será suficiente con registrar el valor de solo una de las magnitudes de campo, en este caso se medirá el campo eléctrico,  $E$ . Lo anterior en concordancia con lo dispuesto en el numeral 7.6 de la recomendación ITU-T K.61 [5].

### 3.4. Hardware y Software de Medición

En esta sección se describen los equipos empleados y el aplicativo desarrollado en el ambiente MATLAB para realizar las mediciones:

#### 3.4.1. Equipos Utilizados en la Medición

- *Analizador de Espectro, R&S®FSH8*: El rango de frecuencia de operación es de 100 kHz a 8 GHz; el equipo permite realizar mediciones en línea con todos los estándares comunes de campos electromagnéticos y métodos de medición. Otras características de interés pueden ser consultadas en [21, 22].

El Analizador de Espectro permite hacer mediciones en diferentes bandas de frecuencia de interés, y se pueden discriminar las distintas componentes de frecuencia, lo que combina las ventajas de los métodos de banda angosta y banda ancha sugeridos en procedimientos estándar, tal como la ITU K.91, véase la referencia [1].

En este punto es pertinente mencionar que en el documento de Propuesta de Trabajo Final uno de los objetivos señalaba que las mediciones se realizarían con el equipo EME

Spy, que permite la medición continua de los niveles de campo electromagnético en bandas predefinidas, sin embargo, debido a que se contó con el Analizador de Espectro R&S®FSH8, que es de mejores especificaciones técnicas, se seleccionó este último para realizar las mediciones.

- *Antena Isotrópica, R&S®TSEMF-B1*: El rango de frecuencia de operación es desde los 30 MHz a los 3 GHz. Otras características de interés pueden ser consultadas en [23].
- *Computador Portátil*: En éste equipo de cómputo se encuentra preinstalado el software requerido para realizar la comunicación digital entre el Analizador de Espectro y el computador. El software desarrollado con interfaz gráfica permite obtener los datos sensados por la antena isotrópica y registrados en el Analizador de Espectro, a su vez, el software permite realizar el procesamiento de la información y mostrar los resultados correspondientes.
- *Trípode*: Este aparato fue elaborado de tal manera que en sus componentes no se involucraran partes metálicas con la finalidad de no perturbar el campo en cercanía de la sonda. Sus componentes son madera, acrílico y plástico.

### 3.4.2. Aplicativo de Medición

El Analizador de Espectro R&S®FSH8 no contaba con software que permitiera realizar la adquisición de los datos medidos ni su posterior procesamiento, por lo que fue necesario realizar un aplicativo que respondiera a estos requerimientos.

El aplicativo se denominó «Aplicativo para Medición de Campos Electromagnéticos – AM-CEM», el cual cuenta con las siguientes características:

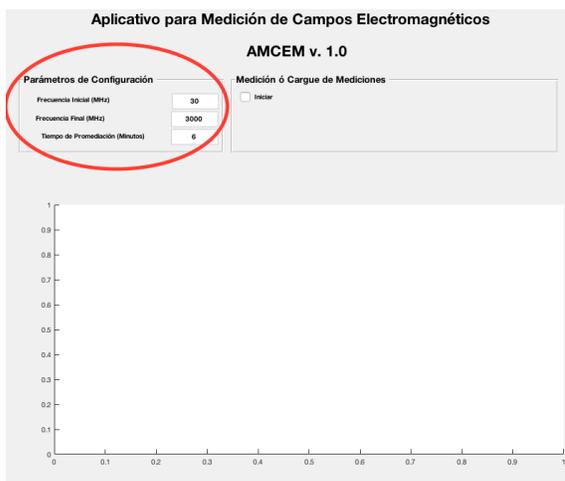
El aplicativo consta de una interfaz gráfica desarrollada en el ambiente de MATLAB que establece la comunicación entre el Computador Portátil y el Analizador de Espectro, obtiene los datos medidos por el analizador y los procesa, mostrando resultados gráficos y numéricos de campo eléctrico y del nivel acumulativo de exposición.

La interfaz se conforma de lo siguiente:

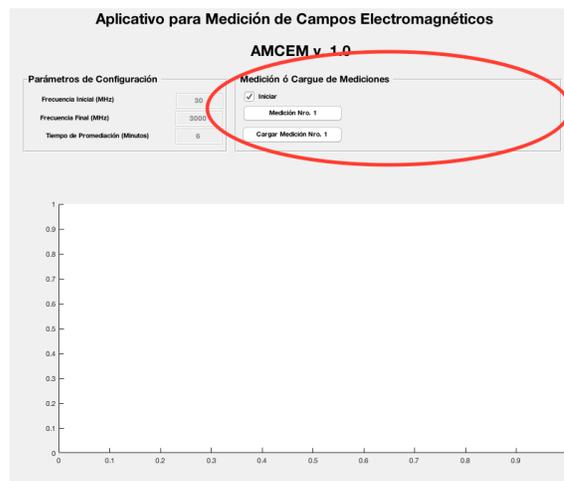
- Marco para ingreso de parámetros de configuración, en la parte superior izquierda. Se activa al iniciar la aplicación, véase óvalo en la subfigura (a) de la figura 3-6. En él se pueden ingresar valores de entrada variables para el ancho de banda fijando la frecuencia inicial y final en MHz y también tiempos variables para promediación, en minutos.

- Marco para seleccionar la actividad a realizar, mediciones o cargue de mediciones, ubicado en la parte superior derecha. Se activa con un click en iniciar, véase óvalo en la subfigura (b) de la figura **3-6**.
- Campos de información y de estado. En la parte superior al marco gráfico se incluyen dos campos de texto; el primero en letras color azul indica el estado del aplicativo; el segundo en letras color negro muestra los valores de configuración, véase óvalo en la subfigura (c) de la figura **3-6**.
- Marco gráfico, se ubica en la parte inferior de la interfaz, véase óvalo en la subfigura (d) de la figura **3-6**. En este se presentan los resultados gráficos y numéricos de las mediciones realizadas.

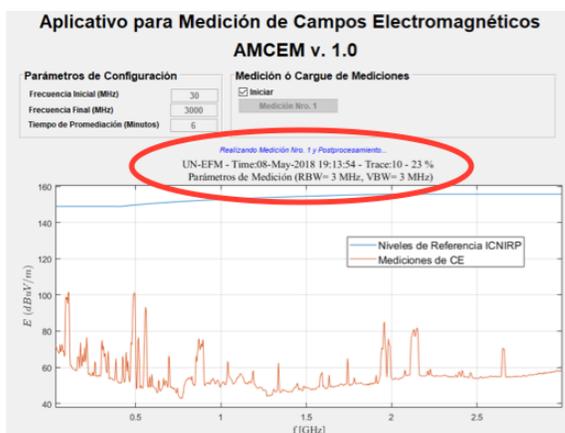
En el Anexo C, se expone una guía rápida de uso del aplicativo.



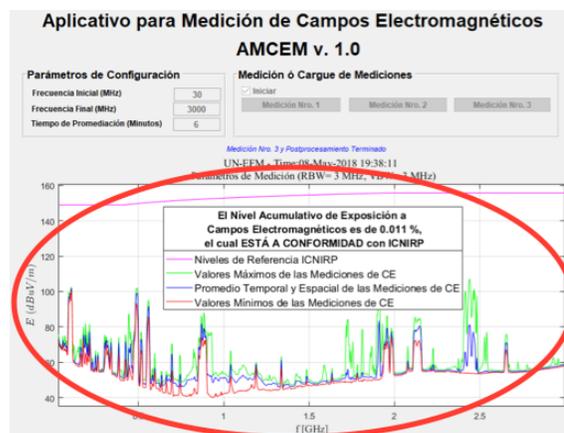
(a) Vista Inicial de la Interfaz



(b) Vista en que se observan activadas las opciones de medición o cargue



(c) Vista que muestra la medición en progreso

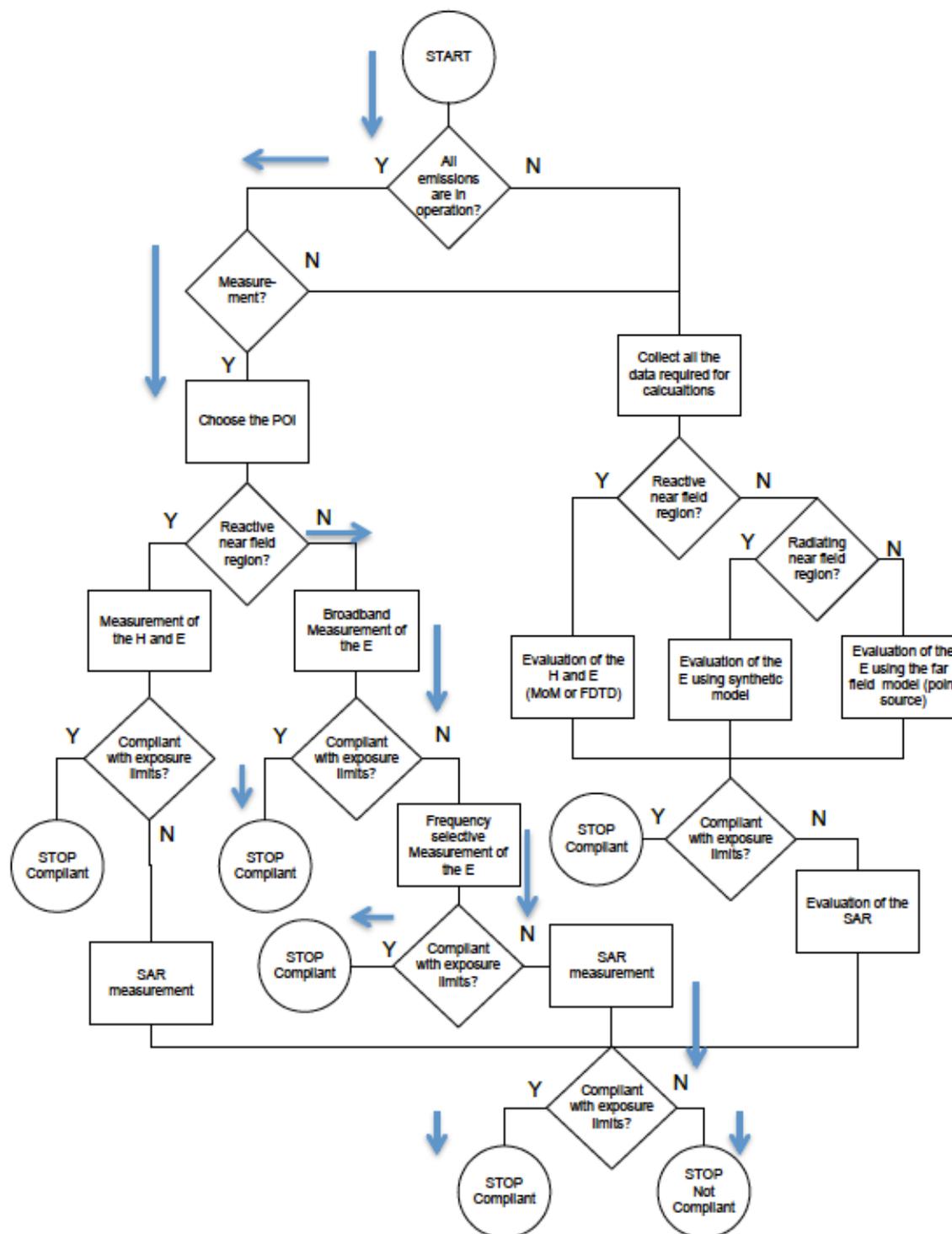


(d) Vista final de la interfaz mostrando los resultados

Figura 3-6.: Diferentes Vistas de la Interfaz del Aplicativo.

### 3.5. Protocolo de Medición

Una buena ilustración del procedimiento para realizar las mediciones de campos electromagnéticos de radiofrecuencia, la ofrece el diagrama de bloques incluido en el Apéndice VII de la Recomendación ITU-T K.91 [1], el cual se muestra en la figura 3-7, en la que además, como aporte, se señala con flechas color azul la posible ruta a seguir para el proceso de medición.



**Figura 3-7.:** Diagrama de bloques de la evaluación de la exposición a campos electromagnéticos indicando la ruta del procedimiento de medición.

Fuente: Imagen extraída de Apéndice VII de la Recomendación ITU-T K.91 [1].

En términos generales, como se observa en la figura 3-7, el procedimiento de evaluación de

la exposición por medición, que se puede realizar sin contar con información de las fuentes de radiación, consta de los siguientes pasos: se escogen los puntos de medición, en seguida se establece si la medición será en la región de campo cercano o no, se define la magnitud (E) a medir, se realiza la medición con un equipo de medición en banda ancha y con los resultados, se verifica si se superan los niveles de referencia en cuyo caso será necesario afinar la medición con mediciones selectivas en frecuencia y se comparan nuevamente y en caso de confirmar que se superan los límites será entonces necesario medir una magnitud de las restricciones básicas que permita establecer si efectivamente se superan los límites de exposición.

Adicionalmente, es preciso mencionar que también se ha tomado como referencia la metodología descrita en el Artículo 5 de la Resolución 1645 [20], sin embargo algunos puntos consideran otras recomendaciones, como las [4, 5] en atención a la particularidad de la medición.

Partiendo de los aspectos mencionados, en los numerales siguientes se indican las actividades a realizar que se requieren para el protocolo de medición:

### 3.5.1. Definición del Momento de Realización de las Mediciones

La recomendación K.91 [1], aconseja que las mediciones se realicen cuando están a su mayor potencia de trabajo, que para el caso de antenas de telefonía móvil se asocia con los mayores niveles de tráfico, mientras que en radiodifusión y televisión se conoce que el funcionamiento es continuo durante todo el día.

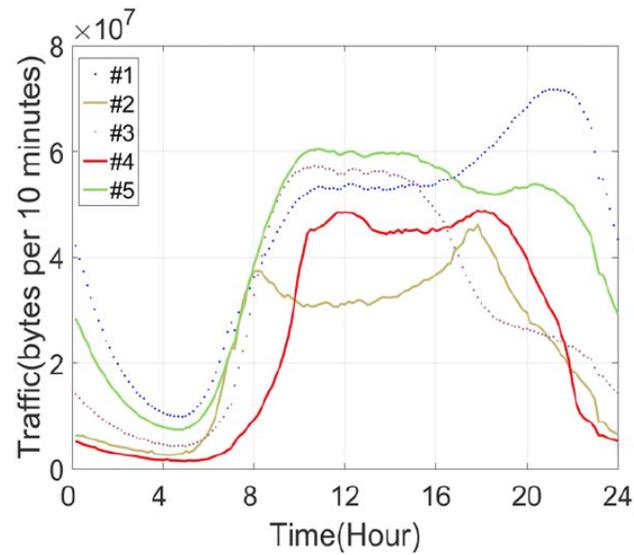
Con la finalidad de determinar la hora y día apropiados de medición, se consultaron las páginas de internet del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, <http://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-channel.html>, y también la de Colombia TIC, <http://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-channel.html>, así como, la de la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones, <https://www.crcom.gov.co/es/pagina/inicio>, en estas páginas no se encontró información relativa a los niveles de tráfico o utilización de las comunicaciones en el país, por lo cual posteriormente se consultó información relativa a estas condiciones en otras latitudes, a fin de analizarlas y verificar si era posible usarlas como parámetro para estimar el momento en que se presenta un nivel nominal alto de tráfico o de utilización.

Se consultaron las referencias [24–35], de las cuales se resalta la [26] cuyo título es «Mobile Traffic Data Decomposition for Understanding Human Urban Activities» por las características siguientes:

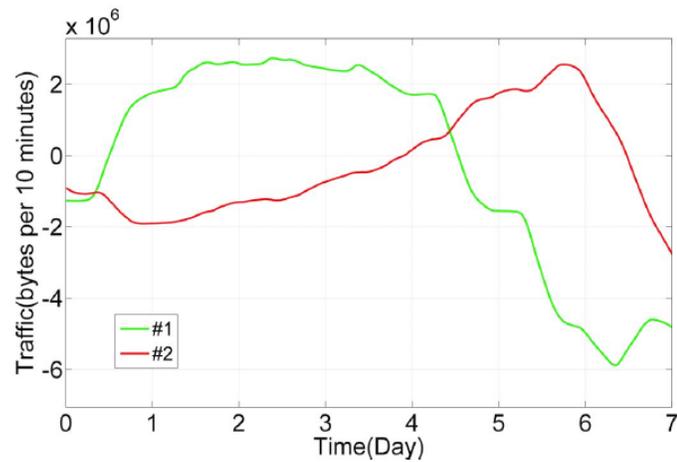
- El objeto de la investigación fue entender los patrones de consumo de tráfico móvil y

revelar las correlaciones entre actividades humanas y los patrones de tráfico móviles en el ambiente urbano.

- El conjunto de datos empleado en la investigación es una traza celular anónima recolectada, entre agosto 1 y agosto 31 de 2014, por un Proveedor de Servicios de Internet de Shanghai (ciudad con más de 20 millones de habitantes, en promedio a 4 msnm), que contiene 2.4 peta bytes ( $10^{15}$ ) registros de alrededor de 6400 estaciones base, todas en Shanghai. Cada entrada en la traza está conformada por un identificador de dispositivos (anónimos), el tiempo de inicio-final de la conexión de datos, el identificador de la estación base, la dirección de la estación base, y la cantidad de datos 3G o LTE usados en cada conexión.
  
- La investigación identifica cinco patrones diarios y dos patrones semanales en el dominio del tiempo, identificados por agrupación de las torres celulares. Los patrones diarios reflejan variaciones de tráfico típicas desde las 00:00 hasta las 24:00 en un día y muestran diferencias significativas de sus horas pico, lo cual puede ser relacionado a actividades humanas regulares. Todos los patrones diarios encuentran la hora de tráfico valle a la media noche, pero difieren en términos de donde aparecen las horas de tráfico pico. A continuación se listan los patrones identificados y en las subfiguras (a) y (b) de la figura **3-8** se muestran los perfiles de tráfico correspondientes:
  - El patrón diario # 1, área residencial, alcanza el pico de tráfico móvil en la noche.
  - El patrón diario # 2, área de transportes, muestra dos picos de horas picos alrededor de las 8:00 y las 18:00.
  - El patrón diario # 3, área de oficinas, tiene un alto tráfico estable y perdurable desde las 8:00 hasta las 16:00.
  - El patrón de tráfico móvil diario # 4, área de entretenimiento, se mantiene alto durante el tiempo de día especialmente en las horas del almuerzo y de la comida.
  - El tráfico del último patrón diario # 5, área mezclada, muestra características de los cuatro anteriores, por lo que es considerado como una mezcla de los cuatro patrones anteriores.
  
  - Patrón de tráfico semanal # 1, se asocia con actividades humanas donde las personas trabajan entre semana y descansan el fin de semana, tales como de oficina o negocios.
  - Patrón de tráfico móvil semanal # 2, se alcanza los picos de tráfico los fines de semana y se asocia a áreas de entretenimiento y a áreas residenciales.



(a) Patrones diarios



(b) Patrones semanales

**Figura 3-8.:** Patrones de tráfico móvil.

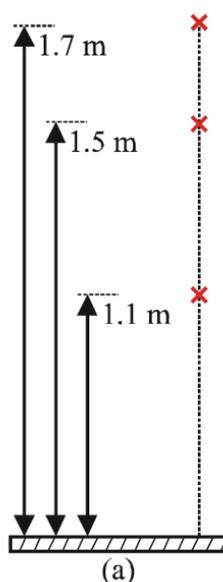
Fuente: Imagen extraída de [26]

- Las referencias [24, 25, 27–35] confirman los resultados obtenidos en la [26].

Sugiere la recomendación K.61 [5] que ante la presencia de fuentes con variabilidad temporal, las mediciones se deberían realizar en los períodos en donde ocurren los picos de tráfico.

### 3.5.2. Selección de los Puntos de Medición

La existencia de múltiples fuentes de radiaciones no ionizantes hace que sea necesario un recorrido del lugar objeto de medición, con la finalidad de determinar los sitios o puntos de mayor permanencia de las personas e identificar aquellos en los que la intensidad de campo eléctrico es mayor. Una vez determinados estos puntos objeto de investigación, en cada uno de ellos se debe realizar la medición conforme a lo dispuesto en la figura 3-9, obteniendo de esta manera mediciones aproximadamente de la altura del cuerpo humano promedio, para así evaluar la exposición equivalente a la del cuerpo.



**Figura 3-9.:** Puntos de Medición para Promediación Espacial

Fuente: Recomendación ITU-T K.61 (01/2018)

Las recomendaciones K.61 y K.91 [1, 5] reconocen la existencia de los efectos de múltiples fuentes operando a diferentes frecuencias, y tal como lo establece la ICNIRP de 1998 [3] estos efectos deben ser considerados como una suma ponderada en la que cada fuente individual es dividida entre el límite aplicable a su frecuencia, véase la ecuación 3-1.

$$\sum_{i=100kHz}^{1MHz} \left( \frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i=1MHz}^{300GHz} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (3-1)$$

Por otra parte, indica la recomendación K.61 [5] que las reflexiones multi-ruta pueden crear distribuciones no uniformes de campo, de lo cual surge una variabilidad espacial, la ecuación 3-2 permite considerarla en la ponderación del campo.

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i^2}{N}} \quad (3-2)$$

### 3.5.3. Configuración del Equipo de Medición

En presencia de múltiples fuentes de campos electromagnéticos, la Resolución Nro. 1645 [20] establece que las verificaciones iniciales de límites de exposición deben llevarse a cabo con el equipo de medición en banda ancha para obtener la contribución total de todas las fuentes radiantes en el rango considerado.

La configuración y características del equipo de medición, Analizador de Espectro, R&S®FSH8, se listan en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1.:** Características configuradas en el Analizador de Espectros.

Configuración del Analizador de Espectros	
Característica	Valor
Ancho de Banda (MHz)	2970
Ancho de Banda de Resolución (MHz)	3
Ancho de Banda de Video (MHz)	3
Frecuencia de Inicio (MHz)	30
Frecuencia de Finalización (MHz)	3000
Escala de Frecuencia	GHz
Ventana de Tiempo de Medición (Minutos)	6
Tiempo de Barrido	Automático
Transductor	Antena Isotrópica

Adicionalmente, es importante resaltar que las mediciones en banda ancha y en banda angosta<sup>1</sup> es posible realizarlas con el Analizador y el aplicativo desarrollado, descritos en los numerales 3.4.1 y 3.4.2 de éste trabajo.

<sup>1</sup>Las mediciones en banda ancha, permiten evaluar el entorno independientemente del número de fuentes existentes; y las mediciones en banda angosta, suelen realizarse cuando las mediciones en banda ancha arrojan como resultado que las medidas exceden los valores límites de exposición y sirven para determinar la contribución de fuentes específicas.

### 3.5.4. Procesamiento de las Mediciones

Terminada la actividad de medición por el tiempo que se defina y en el ancho de banda que se elija, se continúa con el procesamiento de la información que básicamente consiste en los pasos siguientes:

- Realizar una promediación temporal de las mediciones hechas durante la ventana de tiempo seleccionada, haciendo uso de la ecuación 3-1.
- Realizar una promediación espacial de las mediciones hechas según se ilustra en la figura **3-9** en cada punto seleccionado, haciendo uso de la ecuación 3-1.
- Determinar la exposición porcentual (acumulativa) usando la ecuación 3-2.

Finalmente, es preciso mencionar que, si luego de aplicar este método de medición y procesamiento presentado, se observara que los niveles medidos superan los niveles de referencia, sería necesario recurrir a la medición de las variables o magnitudes de las restricciones básicas, las que exceden el alcance del presente trabajo.

## 4. Resultados y Análisis

En los numerales siguientes se listan los resultados obtenidos, con la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 3, y su correspondiente análisis:

### 4.1. Mediciones en Diferentes Sitios de Bogotá

Luego de aplicar el protocolo de medición descrito en el numeral 3.5 de este trabajo, para cada uno de los puntos en los sitios de medición seleccionados, los resultados son los que se indican a continuación:

***Barrio La Esmeralda:*** En este sitio, vivienda en zona residencial, se realizó un escaneo rápido con el equipo de medición y la sonda a partir del cual se seleccionaron dos puntos de medición; uno de ellos en una alcoba del segundo piso y con línea de vista a una antena de telefonía móvil, que fue en el que mayor nivel acumulativo de exposición porcentual a campos electromagnéticos se obtuvo; y el otro en el patio posterior. Obsérvese en la subfigura (a) de la figura 3-5 plano de ubicación del sitio de medida y de las antenas de telecomunicaciones más cercanas.

En total se realizaron 6 mediciones, correspondientes a tres alturas (1.1, 1.5 y 1.7 m) por cada punto seleccionado, con una duración de 6 minutos por medición. La medición en cada altura produjo 43 trazas<sup>1</sup> a las cuales se les aplicó la promediación temporal que se enuncia en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Con las trazas promediadas temporalmente, tres en total (una por cada altura), se realizó la promediación espacial indicada en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Finalmente, se obtuvo una traza resultante por punto de medición, dos en total, a las cuales se les calculó la exposición porcentual según fue señalado en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Los resultados se indican a continuación:

- ***Resultados numéricos:*** Los resultados finales de la mediciones, se muestran en la Tabla 4-1, los cuales están a conformidad con las recomendaciones de la ICNIRP.

---

<sup>1</sup>El término traza aquí se usa para referirse al conjunto de valores de campo eléctrico (631) y frecuencias (631) correspondientes, obtenidos por el analizador en cada medición en el ancho de banda considerado.

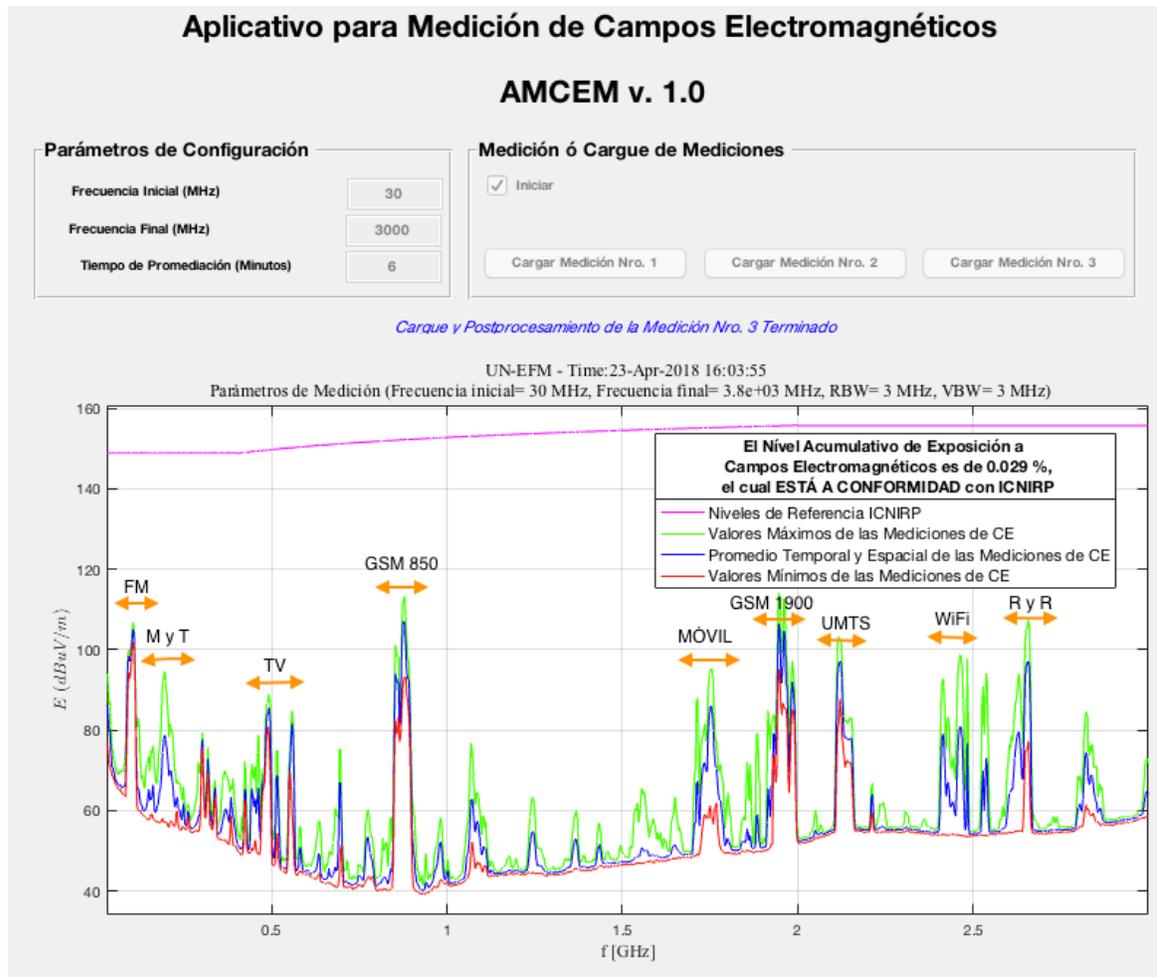
**Tabla 4-1.:** Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, barrio La Esmeralda.

Niveles Acumulativos de Exposición a Campos Electromagnéticos			
Punto de Medición	Fecha	Hora de inicio	Valor (Porcentaje)
1	23/04/2018	15:30	0.029 %
2	23/04/2018	16:00	0.006 %

El resultado del punto de medición número 1 correspondió a 3.400 veces menor que el valor de la exposición acumulativa definida en las recomendaciones de la ICNIRP; el resultado del punto de medición número 2 reportó 16.500 veces menor que el dispuesto en las recomendaciones de la ICNIRP.

- **Resultados gráficos:** En las figuras 4-1 y 4-2 se muestran los resultados finales, y permiten identificar que las señales de FM (88-108 MHz), GSM 850 (869-894 MHz) y GSM 1900 (1930-1990 MHz) son las de mayor intensidad de campo eléctrico; coexisten señales de TV (470-608 MHz), WiFi (2400-2483 MHz) y UMTS (2110-2170 MHz) entre otras, pero son de menor intensidad. En estas mismas figuras también es posible observar que los niveles de campo eléctrico en todas las frecuencias del rango están por debajo de los niveles de referencia de la ICNIRP de 1998 y que los niveles de campo eléctrico en la figura 4-2 son inferiores respecto de los de la figura 4-1.

En la figura 4-1 se han identificado, con flechas color naranja señalando el ancho de banda aproximado y el nombre, algunos de los servicios de telecomunicaciones más comunes partiendo de la información registrada en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de frecuencia consultada en el enlace <http://cnabf.ane.gov.co/cnabf/>. Otros que se identificaron fueron; M y T, correspondientes a servicios móviles marítimos, por satélite, aeronáutico y a televisión; R y R, pertenecientes a servicios de radionavegación aeronáutica y por satélite, radiolocalización y radioastronomía.



**Figura 4-1.:** Mediciones realizadas en la habitación del segundo nivel que tiene línea de vista con una antena de telefonía móvil. El mayor nivel de campo eléctrico,  $E$ , corresponde a ese tipo de comunicaciones (aproximadamente para GSM 850 y GSM 1900 MHz).

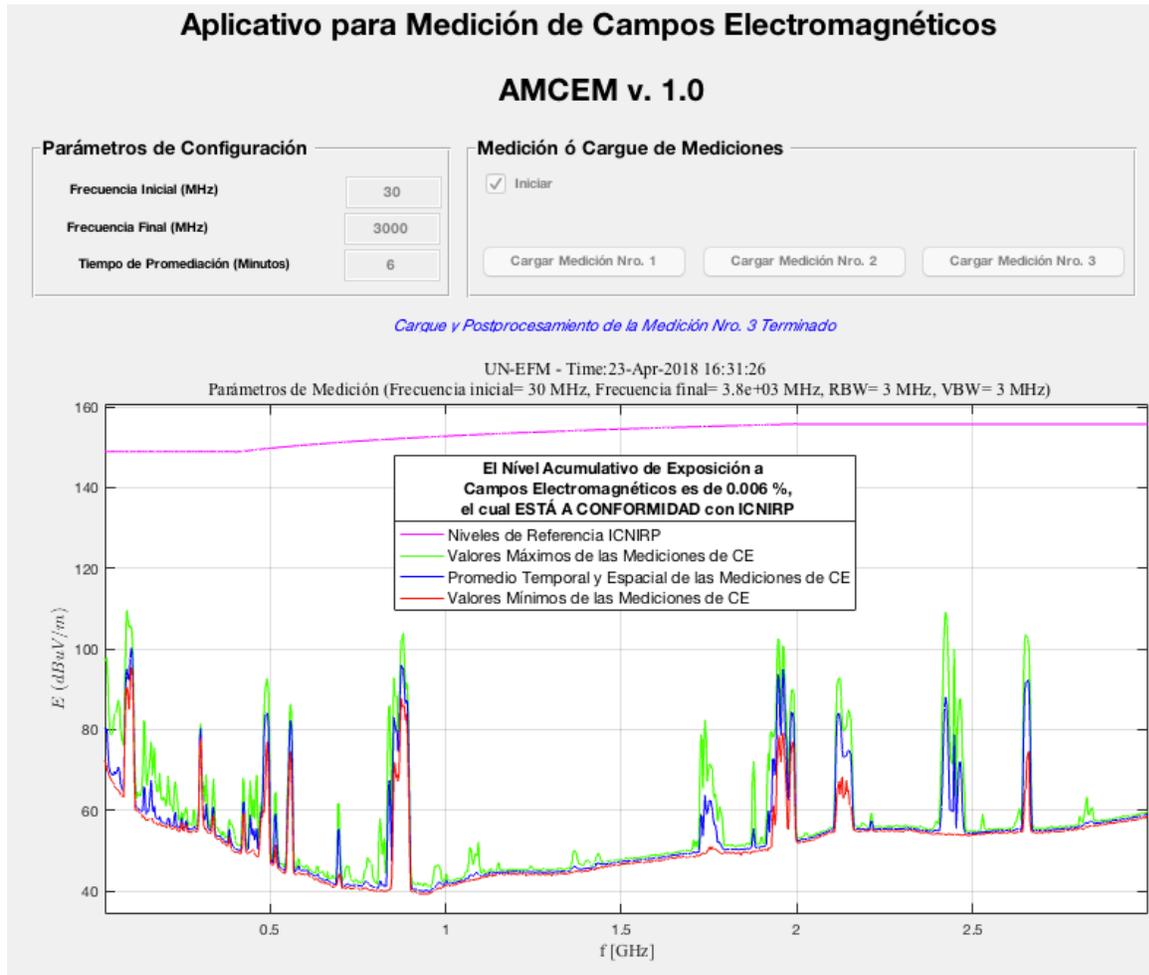


Figura 4-2.: Mediciones realizadas en el patio de la vivienda.

**Barrio Nicolás de Federmán:** En este sitio, vivienda en zona residencial, se realizó un escaneo rápido con el equipo de medición y la sonda a partir del cual se seleccionaron dos puntos de medición; uno en una alcoba del segundo piso; y el otro en el patio posterior, en éste se obtuvo el mayor nivel acumulativo de exposición porcentual a campos electromagnéticos se obtuvo. Obsérvese en la subfigura (b) de la figura **3-5** plano de ubicación del sitio de medida y de las antenas de telecomunicaciones más cercanas.

En total se realizaron 6 mediciones, correspondientes a tres alturas (1.1, 1.5 y 1.7 m) por cada punto seleccionado, con una duración de 6 minutos por medición. La medición en cada altura produjo 43 trazas a las cuales se les aplicó la promediación temporal que se enuncia en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Con las trazas promediadas temporalmente, tres en total (una por cada altura), se realizó la promediación espacial indicada en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Finalmente, se obtuvo una traza resultante por punto de medición, dos en total, a cada una de las cuales se les calculó la exposición porcentual según fue señalado en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Los resultados se indican a continuación:

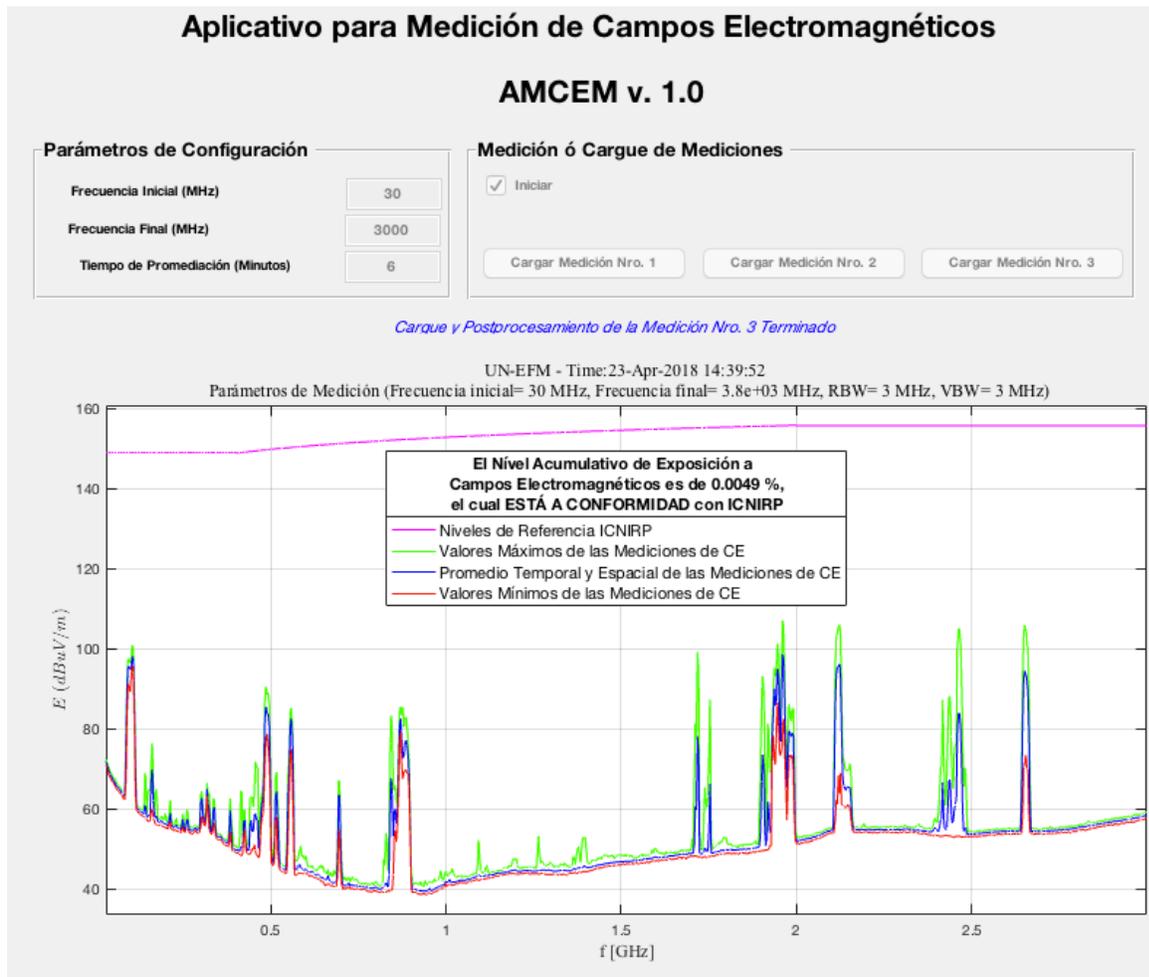
- **Resultados numéricos:** Los resultados finales de la mediciones, se muestran en la Tabla **4-2**, los cuales están a conformidad con las recomendaciones de la ICNIRP.

**Tabla 4-2.:** Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, barrio Nicolás de Federmán.

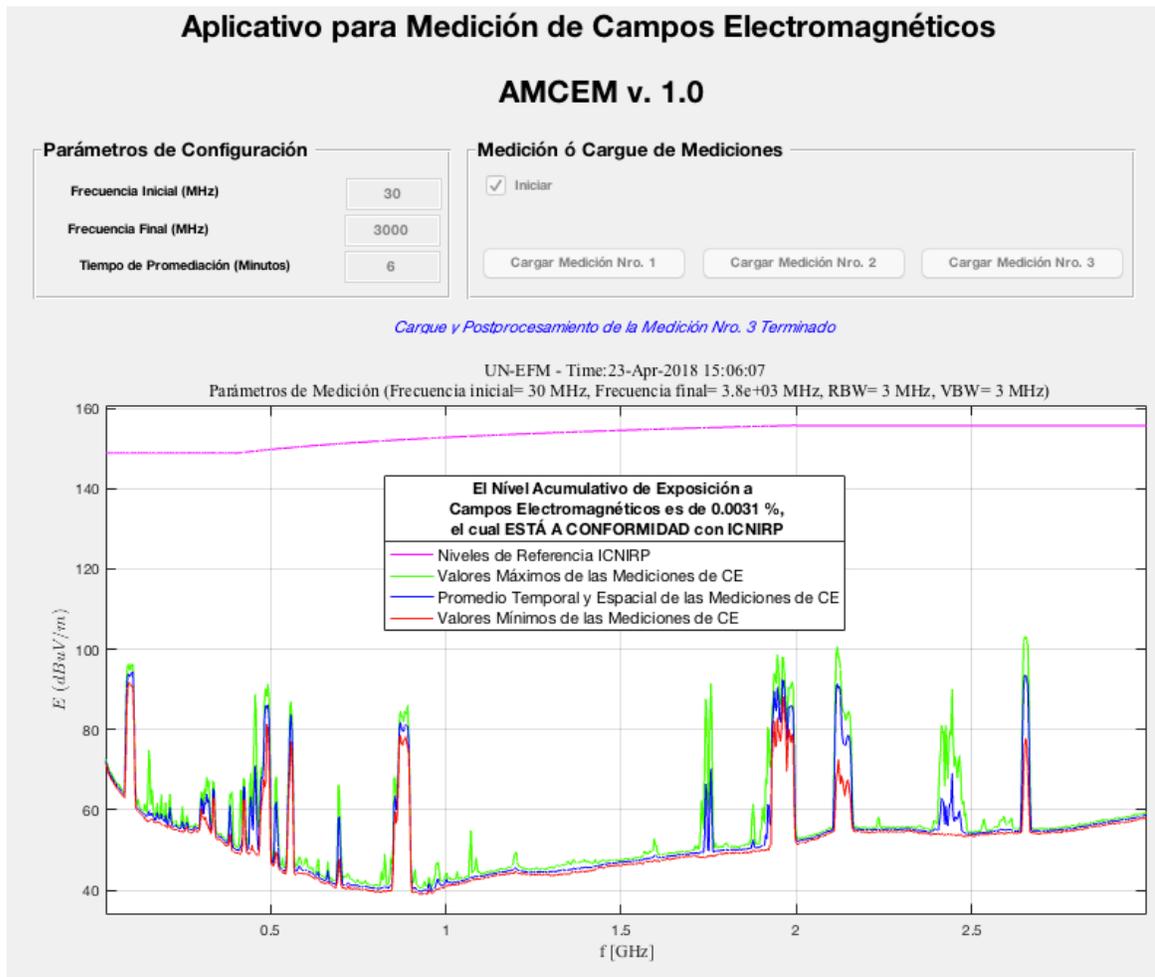
Niveles Acumulativos de Exposición a Campos Electromagnéticos			
Punto de Medición	Fecha	Hora de inicio	Valor (Porcentaje)
1	23/04/2018	14:15	0.0046 %
2	23/04/2018	14:45	0.0029 %

El resultado para el punto de medición número 1 correspondió a 20.000 veces menor que el valor de la exposición acumulativa definida en las recomendaciones de la ICNIRP; el resultado del punto de medición número 2 reportó 32.000 veces menor que el dispuesto en las recomendaciones de la ICNIRP.

- **Resultados gráficos:** En las figuras **4-3** y **4-4** se muestran los resultados finales, y permiten identificar que las señales de FM (87.5-108 MHz), GSM 1900 (1930-1990 MHz) y UMTS (2110-2170 MHz) son las de mayor intensidad de campo eléctrico; coexisten señales de WiFi y 4G entre otras, pero son de menor intensidad. En estas mismas figuras también es posible observar que los niveles de campo eléctrico en todas las frecuencias del rango están por debajo de los niveles de referencia de la ICNIRP y que hay niveles inferiores de campo eléctrico,  $E$ , en la figura **4-4** respecto de los de la figura **4-3**.



**Figura 4-3.:** Mediciones realizadas en el patio posterior de la vivienda. El mayor nivel de campo eléctrico,  $E$ , corresponde a comunicaciones de FM y GSM 1900.



**Figura 4-4.:** Mediciones realizadas en una habitación del segundo piso.

**Laboratorio CMUN Universidad Nacional:** En este sitio se realizó un escaneo rápido con el equipo de medición y la sonda a partir del cual se seleccionó un punto de medición, pero se realizaron dos mediciones en diferentes días (martes y miércoles) y horas (7:00 pm y 10:40 am). Obsérvese en la subfigura (c) de la figura **3-5** plano de ubicación del sitio de medida y de las antenas de telecomunicaciones más cercanas.

En total se realizaron 6 mediciones, correspondientes a tres alturas (1.1, 1.5 y 1.7 m) en el punto seleccionado por cada día, con una duración de 6 minutos por medición. La medición en cada altura produjo 44 trazas a las cuales se les aplicó la promediación temporal que se enuncia en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Con las trazas promediadas temporalmente, tres en total (una por cada altura), se realizó la promediación espacial indicada en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Finalmente, se obtuvo una traza resultante para el punto de medición por cada día, dos en total, a cada una de las cuales se les calculó la exposición porcentual según fue señalado en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Los resultados se indican a continuación:

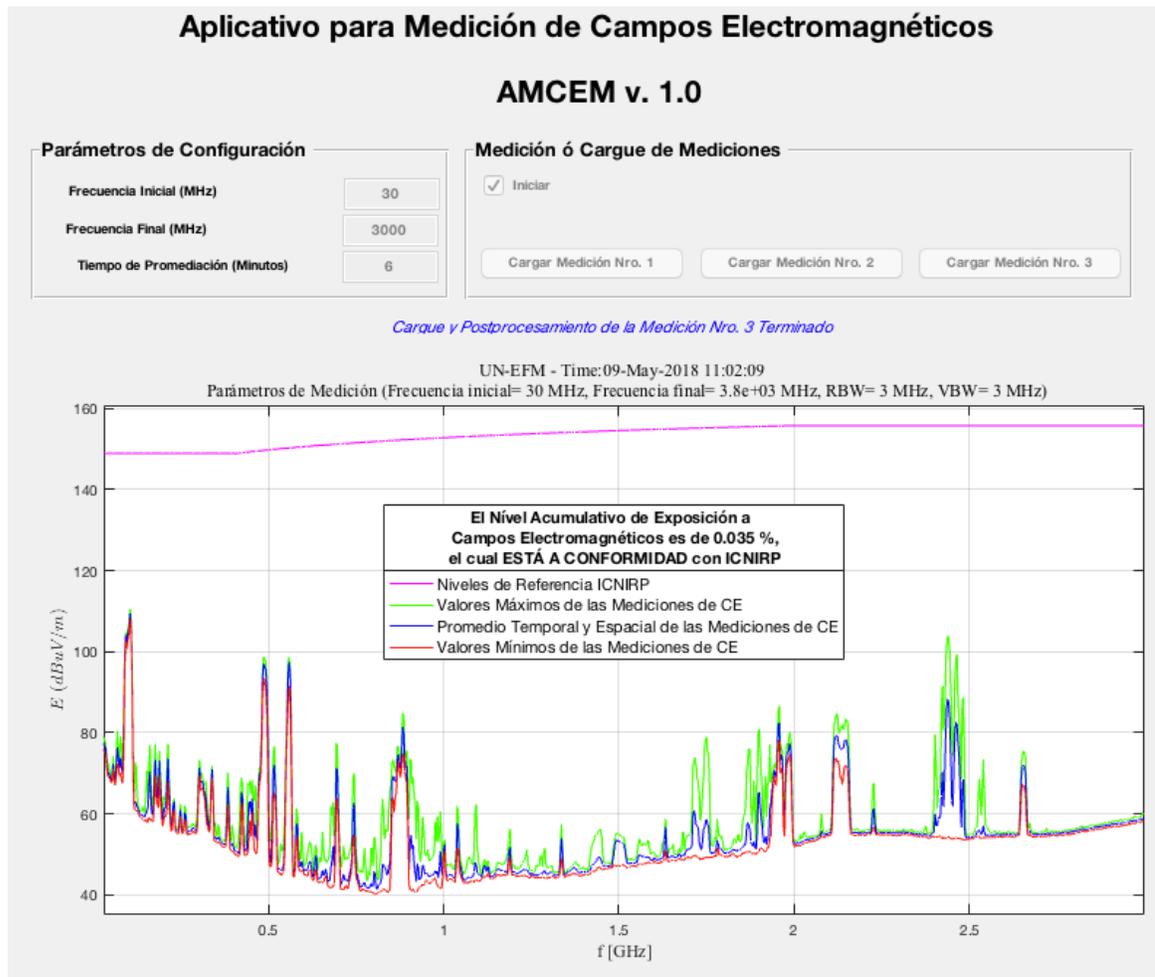
- **Resultados numéricos:** Los resultados finales de la mediciones, se muestran en la Tabla **4-3**, los cuales están a conformidad con las recomendaciones de la ICNIRP.

**Tabla 4-3.:** Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, Laboratorio CMUN Universidad Nacional.

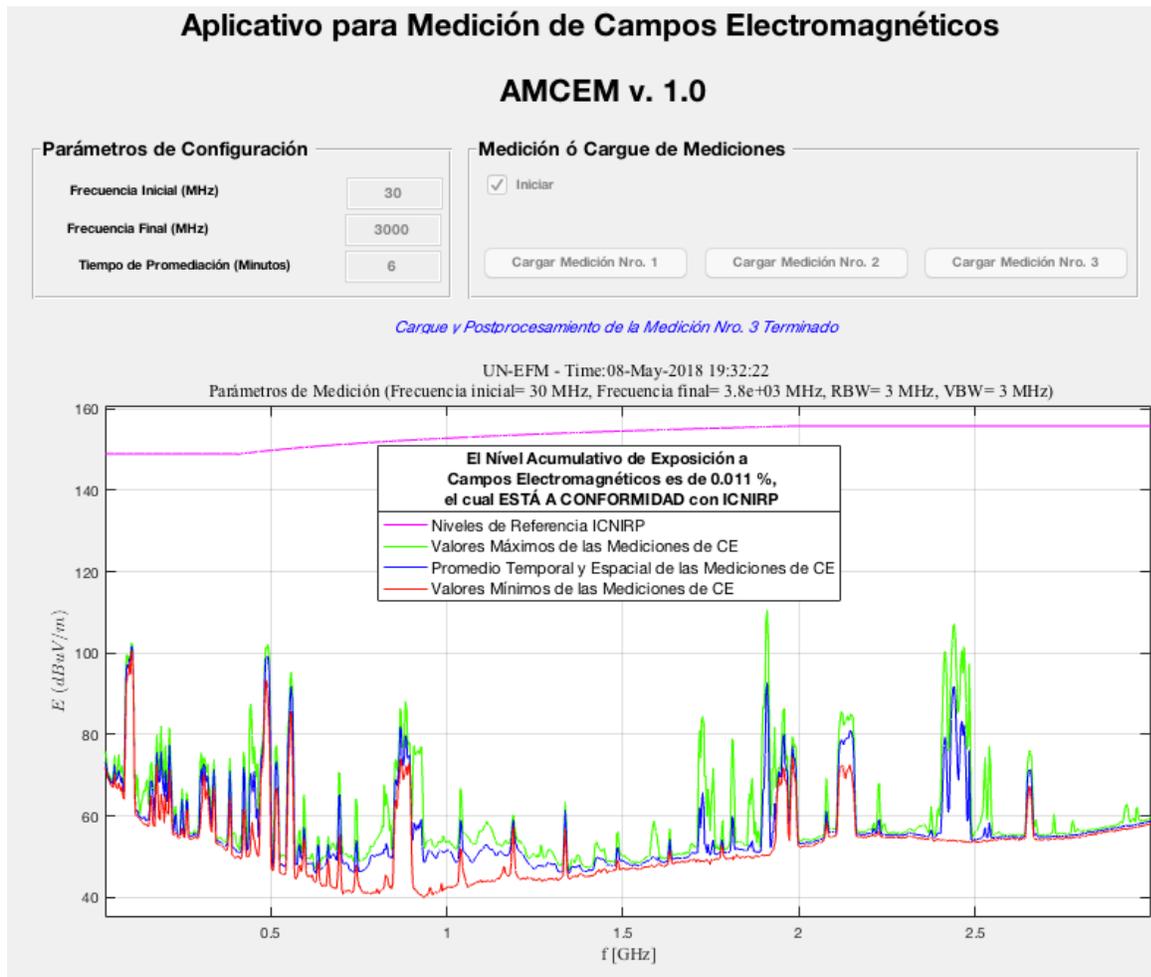
Niveles Acumulativos de Exposición a Campos Electromagnéticos			
Punto de Medición	Fecha	Hora de inicio	Valor (Porcentaje)
1	09/05/2018	10:40	0.035 %
2	08/05/2018	19:00	0.011 %

El resultado para el punto de medición número 1 correspondió a 2.800 veces menor que el valor de la exposición acumulativa definida en las recomendaciones de la ICNIRP; el resultado del punto de medición número 2 reportó 9.000 veces menor que el dispuesto en las recomendaciones de la ICNIRP.

- **Resultados gráficos:** En las figuras **4-5** y **4-6** se muestran los resultados finales, y permiten identificar que las señales de FM (87.5-108 MHz) y UHF (470-790 MHz) son las de mayor intensidad de campo eléctrico; coexisten señales de WiFi y 4G entre otras, pero son de menor intensidad. En estas mismas figuras también es posible observar que los niveles de campo eléctrico en todas las frecuencias del rango están por debajo de los niveles de referencia de la ICNIRP y que hay niveles inferiores de campo eléctrico,  $E$ , en la figura **4-6** respecto a los de la figura **4-5**.



**Figura 4-5.:** Mediciones realizadas en el laboratorio CMUN de la Universidad Nacional. El mayor nivel de campo eléctrico,  $E$ , corresponde a comunicaciones del tipo FM y UHF.



**Figura 4-6.:** Mediciones realizadas en el laboratorio CMUN de la Universidad Nacional.

**Chapinero Central:** En este sitio, edificio de oficinas, se realizó un escaneo rápido con el equipo de medición y la sonda a partir del cual se seleccionaron tres puntos de medición; el primero con vista hacia el oriente; el segundo con vista hacia el sur, estos dos en el piso 12; y el tercero con vista al norte y línea de vista a una antena de telefonía móvil. Obsérvese en la subfigura (d) de la figura 3-5 plano de ubicación del sitio de medida y de las antenas de telecomunicaciones más cercanas.

En total se realizaron 9 mediciones, correspondientes a tres alturas (1.1, 1.5 y 1.7 m) por cada punto seleccionado, con una duración de 6 minutos por medición. La medición en cada altura produjo 46 trazas a las cuales se les aplicó la promediación temporal que se enuncia en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Con las trazas promediadas temporalmente, tres en total (una por cada altura), se realizó la promediación espacial indicada en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Finalmente, se obtuvo una traza resultante por punto de medición, tres en total, a cada una de las cuales se les calculó la exposición porcentual según fue señalado en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Los resultados se indican a continuación:

- **Resultados numéricos:** Los resultados finales de la mediciones, se muestran en la Tabla 4-4, los cuales están a conformidad con las recomendaciones de la ICNIRP.

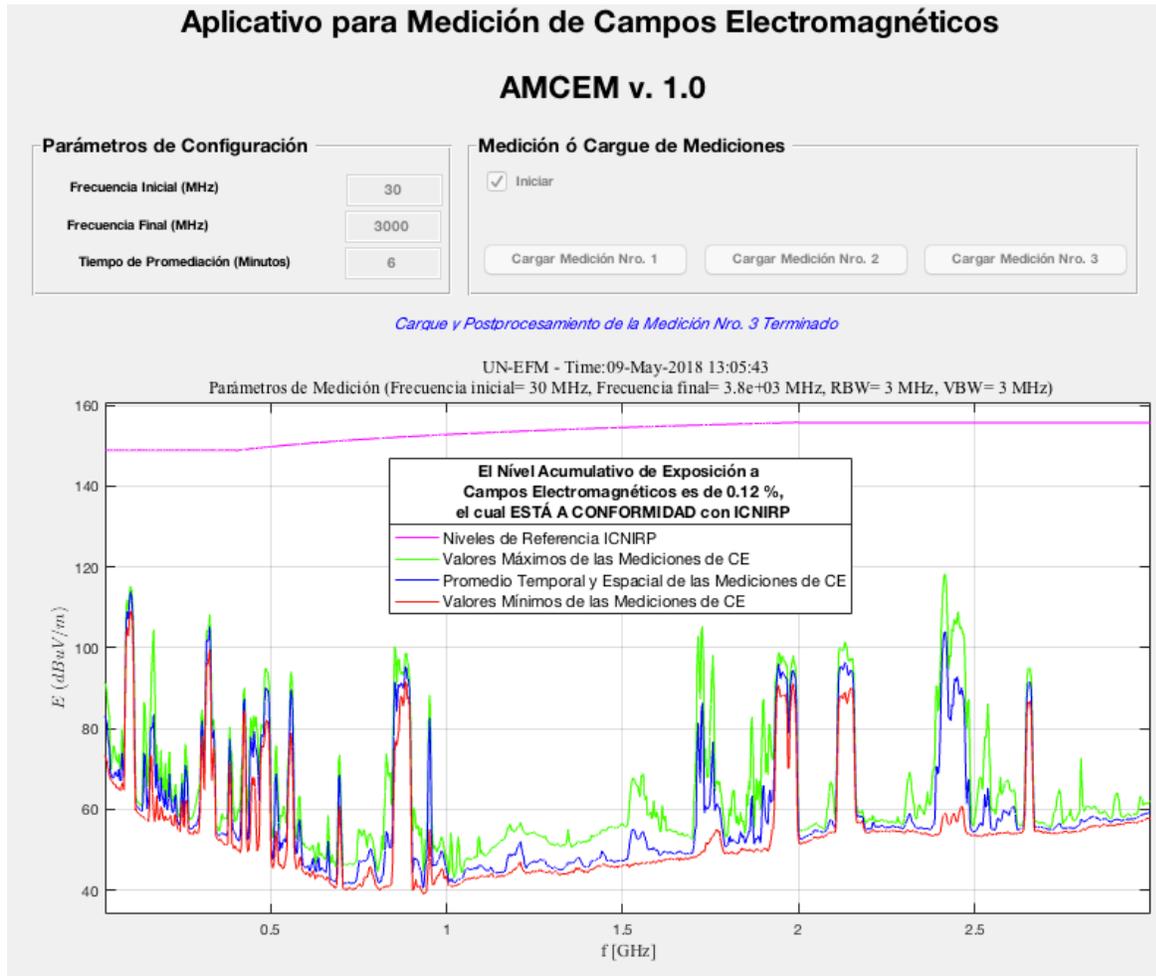
**Tabla 4-4.:** Resultados Finales Puntos de Mediciones Nros. 1, 2 y 3, barrio Chapinero Central.

Niveles Acumulativos de Exposición a Campos Electromagnéticos			
Punto de Medición	Fecha	Hora de inicio	Valor (Porcentaje)
1	09/05/2018	12:40	0.12 %
2	09/05/2018	13:15	0.092 %
3	09/05/2018	13:40	0.028 %

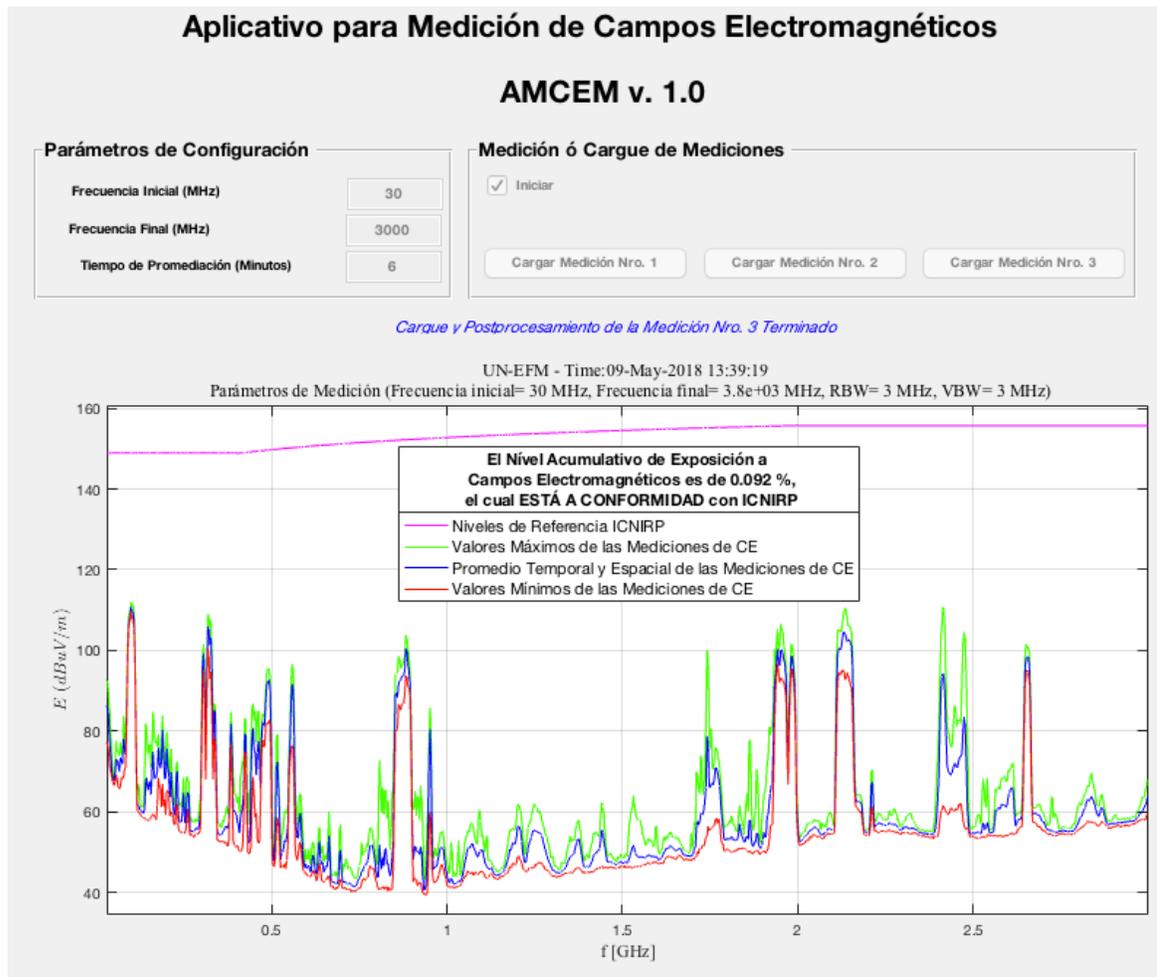
El resultado para el punto de medición número 1 correspondió a 800 veces menor que el valor de la exposición acumulativa definida en las recomendaciones de la ICNIRP; el resultado del punto de medición número 2 reportó 1.000 veces menor que el dispuesto en las recomendaciones de la ICNIRP; y para el punto de medición número 3 es 3.500 veces menor.

- **Resultados gráficos:** En las figuras 4-7, 4-8 y 4-9 se muestran los resultados finales, y permiten identificar que las señales de FM (87.5-108 MHz) y WiFi (2400-2483 MHz) son las de mayor intensidad de campo eléctrico; coexisten señales de GSM y 4G entre otras, pero son de menor intensidad. En estas mismas figuras también es posible observar que los niveles de campo eléctrico en todas las frecuencias del rango

están por debajo de los niveles de referencia de la ICNIRP y que hay niveles inferiores de campo eléctrico,  $E$ , en la figura 4-9 respecto de los de las figuras 4-8 y 4-7.



**Figura 4-7.:** Mediciones realizadas en la zona de cafetería con vista hacia el oriente y ubicada en el piso 12. El mayor nivel de campo eléctrico,  $E$ , corresponde a las comunicaciones en las bandas de FM, UHF, GSM 850, GSM 1900, UMTS y WiFi .



**Figura 4-8.:** Mediciones realizadas en el balcón de una oficina con vista hacia el sur ubicada en el piso 13.

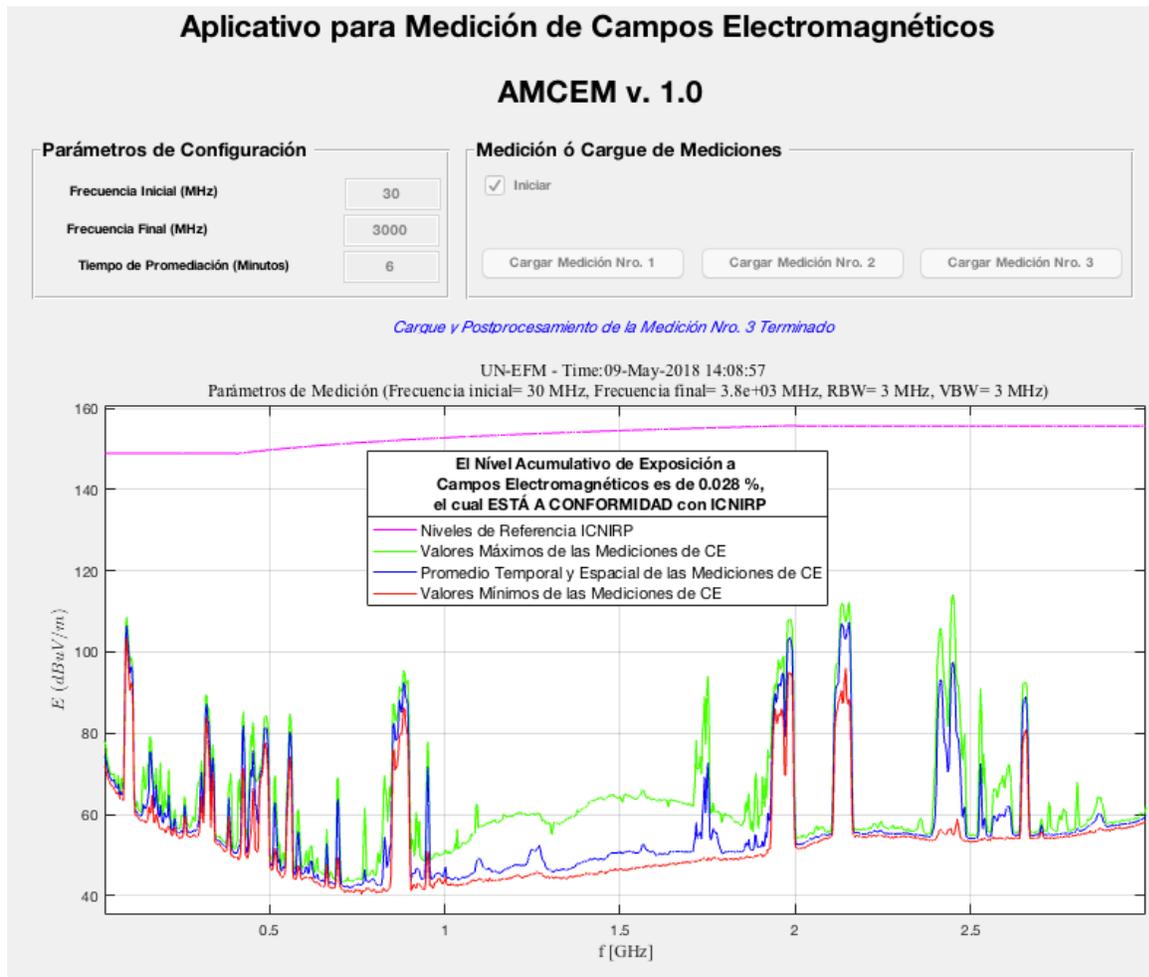


Figura 4-9.: Mediciones realizadas en una oficina con vista al norte ubicada en el piso 13.

**Barrio Chicó Norte:** En este sitio, apartamento en el piso 5, se realizó un escaneo rápido con el equipo de medición y la sonda a partir del cual se seleccionaron dos puntos de medición; uno ubicado en la sala que tiene vista al occidente; y el otro en la esquina nororiental del apartamento, este último arrojó un mayor nivel de exposición porcentual. Obsérvese en la subfigura (e) de la figura 3-5 plano de ubicación del sitio de medida y de las antenas de telecomunicaciones mas cercanas.

En total se realizaron 6 mediciones, correspondientes a tres alturas (1.1, 1.5 y 1.7 m) por cada punto seleccionado, con una duración de 6 minutos por medición. La medición en cada altura produjo 46 trazas a las cuales se les aplicó la promediación temporal que se enuncia en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Con las trazas promediadas temporalmente, tres en total (una por cada altura), se realizó la promediación espacial indicada en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Finalmente, se obtuvo una traza resultante por punto de medición, dos en total, a cada una de las cuales se les calculó la exposición porcentual según fue señalado en el numeral 3.5.4. de este trabajo. Los resultados se indican a continuación:

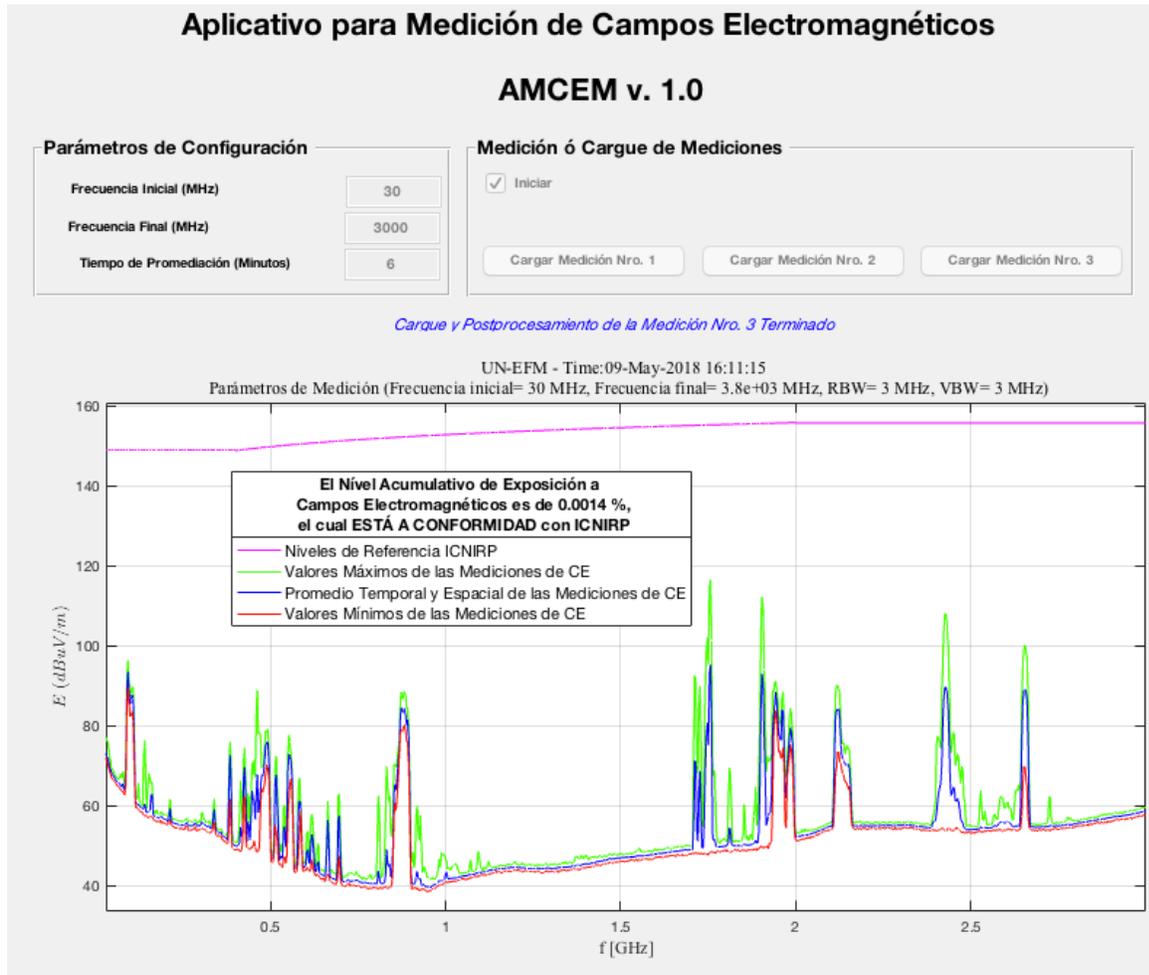
- **Resultados numéricos:** Los resultados finales de la mediciones, se muestran en la Tabla 4-5, los cuales están a conformidad con las recomendaciones de la ICNIRP.

**Tabla 4-5.:** Resultados Finales Puntos de Medición Nros. 1 y 2, barrio Chicó Norte.

Niveles Acumulativos de Exposición a Campos Electromagnéticos			
Punto de Medición	Fecha	Hora de inicio	Valor (Porcentaje)
1	09/05/2018	15:45	0.0014 %
2	09/05/2018	16:15	0.0038 %

En el caso del resultado para el punto de medición número 1 correspondió a 70.000 veces menor que el valor de la exposición acumulativa definida en las recomendaciones de la ICNIRP; el resultado del punto de medición número 2 reportó 26.000 veces menor que el dispuesto en las recomendaciones de la ICNIRP.

- **Resultados gráficos:** En las figuras 4-10 y 4-11 se observan los resultados finales, y permiten identificar que las señales de FM, GSM 850, GSM 1900 y UMTS son las de mayor intensidad de campo eléctrico; coexisten señales de WiFi y 4G entre otras, pero son de menor intensidad. En estas mismas figuras también es posible observar que los niveles de campo eléctrico en todas las frecuencias del rango están por debajo de los niveles de referencia de la ICNIRP y que hay niveles superiores de campo eléctrico,  $E$ , en la figura 4-11 respecto de los de la figura 4-10.



**Figura 4-10.:** Mediciones realizadas en la sala del apartamento que tiene vista al occidente. El mayor nivel de campo eléctrico,  $E$ , corresponde a comunicaciones de tipo FM GSM e incluso WiFi.

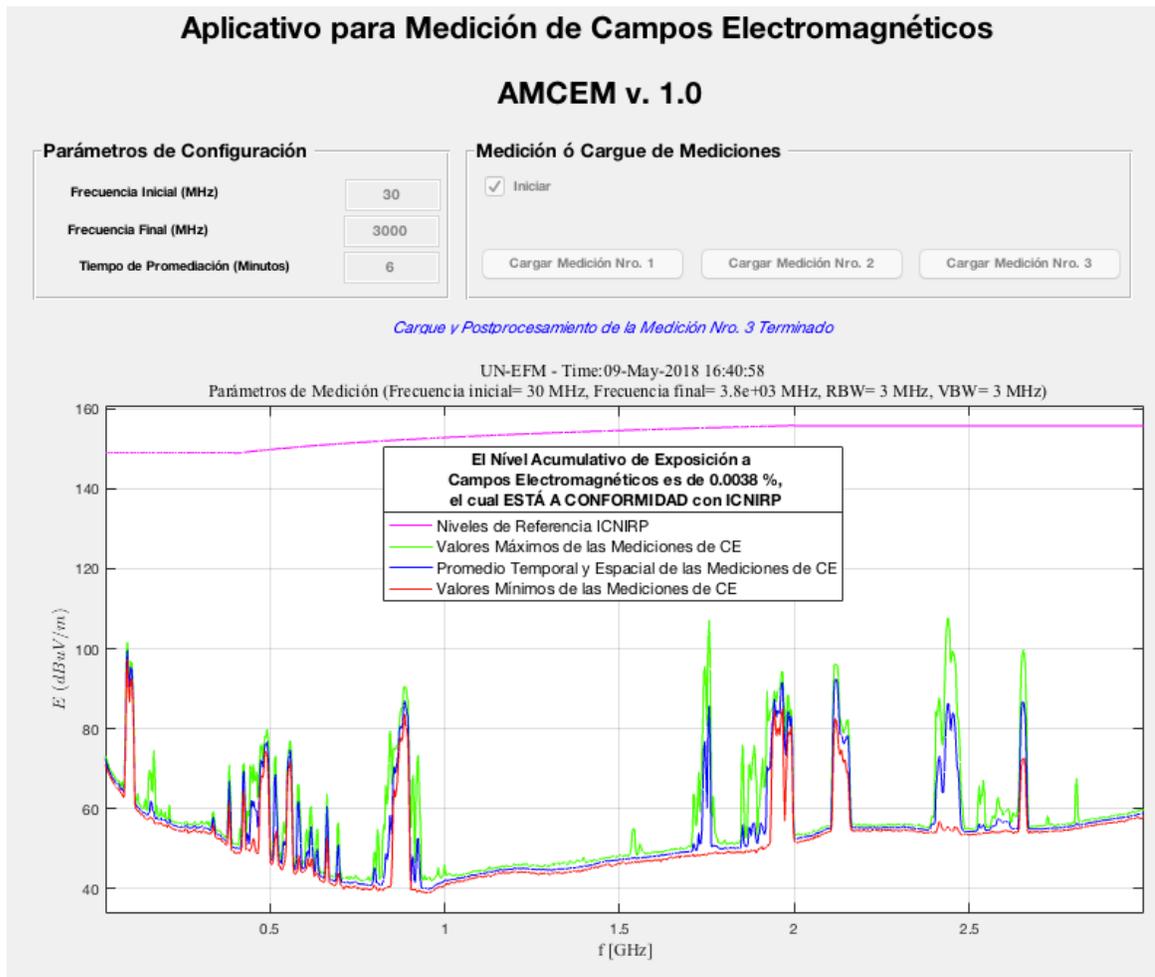


Figura 4-11.: Mediciones realizadas en la habitación que tiene línea de vista al nororienté.

El resumen de los resultados finales de la mediciones, se muestran en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6.:** Resumen de los Resultados Finales de los Puntos de Medición

Niveles Acumulativos de Exposición a Campos Electromagnéticos				
Punto de Medición	Barrio	Fecha	Hora de inicio	Valor (Porcentaje)
1	La Esmeralda	23/04/2018	15:30	0.029 %
2	La Esmeralda	23/04/2018	16:00	0.006 %
1	Nicolás de F.	23/04/2018	14:15	0.0046 %
2	Nicolás de F.	23/04/2018	14:45	0.0029 %
1	UN	09/05/2018	10:40	0.035 %
2	UN	08/05/2018	19:00	0.011 %
1	Chapinero	09/05/2018	12:40	0.12 %
2	Chapinero	09/05/2018	13:15	0.092 %
3	Chapinero	09/05/2018	13:40	0.028 %
1	Chicó	09/05/2018	15:45	0.0014 %
2	Chicó	09/05/2018	16:15	0.0038 %

## 4.2. Análisis de los Resultados Obtenidos de las Mediciones y Comparación con los Resultados de los Estudios en el numeral 2.2 de este Trabajo

Los resultados de la Tabla 4-6 muestran que todos ellos se encuentran a conformidad con los límites definidos para los niveles de referencia de la ICNIRP de 1998 [3] para público general.

En la misma Tabla 4-6, se observa coherente que los resultados de las mediciones realizadas en locaciones internas a edificaciones presenten menores niveles de campo respecto, por ejemplo, de las mediciones en exteriores (las nro. 1 y 2 en el barrio Chapinero), entre otras razones, por las atenuaciones causadas por las paredes y otros elementos estructurales.

En relación con los resultados de los estudios mencionados en el numeral 2.2 de este trabajo y en comparación con los obtenidos en este trabajo, se analiza lo siguiente:

- En el estudio titulado «An IoT-based Open Platform for Monitoring Non- Ionizing Radiation Levels in Colombia», se observa como uno de los resultados el mostrado en

la Figura 4, en la que se indica que el Sensor Universidad Nacional (LABE) registró un nivel porcentual de 9 % durante un periodo de medición de un mes. Al comparar el resultado de éste estudio con los obtenidos en éste trabajo de 0.035 % y 0.011 %, medidos en el laboratorio CMUN, se encuentra que los niveles están muy por debajo de los consignados en el enunciado estudio. La diferencia en los resultados podrían sustentarse en la variaciones en las bandas de frecuencia consideradas dado que esas especificaciones técnicas dependen de las sondas (bandas de frecuencia de 100 MHz - 3 GHz y 100 kHz - 3 GHz) que usaron y que son diferentes a la empleada en este trabajo (30 Mhz - 3 GHz), entre otros aspectos técnicos. En todo caso, se encuentra coincidencia en que ambos estudios arrojan como resultado la conformidad con los límites definidos por la ICNIRP.

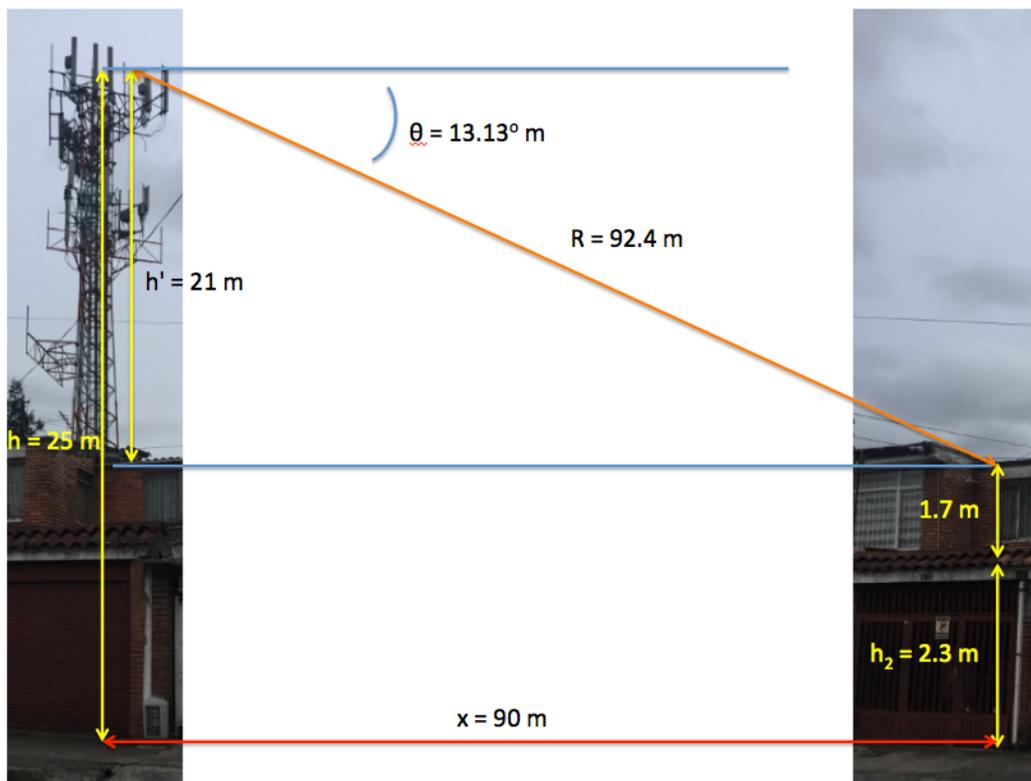
- Respecto a los valores de campo eléctrico sensados y mostrados por la ANE en su aplicativo de monitoreo frente a los resultados obtenidos en este estudio, se observan niveles muy diferentes, del orden de unas 10 veces más grandes los obtenidos por la ANE, lo cual puede deberse, entre otros aspectos, a la diferencia de ancho de banda considerado, por cuanto la ANE indica que el rango es desde los 9 kHz hasta los 300 GHz y el presente estudio abarcó desde los 30 MHz hasta los 3 GHz.
- Frente a los estudios denominados «Medición de Campos Electromagnéticos en la Ciudad de Cali, Colombia» y «Caracterización de Campos Electromagnéticos de Alta Frecuencia en Ambientes Urbanos» en los que se encontraron niveles superiores a los límites, se observa que ellos corresponden a puntos en cercanías de antenas AM, que no fueron objeto de estudio en este trabajo.
- Para el caso del estudio «Medidas de parámetros de incidencia de campos electromagnéticos sobre sistemas biológicos en el rango de frecuencia de 50 MHz A 1 GHz» que se realizó en algunos sectores del barrio Chicó Norte en Bogotá, se observan dos coincidencias con los resultados de éste trabajo en el que se realizaron mediciones en un apartamento del barrio Chicó Norte: la primera, que los niveles medidos están a conformidad con los límites de la ICNIRP y la segunda, que el máximo nivel de campo eléctrico corresponde a las comunicaciones de telefonía móvil celular, aproximadamente de 120 dB $\mu$ V.
- Finalmente, los estudios «Análisis de los límites de exposición humana a campos electromagnéticos de acuerdo a la norma UIT-K.52 para frecuencias entre 10 kHz y 3 GHz en áreas urbanas de Bucaramanga» y «Estudio de los niveles de radiación electromagnética no ionizante en varias zonas de la ciudad de Bucaramanga» coinciden con el estudio objeto de este trabajo en que los resultados obtenidos están muy por debajo de los límites establecidos por la ICNIRP. Por ejemplo, en el primer estudio se incluyen en la Tabla 7 los resultados para algunas bandas de frecuencias de servicios de telecomunicaciones FM, Celular 1 (869-894 MHz) y Celular 2 (1950-1990) con intensidades

de campo eléctrico de  $129.82 \text{ dB}\mu\text{V}$ ,  $136.2 \text{ dB}\mu\text{V}$  y  $132.77 \text{ dB}\mu\text{V}$ , respectivamente, que comparados con los obtenidos en este trabajo se observan superiores pues los máximos son de  $117 \text{ dB}\mu\text{V}$  en FM,  $115 \text{ dB}\mu\text{V}$  en Celular 1 y  $117 \text{ dB}\mu\text{V}$  en Celular 2, y que en todo caso son inferiores a los establecidos por la ICNIRP.

### 4.3. Evaluación Simplificada del Campo Eléctrico

Con la finalidad de comprobar teóricamente el campo eléctrico al que está expuesta una edificación adyacente a una fuente de campos electromagnéticos (antena de telefonía móvil), se emplea el ejemplo sugerido por la recomendación K.52 [4] en el apéndice II, con datos de entrada obtenidos de la medición en el barrio La Esmeralda.

La geometría para calcular el campo eléctrico al que esta expuesto la edificación adyacente a la antena de telefonía móvil mas cercana, se muestra en la figura 4-12.



**Figura 4-12.:** Configuración para calcular la exposición en un edificio adyacente

Fuente: Elaboración propia siguiendo la recomendación K.52 [4]

Los datos de entrada para encontrar el campo eléctrico en la edificación adyacente se listan en la Tabla 4-7. El objetivo del cálculo es determinar la densidad de potencia a la altura

de 1.7 (aproximadamente al nivel de la cabeza) sobre el segundo piso y luego establecer el campo eléctrico. Se supone que el haz principal es paralelo al suelo y que la ganancia de antena es omnidireccional.

**Tabla 4-7.:** Valores de entrada obtenidos en la medición.

Datos de Entrada	
Variable	Valor
Altura del centro de radiación ( $h$ )	25 m
Separación de la antena a la edificación ( $x$ )	90 m
Altura de la edificación ( $h_2$ )	2.3 m
Altura máxima con el trípode	1.7 m
Potencia radiada isotrópica equivalente	800 W (obtenida de la K.70 [36]) para una fuente tipo GSM 1900

Se recurre a la trigonometría, ecuaciones 4-1 y 4-2, para calcular la distancia de la fuente a la altura del trípode en la altura de 1.7 m, resulta

$$h' = h - h_2 - 1,7 = 25 - 2,3 - 1,7 = 21m \quad (4-1)$$

$$R^2 = h'^2 + x^2 = 21^2 + 90^2 = 8541 \quad (4-2)$$

$$\theta = \arctan \frac{h'}{x} = \arctan \frac{21}{90} = 0,2292rad. \quad (4-3)$$

En esta situación, pueden despreciarse las radiaciones del suelo, ya que la onda reflejada probablemente sea atenuada por la vivienda, quedando la densidad de potencia así:

$$S = \frac{F(\theta) PIRE}{4\pi h'^2 + x^2} \quad (4-4)$$

Asumiendo que la antena es de cobertura amplia, típica en las comunicaciones inalámbricas o en las de radiodifusión, la ganancia numérica relativa queda de la forma:

$$F(\theta) = \left[ \frac{\text{sen}[c \cdot \text{sen}(\theta - \alpha)]}{c \cdot \text{sen}(\theta - \alpha)} \right]^2 = 0,3295 \quad (4-5)$$

En donde el factor  $c$  corresponde a:

$$c = \frac{1,392}{\text{sen}(\theta/2)} = 12,17 \quad (4-6)$$

$\theta$  es la anchura de haz a potencia media vertical y  $\alpha$  es la inclinación del haz cuyo valor para este ejemplo será de  $5^\circ$ . Reemplazando valores en 4-4, se obtiene:

$$S = \frac{1,76x10^{-2}}{4\pi} \frac{800}{8541} = 2,456x10^{-3} [W/m^2] \quad (4-7)$$

Recordando que la densidad de potencia se puede expresar en términos del campo eléctrico y despejando  $E$ , se obtiene:

$$S = \frac{E^2}{\eta_0} \quad \text{con} \quad \eta_0 = 377\Omega \quad (4-8)$$

$$E = \sqrt{S\eta_0} = \sqrt{2,456x10^{-3} \cdot 377} = 0,9622 [V/m] \equiv 119,66 [dB\mu V] \quad (4-9)$$

Éste último resultado ahora se compara con el nivel de campo eléctrico medido en la medición nro. 1 en el barrio La Esmeralda, véase la figura **4-1**, para comunicaciones móviles GSM 1900 cuyo valor máximo en dicha figura es de aproximadamente 115 [dB $\mu$ V]. Nótese que aunque el valor calculado, 119.66 [dB $\mu$ V], frente al medido, 115 [dB $\mu$ V], son similares, la evaluación teórica es simplificada ya que no solo supone varios parámetros sino que no considera algunos otros como los elementos metálicos presentes en los sitio en que se miden, y la existencia de múltiples fuentes entre otros.

En forma similar a la que se procedió para desarrollar la evaluación simplificada del campo eléctrico en el barrio La Esmeralda, se elaboraron cálculos para los sitios de medición restantes, los cuales se resumen en la Tabla **4-8**. Se anota adicionalmente, que los valores de potencia radiada isotrópica y altura máxima del trípode se mantuvieron constantes para los demás cálculos.

**Tabla 4-8.:** Resumen de Cálculos de las Evaluaciones Simplificadas de Campo Eléctrico

Evaluaciones Simplificadas de Campo Eléctrico					
Barrio	Altura Centro de Radiación (m)	Separación de la Antena a la Edificación (m)	Altura de la Edificación (m)	E Calculado (dB $\mu$ V)	E Medido (dB $\mu$ V)
La Esmeralda	25	90	2.3	119.66	115
Nicolás de Federmán	25	300	2.3	113.53	107
UNAL	14	200	2.3	110.24	111
Chapinero	25	250	36	108.96	109
Chicó	25	250	12	101.88	113

Los resultados de la tabla 4-8, muestran similitud entre los cálculos simplificados realizados y los valores máximos medidos y seleccionados de los obtenidos en los diferentes sitios de medición, no obstante, no se deben desconocer que las distancias son aproximadas y que el modelamiento es simplificado y también que solo se ha considerado una fuente mientras que en sitio existen múltiples fuentes.

#### 4.4. Conformación de un Laboratorio de Medición de Radiaciones No Ionizantes

Partiendo de las lecciones aprendidas durante las campañas de medición, ejecutadas durante el desarrollo de éste trabajo, es posible establecer que la Universidad Nacional sede Bogotá cuenta con los componentes y procedimientos necesarios para la conformación de un laboratorio de medición de radiaciones no ionizantes en el rango de 30 a 3000 MHz, el cual se especifica en la tabla 4-9 siguiente:

**Tabla 4-9.:** Descripción del Laboratorio Portátil de Medición.

Componentes del Laboratorio Portátil de Medición de Radiaciones No Ionizantes		
Factor	Requisito	Observaciones
Recurso Humano	Una o dos personas que operen los equipos.	Las mediciones puede realizarlas una sola persona, siempre que tenga la idoneidad requerida para la operación de los equipos y accesorios y también fundamentación básica sobre las radiaciones a medir.
Recursos Físicos	Equipos y accesorios necesarios para realizar el montaje de medición.	Ver figura <b>4-13</b> , los cuales previamente se listaron en el numeral 3.4.1 de este trabajo
Procedimientos	Metodologías y protocolos de medición acordes con estándares.	Actividades descritas en el capítulo 3 de este trabajo.
Certificado de Calibración	Exigen los estándares que los equipos de medición se calibren.	La exigencia incluye el medidor y la antena, para el caso de los cables no se requiere en razón a que se hace uso de una función incluida en el medidor que permite considerar los errores que ellos introducen. Existen en el laboratorio CMUN los certificados de calibración del medidor y de la sonda, se adjunta copia del certificado de calibración del Analizador de Espectro en el Anexo D.
Documentación	Formatos para registro de datos genéricos de las mediciones, formato de descarga de responsabilidad y formato de informe de mediciones	Véanse en el Anexo E y F. El informe de mediciones debería incluir por lo menos las secciones tratadas en el capítulo 3 de este trabajo.



**Figura 4-13.:** Montaje para Medición de Radiaciones No Ionizantes

# 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1. Conclusiones

- Las mediciones realizadas permitieron establecer que en los sitios y puntos de medición seleccionados los niveles de campo eléctrico y de exposición porcentual están por debajo de lo establecido en los límites fijados por la ICNIRP de 1998, particularmente para los días y horas en que se realizaron las mediciones.
- Los mayores niveles de campo eléctrico y de exposición porcentual medidos corresponden, efectivamente, a sitios con mayor densidad de antenas y los de menores niveles a los de menor densidad de antenas.
- Aunque se observó que las componentes de la banda FM (87.5-108 MHz) siempre están presentes, no se identificó una amplia variación en la intensidad de campo eléctrico en esa banda, caso contrario ocurrió para las bandas de los servicios de telefonía móvil celular, GSM 850 (869-894 MHz), GSM 900 (935-960 MHz), GSM 1900 (1930-1990 MHz) en los que si se visualizan rangos dinámicos desde los 80 hasta los 120 dB $\mu$ V y en las bandas de VHF (174-230 MHz) y UHF y DVB-T (470-860 MHz) en las que el rango de variación está entre los 80 hasta los 100 dB $\mu$ V.
- La Universidad Nacional, sede Bogotá, luego de la realización de este trabajo cuenta con los elementos necesarios para verificar el nivel de exposición porcentual acumulativo en un reducido tiempo, menos de una hora, y establecer si está a conformidad con la ICNIRP de 1998, específicamente en el rango de los 30 a los 3000 MHz.

## 5.2. Recomendaciones

- En la realización de este trabajo el ancho de banda de estudio se restringió de los 30 a los 3000 MHz a razón de las especificaciones técnicas de la antena isotrópica, por lo cual se sugiere que la Universidad Nacional adquiera antenas que cubran un mayor ancho de banda.
- La ICNIRP en el 2010 modificó los límites, previamente definidos en las recomendaciones de 1998, para el rango 1 Hz a 100 kHz por lo que se sugiere adelantar estudios de verificación en este ancho de banda.

- 
- Conforme a los resultados de algunos de los estudios que se relacionaron en la sección 3.2 de este trabajo que indican superación de los límites para fuentes AM, podría ser de interés también estudiar este rango de frecuencia, así mismo, también se podrían incluir en el rango de frecuencia extendido los futuros nuevos servicios, tales como 5G.
  - Se sugiere mantener vigentes los certificados de calibración de los equipos que se emplean en las mediciones, lo anterior en concordancia con lo dispuesto en el literal b. del artículo 14 del decreto nro. 195 de 2005 [2], referente a la vigencia no mayor a un (1) año de los certificados de calibración.

# A. Anexo: Plegable de Promoción de Campañas de Medición

En la figura A-1 se muestra el plegable entregado a habitantes de barrios aledaños a la Universidad Nacional.



**CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS**

**CONOZCA SU NIVEL DE EXPOSICIÓN A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS**

**SEÑOR(A) RESIDENTE:**

En el sondeo inicial que se ha realizado, en el barrio La Esmeralda, se ha detectado la existencia de antenas telefonía móvi celular, permítale realizar mediciones de campos electromagnéticos al equipo investigador de la Universidad Nacional de Colombia en su vivienda y podrá conocer el nivel de campos electromagnéticos al que están expuestos usted y su familia.

Los transmisores de radio, televisión, microondas, telefonía móvil y radar producen campos electromagnéticos que se usan para transmitir información y son la base para las telecomunicaciones en todo el mundo. La intensidad de los campos electromagnéticos se acentúa con la cercanía a las antenas transmisoras.

La comunidad científica ha adelantado numerosas investigaciones con las cuales ha logrado establecer que los campos electromagnéticos producen principalmente dos efectos en los seres vivos: estimulación eléctrica y efectos térmicos. En razón a esto, varias instituciones, tanto a nivel internacional como a nivel nacional, han expedido normatividad relacionada con la protección de las personas a las radiaciones producidas por los campos electromagnéticos fijando niveles

límites de referencia, que son valores de campos electromagnéticos seguros.

Por la razones expuestas, la Universidad Nacional de Colombia a través de su programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica y del ingeniero Henry Molina Gómez, adelantan una investigación que incluye determinar los niveles de campos electromagnéticos presentes en ambientes típicos de permanencia de la población en general. En tal sentido, se ha dispuesto realizar mediciones en viviendas ubicadas en cercanías a antenas transmisoras, con un tiempo estimado de medición de dos horas.

**Beneficios:**

- ✓ Para el residente que permita realizar la medición: reporte con los niveles de campos electromagnéticos y determinación de lugares seguros o de baja exposición en la vivienda, sin ningún costo.
- ✓ Para el investigador: obtener datos de los niveles de campos electromagnéticos en ambientes de permanencia común y posterior análisis frente a la normatividad aplicable.

Para mayor información contáctese al correo electrónico [hmolinag@unal.edu.co](mailto:hmolinag@unal.edu.co) o al celular **301 6057805**

Figura A-1.: Plegable para realizar mediciones

## B. Anexo: Límites de Referencia ICNIRP

Se observa en la figura **B-1**, los límites de referencia de la ICNIRP de 1998, los cuales fueron adoptados en la recomendación K.52 [4] y también en el Decreto Nro. 195 [2]. Nótese que se han resaltado en color azul los límites de interés para este trabajo.

Type of exposure	Frequency range	Electric field strength (V/m)	Magnetic field strength (A/m)	Equivalent plane wave power density $S_{eq}$ ( $W/m^2$ )
Occupational exposure	Up to 1 Hz	—	$1.63 \times 10^9$	—
	1-8 Hz	20000	$1.63 \times 10^9 / f^2$	—
	8-25 Hz	20000	$2 \times 10^4 / f$	—
	0.025-0.82 kHz	$500 / f$	$20 / f$	—
	0.82-65 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	$3 f^{1/2}$	$0.008 f^{1/2}$	$f/40$
	2-300 GHz	137	0.36	50
General public	Up to 1 Hz	—	$3.2 \times 10^4$	—
	1-8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	—
	8-25 Hz	10000	$4000 / f$	—
	0.025-0.8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	—
	0.8-3 kHz	$250 / f$	5	—
	3-150 kHz	87	5	—
	0.15-1 MHz	87	$0.73 / f$	—
	1-10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	—
	10-400 MHz	28	0.073	2
	400-2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0.16	10	

NOTE 1 —  $f$  is as indicated in the frequency range column.  
NOTE 2 — For frequencies between 100 kHz and 10 GHz, the averaging time is 6 minutes.  
NOTE 3 — For frequencies up to 100 kHz, the peak values can be obtained by multiplying the rms value by  $\sqrt{2}$  ( $\approx 1.414$ ). For pulses of duration  $t_p$ , the equivalent frequency to apply should be calculated as  $f = 1/(2t_p)$   
NOTE 4 — Between 100 kHz and 10 MHz, peak values for the field strengths are obtained by interpolation from the 1.5-fold peak at 100 MHz to the 32-fold peak at 10 MHz. For frequencies exceeding 10 MHz, it is suggested that the peak equivalent plane-wave power density, as averaged over the pulse width, does not exceed 1000 times the  $S_{eq}$  limit, or that the field strength does not exceed 32 times the field strength exposure levels given in the table.  
NOTE 5 — For frequencies exceeding 10 GHz, the averaging time is  $68/f$  1.05 minutes ( $f$  in GHz).

**Figura B-1.:** Niveles de Referencia de la Recomendación ITU-T K.52.

Fuente: Tabla I. 2, Apéndice I de la Recomendación ITU-T K.52 (01/2018)

## C. Anexo: Guía Rápida de Uso del Aplicativo AMCEM

Realizado el montaje de medición de radiaciones no ionizantes, consistente en el encendido del Analizador de Espectro y del computador portátil y el respectivo conexionado del computador al Analizador por medio de su puerto de red Ethernet y de la conexión de la antena isotrópica al Analizador, y habiendo fijado el trípode a una de las tres alturas (1.1, 1.5 o 1.7 m) se continúa con la ejecución de las siguientes instrucciones:

1. En el computador portátil iniciar el software MATLAB y en la ventana de comandos de MATLAB ejecutar la siguiente instrucción para iniciar la interfaz gráfica:  
» 'MCEM\_UNAL\_v1'
2. Iniciada la interfaz gráfica AMCEM v. 1.0, diligenciar los campos del marco superior izquierdo «Parámetros de Configuración» referentes al ancho de banda y al tiempo de promediación, en razón a la restricción de banda de la antena isotrópica solo es posible ingresar valores entre 30 y 3000 MHz.
3. En el marco superior derecho «Medición o Cargue de Mediciones» hacer clic en la caja de chequeo «Iniciar» que habilita los botones  y , y seleccionar uno de los botones según se quiera medir o cargar una medición previamente realizada.
4. Al terminar la ejecución de la instrucción 3, se habilitan los botones  y , cambiar la altura del trípode y seleccionar uno de los botones según se quiera medir o cargar una medición previamente realizada.
5. Al terminar la ejecución de la instrucción 4, se habilitan los botones  y , cambiar la altura del trípode y seleccionar uno de los botones según se quiera medir o cargar una medición previamente realizada.
6. Al terminar la ejecución de la instrucción 5, el aplicativo muestra los resultados gráficos y numéricos en el marco gráfico de la interface.
7. Cerrar la interfaz AMCEM v. 1.0, que preguntará si se desean realizar más mediciones o no.

# D. Anexo: Certificado de Calibración

Se observa en la figura D-1, el certificado de calibración.

 <b>ROHDE &amp; SCHWARZ</b> ROSCHI ROHDE & SCHWARZ AG		
<b>Calibration Certificate</b>		<b>Certificate Number</b>
Kalibrierschein		Zertifikatsnummer
		<b>4030-20617</b>
<b>Unit Data</b>		
Item	Spectrum Analyzer	
Gegenstand	Rohde & Schwarz	
Manufacturer	Hersteller	
Type	FSH8	
Typ		
Material Number	1309.6000K08	Serial Number 106240
Materialnummer		Seriennummer
Inventory Number		Asset Number
Inventarnummer		Anlagennummer
<b>Order Data</b>		
Customer	Rohde & Schwarz Colombia S.A.	
Auftraggeber	Carrera 17A # 119A-80	
	Bogota	
On behalf of		
(where applicable)		
In Namen von		
(Wenn gewünscht)		
Order Number		
Bestellnummer		
Date of Receipt	13.12.2016	
Eingangsdatum		
<b>Performance</b>		
Place, Date of Calibration	Ittigen, 21.12.2016	
Ort, Datum d. Kalibrierung		
Scope of Calibration	Factory Calibration	
Umfang der Kalibrierung		
Remarks		
Bemerkungen		
Statement of Compliance	All measured values are within the defined specifications.	
(Incoming)		
Konformitätsaussage		
(Anlieferung)		
Statement of Compliance	IT Measurements (I = In Tolerance / AT = Out of Tolerance)	
(Outgoing)		
Konformitätsaussage		
(Auslieferung)		
Extent of calibration	3	Pages Calibration Certificate
documents		Seiten des Kalibrierdokuments
Umfang des Kalibrierdokuments	9	Pages Calibration Results
		Seiten Messumfang
		Pages Incoming Report
		Seiten Eingangstest
<b>Roschi Rohde &amp; Schwarz AG</b>		
Date of Issue	Head of Laboratory	Person Responsible
Ausstellungsdatum	Leiter der Kalibrierstelle	Bearbeiter
22.12.2016		
	Ralph Siegfried	David Aaby
<small>CH111909109032010014 Roschi Rohde &amp; Schwarz AG   80403 Ittigen   CH-3002 Ittigen   Phone +41 (0)41 832 15 22   Fax +41 (0) 41 832 81 01          www.rohde-schwarz.ch   support@roschi.rohde-schwarz.com</small>		
		Page 1 / 3

Figura D-1.: Certificado de Calibración del Analizador de Espectros

Fuente: Copia suministrada por el Laboratorio del Grupo en Electrónica de Alta Frecuencia y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional

## E. Anexo: Formato de Medición

Se observa en la figura E-1, el formato a diligenciar durante y después de las mediciones, en el cual se registran los datos de interés sobre resultados y ubicación de las mediciones.

  
INSTITUTO  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

**FORMATO DE REGISTRO DE MEDICIONES DE CAMPOS ELECTROMAGNETICOS**

Fecha: \_\_\_\_\_ Nombre del Propietario: \_\_\_\_\_ Estándar de Referencia: \_\_\_\_\_

Lugar (Dirección y Barrio): \_\_\_\_\_

Hora Inicial de la Medición: \_\_\_\_\_ Hora Final de la Medición: \_\_\_\_\_ Duración de la Medición: \_\_\_\_\_

Bosquejo de la trayectoria de medición:

Equipos utilizados en la medición:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**RESULTADOS DE LAS MEDICIONES**

Nro. de medición	Resultado	Excede Estándar (Si/No)	Observaciones
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Responsable de la medición: \_\_\_\_\_

Figura E-1.: Formato de Medición.

## F. Anexo: Autorización de las Mediciones

Se observa en la figura F-1, la carta de descargo de responsabilidades en que el propietario de la vivienda autoriza las mediciones.

**ACTA DE EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD EN  
ACTIVIDADES DE MEDICIÓN DE CAMPOS  
ELECTROMAGNÉTICOS**

Yo, \_\_\_\_\_, mayor de edad, identificado con la Cédula de Ciudadanía Nro. \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_, en calidad de propietario del bien inmueble ubicado en la dirección \_\_\_\_\_ mediante el presente escrito manifiesto que en forma voluntaria consiento el acceso a la vivienda señalada de del personal de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia encargado de realizar las mediciones de campos electromagnéticos y de los equipos requeridos para las mediciones, de las cuales he sido informado que se realizan sin ningún costo y que tal actividad no constituye relación contractual ni laboral alguna entre la Universidad y el propietario del bien.

Así mismo, fui informado que del ejercicio de mediciones me será entregado un informe que consignará los resultados obtenidos, también me fue indicado que tales resultados tienen finalidad estrictamente académica.

Por lo que la Universidad Nacional de Colombia solamente autoriza a los ejecutores de las mediciones a realizar las actividades de medición y a entregar los resultados de su postprocesamiento y consecuentemente la Universidad:

- No asume ningún compromiso de sustentar los resultados y/o realizar trámites y/o acompañamientos posteriores ante ninguna entidad.
- No se manifestará sobre la salubridad del sitio objeto de medición, ni sobre la existencia o no de efectos biológicos a consecuencia de los resultados.

Con pleno conocimiento y entendimiento de los anteriores términos, y en aceptación de tales condiciones libero de toda responsabilidad y/o reclamación a la Universidad Nacional de Colombia y al personal encargado de realizar la actividad de medición de campos electromagnéticos y asumo todo tipo de responsabilidad, por el uso que le dé al informe de mediciones que me será entregado.

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Fecha

Figura F-1.: Carta de Descargo de Responsabilidad

# **G. Anexo: Aspectos Teóricos Complementarios**

Los avances en las telecomunicaciones y su correspondiente masificación, particularmente en algunos de los dispositivos más usados, es el caso de los teléfonos móviles celulares, que han suscitado entre sus diferentes usuarios interrogantes sobre las posibles afectaciones a la salud como consecuencia de las radiaciones que reciben de estos, así como, del sistema en el cual operan.

Partiendo del anterior planteamiento a continuación se abordan temas inherentes tales como: algunos aspectos fundamentales de electromagnetismo, los mecanismos de interacción de las radiaciones no ionizantes en los materiales biológicos y los efectos biológicos, con los cuales se pretende contextualizar la situación objeto de estudio.

## **G.1. Aspectos Fundamentales de Electromagnetismo**

Los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos emiten radiaciones del tipo no ionizantes, en los rangos de las microondas y radiofrecuencias, a través de los equipos denominados antenas, con las cuales se continúa el ciclo de comunicación. Dado que las antenas tienen su fundamentación en la teoría electromagnética para su funcionamiento, en los párrafos siguientes se mencionan aspectos inherentes a la temática de los campos electromagnéticos en el rango de las microondas y radiofrecuencias, dentro del cual se encuentran los campos generados por antenas que operan en las bandas de telefonía móvil, radio FM y televisión. Para ello, se toman como base algunos de los contenidos de los apartados del capítulo uno de [37], entre los que se resaltan:

### **Rangos de Frecuencias de Radiofrecuencias y Microondas**

El rango de las radiofrecuencias y las microondas abarca el espectro electromagnético que va desde unos pocos kHz hasta algunas decenas de GHz, las radiaciones en este rango de frecuencias son su fenómeno característico, y el concepto de no ionizantes se refiere a aquellas radiaciones que no tienen la capacidad para romper los enlaces moleculares.

Estas radiaciones son los denominados campos eléctrico  $E$  y magnético  $H$ , recuérdese que  $B = \mu H$ , provenientes de las antenas, cuyas fuentes son campos sinusoidales que están simultáneamente presentes, es decir, si hay un campo  $E$  entonces hay un campo  $H$  acoplado, si uno es conocido el otro puede ser calculado, y se relacionan por las Ecuaciones de Maxwell, véase el grupo de ecuaciones G-1 a G-4.

$$\oint_S \varepsilon_0 E \cdot ds = \int_V \rho_v dv \quad (\text{G-1})$$

$$\oint_S B \cdot ds = 0 \quad (\text{G-2})$$

$$\oint_l E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot ds \quad (\text{G-3})$$

$$\oint_l \frac{B}{\mu_0} \cdot dl = \int_s J \cdot ds + \frac{d}{dt} \int_s \varepsilon_0 E \cdot ds \quad (\text{G-4})$$

Una característica interesante de las microondas es que ellas cubren un rango de frecuencias en el que las longitudes de onda son del orden de objetos de uso común (metro, decímetro, centímetro y milímetro) de ahí que estas radiaciones puedan interactuar con los tejidos y sistemas biológicos.

### Campo Eléctrico

Los tejidos vivos se caracterizan por ser dieléctricos por lo que, tener claro el comportamiento de este tipo de materiales en presencia de campos electromagnéticos es de especial interés, así como los parámetros que son importantes. El campo eléctrico total en un material dieléctrico es la suma de los campos eléctricos aplicados y del campo eléctrico inducido, éste último es el resultante de la polarización del material. La estructura de las ecuaciones de Maxwell muestran que la permitividad y la conductividad son parámetros relacionados, se puede decir que expresan el enlace entre la densidad de corriente y el campo eléctrico.

### Campo Magnético

El campo magnético total en un material es la suma del campo magnético aplicado y el campo magnético inducido, éste último es el resultante de la magnetización del material. El campo magnético inducido se calcula teniendo en cuenta la geometría del problema y las condiciones de frontera. Se precisa que en el desarrollo de éste trabajo no se incluye la medición de la magnitud campo magnético.

## Campo Electromagnético

En condiciones de corriente continua el campo eléctrico y magnético son calculados de las leyes de la electrostática y magnetostática, respectivamente. Se mantiene la condición para bajas y extremadamente bajas frecuencias, no es así cuando la frecuencia se incrementa. Los valores de frecuencia para los cuales no es válida la condición dependen de la geometría, las propiedades eléctricas y magnéticas del problema. Cuando la frecuencia se incrementa, los campos magnéticos y eléctricos no pueden estar separados uno del otro.

Los parámetros electromagnéticos son: permitividad,  $\epsilon$ , usada para caracterizar pérdidas en dieléctricos, conductividad,  $\sigma$ , usada para calcular pérdidas en conductores y la permeabilidad,  $\mu$ .

En los tejidos vivos, los fenómenos electromagnéticos suelen ser lentos en comparación con la variedad extremadamente amplia de fenómenos que se evalúan en física e ingeniería. El tiempo de respuesta biológica más corto, de hecho, es del orden de  $10^{-4}$  s, mientras que la mayoría de las reacciones biológicas son mucho más lentas. Por lo que, las ecuaciones de Maxwell generalmente no se usan para evaluar los efectos biológicos en tejidos y sistemas vivos. En las radiofrecuencias, la longitud de onda en el vacío es grande con respecto a los tejidos y sistemas vivos, incluidos los seres humanos en su conjunto: a 1 MHz, la longitud de onda en el vacío es igual a 300 m. Por otro lado, en las microondas, el período de oscilación es pequeño, igual a  $10^{-9}$  a 1 GHz, que es mucho más pequeño que las respuestas biológicas más rápidas. Esto implica que la evaluación de los efectos biológicos en tejidos y sistemas vivos debido a la estimulación electromagnética, tanto en radiofrecuencias como en microondas, en la mayoría de los casos no requieran el uso de las ecuaciones de Maxwell. Por lo tanto, en la práctica, los enfoques cuasi-estáticos son bastante satisfactorios en el material biológico, y los campos magnéticos y eléctricos a menudo se consideran por separado, incluso en radiofrecuencias / microondas, véase [37].

## Onda Electromagnética

El acople entre las variaciones espaciales y temporales de los campos eléctrico y magnético resultan en un movimiento ondulatorio, lo cual conlleva a la noción de propagación y otras características tales como la reflexión, la refracción y la polarización, esta última concerniente a la variación en la orientación de los campos cuando la onda esta propagándose y más frecuentemente relacionada con el campo eléctrico.

Los parámetros específicos que describen las ondas electromagnéticas son la longitud de onda  $\lambda$  y la frecuencia  $f$  cuyo producto resulta en una constante denominada velocidad de la luz en el vacío, véase la ecuación G-5. Muchos tejidos vivos contienen una cantidad considerable

de agua. El agua es un material dieléctrico con una constante dieléctrica o permitividad relativa,  $\epsilon_r$ , muy alta, de orden 80 a bajas frecuencias. La velocidad de fase de una onda, tasa a la cual la fase de la onda se propaga en el espacio, a 1 GHz en el cuerpo humano es casi 9 veces más pequeña que en el vacío porque la longitud de onda es casi 9 veces más pequeña que en el vacío. A altas frecuencias, sin embargo, la permitividad decrece y el valor de longitud de onda y velocidad de fase son más cercanas a sus valores en el vacío.

$$f\lambda = c \text{ (vacío)} \quad (\text{G-5})$$

La impedancia de onda o impedancia intrínseca del medio de propagación es la relación de las amplitudes del campo eléctrico y magnético, que en el vacío es 377 ( $120 \pi$ ) (Ohm). La impedancia de onda expresa la capacidad de una onda de propagación para transportar densidad de potencia de un punto a otro en el espacio y tener posibilidad de ser absorbida ahí, totalmente o en parte.

### Antenas y Campo Cercano

Las antenas son generalmente dispositivos recíprocos, es decir que sus propiedades de recepción y transmisión son similares. Las antenas pueden colocarse en el espacio libre y tener otros propósitos como transmitir señales de televisión, radio FM, o telefonía móvil, o en ubicaciones específicas dentro de una parte del cuerpo humano. Por otro lado, las antenas emiten campos que en algunos casos requieren ser medidos, por ejemplo, para aplicaciones radiométricas<sup>1</sup>.

El espacio alrededor de una antena en modo de transmisión o recepción, se divide en las tres regiones siguientes:

- **Campo cercano reactivo.** Región inmediata alrededor de la antena, en la que predomina el campo reactivo. Comúnmente es interior a la distancia  $0,62(D^3/\lambda)^{1/2}$  de la superficie de la antena, D es la dimensión más grande de la antena, se llama reactiva porque la densidad de potencia reactiva es predominante.
- **Campo cercano radiante (Fresnel).** Región que se extiende desde el campo cercano reactivo y limita con la distancia  $2D^2/\lambda$ , para que sea válida D debería ser grande comparada con  $\lambda$ . En esta zona el patrón de campo es una función de la distancia radial y la componente de campo radial debería ser apreciable.
- **Campo lejano (Fraunhofer).** Existe comúnmente a distancias más grandes que  $2D^2/\lambda$  de la antena, en esta región el campo es esencialmente transversal y la distribución angular es independiente de la distancia radial en las que son hechas las medidas.

<sup>1</sup>La radiometría es el campo de la ciencia y de la ingeniería relacionado con la medición de la radiación electromagnética.

En comunicaciones de radiofrecuencias y microondas, las situaciones de campo lejano son usualmente las de interés más práctico. Cuando se evalúan efectos biológicos este no es siempre el caso y es muy importante distinguir claramente entre exposición a campo cercano y a campo lejano. La evaluación de riesgos debidos a la exposición de seres humanos o animales a radiofrecuencia o microondas es usualmente hecha en condiciones de campo lejano. Por una parte, las estaciones de transmisión están generalmente lo suficientemente lejos para situaciones de habitantes y trabajadores, mientras que, la antena de un teléfono móvil es tan pequeña con respecto a la longitud de onda, que la cabeza de un usuario final está en el campo lejano de la antena [37].

### Potencia y Energía

La combinación adecuada de las ecuaciones de Maxwell produce el teorema de Poynting, véase la ecuación G-6. En el dominio del tiempo, el teorema expresa la igualdad entre la variación espacial de potencia electromagnética y la variación temporal de la energía electromagnética, la suma de las energías magnética y eléctrica.

$$-\oint_s \mathcal{P} \cdot ds = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[ \frac{\epsilon E^2}{2} + \frac{\mu H^2}{2} \right] dv + \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} dv \quad \text{con} \quad \mathcal{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{G-6})$$

Coloquialmente, energía significa potencia absorbida por algún tiempo en vatios por segundo. En electromagnetismo, energía es interpretada como una concentración de campo almacenado en el espacio, expresado en Julios. La energía electromagnética total almacenada en un volumen dado es obtenida por integración de la energía sobre el volumen. La derivada en el tiempo de la energía produce vatios, es decir potencia.

Los patrones de absorción de energía, entendidos como la forma particular en que la materia asimila la energía de la radiación electromagnética, en tejidos o sistemas biológicos, como el cuerpo humano, contribuyen a los efectos de las radiofrecuencias y microondas.

### Influencia de la Forma de Onda

Los parámetros de exposición a microondas son una consideración importante en la producción de efectos biológicos. La dosimetría toma en cuenta los niveles de exposición y su duración. Diferentes duraciones conllevan diferentes efectos biológicos y diferentes efectos de largo plazo ocurren después de exposición repetida. La forma de onda de la radiación es importante, por ejemplo, efectos diferenciales han sido observados después de la exposición a onda pulsada respecto a microondas de onda continua. En la práctica, efectos biológicos han sido observados bajo una variedad de tipos de exposición: onda continua, onda sinusoidal de amplitud modulada, onda pulsada y onda pulsada modulada, véase [38].

### **Penetración en Tejidos Biológicos y Efecto Piel**

Un fenómeno de interés que surge cuando los materiales son sometidos a campos electromagnéticos es el conocido como efecto piel, que hace que campos, corrientes y cargas se concentren cerca a la superficie del material e implica que, por ejemplo, si un ser humano es sometido a campos de microondas, los órganos internos estén más protegidos a altas frecuencias que a bajas. La profundidad de piel es tres veces más pequeña a 900 MHz (frecuencia de telefonía móvil) que a 100 MHz (frecuencia de radio FM), lo cual significa que los campos son tres veces más concentrados cerca de la superficie del cuerpo a 900 MHz que a 100 MHz.

Hay una tendencia a creer que las microondas y las radiofrecuencias ejercen efectos biológicos más significativos que a bajas y a extremadamente bajas frecuencias, lo cual no es necesariamente cierto: la constante dieléctrica de los materiales vivos es cerca de 10.000 veces más grande a frecuencias extremadamente bajas que a microondas. La constante dieléctrica es importante porque ésta es el enlace entre el campo fuente y la densidad de flujo eléctrico (también llamado campo de desplazamiento). Existe, entonces, en un material con una constante dieléctrica grande la posibilidad de una densidad de flujo eléctrico con un campo fuente muy pequeño.

## **G.2. Mecanismos de Interacción de las Radiofrecuencias / Microondas en los Materiales Biológicos**

El conocimiento y la caracterización de los tejidos o materiales biológicos toma mayor trascendencia cuando se trata de entender lo que sucede con las radiaciones emitidas en los rangos de radiofrecuencias / microondas que inciden en estos materiales, por lo que, su conformación y funcionalidad, así como los diferentes mecanismos de interacción, entre otros temas, serán los asuntos que ocuparán los párrafos siguientes, los cuales se han fundamentado en algunos de los contenidos de los apartados del capítulo dos de [37]:

### **Fundamentos**

Los efectos de la interacción de las radiaciones emitidas por radiofrecuencias / microondas con tejidos biológicos, pueden ser considerados como el resultado de tres fenómenos:

- La penetración de ondas electromagnéticas en los sistemas vivos y su propagación en estos.
- La interacción primaria de las ondas con los tejidos biológicos.
- Los posibles efectos secundarios inducidos por la interacción primaria.

La interacción se refiere a que el resultado final no solo depende de la acción del campo aplicado sino que también es influenciado por la reacción del sistema vivo. Los sistemas vivos tienen una gran capacidad para compensar los efectos inducidos por influencias externas, en particular las de fuentes electromagnéticas. La compensación puede ser fisiológica o patológica: en la primera, la compensación es completa y en la segunda podrían resultar alteraciones estructurales en el organismo.

El mecanismo de radiación considerado consiste de una fuente que emite energía electromagnética y un sistema biológico en el que parte de la energía incidente es absorbida y transformada dentro de él, con lo que se obtiene la secuencia fuente-radiación-objetivo.

Los procesos biológicos naturales son responsables de las funciones de los nervios y músculos. Las corrientes eléctricas aplicadas externamente pueden excitar nervios y células de músculos. El sistema nervioso se ocupa de la transferencia rápida de información a través del cuerpo en la forma de señales eléctricas. El sistema nervioso se divide en sistema nervioso central (SNC) y sistema nervioso periférico (SNP): el SNC, esta compuesto por el cerebro y la médula espinal, y el SNP esta conformado de neuronas aferentes, las cuales llevan información dentro del SNC, y neuronas eferentes, que llevan información desde el SNC al cuerpo. El sistema eferente esta subdividido en sistema nervioso somático (SNS) y sistema nervioso autónomo (SNA): el SNA, consiste de neuronas que llevan impulsos a los tejidos musculares lisos, tejidos musculares cardiacos, y glándulas, que son usualmente considerados involuntarios, esto es, no bajo control consciente. El SNA está dividido en simpático y parasimpático: el sistema nervioso simpático tiende a movilizar el cuerpo para emergencias (secreción de adrenalina), mientras que el sistema nervioso parasimpático se ocupa de las funciones vegetativas del cuerpo, tales como la digestión. El SNA es responsable de mantener la homeostasis del cuerpo.

## **Células y Nervios**

El límite funcional de una célula biológica es un lípido bimolecular y estructura proteínica denominada membrana, un dieléctrico semipermeable que permite intercambios iónicos. La membrana es delgada, del orden de 10 nm. Fuerzas electromecánicas a través de la membrana regulan los intercambios químicos en la célula. El medio interno de la célula (plasma) y externo de la célula (fluido intersticial) estén compuestos en su mayoría de agua que contiene varios iones. Los iones particularmente involucrados con la respuesta eléctrica de nervios y músculos son el sodio y el potasio. Las concentraciones de estos iones internos y externos a la célula dictan el potencial eléctrico, llamado el potencial de Nernst. La diferencia en la concentración de iones interna y externa a la célula causa una fuerza electromecánica a través de la membrana.

El cuerpo está equipado con un vasto arreglo de (receptores) sensoriales para monitoreo de su ambiente interno y externo. Receptores especializados están asociados con los sistemas auditivos y visuales. Los receptores químicos hacen que las neuronas se comuniquen unas con otras. El sistema somatosensorial es encontrado en la piel y órganos internos, y está generalmente involucrado en la estimulación eléctrica.

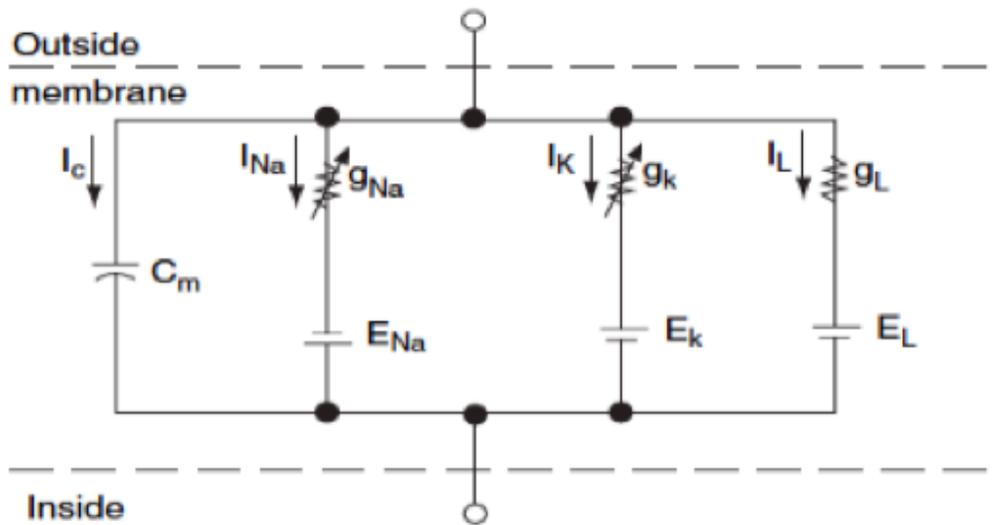
Cuando un receptor sensorial es estimulado, este produce un cambio de voltaje denominado potencial generador. El potencial generador es graduado: apretar un sensor de presión, por ejemplo, produce un voltaje, mientras que apretar éste más fuerte produce un voltaje más alto. El potencial generador inicia una secuencia de eventos que lleva a una propagación del potencial de acción, el cual en el habla común es usualmente denominado un impulso nervioso. Por otra parte, el potencial de acción es un cambio en la propagación, en la conductividad y en el potencial a través de un nervio de la membrana de la célula. Más específicamente, es un cambio rápido del potencial de la membrana que envuelve una despolarización seguida por una repolarización. Los potenciales provocados son modificaciones de la actividad eléctrica cerebral debidas a la aplicación de estimulación sensorial. Dependiendo del tipo de estimulación, ellos pueden ser visuales, auditivos o somestésicos.

La electrodinámica de la membrana excitable de nervios no mielinados fue primero descrita en detalle por Hodgkin y Huxley, un trabajo por el cual obtuvieron el Premio Nobel [39]. Ellos establecieron un modelo eléctrico para la membrana, este modelo fue extendido después a la membrana de nervios mielinados. El modelo está representado en la figura **G-1**, éste incluye fuentes de potencial que son los potenciales Nernst para los iones particulares. La membrana dieléctrica separa el medio conductivo sobre uno u otro lado formando una capacitancia  $C_m$ . Las conductancias no lineales  $g_{Na}$  y  $g_K$  aplican a los canales  $Na^+$  y  $K^+$ , respectivamente. La alta dependencia del voltaje aplicado a través de la membrana es descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales. La conductancia  $g_L$  es un canal de fuga que no es especificado para un ion en particular.

La velocidad de propagación de un impulso nervioso es independiente de la fuerza de los estímulos. Una vez una neurona alcanza su umbral de estimulación, la velocidad de propagación es normalmente determinada por el diámetro de la fibra, la temperatura, y la presencia o ausencia de mielina. La conducción también puede ser alterada por condiciones de temperatura y otros agentes físicos o químicos.

### Fenómeno Bioeléctrico

Todas las células vivas presentan fenómeno bioeléctrico. No hay duda que la bioelectricidad tiene que ser tomada en cuenta cuando se investigan posibles riesgos, sobre seres humanos y animales, debidos a la exposición de radiofrecuencias o microondas. Los tres efectos bio-



**Figura G-1.:** Modelo de la membrana de Hodgkin-Huxley.

Fuente: Imagen extraída de [37]

eléctricos más prominentes, aunque a nivel de diagnóstico, son los del corazón, los músculo esqueléticos, y los del cerebro, que se registran por medio de: el electrocardiograma (ECG), reflejando la excitación y la recuperación completa del corazón; el electromiograma (EMG), reflejando la actividad músculo esquelética; y el electroencefalograma (EEG), reflejando la actividad de las capas externas del cerebro, la corteza.

### Caracterización de los Tejidos

La caracterización de los tejidos se da principalmente por los siguientes fenómenos:

- **Ionización y No Ionización.** La energía de las ondas electromagnéticas está cuantificada con los cuantos de energía (en Julios). La ionización puede ocurrir no solo por absorción de energía electromagnética sino también por una u otra colisión con partículas elementales extranjeras (inyectadas) de la energía requerida o por colisión suficientemente violenta con sus propios átomos. La ionización por cualquier agente externo de los compuestos complejos hace que un sistema vivo lleve a profundos y frecuentes cambios irreversibles en la operación del sistema. A radiofrecuencias y microondas, e incluso a ondas milimétricas, la energía cuántica esta bien por debajo del potencial de ionización de cualquier sustancia.
- **La caracterización dieléctrica.** Tres procesos de relajación son responsables principalmente por las propiedades dieléctricas de los tejidos, particularmente de los materiales heterogéneos:

- **Orientación dipolar.** El agua es el mayor constituyente en muchos tejidos, y en varios sentidos las propiedades dieléctricas de los tejidos reflejan las del agua. A radiofrecuencias, la conductividad de los tejidos es esencialmente la de sus fluidos intracelulares y extracelulares. A frecuencias de microondas la dispersión dieléctrica surge de la relajación dipolar del tejido de masa de agua. La relajación dipolar del agua es un efecto dominante en tejidos a frecuencias de microondas.
- **Relajación interfacial.** Si un material es eléctricamente heterogéneo, las cargas aparecen en las interfaces dentro del material debido a las condiciones de frontera de las interfaces. Evaluar el efecto de las interfaces dentro de un material es un problema clásico de campos electromagnéticos, en particular para evaluar la transmisión y reflexión de ondas electromagnéticas. A bajas frecuencias, la corriente fluye alrededor de las células; a altas frecuencias la corriente fluye sin restricción a través de las células. Esto da lugar a una dispersión cuya frecuencia de relajación corresponde al punto medio de la transición entre estas dos situaciones limitantes y está determinada por la constante de tiempo para cargar la capacitancia de la membrana celular a través de los fluidos extracelular e intracelular.
- **Difusión iónica:** Efectos de Polarización Contraion. Los fenómenos contraiones se deben a la difusión iónica en las capas eléctricas dobles adyacentes a las superficies cargadas. Los efectos contraiones contribuyen a la dispersión alfa que se encuentra en tejidos a bajas frecuencias, ellos son dominantes en sistemas biológicos a frecuencias por debajo de los kHz. Cuando un campo eléctrico es aplicado, los iones se redistribuyen bajo la influencia de los campos y la difusión. Dependiendo si el signo del ion es el mismo u opuesto a los de la capa contraion el comportamiento varía de buen conductor en el caso de igual signo y a aislador en caso contrario.
- **Dispersión Dieléctrica en Tejidos.** Un material dispersivo es aquel en el que los parámetros de permitividad, conductividad y permeabilidad son variables con la frecuencia. Además, los materiales con la parte imaginaria de la permitividad diferente de cero tienen pérdidas y serán disipativos.

La conductividad es mínima en frecuencias por debajo de 100 kHz para una célula comparada con el electrolito que la rodea, para radiofrecuencias entre 1 y 100 MHz las membranas celulares son acortadas y no ofrecen una barrera significativa al flujo de corriente y por encima de 100 MHz exhibe tres efectos: Maxwell-Wagner, efecto debido a la polarización interfacial de tejidos sólidos a través de electrolitos de tejido; pérdidas dieléctricas de pequeñas moléculas polares y cadenas polares laterales en proteínas; y relajación dieléctrica del agua.

Hay tres regiones de mayor dispersión donde el valor de la permitividad varía fuertemente con la frecuencia, son: alfa, debida a los efectos de difusión contraion; beta, ocurre en las radiofrecuencias; y gamma, que se da cerca de la frecuencia central de 25 GHz.

- **Mediciones.** Un buen conocimiento de la permitividad compleja del medio biológico es necesaria para determinar adecuadamente la acción de los campos electromagnéticos en efectos biológicos.

La temperatura influye de la siguiente forma: a las frecuencias de microondas la permitividad de los tejidos refleja las del agua, la permitividad estática varía poco con la temperatura, y en el rango de radiofrecuencias los efectos Maxwell-Wagner asociados con la carga de las membranas celulares determina las propiedades dieléctricas.

## Termodinámica

Otra forma de caracterizar los materiales es a través de sus propiedades térmicas y mecánicas, en este sentido, resulta útil recurrir a la teoría clásica de la termodinámica. Muchos materiales biológicos son no homogéneos, están compuestos de varias partes. Las partes separables de un sistema termodinámico se denominan fases, por tanto, desde el punto de vista termodinámico los materiales biológicos deben tratarse en fases.

## Energía

Por último, y respecto a la energía se puede decir que un medio dieléctrico sin pérdidas, no exhibe dispersión, es decir, sus características eléctricas no varían con la frecuencia. En este caso, la energía electromagnética es la diferencia entre la energía interna por unidad de volumen con y sin el campo, respectivamente, con densidad y entropía sin cambios.

La presencia de dispersión en general significa una disipación de energía, ésta es la razón de porque un medio dispersivo es también un medio absorbente. Las partes imaginarias de  $\epsilon$  y  $\mu$  determinan la absorción (disipación) de energía. Estas partes imaginarias están asociadas con las pérdidas eléctricas y magnéticas, respectivamente.

## Exposición

Finalmente, en lo concerniente a la exposición a campos electromagnéticos, se precisa:

- Los efectos biológicos son evaluados con respecto a campos internos al material biológico, esto implica un buen conocimiento de ambos: los campos respecto a la interfaz con

el material y las propiedades del material.

- En condiciones reales, los seres humanos están expuestos a un ambiente con campos de radiofrecuencias o microondas debido a una variedad de fuentes: radio AM, radio FM, televisión, telefonía móvil, radares y demás. Es necesario tener un conocimiento exacto de la amplitud del campo, por ejemplo, para comparar la exposición humana a los estándares o evaluar los posibles peligros, identificar el riesgo de interferencia en un hospital.
- Los estándares para seres humanos se basan en dos tipos de limitación: 1. Limitaciones básicas que siempre deberían ser respetadas y 2. Niveles de referencia que podrían ser excedidas si las limitaciones básicas no son superadas. Las limitaciones básicas son expresadas en términos de absorción para el cuerpo humano, más precisamente por la parte del cuerpo que es expuesta, pues debido al efecto piel solo la capa más externa está absorbiendo potencia.
- A radiofrecuencias / microondas, el campo eléctrico es en mayoría usado como referencia. Los estándares, entonces, especifican el valor del campo eléctrico, por ejemplo, que no debería ser excedido en algún lugar o por algún tiempo.

### **G.3. Efectos Biológicos**

Considerando que los factores externos, como lo son las radiaciones emitidas por las antenas de los sistemas de comunicaciones, al incidir en los sistemas biológicos les ocasionan algún tipo de perturbación, resulta necesario que en éste apartado se mencionen algunos de los conceptos y características relacionados con esas perturbaciones, tales como: la tasa específica de absorción, conceptos de la termodinámica y señalar algunos efectos en ciertos órganos del cuerpo humano. Los conceptos y características que se citan a continuación se fundamentan en algunos contenidos de los apartados del capítulo tres de [37]:

#### **Fundamentos de la Absorción**

Los efectos biológicos de las radiofrecuencias / microondas no dependen solamente de la densidad de potencia externa, también dependen de los campos internos en los dieléctricos de los tejidos o del cuerpo, de ahí la necesidad del cálculo de los campos internos. Los estudios dosimétricos intentan cuantificar la interacción de campos de radiofrecuencias / microondas con los tejidos biológicos y cuerpos.

La intensidad de los campos internos depende de una serie de parámetros: frecuencia, intensidad, y polarización del campo externo; tamaño, forma, y propiedades dieléctricas del cuerpo; configuración espacial entre la fuente de exposición y el cuerpo expuesto; y la presencia de

otros objetos en la vecindad.

La geometría y las propiedades eléctricas de los sistemas biológicos también son factores determinantes en la magnitud y distribución de corrientes inducidas a frecuencias por debajo del rango de las microondas. Cuando los campos electromagnéticos pasan de un medio a otro, ellos pueden ser reflejados, refractados, transmitidos o absorbidos, dependiendo de la conductividad compleja del cuerpo expuesto y de la frecuencia de la fuente.

La energía absorbida de radiofrecuencia puede convertirse en otras formas de energía y causar interferencia con el funcionamiento del sistema vivo. Mucha de esta energía se convierte en calor: esto es absorción. A frecuencias por debajo de 100 kHz, se ha observado que los campos eléctricos pueden estimular los tejidos nerviosos.

La profundidad a la que las microondas pueden penetrar tejidos es primariamente una función de las propiedades magnéticas y eléctricas de los tejidos y de la frecuencia de las microondas. En general, a una frecuencia dada, a más bajo contenido de agua del tejido, una onda puede penetrar más profundo.

### **Dosimetría y SAR**

Los niveles de exposición en el rango de las microondas se describen generalmente en términos de densidad de potencia en  $W/m^2$ , sin embargo, cerca de las fuentes de radiofrecuencias con longitudes de onda más largas, los valores tanto de los voltios eléctricos por metro como de los amperios magnéticos por metro son necesarios para describir el campo. A bajas frecuencias, por debajo de 100 kHz, muchos efectos biológicos son cuantificados en términos de la densidad de corriente en tejidos. A frecuencias altas, muchas (pero no todas) de las interacciones se deben a la tasa de deposición de energía por unidad de masa. Esta es la razón por la cual la tasa de absorción específica (SAR) se usa como la medida dosimétrica en esas frecuencias, se expresa en W/kg.

La SAR puede ser una medida cuantitativa válida de los mecanismos de interacción, distintos de los de absorción, cuando el mecanismo depende de la intensidad del campo eléctrico E, excepto, cuando la dirección del campo E es importante con respecto a la estructura biológica.

El concepto SAR ha demostrado ser una herramienta simple y útil para: cuantificar las interacciones de las radiaciones de radiofrecuencia y microondas con sistemas vivos, permitir la comparación de efectos biológicos observados experimentalmente para varias especies bajo diversas condiciones de exposición, proporcionar el único medio de extrapolar los datos obtenidos de animales en riesgos potenciales para los humanos expuestos a radiaciones de radiofrecuencias, y facilitar, planificar y ejecutar eficazmente el tratamiento hipertérmico

terapéutico.

La SAR se define como la derivada en el tiempo de la energía incremental  $dW$  absorbida o disipada en una masa incremental  $dm$  contenida en un elemento de volumen  $dV$  de una densidad dada  $\rho$ , véase la ecuación G-7. La SAR promedio, se define como la relación de la potencia total absorbida en el cuerpo expuesto a la masa en la que se absorbe, que no es necesariamente la del cuerpo total. La SAR es la relación entre la potencia absorbida y la masa absorbente.

$$SAR = \left( \frac{d}{dt} \right) \left( \frac{dW}{dm} \right) = \left( \frac{d}{dt} \right) \left[ \frac{dW}{\rho(dV)} \right] \quad (G-7)$$

Otro concepto importante es el de escala de frecuencia, que se refiere a la extrapolación de los resultados obtenidos de, por ejemplo, experimentos en animales para ser usados con fines de limitar la exposición de los humanos, en que se pueden aplicar las condiciones de la similitud electromagnética. El concepto de factor de escala implica que las ecuaciones básicas que describen el fenómeno, las ecuaciones de Maxwell en ingeniería eléctrica, se transformen en ecuaciones adimensionales. La escala de frecuencia es aplicable a sistemas sin pérdidas. En sistemas biológicos las pérdidas pueden ser muy importantes. Las distribuciones SAR serán similares en dos cuerpos, no iguales, y la equivalencia es esencialmente válida para bajas pérdidas, lo cual podría no ser el caso de las estructuras biológicas.

### Consideraciones Térmicas

Varios métodos para determinar efectos biológicos se basan en mediciones térmicas, entre ellos están: calorimétricos, para estimar la energía absorbida; termométricos, para medir la temperatura debida a microondas; y técnicas termográficas que usan cámaras especiales.

Los factores a tener en cuenta que influyen en la tasa de cambio de temperatura de los tejidos expuestos a energía de radiofrecuencia<sup>2</sup> o microondas que la relacionan con la SAR son: duración de la exposición, tasa de calentamiento metabólico, tasa de pérdida de calor por unidad de volumen debida a la conducción térmica, tasa de pérdida de calor por unidad de volumen debida al flujo sanguíneo y el calor específico.

Los efectos térmicos resultantes de la absorción de ondas electromagnéticas son descritos en términos de la ecuación de BioCalor, véase la ecuación G-8, cuyas variables son: incremento de temperatura,  $\Delta T$ , duración de la exposición,  $\Delta t$ , tasa de calentamiento metabólico,  $P_m$ , tasa de pérdida de calor por unidad de volumen debido a la conducción térmica,  $P_c$ , tasa de pérdida de calor por unidad de volumen debido al flujo sanguíneo,  $P_b$ , y calor específico,  $C$ .

<sup>2</sup>Corresponde a la energía electromagnética proveniente de las ondas de radio emitidas por las antenas al espacio libre y que pueden ser absorbidas por los tejidos o sistemas vivos.

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{(SAR + P_m - P_c - P_b)}{C} \quad (\text{G-8})$$

### Descripción General del Sistema Nervioso

El sistema nervioso es la red de integración y control principal del cuerpo, sus tres funciones son: sensor los cambios internos y externos al cuerpo, interpretar e integrar estos cambios, y responder a la interpretación iniciando acciones en la forma de contracciones musculares o secreciones glandulares.

La temperatura del cuerpo y las funciones endocrinas están bajo la influencia directa de los campos electromagnéticos. Los efectos térmicos, incluyen: interacciones con el sistema nervioso periférico y ciertas funciones neurovegetativas, alteraciones electrofisiológicas, cambios en comportamiento animal y posiblemente la permeabilidad de la barrera hematoencefálica. Los efectos no térmicos, podrían incluir: interacciones de la membrana que afectan el flujo de iones, la modulación de actividades de impulsos neuronales y posiblemente arritmias inducidas en corazones aislados.

### Efectos sobre el Cerebro y la Columna Vertebral

La presencia de interacciones moleculares específicas en cerebro y médula espinal podría, en efecto, ser soportada por una particularidad de frecuencias basadas en las propiedades dieléctricas macroscópicas del sistema biológico. Cambios dependientes de la frecuencia han sido encontrados para los tres componentes claves en el metabolismo de la energía del cerebro: dinucleótida adenina nicotinamida (NADH), trifosfato adenosina (ATP) portador de la energía y fosfato creatina (CP). Para unas especies moleculares, la inducción de oscilación dipolar y cambio en catalítico o actividad de transporte podría ser dependiente de la frecuencia y debería ser sensible al campo eléctrico local, es decir, al campo en el tejido.

### La Barrera Hematoencefálica

La barrera hematoencefálica es un complejo anatómico/fisiológico asociado con el sistema cerebro vascular, su función es de filtro diferencial que permite el paso selectivo de sustancias biológicas de la sangre al cerebro. La pregunta de si la apertura de la barrera hematoencefálica puede ser inducida por exposición a las microondas del público general a la televisión, radio, y transmisores de telefonía móvil y, por lo tanto, si esta constituye un riesgo a la salud, demanda mayor investigación.

### **Influencia de los Parámetros de Exposición a Microondas**

Los parámetros de la exposición a microondas importantes de considerar cuando se investiga efectos biológicos son: la duración, la forma de onda y el patrón de absorción de energía. Algunos posibles efectos de la influencia de los parámetros de exposición a microondas son: el mecanismo de interacción directa consistente con la hipótesis de inhibición por microondas de la función de la cadena de transporte de electrones mitocondriales de la producción de ATP, que las microondas provoquen movimientos del cuerpo, y el aprendizaje retardado (efecto reversible).

### **Células y Membranas**

Las membranas celulares son amplificadores poderosos de eventos electromagnéticos débiles en sus vecindades (véase la referencia 70 listada en el capítulo 3 de [37]). En el flujo de iones, los de preferencia son los de calcio porque no causan deformación a otras proteínas u organelos con los que se enlaza, además, transmite mensajes electroquímicos a la superficie celular y a sus mecanismos bioquímicos. Los canales dependientes de voltaje están normalmente cerrados en células excitables, pero abren en respuesta del potencial de acción, esto es, el pulso de voltaje transmembrana inducido por la llegada de un mensaje de la superficie celular. Las señales pulsadas actúan más en la reducción de la probabilidad de apertura que las ondas continuas (véase la referencia 71 listada en el capítulo 3 de [37]).

### **Nivel Molecular**

Las células expuestas a efectos de microondas exhibieron significativo incremento en el número de lesiones de cromosomas específicos y también evidenciaron cambios en el genoma. No fue obtenido incremento en la frecuencia de mutación (véase la referencia 72 listada en el capítulo 3 de [37]).

### **Síndrome de Microondas**

Para humanos expuestos a densidades de potencia muy bajas existe una variedad de problemas asténicos reversibles, tales como: dolor de cabeza, transpiración, inestabilidad emocional, irritabilidad, cansancio, somnolencia, problemas sexuales, pérdida de memoria, concentración y dificultades de decisión, insomnio y tendencias hipocondriacas depresivas, que constituyen el hipotético síndrome de microondas (véanse las referencias 13, 79 y 80 listadas en el capítulo 3 de [37]). Estas quejas son subjetivas y su evaluación es difícil en la ausencia de datos dosimétricos bien establecidos.

## **Exposición Pulsada de Bajo Nivel**

La exposición a microondas pulsadas de bajo nivel podría ser una fuente de estrés moderado, sin embargo, la semejanza de los efectos de las microondas con los de las fuentes establecidas de estrés llevan a la especulación de que la irradiación de microondas es un estresador (véase la referencia 43 listada en el capítulo 3 de [37]). Las consecuencias biológicas de largo plazo de exposiciones repetidas a microondas también depende los parámetros de exposición y no hay evidencia convincente de que esta exposición conlleve efectos neurológicos irreversibles.

## **Componentes de Frecuencias Extremadamente Bajas**

Las ondas de radio transmitidas por teléfonos móviles del tipo GSM (sistema global para telecomunicaciones móviles) presentan un patrón característico que resulta de la particular estructura de tiempo de tal señal (acceso múltiple por división de tiempo). Es una microonda portadora pulsada modulada de muy baja frecuencia. La telefonía celular digital usando el sistema GSM transmite información en ráfagas. La pregunta que surge es si esta señal estructurada puede influenciar negativamente los tejidos de la cabeza humana, en especial los del cerebro, posiblemente induciendo efectos no térmicos. La investigación, al respecto, se encuentra en proceso para obtener conclusiones prácticas acerca de los umbrales de sensibilidad y reversibilidad para la exposición a campos magnéticos de muy bajas frecuencias emitidos por la telefonía móvil.

## **Oído, Ojos y Corazón**

Cuando una radiación de microondas incide en la cabeza, la energía absorbida es convertida en calor, ésto produce un pequeño pero rápido crecimiento en temperatura. Esa elevación de temperatura ocurre en un tiempo muy corto, genera expansión termoelástica rápida de los tejidos en la cabeza, que lanza una onda acústica de presión que es detectada por las células del pelo en la cóclea. La estructura interna del oído es mucho más compleja que la del cerebro, porque esta contiene materiales hidratados y no hidratados, lo que dificulta determinar la potencia de las microondas. La complejidad también incrementa el fenómeno ondulatorio y ello reduce la densidad de potencia electromagnética.

La elevación de temperatura del oído puede ser importante cuando se somete a exposición de microondas en razón de la vascularización dado el número de vasos y vasos sanguíneos capilares. En malas condiciones, una conversación telefónica establecida en la base de un edificio moderno, la temperatura del lóbulo del oído se incrementa entre 1.5 y 2.5 °C después de 10 a 15 minutos de conversación. Los humanos pueden percibir radiaciones moduladas por pulsos entre 200 MHz y 6,5 GHz como un zumbido o sonido de clic, dependiendo de las características de la modulación. El efecto es generalmente atribuido a la expansión termo-

elástica del tejido del cerebro después del pequeño pero rápido aumento en la temperatura por la absorción de la energía incidente, generando una onda de sonido en la cabeza que estimula la cóclea (véase la referencia 88 listada en el capítulo 3 de [37]).

La cornea y los lentes cristalinos de los ojos no son vascularizados y su metabolismo es lento. Los ojos no tienen sensores térmicos y no producen sensaciones de protección, por lo tanto la función visual podría alterarse en caso de imprudencia: existe la posibilidad de cataratas a densidades de potencia mas altas de  $100 \text{ mW/cm}^2$  a frecuencias por encima de 1 GHz, lesiones endoteliales de la cornea con cambios degenerativos de las células en retina e iris a  $10 \text{ mW/cm}^2$ , daño corneal a SAR de  $4 \text{ W/kg}$  en frecuencias de 2.6 a 2.45 GHz y daño en la retina a  $4 \text{ W/kg}$  en frecuencias de 1.25 a 2.45 GHz (véase la referencia 92 listada en el capítulo 3 de [37]).

La ubicación del corazón, al interior del cuerpo, junto con la pequeña penetración de las microondas debido al efecto piel, son tales que el corazón no es sometido a campos de microondas altos . La exposición a onda continua y a la modulación por pulsos no muestra modificaciones de los latidos del corazón (véase la referencia 95 listada en el capítulo 3 de [37]).

### **Efectos No Térmicos, Microtérmicos e Isotérmicos**

Existe controversia acerca de la posibilidad de efectos microtérmicos y no térmicos, no solo es científica sino también política y comercial dado que implicaría que las exposiciones a radiofrecuencias/microondas podría causar efectos no térmicos a niveles bajos o muy bajos de exposición, situación que no es muy bien aceptada. Los efectos biológicos por su parte podrían resultar o no adversos a la salud, en esto es que subyace la pregunta de cómo establecer recomendaciones para limitar la exposición a campos electromagnéticos, deberían proveer protección contra efectos adversos conocidos.

La temperatura no es un parámetro electromagnético, es una consecuencia de la absorción de energía a las frecuencias de radiofrecuencias y microondas. La SAR es proporcional a las pérdidas de absorción y hay elevación de temperatura cuando la SAR es positiva; si hay absorción, hay elevación de temperatura. Con la teoría electromagnética solo se pueden evaluar efectos térmicos, y no hay oportunidad de mostrar efectos no térmicos.

Para investigar la posibilidad de efectos isotérmicos, electromagnetismo y termodinámica (entendiendo el sistema como caja negra con volumen, presión, temperatura y entropía) tienen que ser usados conjuntamente, combinando el teorema de Poynting y las ecuaciones básicas de la termodinámica.

La transferencia de energía de las radiaciones al material produce efectos térmicos, estos varían lentamente con la frecuencia y son en gran parte gobernados por las pérdidas dieléctricas. Los efectos microtérmicos ocurren solo en ciertas regiones de frecuencia y usualmente exhiben saturación a bajas intensidades.

H. Fröhlich [40] demostró que los efectos biológicos dependientes de la frecuencia de tipo resonante son propiedades del sistema completo y podrían depender de la actividad biológica. Los sistemas biológicos tienen que ser considerados en términos de sus actividades. Algunos biosistemas pueden exhibir propiedades y sensibilidad, similares a la de los instrumentos electrónicos más sofisticados.

Una característica de los sistemas biológicos activos es que la energía está siempre disponible, a través de procesos metabólicos, y esto causa cambios no lineales en moléculas o subsistemas grandes. Por esta razón no es conveniente extrapolar las propiedades de las moléculas biológicas obtenidas extrayéndolas del sistema vivo a su comportamiento *in vitro*.

Dos modelos físicos teóricos [40], cuya importancia básica son las características no lineales en conjunción con un suministro de energía: el primero cuasi estático, mostrando que bajo condiciones metaestables muy generales fija existencia de polarización eléctrica muy alta; el segundo, es dinámico en términos de excitación coherente de vibraciones eléctricas y muestra que bajo condiciones más rigurosas las vibraciones eléctricas coherentes podrían ser excitadas por energía metabólica aleatoria.

Las membranas biológicas han sido consideradas como un material básico, mostrando oscilaciones con desplazamiento perpendicular a la superficie, tal que para la longitud de onda más larga la delgadez de la membrana equivale a la mitad de la longitud de onda. Fröhlich señaló teóricamente la posibilidad de excitaciones coherentes, mostrando que cuando se cumplen ciertas condiciones, el suministro aleatorio de energía a los modos de una banda de ondas de polarización eléctrica puede conducir a una excitación fuerte, es decir, coherente, de un solo modo, siempre que el suministro de energía exceda un valor crítico. La acción disparadora de las microondas es una característica del modelo. La otra es que predice una fuerte excitación de los modos polares a través del bombeo biológico.

Las microondas que penetran en un material le suministran energía como una respuesta lineal proporcional a la intensidad de la radiación y con una dependencia de magnitud y fase gobernada por la permitividad compleja del material. Hay una acción de microondas sobre el movimiento térmico de los dipolos eléctricos del material. Este movimiento solo se perturba muy minuciosamente, pero esto induce un aumento de la temperatura: en condiciones estacionarias, la energía eliminada por la conducción de calor es igual a la energía suministrada por la absorción de las microondas. En consecuencia, no se debe esperar de-

masiado la detección de efectos no térmicos en regiones de alta absorción dieléctrica. Una de las características biológicas más generales es, de hecho, que la energía suministrada en términos de alimentos, o de la luz solar, se utiliza en parte para construir y mantener una organización muy compleja.

La termodinámica considera la interacción del sistema con el ambiente, tomando en cuenta la entropía y la energía respecto a la entrada y salida del sistema, tratando solo con tres tipos diferentes de sistemas:

- Sistema aislado, no tiene intercambio con todo el ambiente
- Sistema cerrado, puede intercambiar energía con el ambiente
- Sistema abierto, puede intercambiar masa y energía con el ambiente

La relación entre el trabajo eléctrico útil y la parte absorbida de la energía de radiación electromagnética se denominada eficiencia del convertidora. Por otro lado, la relación entre el trabajo eléctrico útil y la energía de radiación electromagnética total se denomina eficacia. La termodinámica solo trata con la eficiencia

El fenómeno Saratov es la demostración de la luminiscencia cuando se expone una interfaz aire-agua a ondas milimétricas. A altos niveles de exposición a ondas milimétricas, desde  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  a  $10 \text{mW}/\text{cm}^2$ , la radiación de ondas decimétricas no fue observada, mientras que a niveles de potencia por encima de  $10 \text{mW}/\text{cm}^2$  un efecto térmico es observado. Los investigadores han notado que el espectro Saratov cambia cuando las condiciones fisiológicas funcionales de los tejidos cambian (véase la referencia 103 listada en el capítulo 3 de [37]).

### Estudios Epidemiológicos

El uso extendido de teléfonos móviles portátiles ha ocasionado que muchas personas rutinariamente ubiquen los transmisores de radiofrecuencias / microondas contra sus cabezas. Los transmisores de radio FM y de televisión deberían también haber despertado un interés por esta forma de energía radiante, pero no fue así.

Hasta la fecha del texto, véase la referencia [37], no se ha establecido claramente que las radiofrecuencias conduzcan al cáncer. Para establecer tales efectos la pregunta difícil es la dosimetría: medir la exposición a la cual los humanos están siendo sometidos es una cosa; estimar lo que ha sido en el pasado es mucho más difícil.

El cáncer de cerebro toma años o décadas en desarrollarse, un estudio válido tendría que evaluar el uso individual del teléfono móvil en una década o más, lo cual resulta complicado

dado el rápido cambio tecnológico. Los estudios con animales son más fáciles de controlar que los estudios epidemiológicos y se podría usar el escalado de frecuencia siempre que se este en situaciones sin pérdidas, que no es el caso de los tejidos vivos.

Los resultados de algunos estudios exhiben un incremento del riesgo relativo de cáncer para la población sometida a microondas pero no son concluyentes porque el incremento no es estadísticamente significativo. Por otra parte, otros estudios revelan resultados negativos. Otros estudios sobre cáncer que se deberían adelantar son: el de la leucemia en adultos y niños y el de cáncer cerebral en relación con el uso del teléfono móvil debido a las consideraciones de la dosis. Los efectos genotóxicos sobre células biológicas podría llevar a efectos adversos a la salud tales como cánceres y neurológicos u otras enfermedades. La mayoría de estudios llevados hasta 2002 no han demostrado la genotoxicidad de las radiofrecuencias. Sin embargo, algunos resultados muestran un incremento en la alteración del ADN en cerebros de ratas expuestas a radiofrecuencias.

### **Interferencias**

Aunque las interferencias producidas por dispositivos de radiofrecuencias/microondas sobre eléctricos y especialmente equipo electrónico no son efectos biológicos, ellas afectan la salud de los pacientes. El blindaje de los sistemas usualmente hace que no representen una amenaza cerca de otros equipos eléctricos. Las principales fuentes de radiación de interferencias electromagnéticas son los radiadores intencionales tales como telemetría, buscapersonas, radioteléfonos y teléfonos celulares. Los láseres, rayos X, equipos de resonancia magnética y escáneres de tomografía computada usan altos niveles de energía para su funcionamiento pero sus niveles de radiación de interferencia electromagnética están por debajo de los niveles de transmisores cercanos.

La rápida expansión en el uso y proliferación de los teléfonos celulares, motiva el interés por determinar si hay interferencias electromagnéticas por estos dispositivos, aunado al hecho de que estos pueden transmitir sin el conocimiento del usuario, cuando se encuentran en el modo standby, a la red de comunicaciones para notificar que están listos para recibir llamadas y la celda en la que se encuentran. Un estudio encontró que seis de trece equipos dosimétricos personales fueron afectados por las interferencias, mostraron respuestas anormales, cuando fueron expuestos a transmisión de teléfonos móviles. Según estudios realizados, una distancia de 20 cm es suficiente para garantizar integridad de marcapasos con respecto a teléfonos portátiles cuando se trata de interferencias electromagnéticas. En evaluaciones de interferencias electromagnéticas de teléfonos GSM con audífonos se encontró que, para ciertos teléfonos, los niveles de presión de sonido del nivel de interferencia electromagnética inducida variaron más de 40 dB, dependiendo del diseño del audífono (véanse las referencias 108, 109 y 110 listadas en el capítulo 3 de [37]).

## Riesgos de Radiación

Aunque los equipos que utilizan o emiten energía electromagnética proveen beneficios a la humanidad, estos también constituyen peligros a los individuos a través de no controladas y excesivas emisiones. A altas frecuencias la profundidad de penetración en tejidos biológicos es limitada a las capas superficiales. El enfoque acerca de potenciales peligros se debería centrar en los tejidos que son superficiales y biológicamente sensibles, los ojos serían un buen ejemplo de estos. La investigación de exposición humana es difícil porque el cuerpo humano posee una geometría compleja y tejidos heterogéneos.

## Tejidos Fantasma y Mediciones SAR

Un paso necesario para evaluar el riesgo potencial es analizar y cuantificar la energía electromagnética inducida en el cuerpo humano, en particular en la cabeza humana, por fuentes externas, tales como teléfonos celulares y las estaciones base asociadas. Los estudios se han adelantado con simulación numérica y con otro procedimiento consistente de la producción de un fantasma: que es un tejido biológico equivalente con la misma permitividad y conductividad que los tejidos del cerebro y del cráneo, estos hacen posible acompañar con alta confiabilidad y precisión la estimación de la SAR en tejidos biológicos.

Los fantasmas ofrecen la posibilidad de medir los picos locales de SAR, lo cual es interesante frente a fuentes externas locales de microondas, tales como los teléfonos celulares. La SAR es medida ya sea usando una sonda de campo eléctrico o por métodos termográficos.

Varios métodos son basados en mediciones térmicas: métodos calorimétricos, apropiados para medidas in vitro en los cuales los datos de enfriamiento y calentamiento pueden ser analizados para estimar la energía absorbida por una muestra irradiada; métodos termométricos, usados para medir la temperatura debida a microondas; y técnicas termográficas usados para medir la temperatura con cámaras termográficas (miden como cuanta radiación es emitida por el objeto comparada a la emitida por un cuerpo negro perfecto).

La piel humana presenta una emisividad cercana a 1.0. La determinación de la temperatura superficial y las variaciones de temperatura sobre la superficie dependen directamente de la emisividad superficial. Los parámetros que se deben determinar antes de las mediciones son: emisividad, temperatura ambiente, temperatura atmosférica, humedad relativa del aire y distancia.

La operación con fantasmas implica el uso de alta potencia, de ahí que los equipos de comunicación móvil actuales no pueden ser probados, y no pueden realizarse mediciones tridimensionales, por eso no es eficiente medir SAR por experimentos termográficos. Por otro

lado, el uso de experimentos termográficos si es eficiente en evaluaciones SAR de un medio de forma complicada, tal como el oído interno y el lóbulo.

### **Métodos Computacionales para Evaluaciones SAR**

Hay varios estudios realizados por simulación numérica, en particular acerca de valores SAR en la cabeza humana, cuando es expuesta a radiaciones de microondas de dispositivos portátiles. El Método de los Momentos (MoM) en el dominio de la frecuencia y el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) son ampliamente usados para analizar problemas complejos de electromagnetismo tales como estructuras biológicas. Los mayores inconvenientes de estas simulaciones son el tiempo de ejecución y los requerimientos de memoria computacional, el propósito de los métodos es reducirlos ambos. Hay un método híbrido entre MoM y el método FDTD capaz de analizar un sistema de regiones múltiples discretas empleando el principio de fuentes equivalentes para excitar superficies acopladas.

### **Exposición del Cuerpo a Teléfonos Celulares y Estaciones Base**

Las recomendaciones que limitan la exposición electromagnética proveen protección contra efectos conocidos adversos a la salud. Los efectos biológicos podrían resultar o no en un efecto adverso a la salud. Hay interés sobre los posibles efectos biológicos adversos debidos a estaciones base de telefonía celular y sorprendentemente no hay interés sobre la exposición a TV y FM. Las principales conclusiones son: hay aún un número de incertidumbres, hay una base de datos disponible de efectos biológicos térmicos, muchas naciones tienen estándares de protección y hay una variedad de estos estándares.

Los efectos biológicos debidos a la exposición a las microondas dependen del campo eléctrico interno a los tejidos. Los efectos térmicos dependen de la distribución SAR. Los denominados efectos no térmicos podrían ser efectos microtérmicos y podrían ser efectos isotérmicos. Las microondas forman una familia completa de frecuencias, tradicionalmente desde 100 MHz a 1THz (podría iniciar desde los 50 MHz si se incluyen las emisiones de TV), que induce esencialmente los mismos efectos a través del rango completo de frecuencias.

La densidad de potencia absorbida es la principal causa de los efectos. Mediciones en la cara han mostrado un incremento en la temperatura que se obtiene luego de 10 a 12 minutos (véase la referencia 7 listada en el capítulo 3 de [37]). La SAR es la relación de potencia absorbida a la masa absorbente: el efecto piel tiene que ser tenido en cuenta. Las ondas pulsantes producen un efecto detectable a niveles de potencia más pequeños que las ondas continuas.

La cuestión del «síndrome de microondas» se planteó hace varias décadas en Europa del

Este, relacionada con una serie de manifestaciones, como dolor de cabeza, transpiración, inestabilidad emocional, irritabilidad, cansancio, somnolencia, problemas sexuales, pérdida de memoria, dificultades en concentración y decisión, insomnio y tendencias depresivas hipochondriacas, la evaluación es difícil por la ausencia de un grupo de control y datos dosimétricos bien establecidos.

Las actuales recomendaciones se limitan solo a procesos de calentamiento, que es el único efecto de las microondas bien conocido. Cualquier recomendación para los límites de exposición con respecto a los efectos no térmicos a largo plazo no puede hacerse en esta etapa sobre una base científica.

# Bibliografía

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-T K.91. – orientación para el cálculo, evaluación y monitoreo de la exposición humana a campos electromagnéticos de radiofrecuencia. <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.91-201801-I/en>, 2018. Accedido 01-05-2018.
- [2] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Decreto número 195 d 31 de enero de 2005. [http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3569\\_documento.pdf](http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3569_documento.pdf), 2005. Accedido 01-05-2018.
- [3] A. Ahlbom, U. Bergqvist, J. H. Bernhardt, J. P. Cesarini, L. A. Court, M. Grandolfo, M. Hietanen, A. F. McKinlay, M. H. Repacholi, D. H. Sliney, J. A J Stolwijk, M. L. Swicord, L. D. Szabo, M. Taki, T. S. Tenforde, H. P. Jammet, and R. Matthes. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz). *Health Physics*, 74(4):494–521, 1998.
- [4] Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-T K.52. – orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos. <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.52-201801-I/en>, 2018. Accedido 01-05-2018.
- [5] Unión Internacional de Telecomunicaciones. 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. <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.61-201801-I/en>, 2018. Accedido 01-05-2018.
- [6] Damiano Urbinello, Wout Joseph, Anke Huss, Leen Verloock, Johan Beekhuizen, Roel Vermeulen, Luc Martens, and Martin Röösl. Radio-frequency electromagnetic field (rf-emf) exposure levels in different european outdoor urban environments in comparison with regulatory limits. *Environment International*, 68:49 – 54, 2014.
- [7] L. Seyfi. Measurement of electromagnetic radiation with respect to the hours and days of a week at 100khz-3ghz frequency band in a turkish dwelling. *MEASUREMENT -LONDON-*, (9):3002, 2013.

- 
- [8] H. Korman and J.R. Descardecí. Electromagnetic power radiation from cellular base station: a study of power exposure in a urban area of curitiba-brazil. *2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings, Asia-Pacific Microwave Conference*, 2005.
- [9] C. Bornkessel. The bioelectromagnetic side of antenna radiation - exposure, limits and present research. *2007 2nd International ITG Conference on Antennas, Antennas, 2007. INICA '07. 2nd International ITG Conference on*, page 222, 2007.
- [10] A. Ismail, N.M. Din, M.Z. Jamaluddin, and N. Balasubramaniam. Electromagnetic assessment for mobile phone base stations at major cities in malaysia. *2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on*, page 150, 2009.
- [11] M.D. Calin, C. Ursachi, and E. Helerea. Electromagnetic environment characteristics in an urban area. *2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), 2013 4th International Symposium on*, page 1, 2013.
- [12] Morales Santiago Urbano Oscar Arevalo Andres Muskus Elkin Pedraza Cesar Patino Marlon Suarez Martha Vega Felix, Pantoja John and Hernandez Nelson. An iot-based open platform for monitoring non-ionizing radiation levels in colombia. *2016 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), Communications and Computing (COLCOM), 2016 IEEE Colombian Conference on*, page 1, 2016.
- [13] Guillermo Aponte, Adolfo Escobar, Carlos R Pinedo, and Gisela Arizabaleta. Medición de Campos Electromagnéticos en la Ciudad de Cali, Colombia. *Información tecnológica*, 18:39 – 47, 00 2007.
- [14] Adolfo Escobar Ordoñez, Héctor Cadavid Ramírez, and Guillermo Aponte Mayor. Caracterización de campos electromagnéticos de alta frecuencia en ambientes urbanos. *Revista de Ingeniería*, pages 40 – 46, 05 2010.
- [15] Daniel Rosas Tapia and Mejía Mateus Duván Javier. Sistemas y telemática - no. 5 - enero/junio 2005 [texto completo]. 2006.
- [16] José de Jesús Rugeles Uribe, Antonio Jaimes Oviedo, Víctor Hugo Sánchez Barón, Oscar Alberto Mantilla Prada, and Eduard Sastoque Gálvez. Análisis de los límites de exposición humana a campos electromagnéticos de acuerdo a la norma UIT-K.52 para frecuencias entre 10 kHz y 3 GHz en áreas urbanas de Bucaramanga. *Ingeniería e Investigación*, 27:149 – 158, 12 2007.

- [17] Cesar Camilo Rodríguez Sánchez, Sandra Milena Peña Vega, and Homero Ortega Boada. Estudio de los niveles de radiación electromagnética no ionizante en varias zonas de la ciudad de Bucaramanga. *UIS Ingenierías*, 9(2):207 – 218, 2010.
- [18] Ieee standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 khz to 300 ghz. *IEEE Std C95.1, 1999 Edition*, page 1, 1999.
- [19] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Decreto Único reglamentario del sector de tecnologías de la información y las comunicaciones. [http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-9528\\_documento.pdf](http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-9528_documento.pdf), 2015. Accedido 01-05-2018.
- [20] Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Resolución número 001645 de 29 de julio de 2005. [http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3758\\_documento.pdf](http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3758_documento.pdf), 2005. Accedido 01-05-2018.
- [21] ROHDE&SCHWARZ. Manual de operación del analizador de redes. [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_manuales/gb\\_1/f/fsh\\_1/FSH\\_OperatingManual\\_en\\_FW271.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuales/gb_1/f/fsh_1/FSH_OperatingManual_en_FW271.pdf), 2016. Accedido 01-05-2018.
- [22] ROHDE&SCHWARZ. Guía rápida de operación del analizador de redes. [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_manuales/gb\\_1/f/fsh\\_1/FSH\\_QuickStartGuide\\_en\\_FW260.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuales/gb_1/f/fsh_1/FSH_QuickStartGuide_en_FW260.pdf), 2016. Accedido 01-05-2018.
- [23] ROHDE&SCHWARZ. Catálogo de la sonda de medición. [https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/TS-EMF\\_dat\\_en\\_0758-2777-12\\_v0501.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/TS-EMF_dat_en_0758-2777-12_v0501.pdf), 2016. Accedido 01-05-2018.
- [24] S. Morosi, P. Piunti, and E. Del Re. Improving cellular network energy efficiency by joint management of sleep mode and transmission power. *2013 24th Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Green ICT (TIWDC), Digital Communications - Green ICT (TIWDC), 2013 24th Tyrrhenian International Workshop on*, page 1, 2013.
- [25] M.A. Marsan, G. Bucalo, A. Di Caro, M. Meo, and Yi Zhang. Towards zero grid electricity networking: Powering bss with renewable energy sources. *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, page 596, 2013.
- [26] Mingyang Zhang, Fengli Xu, and Yong Li. Mobile traffic data decomposition for understanding human urban activities. *2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), 2016 IEEE 13th International Conference on, MASS*, page 1, 2016.

- 
- [27] N. Saxena, A. Roy, and H. Kim. Traffic-aware cloud ran: A key for green 5g networks. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, (4):1010, 2016.
- [28] A. Vaccari, Liang Liu, A. Biderman, C. Ratti, F. Pereira, J. Oliveirinha, and A. Gerber. A holistic framework for the study of urban traces and the profiling of urban processes and dynamics. *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC '09. 12th International IEEE Conference on*, page 1, 2009.
- [29] U. Paul, A.P. Subramanian, M.M. Buddhikot, and S.R. Das. Understanding traffic dynamics in cellular data networks. *2011 Proceedings IEEE INFOCOM, INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, page 882, 2011.
- [30] Liu Jun, Li Tingting, Cheng Gang, Yu Hua, and Lei Zhenming. Mining and modelling the dynamic patterns of service providers in cellular data network based on big data analysis. *China Communications, Communications, China, China Commun*, (12):25, 2013.
- [31] Ana Nika, Asad Ismail, Ben Y. Zhao, Sabrina Gaito, Gian Paolo Rossi, and Haitao Zheng. Understanding and predicting data hotspots in cellular networks. *Mobile Networks and Applications*, (3):402, 2016.
- [32] W. Sun, X. Qin, and G. Wei. Modeling and mining the temporal patterns of service in cellular network. *CHINA COMMUNICATIONS*, (9):11, 2015.
- [33] Suyeon Kim, Yohan Chon, Seokjun Lee, and Hojung Cha. Prediction-based personalized offloading of cellular traffic through wifi networks. *2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2016 IEEE International Conference on*, page 1, 2016.
- [34] Liangrui Tang, Shimo Du, and Shiyu Ji. Forecasting network traffic at large time scale by using dual-related method. *2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), 2016 12th International Conference on*, page 1336, 2016.
- [35] Andres Fernando Mejia Ardila. Análisis de ocupación de canales para redes de radio cognitiva en el espectro de señales gsm durante un periodo de seis meses. Magíster en Ingeniería - Telecomunicaciones, Línea de Investigación: Redes Inalámbricas - Telecomunicaciones, Noviembre 2017.
- [36] Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-T K.91. – técnicas de mitigación para limitar la exposición humana a campos electromagnéticos en la

vecindad de estaciones de radiocomunicación. <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.70-201801-I/en>, 2018. Accedido 01-05-2018.

- [37] A. Vander Vorst, Arye Rosen, and Y. Kotsuka. *RF / Microwave Interaction with Biological Tissues*. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley-IEEE Press, 2006.
- [38] A. Vander Vorst and F. Duhamel. 1990-1995 advances in investigating the interaction of microwave fields with the nervous system. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Microwave Theory Techn*, (10):1898, 1996.
- [39] & Huxley A. F. Hodgkin, A. L. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology*, pages 500–544, 1952.
- [40] H. Fröhlich. The biological effects of microwaves and related questions. *Advances In Electronics And Electron Physics*, 53:85–152, 1980.