

Análisis de irradiación electromagnética en las inmediaciones de una radio base sectorizada en condiciones andinas

Alexis Paolo García Ariza

alexis_paolo@ieee.org

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS

Fecha de recepción: 10-12-2004

Fecha de aceptación: 30-03-2005

ABSTRACT

For more than a year now, the Radio GIS Research Group, assisted by the Schools of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering (E³T) at UIS, together with other local research groups (i.e. ICESI's I2T, UFPS's GIDT, and UDI's MAXWELL, and the Colombian Ministry of Communications have been conducting a number of studies on high-frequency electromagnetic radiation under outdoor conditions to determine acceptable human exposure levels to this kind of radiation. These studies are driven not only by academic interest in this subject, but also by concerns raised by communities in the city of Bucaramanga and other regions in Colombia with respect to the installation of a large number of radio-communications stations.

With this paper, the Radio GIS group makes some contributions, which will

hopefully benefit both the population in general and the regulatory agencies, aiming at establishing control policies based on concrete theoretical and technical studies.

The results of the studies discussed in this paper derive from previous research conducted in the field of electromagnetic propagation. They were extrapolated to new research studies on sectorized radio bases under Andean region conditions.

Based on modern simulation and measurement methods to determine the coverage areas and radiation levels generated by cellular systems, which are now operating in Colombia at frequencies of 800 MHz and 1,900 MHz (i.e. CDMA2000.1x, TDMA/IS-136 and GSM 800 and 1900 Standards), safe human exposure levels and limits were calculated efficiently.

In addition to this, this paper presents the results and relevant analysis of the main commercial frequencies on the

radioelectric spectrum which are considered critical to the safety of the general public (i.e. AM, FM, TV, 300MHz, and cellular frequencies) based on readings taken in the field. This is intended to make a comparison of the percentile and specific radiation of mobile phone and PCS systems against international standards.

These studies were conducted in cooperation with the Bucaramanga Regional Management Division of the Ministry of Communications, which made available their spectrum monitoring systems.

KEY WORDS

Density, power, field, restrictions, levels, reference contribution, broadband, zones, sectorization, readings, polarization, algorithm, model, Walfisch, Ikegami, COST231, GIS, propagation, path loss, topography, Andean.

RESUMEN

Desde hace más de un año el Grupo de Investigación RadioGIS, apoyado por la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones-E³T- de la UIS, junto con otros grupos de investigación del país (i.e. I2T-ICESI, GIDT-UFPS y MAX WELL-UDI) y el Ministerio de Comunicaciones, vienen realizando estudios sobre las irradiaciones electromagnéticas en ambientes abiertos a altas frecuencias y sobre los niveles aceptables de exposición a estas irradiaciones para los seres humanos. Estos estudios son motivados no sólo por la inquietud académica sobre el tema sino también por las dudas generadas en las comunidades de la ciudad de Bucaramanga y de otras regiones del país ante la instalación de una gran cantidad de estaciones de radiocomunicación. Con este *paper* el grupo RadioGIS realiza algu-

nos aportes que espera beneficien a la población en general y a los entes reguladores en busca de establecer políticas de control basadas en estudios teóricos y técnicos concretos. Los resultados de los estudios aquí expuestos se derivan del desarrollo de investigaciones previas realizadas en el área de propagación electromagnética^{11,12,13} extrapolados a nuevos trabajos de investigación sobre radios base sectorizadas en condiciones andinas.^{4,9,14,17} Se ponen en práctica métodos modernos de simulación y de medidas para determinar las *áreas de servicio* y los *niveles de irradiaciones* ocasionados por los sistemas celulares actualmente en funcionamiento en Colombia en las bandas de 800MHz y 1900MHz (i.e. Estándares CDMA2000.1x, TDMA/IS-136 y GSM 800 y 1900), y de esta manera poder establecer de forma eficiente y eficaz los niveles y límites de seguridad. Además, con base en medidas de campo, se presentan los resultados y los análisis hechos a las principales bandas del espectro radioeléctrico explotadas comercialmente y consideradas como críticas para la seguridad del público en general (i.e. Bandas de AM, FM, TV, 300MHz y Celular), en busca de obtener puntos de comparación con las irradiaciones porcentuales y las particulares de los sistemas móviles Celular y PCS, tomando como referencia las recomendaciones internacionales.^{7,18,21,25} Estos trabajos se realizaron en cooperación con el Ministerio de Comunicaciones, Dirección Territorial Bucaramanga, haciendo uso de sus sistemas de monitoreo espectral.

PALABRAS CLAVE

Densidad, potencia, campo, restricciones, niveles, referencia, contribución, banda ancha, zonas, sectorización, medidas, polarización, algoritmo, modelo, Walfisch, Ikegami, COST231, GIS, propagación, path loss, relieve, andino.

INTRODUCCIÓN

Luego de haber iniciado un proceso investigativo en el área de radiopropagación celular sobre terreno irregular y haber expuesto sus resultados a nivel nacional e internacional^{11,12,13} este trabajo dio continuidad a esta línea de investigación orientándose al ofrecimiento de una solución inicial confiable para el análisis y simulación de *propagación electromagnética* y definición de niveles de *potencia y densidad de potencia* sobre entornos urbanos con esquemas de topografía irregular para las bandas UHF en sistemas de comunicación inalámbricos. El trabajo realizado y sus futuros avances se presentan como una propuesta para el desarrollo de una *plataforma base* que supla las necesidades básicas del Ministerio de Comunicaciones de Colombia en cuanto a la predicción de *Áreas de Servicio* y estimación de *Densidades de Potencia* (para consideraciones ambientales en cuanto a emisiones de campos electromagnéticos), *que luego será complementada* con trabajos que incluirán la aplicación de algoritmos específicos para otras bandas del espectro radioeléctrico, tanto para el cálculo de pérdidas por propagación, como para la estimación de interferencias, análisis de capacidad, estimación de niveles de irradiaciones y configuraciones de campo cercano y lejano en sistemas de baja frecuencia.

Por otro lado, se resalta la importancia de este estudio debido al auge y crecimiento que han tenido las nuevas redes móviles celulares en Colombia como CDMA2000.1x, GSM800 y GSM1900, lo que ha generado múltiples discrepancias entre la población, la comunidad académica y los entes

gubernamentales en cuanto a la influencia de los campos electromagnéticos emitidos por estos sistemas sobre la salud humana. Al respecto no se ha establecido un concepto concluyente a nivel internacional, pero después de varios estudios desarrollados por organizaciones mundiales^{7,21,25} y normativas establecidas por algunos países como Chile,¹ Venezuela,⁶ Argentina⁵ y España,¹⁹ se ha concluido en la necesidad de emitir normas y recomendaciones para establecer algunos valores mínimos de seguridad a la exposición a campos electromagnéticos en Colombia. Aunque en el país esta normativa no se ha establecido, ya existe un borrador de decreto bajo estudio¹⁸ que aplica estas recomendaciones, no sólo a las bandas Celular y PCS, sino que se extiende a todas las fuentes de irradiación comprendidas entre los 3KHz y 300GHz.

Según el análisis hecho a la problemática por parte de RadioGIS-UIS es de especial interés y beneficio para el Ministerio de Comunicaciones el poder determinar estos niveles de irradiación en las condiciones ya mencionadas para ser comparadas con normas establecidas a nivel mundial. Con los resultados obtenidos se podrán despejar las dudas existentes y realizar las recomendaciones pertinentes a los operadores de los sistemas, brindando así tranquilidad a la población. Es así que contar con algoritmos de predicción como los que se han utilizado en la investigación se lograrán predecir los niveles de campo recibidos sobre las coberturas de celdas sin necesidad de trasladar costosos equipos de medida, y a partir de los resultados de simulación, tomar decisiones sobre cuáles son los

lugares más vulnerables y realizar, si es necesario, los respectivos cotejos de campo, ahorrando tiempo, dinero y horas hombre dedicadas.

En este trabajo en particular se utilizó un Sistema de Información Geográfico-SIG comercial (i.e. ArcView de la casa ESRI), un Modelo Digital de la ciudad de Bucaramanga (proporcionado por la compañía TES América Andina Ltda.), junto con una herramienta de planificación celular facilitada por el Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles-MCG de la Universidad Politécnica de Valencia.²³ El trabajo presenta un análisis de cobertura y densidad de potencia para la telefonía móvil celular (i.e. un sitio que comparte las tecnologías CDMA2000.1x y TDMA/IS-136 en una configuración de sectorización de grado tres) en una región particular de Bucaramanga donde se tienen características de relieve urbano tipo andino. Además, se hace un análisis de las contribuciones de otros sistemas radioeléctricos que influyen en los niveles de exposición a campos electromagnéticos del sector en estudio (i.e. bandas AM Comercial, FM Comercial, TV banda baja, banda de 300MHz y Celular en 800MHz). En el plano investigativo se puso en práctica el algoritmo de predicción ajustado en la UIS en el año 2002,^{11,12,13} pero en esta ocasión en condiciones de celda sectorizada con el fin de estimar las pérdidas de señal y corroborar los niveles de densidad de potencia tomados como referencia en la reglamentación internacional para los sistemas que funcionan en la banda de 400-2000MHz.²⁵

CONCEPTOS GENERALES

Antes de abordar este tema con la mayor objetividad posible, es impor-

tante aclarar algunos de los conceptos que se involucran en la problemática, especialmente en el caso particular que representan los servicios de telefonía móvil terrestre (Celular y PCS). Primero, la telefonía móvil ha adquirido popularidad debido a la libertad, movilidad y la productividad realizada que provee, convirtiendo los teléfonos portátiles en estaciones móviles con grandes capacidades de procesamiento de información, tanto así, que las personas ya no deben permanecer atadas a teléfonos fijos para atender negocios, clientes, colegas y establecer relaciones. Es de esta forma que la sociedad ha entrado en una alta dependencia de esta tecnología, lo cual seguirá promoviendo su avance y penetración en las ciudades, pueblos y carreteras de todos los países. Desde el punto de vista técnico, la cobertura geográfica de un servicio de comunicación móvil permite que el usuario pueda generar y recibir mensajes en todo instante, lo que implica instalar estaciones base (equipos y torres con sus respectivas antenas), en aquellos lugares en que se desee entregar un buen servicio, que en últimas es lo que exigen los usuarios desde una perspectiva comercial.

La presencia de las antenas y sus torres responde principalmente a dos factores: el primero es proporcionar *cobertura* (área de servicio), es decir, que desde cualquier punto se pueda establecer una llamada; y el segundo factor es dar *capacidad*; ofrecer el servicio a todos los usuarios que lo necesiten. Esto último es debido a que cada estación base sólo puede soportar un número relativamente pequeño de llamadas al mismo tiempo, por

lo tanto, a medida que más usuarios utilizan la red, el número de estaciones base tiene que aumentarse para satisfacer el incremento de la demanda de llamadas con la calidad adecuada. Por lo tanto, las estaciones base son, en cierta forma, necesarias para el correcto funcionamiento de los teléfonos móviles dentro de las ciudades y no tiene sentido el tener todas las antenas alejadas de la ciudad emitiendo a mayor potencia para servir a dichos usuarios.

El punto de discusión principal en este tema son las ondas electromagnéticas irradiadas, para lo cual es esencial definir su uso en los sistemas de comunicación. La interacción entre el teléfono y las estaciones base se realiza mediante ondas electromagnéticas, generadas artificialmente por el equipo transmisor del teléfono y de la estación base. En *Uplink*^{15,20} (enlace de subida), una vez que las ondas han llegado a la estación base más próxima, ésta las transforma para pasar a la red telefónica convencional. Las antenas emisoras que crean a su alrededor un campo electromagnético o un espacio en el que actúan sus radiaciones (no solo las estaciones base de telefonía celular, sino también las estaciones de TV, Radio y cualquier otro servicio que utilice el espectro electromagnético, al igual que los emisores no intencionales como los computadores y otros elementos electrónicos) son el principal tema científico de discusión. La intensidad de este campo creado es inversamente proporcional a la distancia que hay desde la antena hasta un punto receptor, por lo que, *en principio*, las viviendas

próximas a las estaciones, o los mismos edificios donde se ubican, o los edificios próximos, pueden quedar dentro de ese campo intenso y verse afectados. Además, cuando hacemos una llamada por un teléfono móvil nos vemos adicionalmente irradiados por las ondas que éste emite debido a la corta distancia a la que lo usamos, aun cuando su intensidad de irradiación es menor que la de una radio base de telefonía móvil.

Las antenas de las radios base y los teléfonos móviles producen una radiación electromagnética de radiofrecuencia (o RF de sus siglas en inglés *Radio Frequency*) denominada no ionizante (por sus efectos no modificadores del material genético), operando en bandas de frecuencia de 300MHz a 3GHz del espectro electromagnético. Los efectos biológicos de las ondas de RF dependen de la tasa de energía absorbida por los tejidos, denominada técnicamente *Tasa de Absorción Específica* (SAR: *Specific Absorption Rate*),¹⁹ y es difícil de medir si no se cuenta con los equipos y condiciones apropiadas. Por lo anterior, se suele medir la *densidad de potencia de onda plana*,^{3,24} que después de este estudio y luego de varias pruebas de laboratorio al interior de RadioGIS-UIS en cooperación con el Ministerio de Comunicaciones, y simulaciones computarizadas con herramientas de planificación celular y algoritmos de predicción, se ha demostrado la factibilidad tecnológica local para realizar su predicción (ver Figura 1) y su corroboración sobre equipos de telecomunicación ya instalados o en perspectiva de instalación.

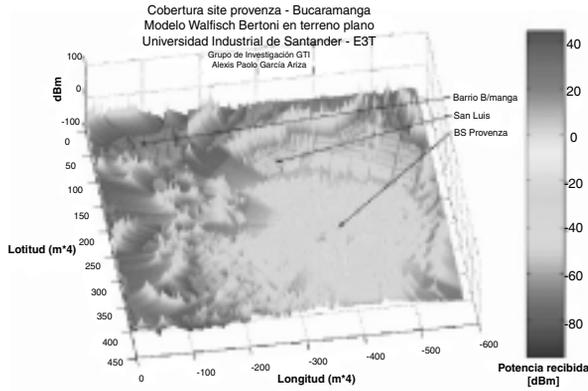


Figura 1. Simulación de los niveles de potencia en las inmediaciones de una estación base celular en Bucaramanga usando el algoritmo AndinoUIS®.¹³

LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y LA SALUD

Las antenas presentes en el entorno no son algo nuevo, ya que se está familiarizado con las antenas de radio y televisión situadas en colinas y otros emplazamientos elevados por todas las ciudades del mundo, transmitiendo a largas distancias hasta antenas ubicadas sobre edificios y casas. Esta clase de transmisiones son de *alta potencia* para conseguir cobertura a largas distancias (del orden de kilómetros a decenas de kilómetros). Por otro lado, las redes de comunicaciones móviles se basan en el intercambio de señales de radio entre el terminal móvil y la estación base más cercana (hasta la antena sobre el mástil). Estas comunicaciones ocurren a *potencias bastante bajas* en comparación con las correspondientes a radiodifusión, ya que suelen estar muy próximos el teléfono móvil y la estación base que le da servicio (cientos de metros o a unos cuantos kilómetros). La pregunta es, ¿las estaciones base de telefonía móvil y las de otros sistemas de radiofrecuen-

cia y sus irradiaciones ofrecen algún peligro a la salud humana?, esta es una pregunta difícil de resolver y los estudios a realizar deberán involucrar grupos multidisciplinarios y podrían tardar varios años para llegar a conclusiones aceptables internacionalmente (i.e. la Organización Mundial de la Salud espera emitir un concepto sobre el particular en el año 2007). Se debe destacar que ya se han realizado estudios particulares que han arrojado como conclusión la producción de estrés y otras afecciones en la salud por exposiciones elevadas y continuadas, los cuales han sido relacionados y analizados en profundidad por varios comités gubernamentales^{1,19} e internacionales²¹ y su conclusión final es que no hay ninguna evidencia causal de que las estaciones de telefonía móvil presenten problemas a la salud. Lo que sí es claro es que a nivel mundial ya se han determinado *niveles básicos y de referencia* (los cuales son aplicados en el estudio) considerados como seguros entre tanto se determinan los efectos reales de estos campos sobre la salud.

NORMATIVA SOBRE EXPOSICIÓN A CEM

Las normativas pretenden establecer niveles permitidos que garanticen la seguridad a un determinado agente externo, en nuestro caso, los campos electromagnéticos o CEM. La normativa de exposición a la emisión electromagnética fija unos niveles que no han de ser superados para garantizar la seguridad. Estos niveles se fijan introduciendo un margen sobre los valores que son ya, en sí mismos, seguros, y de los cuales se pueden definir zonas de confianza tal como se aprecia en la Figura 2. El tamaño de estas zonas depende de la frecuencia de operación del sistema, de la altura a la cual se encuentren las antenas y del PIRE —*Potencia Isotrópica Irradiada Efectiva*— del sistema.²⁵

Varias actividades informativas se han realizado en Colombia alrededor del tema de las irradiaciones electromagnéticas (i.e. el Foro Regional “Te-

lecomunicaciones, Salud y Medio Ambiente” llevado a cabo en el mes de diciembre de 2003 en Bucaramanga, y el Foro Internacional “Las Telecomunicaciones Inalámbricas y su Impacto en la Salud Humana y el Medio Ambiente”, realizado en la ciudad de Bogotá en el mes de mayo de 2004). Por otro lado, el Gobierno colombiano se pronunció oficialmente al respecto con la publicación de una normativa preliminar aplicable a todas las estaciones irradiadoras de campos electromagnéticos comprendidos entre los 3kHz y los 300GHz,¹⁸ documento que ha contado con los aportes de expertos y grupos de investigación del país, incluido RadioGIS-UIS.

En el ámbito internacional la Agencia Internacional de Protección de la Radiación creó la Comisión Internacional de Protección de Radiaciones No Ionizantes, ICNIRP (*International Comision on Non-Ionizing Radiation Protection*), como organismo cien-

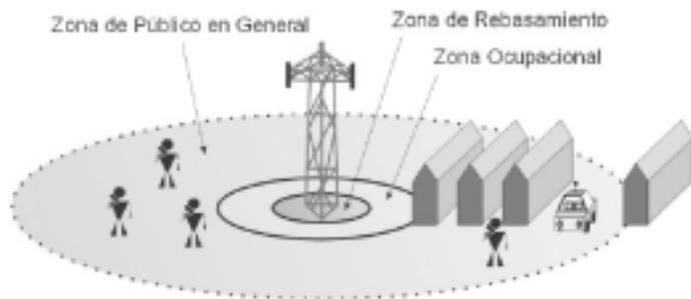


Figura 2. Zonas de seguridad establecidas en la norma colombiana.

El incremento de la altura de la estación reduciría las zonas críticas de rebasamiento y ocupacional, y el aumento de la potencia de transmisión aumentaría sus tamaños.

Nota: Las zonas de rebasamiento y ocupacional aquí mostradas no deben relacionarse con la realidad de las estaciones de telefonía móvil, éstas se exponen en la gráfica de forma didáctica con fines académicos.

tífico independiente encargado de investigar los riesgos que puedan estar asociados con la exposición a emisiones no ionizantes y desarrollar unas líneas directrices internacionales sobre los límites de exposición.²¹ Estas directrices han sido adoptadas por la UIT,²⁵ cuyas recomendaciones son utilizadas en la norma colombiana.¹⁸ En estas normas se diferencian dos partes: la primera, basada en ciencia establecida y reproducible, y la segunda en un *factor de seguridad*. En este sentido, las directrices están elaboradas sobre la base del elemento de prevención. Países como España, Francia, Reino Unido, Alemania, Austria, Irlanda, Suecia, Finlandia, Turquía, Nueva Zelanda, Australia, Canadá, Chile, Venezuela, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador y México han adoptado las recomendaciones del ICNIRP. Por otro lado, la Unión Europea, a través del Consejo Europeo, publicó una recomendación,⁷ que establece los niveles máximos de exposición a campos electromagnéticos.

LOS LÍMITES

Siguiendo los lineamientos del informe realizado en España¹⁹ y los de la recomendación de la UIT-T²⁵ se puede resumir que las restricciones se dividen en dos, las básicas y las de referencia. En este sentido la recomendación K.52 diferencia dos niveles, uno para exposición ocupacional y otro para público en general.

Restricciones básicas. Dependiendo de la frecuencia se emplean las siguientes cantidades físicas (cantidades dosimétricas o exposimétricas):¹⁹

- De 0 a 1Hz: Inducción Magnética, con un límite de 40mT para

campos magnéticos estáticos (0 Hz), y *Densidad de Corriente*, con un límite de 8mA/m² para campos variables en el tiempo de 1 Hz bajo exposición de público en general (40mA/m² para exposición ocupacional). Estas restricciones tienen el fin de prevenir los efectos sobre el sistema cardiovascular y el sistema nervioso central.

- De 1Hz a 10MHz: *Densidad de Corriente*, con límites de $8/f$ a $f/500$ mA/m² (f dado en Hz) en condiciones de público en general para prevenir los efectos sobre las funciones del sistema nervioso (de $40/f$ a $f/100$ mA/m² en ocupacional).
- De 100kHz a 10GHz: SAR, con un límite de 0.08W/kg para prevenir la fatiga calorífica de cuerpo entero, y de 2 y 4 W/kg para evitar un calentamiento local excesivo de los tejidos de la cabeza y tronco, y de las extremidades, respectivamente (en consideraciones de público en general). De 100kHz a 10MHz se ofrecen restricciones de la Densidad de Corriente y de SAR.
- De 10GHz a 300GHz: Densidad de Potencia, con un límite de 10W/m² con el fin de prevenir el calentamiento de los tejidos en la superficie corporal o cerca de ella.

Niveles de referencia. Los niveles de referencia sirven para ser comparados con los valores de cantidades medidas. Si se respetan los niveles de referencia recomendados se asegura el respeto de las restricciones básicas. Hay que tener en cuenta que si las cantidades de los valores medidos son mayores que los niveles de referencia no quiere decir necesariamente

te que se hayan sobrepasado las restricciones básicas. En este caso, debe efectuarse una evaluación para comprobar si los niveles de exposición son inferiores a las restricciones básicas. Es de anotar que los niveles de referencia se obtienen a partir de las restricciones básicas considerando un acoplamiento máximo del campo con el individuo expuesto, de forma tal que se obtiene un máximo de protección. En todas las recomendaciones figuran los niveles de referencia, de los cuales para el presente trabajo han sido usados los correspondientes a la recomendación UIT-T K.52²⁵ (utilizados por la norma colombiana¹⁸) para de esta forma poder comprobar los niveles de exposición alrededor de una radio base sectorizada en un marco legal local. Por lo general, estos niveles están pensados como valores promedio calculados espacialmente *sobre toda la extensión del cuerpo* del individuo expuesto, pero teniendo en cuenta que no deben sobrepasarse las restricciones básicas de exposición localizada. En situaciones en las que la exposición está muy localizada, como ocurre con los teléfonos móviles al usarlos muy cerca de la cabeza, no es apropiado emplear los niveles de referencia. *En estos casos debe evaluarse directamente si se respeta la restricción básica localizada.*^{19,25}

En el caso de estudio (correspondiente a los sistemas de comunicación en la banda UHF) se manejó una hipótesis de exposición sobre todo el cuerpo. Las cantidades físicas consideradas fueron la *Densidad de Corriente* y el *SAR* al verificar las *Restricciones Básicas*. En el caso de las medidas realizadas, las cantidades a verificar fueron la *Intensidad de Campo Eléctrico*

(en V/m), o la *Intensidad de campo Magnético* (en A/m) o la *Densidad de Potencia* (en W/m²) para los *Niveles de Referencia*.^{19,25} Partiendo de estas premisas, el estudio restringió inicialmente su análisis a los niveles de Intensidad de Campo Eléctrico y de Densidad de Potencia para constatar los niveles de referencia, y al comprobarse que estos no fueron sobrepasados no se verificaron las cantidades físicas de las restricciones básicas. Hay que anotar que este es un caso particular y no siempre se presentará (como se verá en las simulaciones de la zona piloto de análisis) y en algunas ocasiones será necesario constatar las restricciones básicas con la medida, cálculo teórico o simulación de alguna de las cantidades físicas, teniendo en cuenta, de antemano, las limitaciones en equipos que esto involucra.

Como se puede apreciar, la relación entre la intensidad de los campos electromagnéticos, la frecuencia y su interacción con el medio y los tejidos son algo complejo. Una relación de todos los valores, de todas las normas correspondientes a todas las frecuencias es difícil de comprender, siendo más práctica la aplicación de las recomendaciones dadas por bandas de frecuencia en cada caso particular. De lo anterior se vislumbran conceptos que suenan algo confusos tanto a nivel teórico como a nivel de aplicación técnica, pero en últimas son los promedios de *irradiación porcentual* y en banda angosta los que permiten establecer los niveles de seguridad y la aplicación final de una normativa al respecto en nuestro país. RadioGIS-UIS se ha comprometido en avanzar en dicha línea para ofrecer soluciones tangibles no sólo a esta proble-

mática sino al complejo correspondiente a Gestión del Espectro Electromagnético de forma eficiente y eficaz, tanto en Colombia como en la región Andina, cumpliendo así con la misión y visión institucional de la Universidad Industrial de Santander y de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

SISTEMA DE SIMULACIÓN

El sistema de simulación utilizado está conformado por una Herramienta de Planificación -HP- Celular,²³ un algoritmo de predicción ajustado a entornos andinos [11] (acoplado a la HP) el cual se ha basado en el modelo COST231-Walfisch-Ikegami,⁸ un Sistema de Información Geográfico -GIS- [2], un Modelo Digital de la Ciudad de Bucaramanga acoplado al GIS y una serie de funciones y ficheros de entrada habilitados dentro de un sistema de cómputo. En la Figura 3 se aprecia un diagrama de bloques de lo que sería en principio la propuesta del *Sistema de Gestión* para el Ministerio de Comunicaciones y con el cual se realizarían los análisis de áreas de servicio y de niveles de irradiación (no sólo para la banda celular sino que se incluirían algoritmos de predicción ajustados para todo el espectro). En este sentido, es importante la incorporación de una base de datos alimen-

tada por información suministrada de forma estándar por parte de los operadores de redes y sistemas de comunicaciones, donde se incluyan datos relevantes sobre los tipos de enlaces, tipos de antenas y sus parámetros, frecuencias de operación, anchos de banda, PIRE del sistema, etc. Como salidas de la plataforma estarían los informes sobre áreas de servicio y niveles de irradiación con sugerencias al respecto, relacionados con el sistema de facturación en el caso de que dichos resultados afecten directamente el estado de los operadores (funcionamiento conforme o no conforme con las reglamentaciones nacionales y los contratos de operación).

A nivel práctico, los resultados anteriores a este estudio¹³ sugirieron la utilización de sistemas sectorizados para la simulación de radios base de telefonía móvil. Como parte de los ficheros de entrada al sistema, el patrón de radiación de las antenas instaladas en la celda de estudio fue un factor determinante a la hora de mejorar los resultados de predicción. En este caso se consideraron dos tipos de antenas, una para el sistema CDMA2000.1x y otra para el sistema TDMA/IS-136 (i.e. DB874G90R y 855DDH90E respectivamente; fabricadas por la compañía Decibel Products²⁶).

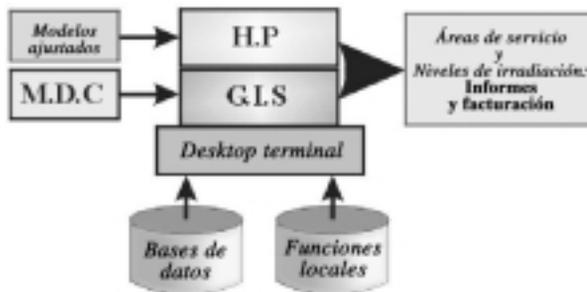


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de simulación.

En la Figura 4 se aprecia el patrón de radiación obtenido mediante Mat-Lab® para la antena 855DDH90E. Este fue utilizado para cada uno de los tres sectores de la celda, al igual que el patrón de radiación de la antena del sistema CDMA.

Por otro lado, dada las condiciones de la región Andina, la utilización de un modelo estándar de predicción no era apropiado para los fines establecidos. Debido a esto y gracias a los avances alcanzados al interior de RadioGIS en dicha línea se logró utilizar un algoritmo de predicción ajustado a las características de la mayoría de ciudades ubicadas dentro de la cordillera.¹³ Dicho algoritmo tiene la ventaja de funcionar en cualquier condición y tipo de entorno (urbano plano, urbano montañoso, rural montañoso y semi-urbano) en la banda de los sistemas Celular y PCS. En la Figura 5 se aprecia la geometría conceptual aplicada para la ejecución del algoritmo, considerando a su interior las pérdidas por difracción múltiple ocasionadas por los techos de los edificios y por las colinas, consideraciones de obstrucción de las zonas de Fresnel, pérdidas por espacio libre y por modelo de dos rayos, pérdidas por di-

fracción final, y un factor de corrección por orientación de las vías.^{8,11} El desempeño de este algoritmo ya ha sido demostrado en trabajos anteriores,^{11,12,13} y se espera sea mejorado con la aplicación de conceptos sobre convergencia de vías y de difracción por cilindros.⁴ Estas mejoras están en desarrollo al interior de RadioGIS-UIS y son aplicadas a un Modelo Digital de la ciudad de Bucaramanga actualizado (facilitado por la compañía TES-América Andina Ltda.) en busca de que el algoritmo sea implementado dentro de una HP comercial (i.e. ICS-Telecom® de la casa ATDI).

CAMPAÑAS DE MEDIDAS

Las campañas de medidas son un procedimiento definido por la aplicabilidad que se le darán los datos obtenidos. En el caso de validación y ajustes de modelos se suelen tomar varios puntos y rutas de análisis buscando obtener datos comparativos para consideraciones a *Gran Escala* y a *Pequeña Escala*.¹⁰ En este caso se tomaron 12 rutas, 225 puntos de medida y más de 6000 adquisiciones para promediar los resultados del sistema TDMA, y 6 rutas y 194 puntos

Antena Decibel para Diversidad y Sectorización 855DDH90F
Ganancia 11.1 dBi cn Rx y 12.1 dBi cn Tx - 90o BW Azimuth - 24° BW Elevación
500hms - VSWR: 1.5:1 - ROE: >25dB - Frecuencias: 806-896MHz - Downtilt 0°

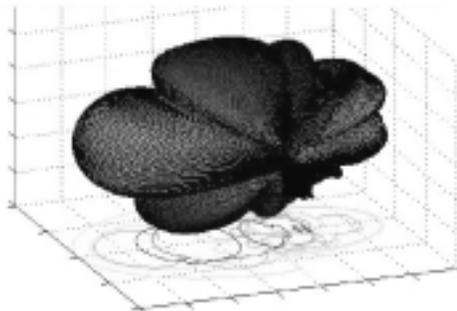


Figura 4. Patrón de radiación antena sectorizada 855DDH90E.

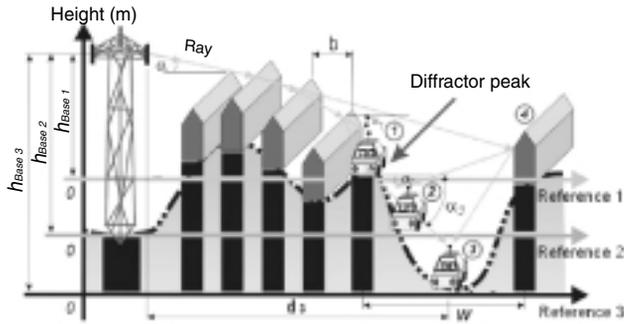


Figura 5. Geometría del algoritmo implementado para la aproximación en un entorno urbano montañoso.

de medida para el sistema CDMA,¹⁴ considerando además cubrir los tres sectores de la celda de estudio teniendo en cuenta la coexistencia de los dos sistemas en el mismo emplazamiento, tal como se aprecia en la Figura 6. Las rutas se escogieron siguiendo un criterio colina-valle-colina,¹¹ tomándose los barrios Bucaramanga, Pro-

venza, San Luis y La Victoria para dichas medidas, ver la Figura 7. Los equipos utilizados para este procedimiento fueron el *Miniport Receiver EB200*²² (para las medidas de banda angosta de 30kHz del sistema TDMA/IS-136) y la *Unidad Móvil de Monitoreo Espectral* (para las medidas de banda ancha de 1.25MHz del siste-

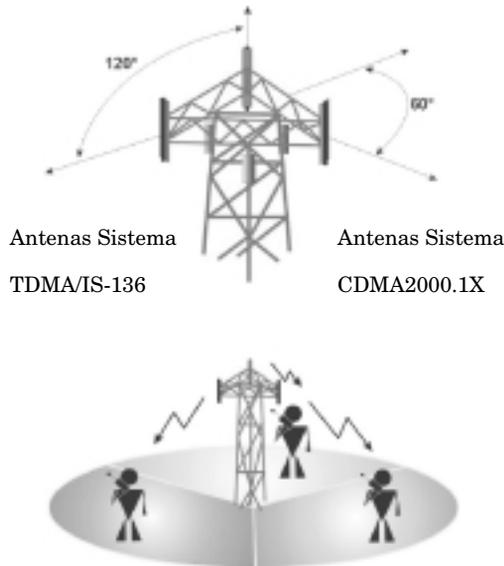


Figura 6. Sistema de celda sectorizada de grado tres.

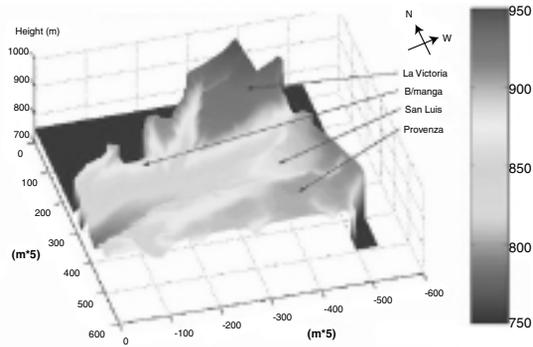


Figura 7. Zona piloto de estudio en Bucaramanga.

ma CDMA2000.1x), ambas unidades facilitadas por el Ministerio de Comunicaciones Dirección Territorial Bucaramanga. Estas medidas iniciales se realizaron con dos finalidades, primero validar el algoritmo de predicción de áreas de servicio y de densidad de potencia, y segundo establecer las condiciones de irradiación en banda angosta siguiendo la recomendación UIT-K.52 en toda el área de acción de la celda.

En la Figura 8 se aprecian los cuatro sectores de análisis de la zona piloto de estudio. Ya que las recomendaciones internacionales prevén un análisis de todas las fuentes irradiantes y sus contribuciones porcentuales sobre la exposición de los individuos a estos campos, se decidió realizar una medida en las principales bandas de frecuencia explotadas comercialmente y consideradas como peligrosas debido a la resonancia que alcanzan



Figura 8. Zonas de análisis y rutas de las campañas de medidas. Barrios Bucaramanga (1), Provenza (2), San Luis (3) y La Victoria (4).

sus ondas en el cuerpo de los humanos (i.e. las bandas de AM Comercial, FM Comercial, TV, Enlaces de 300MHz y Celular). Tomando como principio que los lugares *más vulnerables respecto a la radiobase* son aquellos que se encuentran más cerca de ella, fue allí donde se realizaron las medidas de contribución de todo el espectro analizado. El lugar escogido fue la zona 2 de la Figura 8, muy cerca del emplazamiento (unos 50 metros de una de las caras del sector), donde se estima que los campos emitidos por las antenas tienen gran influencia. Para estas medidas se utilizó el equipo *Miniport Receiver EB200*²² ajustado por software para medidas promedio de intensidad de campo eléctrico (en dB μ V/m) y de voltaje en (en dB μ V), utilizando anchos de banda y saltos de frecuencia ajustados a las bandas con análisis (i.e. pasos de 10kHz y ancho de banda de 9kHz para AM, pasos de 25kHz y ancho de banda de 15kHz para FM y TV, pasos de 12.5kHz y 9kHz de ancho de banda para la banda de 300MHz y pasos de 10kHz y ancho de banda de 9kHz para la banda Celular). La finalidad al realizar este procedimiento tiene relación a que si dado el caso se rebasaban los

niveles porcentuales es necesario identificar cuál de todas las fuentes irradiadoras contribuye más con el nivel general.

Es importante anotar que los sistemas de radiofrecuencia se comportan de forma diferente al hablar de condiciones de propagación en relación con la frecuencia que manejan, y en la mayoría de ocasiones se utilizan diferentes técnicas de polarización y diversidad para el control de estos fenómenos. Debido a esto, y a que un individuo común se ve expuesto de forma global por todas las emisiones, se decidió realizar las medidas teniendo en cuenta polarizaciones vertical y horizontal en el equipo de adquisición, y considerar un sistema coordenado de 90° para la medida por frecuencia, aproximándose a lo que sería una condición isotrópica, tal como se aprecia en la Figura 9. Es de resaltar que esta técnica es tediosa y toma alrededor de cuatro horas por punto, recomendándose realizarla sólo en aquellos lugares considerados críticos, los cuales podrían identificarse fácilmente con un algoritmo de predicción como el utilizado en el presente estudio.

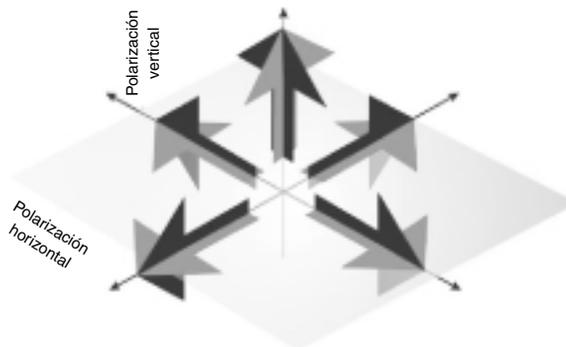


Figura 9. Sistema de coordenadas de medición para consideraciones porcentuales debido a múltiples fuentes.

En cuanto al procedimiento de conversión de unidades medidas ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m} \leftrightarrow \text{V}/\text{m} \leftrightarrow \text{dBm} \leftrightarrow \text{dBm}/\text{m}^2$) se recurrió a un análisis tipo isotrópico, que arrojó como resultado para el cálculo de la potencia recibida la ecuación

$$P_{R(\text{dBm})} = E[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] - 129,76 + 20\log(\lambda) \quad (1),$$

en comparación con los resultados para el caso tipo dipolo de 50Ω utilizado en los estudios anteriores,¹³ cuya ecuación era

$$P_{R(\text{dBm})} = E[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] - 122,95 + 20\log(\lambda) \quad (2),$$

lo que arroja una diferencia promedio de 6.81dBm . Por otro lado, para el cálculo de la densidad de potencia con base en las medidas se llegó a la expresión de la ecuación 3.

$$S_{R(\text{dBm}/\text{m}^2)} = P_{R(\text{dBm})} + 11 - 20\log(\lambda) \quad (3),$$

Para ello se consideró que los equipos utilizados están calibrados y no se tienen en cuenta las contribuciones de pérdidas por cables, conectores, filtros, etc. En este sentido, y siguiendo la recomendación venezolana,⁶ y verificando las especificaciones técnicas del equipo de medida²² se llegó a la conclusión de que las medidas se pueden aproximar a un caso isotrópico. En concreto, sabiendo que el factor de antena $-K-$ del equipo a la frecuencia de medida para la portadora de la radio base en estudio (i.e. 880.11MHz para el Canal de Control Analógico TDMA/IS-136) es de $24.5\text{dB}/\text{m}$ y utilizando la ecuación

$$E_{[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}]} = K_{[\text{dB}/\text{m}]} = V_{[\text{dB}\mu\text{V}]} \quad (4),$$

extraída de la norma venezolana,⁶ se encontró que el *valor medio* de las diferencias entre el valor calculado y el medido por el equipo es de $0.5\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, el promedio de $1.62\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$, con una desviación estándar de $4.69\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ a una varianza de $22\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$. Con los anteriores datos se confirma que el sistema de adquisición es confiable y los criterios isotrópicos pueden ser aplicados.

SIMULACIONES

Los parámetros de simulación utilizados en el estudio se aprecian en la Tabla 1. Para cada uno de los sectores se realizaron simulaciones independientes (ver Figura 11) que luego fueron comparadas con el caso isotrópico (ver Figura 10). A nivel del sistema de banda ancha CDMA se pudo corroborar que las simulaciones a la frecuencia central de la portadora de 1.25MHz se aproximan a las mediciones realizadas con un teléfono portátil,¹⁴ pues con este último se logran distinguir los diferentes canales codificados dentro de la misma portadora. Por otro lado, al realizar las medidas con el sistema móvil del Ministerio de Comunicaciones se tenían en cuenta todas las fuentes presentes sobre ese ancho de banda, sin distinguir los usuarios independientes. Para estos casos particulares donde los sistemas utilizan técnicas de espectro expandido se recomienda el uso de un equipo de medida especializado, esto siempre y cuando se deseen diferenciar todas las fuentes emisoras, o utilizar el equipó tipo analizador si esto no es necesario, como en el caso de comprobar irradiaciones porcentuales por frecuencia.²⁵

Tabla 1. Parámetros de la BS y el MS para los sistemas TDMA y CDMA. Valores de entrada para las simulaciones.

Parámetros	Valor
Sistema TDMA/IS-136	
PIRE del transmisor	42.48dBm
Ganancia del receptor	0dB
Ganancia antena 855DDH90E	12.1dBi
Frecuencia CCA	880.11MHz
Altura del transmisor	40m
Altura del Receptor	1.7m
Downtilt de la antena	3°
Acimut de las antenas	40, 160 y 280°
Factor de curvatura K	1.33
Tamaño de celdas del grid para simulación	3m
Sistema CDMA2000.1x	
PIRE del transmisor	40dBm
Ganancia del receptor	0dB
Ganancia antena DB874G90R	12dBi
Frecuencia Central de la Portadora	881.525MHz
Altura del Transmisor	38m
Altura del Receptor	1.8m
Downtilt de la antena	3°
Acimut de las antenas	100, 220, 340°
Factor de curvatura K	1.33
Tamaño de celdas del grid para simulación	3m

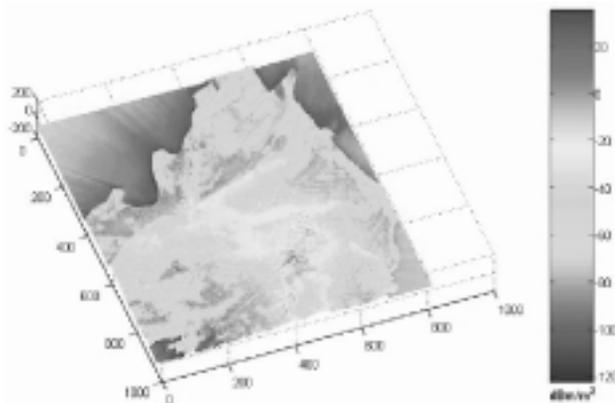
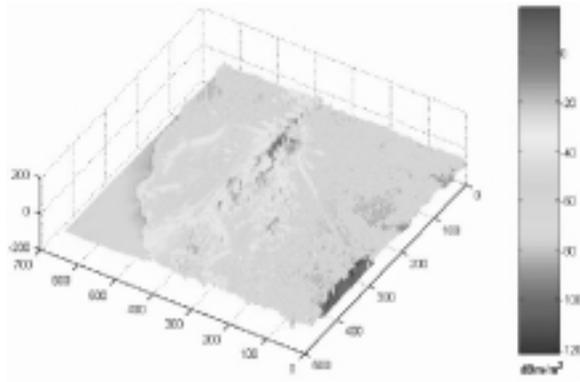
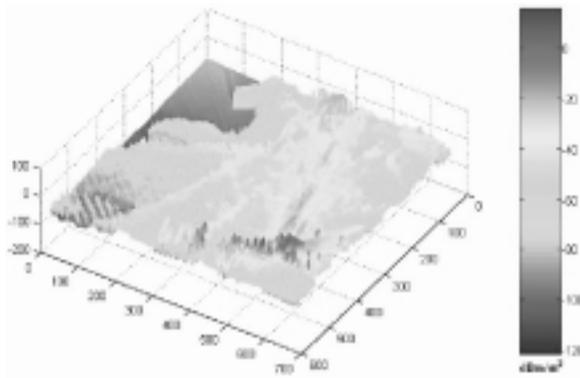


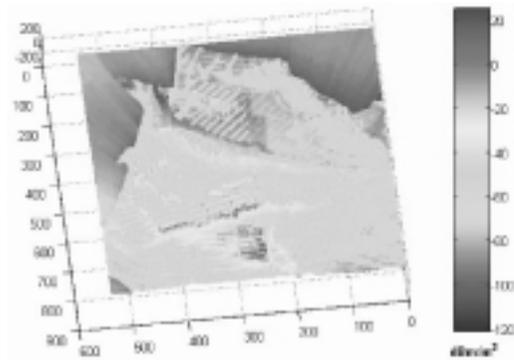
Figura 10. Simulaciones de densidad de potencia caso omnidireccional para el sistema TDMA/IS-136.



a)



b)



c)

Figura 11. Simulaciones de densidad de potencia caso sectorizado para el sistema TDMA/IS-136.

a) Sector 1, b) Sector 2, c) Sector 3.

ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DEL ESPECTRO AM, FM, TV, 300MHz Y CELULAR, Y SIMULACIONES

Las medidas realizadas en este espectro se pueden apreciar en las Figuras 12 y 13, donde la cantidad física relacionada es la intensidad de campo eléctrico dada en $\mu\text{V}/\text{m}$, y cuyos valores se obtuvieron al utilizar la ecuación:

$$E_{[\mu\text{V}/\text{m}]} = 10^{\frac{E_{[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}]}}{20}} \quad (5)$$

Como se aprecia en las mediciones realizadas (Figuras 12 y 13), la banda con el mayor nivel de intensidad de campo eléctrico es la Celular (con un pico de $100\text{mV}/\text{m}$ aproximadamente), como era de esperarse debido a la cercanía de la estación base. Aunque sus niveles no superaron los límites establecidos,²⁵ se considera relevante verificar aquellas zonas donde las simulaciones son próximas a los niveles de referencia dados por la recomendación UIT-T K.52 (marcas rojas de la Figura 14). Por otro lado, se ven con preocupación los niveles adquiridos para la banda de AM donde se bordean los $60\text{mV}/\text{m}$. Esto si se tiene en cuenta que los sistemas de radiodifusión en esta banda se encuentran lejos de la celda de análisis, más específicamente en los cerros de la ciudad, tal como se muestra en la Figura 15, y en algunos casos muy cerca de los límites del casco urbano.

Realizando un análisis más estricto se obtuvo un nivel de irradiación porcentual (exposición a múltiples fuentes) por debajo de 1, lo cual es congruente con la recomendación K.52 de la UIT-T.²⁵ Estos resultados y las contribuciones totales al nivel de in-

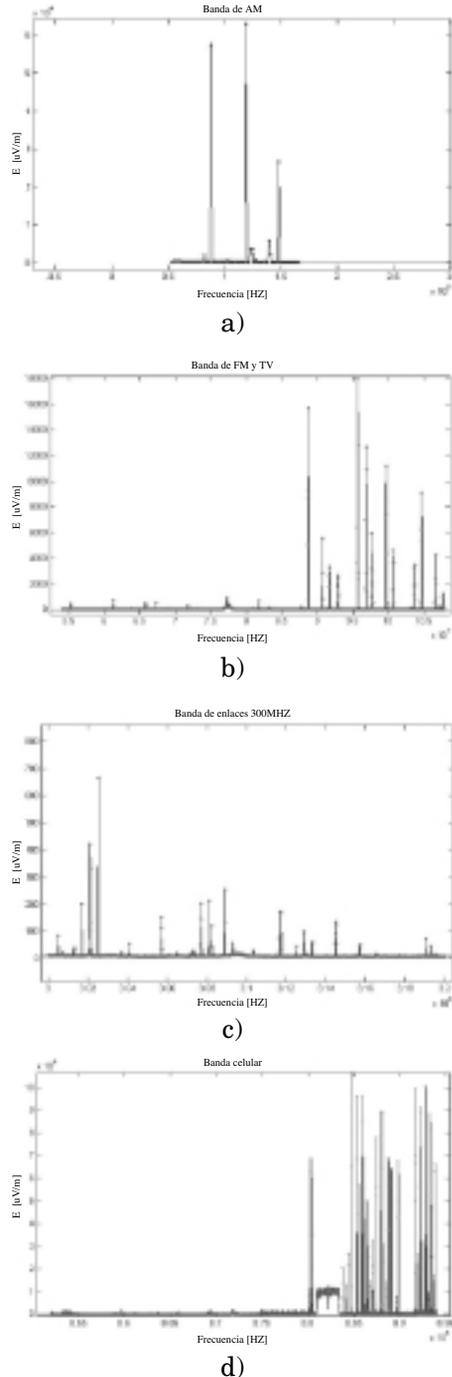


Figura 12. Medidas del espectro. a) Banda de AM, b) Banda de FM y TV, c) Banda de 300MHz, d) Banda Celular.

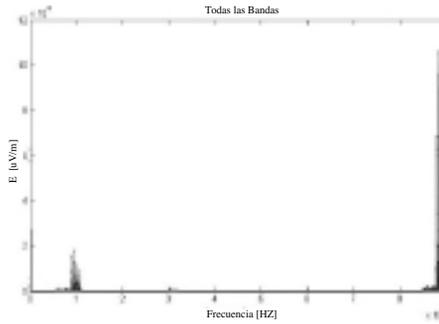


Figura 13. Medidas consolidadas de todo el espectro analizado.

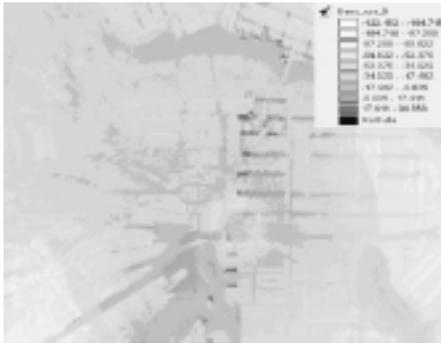


Figura 14. Simulación del sistema TDMA y zonas críticas.



Figura 15. Ubicación general de la zona piloto.

tensidad de campo eléctrico, de potencia recibida y de densidad de potencia se pueden apreciar en la Tabla 2. Los análisis por banda de frecuencia se aprecian en las tablas 3, 4, 5 y 6. De estas se destaca que ninguna de ellas sobrepasa los niveles establecidos por la recomendación, resaltando únicamente que la banda de AM presenta los niveles más próximos a los límites permitidos (en

el caso de la polarización vertical; ver Tabla 3). Debido a que esta banda cubre parte del espectro por arriba de 1MHz se deben realizar consideraciones de dos niveles de referencia distintos. Para las bandas de FM, TV, 300MHz y Celular se presentan niveles muy por debajo de los límites establecidos, tal como se aprecia en las tablas 4, 5 y 6.

Tabla 2. Resultados de exposición simultánea a varias fuentes de irradiación electromagnética entre los 50 y 895MHz.

Análisis de resultados de la exposición simultánea					
2,25873E-04 << 1					
Análisis de la contribución de todo el espectro estudiado					
E	E	PRI	PRI	Densidad de potencia	Densidad de potencia
[$\mu\text{V/m}$]	[$\text{dB}\mu\text{V/m}$]	[dBm]	[mW]	[dBm/m^2]	[mW/m^2]
8046667,6	138,11	-22,5453	5,56E-03	-4,16827	3,82E-01

Tabla 3. Resultados de exposición simultánea a varias fuentes de irradiación electromagnética en la banda de AM Comercial.

Límites en E [V/m] en la banda de 0,15 - 1 MHz	
Norma Colombiana y Recomendación UIT-K.52: Ocupacional: 610 \rightarrow 610 [V/m] 175,7 [$\text{dB } \mu\text{V/m}$] Público en General: 87 \rightarrow 87 [V/m] 158,79 [$\text{dB } \mu\text{V/m}$]	
$\text{dB } \mu\text{V/m}$ máximo medido Horizontal	95,20
$\text{dB } \mu\text{V/m}$ máximo medido Vertical	112,60
Límites en E [V/m] en la banda de 1-10 MHz	
Norma Colombiana y Recomendación UIT-K.52: Ocupacional: 610/f \rightarrow 610 - 61 [V/m] \rightarrow 175,7 - 155,7 [$\text{dB } \mu\text{V/m}$] Público en General: 87/f \rightarrow 87 - 27,51 [V/m] \rightarrow 158,79 - 148,78 [$\text{dB } \mu\text{V/m}$]	
$\text{dB } \mu\text{V/m}$ máximo medido Horizontal	96,00
$\text{dB } \mu\text{V/m}$ máximo medido Vertical	108,30
Exposición simultánea a múltiples fuentes	5,2788E-05

Tabla 4. Resultados de exposición simultánea a varias fuentes de irradiación electromagnética en la banda de FM y TV Comercial.

Límites en S_{aq} [W/m^2] en la banda de 10 - 400 MHz	
Norma Colombiana y Recomendación UIT-K.52: Ocupacional: 10 \rightarrow 10 [W/m^2] \rightarrow 40 [dBm/m^2] Público en General: 2 \rightarrow 2 [W/m^2] \rightarrow 33,01 [dBm/m^2]	
dBm/m^2 máximo medido considerando la suma de las dos polarizaciones	-33,67
Exposición simultánea a múltiples fuentes	2,5939E-06

Tabla 5. Resultados de exposición simultánea a varias fuentes de irradiación electromagnética en la banda de enlaces a 300MHz.

Límites en S_{eq} [W/m^2] en la banda de 10 - 400 MHz	
Norma Colombiana y Recomendación UIT-K.52: Ocupacional: 10 \rightarrow 10 [W/m^2] \rightarrow 40 [dBm/ m^2] Público en General: 2 \rightarrow 2 [W/m^2] \rightarrow 33,01 [dBm/ m^2]	
dBm/ m^2 máximo medido considerando la suma de las dos polarizaciones	-62,30
Exposición simultánea a múltiples fuentes	1,7955E-09

Tabla 6. Resultados de exposición simultánea a varias fuentes de irradiación electromagnética en la banda Celular.

Límites en S_{eq} [W/m^2] en la banda de 400 - 2000 MHz	
Norma Colombiana y Recomendación UIT-K.52: Ocupacional: $f/40$ 10 \rightarrow 50 [W/m^2] \rightarrow 40 - 46,98 [dBm/ m^2] Público en General: $f/200$ 2 \rightarrow 10 [W/m^2] \rightarrow 33,01 - 40 [dBm/ m^2]	
dBm/ m^2 máximo medido considerando la suma de las dos polarizaciones	-18,25
Exposición simultánea a múltiples fuentes	1,7049E-04

Tabla 7. Resultados de exposición tanto medidos como simulados para la fuente de irradiación electromagnética de 880.11MHz en la celda de estudio. Portadora CCA TDMA de 30kHz de ancho de banda.

Límites de exposición a 880,11MHz EN S_{eq} [W/m^2]		
Norma Colombiana y Recomendación UIT-K.52: Ocupacional: 43,424 [dBm/ m^2] Público en general: 36.435 [dBm/ m^2]		
Barrio	dBm/ m^2 máximo medido	dBm/ m^2 máximo simulado
Bucaramanga	-36,06581	-40,75720
Provenza	-21.0658	-11.28600
San Luis	-35.0858	-47.1118
La Victoria	-44.4658	-52.6103

Para el caso particular de análisis que corresponde a la celda sectoriza que cubre la zona piloto de estudio teniendo en cuenta sólo la portadora de 880.11MHz del canal de control analógico del sistema TDMA/IS-136, se encontró de forma simulada y medida que en ninguno de los sectores se sobrepasan los niveles permitidos, estando en promedio varias decenas por debajo del límite de la norma, tal como se muestra en la Tabla 7.

Los resultados del máximo simulado expuestos en la Tabla 7 corresponden sólo a los valores obtenidos en los puntos de medida. Haciendo un análisis del resultado completo de la simulación se aprecian zonas consideradas críticas, resaltadas en rojo en las figuras 16 y 17. Estos puntos están por arriba de los 20dBm/m² pero son menores a los 36.43dBm/m² recomendados por la norma para la seguridad del público en general a 880.11MHz. Aunque los resultados de las figuras 16 y 17 corresponden a los casos sectorizados, se recomienda hacer un análisis especial a los puntos críticos encontrados con la simulación omnidireccional mostrados en la Figura 14 que sobrepasan los 34dBm/m².

DESEMPEÑO DEL ALGORITMO DE PREDICCIÓN

Con el fin de establecer la veracidad de los análisis realizados de forma simulada se realizó una comparación de las simulaciones sectorizadas y omnidireccionales con respecto a las medidas para cada una de las rutas realizadas en las campañas de campo en la frecuencia de 880.11MHz (según lo visto en la Figura 8). Los resultados se pueden apreciar en la Fi-

gura 18. De aquí, y en comparación con los resultados anteriores,¹³ se puede verificar que en el caso del entorno plano próximo a la radio base el desempeño del algoritmo mejoró notablemente, pasando de 9.35dBm/m² de desviación estándar -STD- a 6.28dBm/m². En general las tendencias de los resultados de simulación con el algoritmo AndinoUIS®¹³ siguen un comportamiento similar a las medidas. El peor caso se alcanzó en el barrio La Victoria (Figura 18.d), y el mejor en el barrio Provenza. Los resultados estadísticos de las Tablas 8 y 9 muestran una desviación estándar mínima de 3.55dBm/m², una máxima de 12.13dBm/m² y en promedio de 7.47dBm/m², lo cual sugiere una leve mejora respecto al caso de análisis anterior,¹³ aclarando que los sectores pueden presentar PIRE diferentes para dar cobertura a zonas alejadas, como en el caso del barrio La Victoria, y no ser iguales (i.e. 42.48dBm) como se utilizó en este caso de estudio.

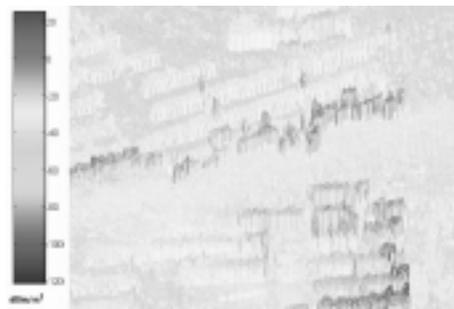


Figura 16. Ubicación de las zonas críticas de la simulación del sector 1.

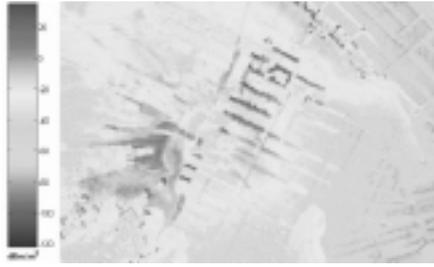


Figura 17. Ubicación de las zonas críticas de la simulación del sector 3.

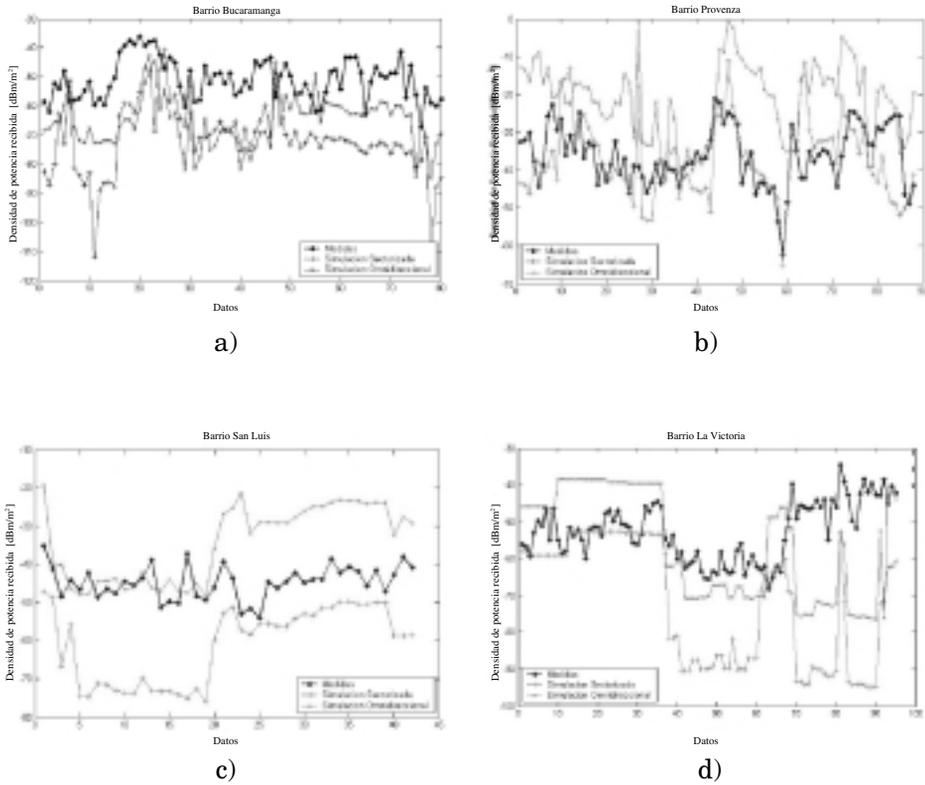


Figura 18. Comparación de los resultados de simulación sectorizada y omnidireccional VrS. medidas. Resultados por barrio.

Tabla 8. Desempeño de las simulaciones sectorizada y omnidireccional respecto a las medidas para los barrios Provenza y Bucaramanga.

Desempeño de la simulación VrS Medidas

Provenza Sectorizada

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,39	10,14	0,03	21,28	7,52	8,15	5,99	35,89
2	0,79	6,47	0,36	19,10	4,28	4,90	4,12	17,01
3	0,12	10,11	0,23	30,34	5,93	9,49	8,74	76,47
PROM.	0,35	8,91	0,21	23,57	5,91	7,52	6,28	43,12

Provenza Omnidireccional

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,29	7,15	1,96	38,27	13,88	16,12	8,16	66,74
2	0,39	12,15	1,36	32,75	18,50	15,58	10,90	118,88
3	0,14	9,582	2,12	34,56	16,81	17,39	9,00	81,05
PROM.	0,27	9,63	1,81	35,19	16,40	16,37	9,35	88,89

Bucaramanga Sectorizada

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,22	13,42	6,89	52,01	26,92	27,41	10,73	115,28
2	0,21	8,70	4,89	30,98	11,20	14,04	8,30	68,95
3	0,01	7,28	8,99	27,03	17,563	18,07	5,10	26,09
4	0,32	7,55	9,02	52,63	23,07	22,76	8,40	70,72
PROM.	0,19	9,24	7,45	40,66	19,69	20,57	8,13	70,26

Bucaramanga Omnidireccional

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,13	6,10	5,94	22,55	12,99	13,19	4,41	19,51
2	0,63	7,46	6,80	29,14	18,98	18,57	7,23	52,36
3	0,22	8,14	8,21	30,98	22,87	20,82	5,88	34,65
4	0,26	6,96	0,39	28,18	11,68	11,75	6,79	46,14
PROM.	0,31	7,16	5,34	27,71	16,63	16,08	6,08	38,17

Nota: Estos análisis se realizaron con las densidades medidas para el caso isotrópico en relación con las simulaciones.

Tabla 8. Desempeño de las simulaciones sectorizada y omnidireccional respecto a las medidas para los barrios San Luis y La Victoria.

Desempeño de la simulación VrS Medidas

San Luis Sectorizada

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,50	8,61	7,40	37,81	24,13	22,50	8,42	70,99
2	0,26	3,34	1,53	20,66	8,89	9,53	4,74	22,55
PROM.	0,38	5,98	4,47	29,24	16,51	16,01	6,58	46,77

San Luis Omnidireccional

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,49	7,15	0,30	18,35	4,01	5,66	4,98	24,87
2	0,14	3,22	10,26	31,52	18,04	17,99	4,99	24,98
PROM.	0,32	5,19	5,28	24,93	11,02	11,82	4,99	24,92

La Victoria Sectorizada

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,28	2,86	0,20	12,80	2,70	4,09	3,55	12,64
2	0,05	11,30	0,65	33,80	25,43	19,81	11,04	121,94
3	0,45	12,25	17,27	55,76	44,23	40,03	12,13	147,32
PROM.	0,26	8,80	6,04	34,12	24,12	21,31	8,91	93,97

La Victoria Omnidireccional

RT.	Coef. Corr.	Err. Tip.	Dif. Min	Dif. Max	Med.	Prom.	STD	Var.
1	0,03	3,29	0,45	21,36	11,45	11,05	5,17	26,74
2	0,04	8,42	1,00	19,48	8,25	8,51	4,25	18,13
3	0,27	11,85	1,50	37,50	26,71	23,46	11,27	127,06
PROM.	0,11	7,85	0,98	26,11	15,47	14,34	6,90	57,31

Nota: Estos análisis se realizaron con las densidades medidas para el caso isotrópico en relación con las simulaciones.

De los resultado de las tablas 7 y 8 se corroboró que el error típico de las simulaciones está alrededor de los 8dBm/m² para el caso sectorizado y en 7.5dBm/m² para el caso omnidireccional. Por otro lado, el promedio de las diferencias de lo simulado respecto a lo medido se ubicó en 16.35dBm/m² para el caso sectorizado y en 14.65dBm/m² para el caso omnidireccional. Según esto se podría decir que en general no hay mejoras en las simulaciones al utilizar un esquema sectorizado en vez de uno omnidireccional. Aunque con respecto a los estudios anteriores¹³ las simulaciones presentaron una mejora de 0.13 y 0.6 dBm/m² de STD promedio para los sistemas TDMA/IS-136 y CDM A2000.1x respectivamente, la cantidad de zonas analizadas no son suficientes para llegar a una conclusión final, pues varias de las rutas estudiadas correspondían a lugares donde se presenta solapamiento de sectores y algunos de los puntos de medida se encuentran en sitios de convergencia de vías donde la predicción incrementa su error; este problema es actualmente caso de análisis.⁴ Por último, es relevante anotar que en general, y según se aprecia en las gráficas de la Figura 18, el algoritmo diseñado en la UIS sobreestima las pérdidas para los parámetros de entrada al sistema de simulación mostrados en la Tabla 1, y que dada la falta de información precisa sobre la estación base no se pueden obtener resultados más reales debido a las aproximaciones utilizadas.

CONCLUSIONES

La documentación y normas existentes sobre límites de exposición a campos electromagnéticos es bastante

completa y específica,^{1,5,6,7,18,19,21,25} resaltándose que en la mayoría de normas establecidas por los gobiernos de diferentes países han optado por asumir las recomendaciones del ICNIRP²¹ y las de la UIT-T,²⁵ las cuales de igual forma hacen referencia a las recomendaciones de dicha Comisión Internacional. De estas recomendaciones se resalta la existencia de límites establecidos para exposiciones de público en general y ocupacional, y el doble de restrictivos son los del primer caso en comparación con el segundo, tanto a nivel básico como de referencia. Con este trabajo se demostró la viabilidad de utilización de los equipos de medida del Ministerio de Comunicaciones para la verificación de dichas normas y el gran apoyo que significa el uso de herramientas de simulación computarizadas para la optimización de este trabajo en condiciones andinas. Para la celda en estudio se verificó que los niveles de referencia se respetan con los límites permitidos dentro del área de cobertura de la celda, sin llegar a generalizaciones debido a que se trata de un caso particular y a que la distancia de la radio base a otras fuentes de irradiación (i.e. sistemas de radiodifusión) es considerable. Las restricciones básicas no fueron verificadas pues en ninguno de los puntos se sobrepasaron los niveles de referencia, pero se espera, con el auspicio del Estado, realizar alianzas que permitan el análisis de aquellos lugares donde los resultados de simulación muestran condiciones críticas para el sistema celular instalado en la zona piloto, y en los sectores considerados vulnerables dentro de las ciudades verificando además otras bandas del espectro radioeléctrico. Junto con las

simulaciones y campañas de medidas realizadas en el presente estudio se pudo corroborar la veracidad de los resultados de predicción del algoritmo diseñado y demostrar así que la propuesta planteada para el análisis de áreas de cobertura y de densidad de potencia es viable para su implementación práctica en Colombia. Con respecto a los estudios anteriores^{11,12,13} el algoritmo de predicción diseñado mejoró su desempeño, pasando de una STD de 7.6dBm/m² a 7.47dBm/m² para el sistema TDMA/IS-136 y a 7.0dBm/m² para el sistema CDMA2000.1x, lo contrario ocurrió al comparar los resultados de simulación con el nuevo caso omnidireccional, donde se obtuvo una STD promedio de 6.83 dBm/m². Se considera que para dar una conclusión final al desempeño del algoritmo es necesaria la toma de más medidas de campo para compararlas con los resultados de predicción. Además, para la obtención de resultados más confiables es necesaria la verificación de los parámetros técnicos de la radio base, en especial los niveles de PIRE de cada uno de los sectores para los dos sistemas instalados. Por otro lado, se espera que con la utilización de la cartografía actualizada y de alta resolución facilitada por la compañía TES América Andina Ltda. se mejore el desempeño del algoritmo, logrando subir los niveles de correlación entre las simulaciones y las medidas, ubicados en 0.3 para el caso sectorizado (valor promedio) y en 0.25 para el omnidireccional. Además, se espera con la aplicación de un factor de corrección por difracción en el cruce de vías se mejore la predicción en estos puntos.

Se confirma entonces que este trabajo representa una propuesta prelimi-

nar de desarrollo que resultará de interés para el Ministerio de Comunicaciones de Colombia, para los antiguos y nuevos operadores de telefonía móvil en el país y para los entes reguladores del Estado en cuanto que facilita la predicción del impacto ambiental de estas tecnologías. Además, servirá de soporte para el desarrollo de otros proyectos de investigación relacionados (análisis de capacidad, caracterización de canales y planificación), los cuales serán de utilidad en el desarrollo de normativas propias, emisión de conceptos o certificaciones (para el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios) y para la planificación de futuras redes con esquemas de seguridad ambiental y optimización sobre entornos tipo andinos. A nivel mundial éste es un tema de estudio y representa gran interés para los grupos estandarizadores, reguladores y desarrolladores de tecnología pues los modelos propuestos no han sido probados sobre nuestras condiciones geográficas; lo que será básico para conocer el desempeño e impacto de las tecnologías que aún no se han implantado en Colombia (i.e. 3G, 4G y otras redes inalámbricas tanto móviles como fijas).

BIBLIOGRAFÍA

1. Andrei, N. Tchernitchin. Informe al Proyecto: La Regulación Jurídica de la Contaminación Electromagnética en Chile. Laboratorio de Endocrinología y Patología Ambiental. En: Instituto de Ciencias Biomédicas I.C.B.M., Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Comisión de Salud y Medio Ambiente, Colegio Médico de Chile.
2. Arcview Spatial Analyst: advanced spatial analyst using raster and

- vector data. U.S. Environmental Systems Research Institute, 1996.
3. Bertoni, Henry L., Radio Propagation for Modern Wireless Systems, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
 4. Carreño L., Yair I. Mejoramiento en la predicción de pérdidas de potencia en sistemas de comunicación móviles TDMA/IS-136 para entornos andinos mediante el uso del modelo COST231-Walfisch-Ikegami, Campañas de medidas y el cellview®, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS, Bucaramanga-Colombia, septiembre de 2004.
 5. Comisión Nacional de Comunicaciones - CNC. Argentina. Estándar Nacional de Seguridad de aplicación obligatoria a todos los sistemas de telecomunicaciones que irradian en determinadas frecuencias, diciembre de 2000.
 6. Comisión Nacional de Telecomunicaciones República Bolivariana de Venezuela - Conatel. Condiciones de seguridad ante las emisiones de radiofrecuencias producidas por estaciones radioeléctricas fijas en el rango de 3 KHz A 300 GHz, Caracas, julio de 2003.
 7. Council recommendation. Limitation of Exposure of the General Public to Electromagnetic Fields (0 Hz to 300 GHz). En: Official Journal of the European Communities (jul. 1999); p. L199/59-70.
 8. Cost 231 Final report, Digital Mobile Radio: Cost 231 View on the Evolution Towards 3rd Generation Systems, P. 134-140, Commission of the European Communities and COST Telecommunications, Brussels, 1999.
 9. Gallo, Fideligna, y Prieto, Martha I. Análisis y comprobación de los niveles de densidad de potencia en las inmediaciones de una celda sectorizada en un entorno andino utilizando sistemas de información geográfica (GIS) y MatLab, Universidad del Valle en convenio con la Universitaria de Investigación y Desarrollo - Grupo Maxwell-UDI en Cooperación con el Grupo RadioGIS-UIS, Departamento de Ingeniería Electrónica, Bucaramanga-Colombia, Septiembre de 2004.
 10. García A., A. Paolo. Efectos a pequeña escala en canales de radio para comunicaciones móviles satelitales y terrestres, y sistemas "MIMO" como alternativa para el control del efecto multipath y de la interferencia co-canal. Universidad Industrial de Santander, E³T, Bucaramanga-Colombia, Septiembre de 2004.
 11. García, A. P., Ortega, H., Navarro, A. and Cardona, N.. Effect of Terrain on Electromagnetic Propagation in Urban Environments on the Andean Region. En: 7th Management Committee Meeting Cost 273 (Commission of the European Communities and Cost Telecommunications, "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks") (2003: Paris). 11 p. TD-(03)065.
 12. García, A. P., Ortega, H., Navarro, A. and Rodríguez, H.. Effect of Terrain on Electromagnetic Propagation in Urban Environments on the Andean Region, Using the COST 231- Walfisch-Ikegami Model and GIS Planning Tools. En: Twelfth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2003),

- University of Exeter, (2003: Exeter-UK). 6 p. ISBN 0 85296 752 7, ISSN 0537-9989.
13. García A., A. Paolo *et al.* Efectos del terreno en la propagación electromagnética en entornos urbanos sobre la región andina, usando el modelo COST231-Walfisch-Ikegami y herramientas de planificación basadas en GIS. En: I2TS'2002 - International Information Technology Symposium (2002: Florianopolis-Brasil). ISBN 85-89264-01-7.
 14. García L., Cristian A., y Meléndez M., José L. Caracterización de la radiopropagación en las comunicaciones móviles con tecnología CDMA en presencia de terreno escarpado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS, Bucaramanga-Colombia, Septiembre de 2004.
 15. Lee, William C. Y. Mobile Communications Engineering, USA: McGraw-Hill Book Company, 1998.
 16. Lee, William C. Y. Mobile Cellular Telecommunications Systems, USA: McGraw-Hill Book Company, 1989.
 17. Maldonado, Diego A., Predicción de pérdidas de potencia en sistemas de comunicación móviles PCS para entornos andinos mediante el modelo Saunders-Bonhar-Irregular, Campañas de medidas y el Cellview®, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Investigación en Radiocomunicaciones - RadioGIS, Bucaramanga-Colombia, Septiembre de 2004.
 18. Ministerio de Comunicaciones de Colombia. Proyecto de decreto por el cual se adoptan límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos, se define metodología para la medición y se adecuan procedimientos para la instalación de estaciones radioeléctricas, Colombia, 2004.
 19. Ministerio de Sanidad y Consumo de España. Informe técnico elaborado por el Comité de Expertos "Campos Electromagnéticos y Salud Pública". 2001.
 20. Rappaport, Theodore S., Wireless Communications: Principles and Practice, New Jersey U.S. Prentice Hall PTR, 1996.
 21. Recomendaciones CNIRP. Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (hasta 300 Ghz). En: Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No-Ionizantes.
 22. Rohde&schwarz. Miniport receiver EB200 - portable monitoring from 10kHz to 3GHz [online]. [Munich, Germany]: Rohde&Schwarz, 2002. Available from Internet: <URL:http://www.rohde-schwarz.com>.
 23. Roig G., Vicente. Planificación y análisis de sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación sobre CellView, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 1996.
 24. Saunders, Simon R., Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, Baffins Lane, Chichester, West Sussex U.K: John Wiley & Sons, Ltd., 1999.

25. 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, febrero de 2000.
26. Vari-tilt antennas for Diversity and Sectorization “DB874G90R and 855DDH90E Antennas”, 2004. Available from Internet: <URL:http://www.decibelproducts.com>.

CURRÍCULO

Alexis Paolo García Ariza: nació en Bucaramanga-Colombia, el 9 de junio de 1978. Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica de la misma Universidad. Hace parte del Grupo de Investigación

en Radiocomunicaciones - Radio-GIS-UIS, Bucaramanga-Colombia. Realiza investigaciones en el ámbito de MIMO Channels y Modelos de Propagación aplicables a la región Andina utilizando GIS, en cooperación con el Ministerio de Comunicaciones de Colombia-Seccional Bucaramanga, ICESI y la UPV de España. Actualmente se desempeña como docente de las cátedras de Comunicaciones Satelitales, Comunicaciones Móviles y Antenas. Sus áreas de interés incluyen Sistemas de Tercera y Cuarta Generación, Sistemas de Información Geográfica aplicados a las Telecomunicaciones, Modelos de Propagación, redes de datos móviles y configuraciones MIMO para 4G. (E-mail: alexis_paolo@ieee.org, alexis_paolo@yahoo.es).☼