

## Obtención de un modelo de predicción semi empírico mediante una herramienta de información geográfica para ambiente urbano

Obtaining a semi-empirical prediction model by means of a geographic information tool for urban environment

Jorge Herrera Rubio



José Ramón Gelves



Edwin Sequeda Arenas



Universidad de Pamplona, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 13/01/2023

Aceptado: 05/04/2023

Publicado: 12/05/2023

Correspondencia de autores:

[jherrera@unipamplona.edu.co](mailto:jherrera@unipamplona.edu.co)



Copyright 2020  
by Investigación e  
Innovación en Ingenierías

### Resumen

**Objetivo:** Diseñar un modelo de predicción por medio de la generación de un mapa geoespacial de la radiación electromagnética producida por la radiodifusión sonora en frecuencia modulada en las vías urbanas del municipio de Pamplona. **Metodología:** La técnica de estudio consiste en la toma de muestras en sitios aleatorios considerando las referencias de las coordenadas altimétricas y planimétricas. A continuación con la información de niveles de potencia obtenida en campo se analiza con la aplicación ArcGIS, en donde se caracteriza y se clasifica cada punto de la frecuencia de trabajo permitiendo que a través de un algoritmo de búsqueda rápida se genere un mapa geoespacial con las radiaciones de campo eléctrico. **Resultados:** Los datos son procesados, analizados y comprobados de forma analítica, con software de simulación y un modelo estándar de propagación. **Conclusiones:** Como resultado se obtiene un modelo matemático para realizar las pruebas y validaciones sobre el fenómeno de la radiación obtenido mediante la configuración de un mapa de información geoespacial.

**Palabras clave:** Información, espectro, comprobación, herramienta, radiación.

### Abstract

**Objective:** To design a prediction model by generating a geospatial map of electromagnetic radiation produced by FM sound broadcasting in urban roads in the municipality of Pamplona. **Methodology:** The study technique consists of taking samples in random sites considering the references of altimetric and planimetric coordinates. Then, with the information of power levels obtained in the field, it is analyzed with the ArcGIS application, where each point of the working frequency is characterized and classified, allowing through a fast search algorithm to generate a geospatial map with the electric field radiations. **Results:** The data are processed, analyzed and checked analytically, with simulation software and a standard propagation model. **Conclusions:** As a result, a mathematical model is obtained to perform tests and validations on the radiation phenomenon obtained by configuring a geospatial information map.

**Keywords:** Information, spectrum, testing, tool, radiation.

## Introducción

El tipo de estudio propuesto puede explicarse en términos de la interpretación de un "mapa radioeléctrico" que en general se refiere a la densidad del espectro de potencia de la señal geográfica como lo expresan [1], el cual se construye con la superposición de transmisiones de potencias existentes en el medio, tomando como referente la ubicación, la frecuencia y el tiempo, con información de las actividades espectrales y los canales de las redes inalámbricas.

La aplicación práctica de los mapas en sistemas inalámbricos depende del tipo de tecnología y frecuencia de trabajo, en este estudio se analiza la técnica utilizada por un algoritmo en particular que de forma matemática y con aproximaciones geométricas espaciales se construye un mapa de radiación para obtener un modelo para facilitar interpretación de la predicción de la densidad de potencia

De forma que, en temimos del diseño de un radio enlace que contiene información sobre el estado del sistema, permita analizar un entorno de propagación para conocer la potencia y la fidelidad de la señal; las cuales son fuertemente afectadas por los fenómenos y parámetros externos [2], en estos casos conviene utilizar aproximaciones matemáticas y modelos de propagación que ayuden con la caracterización de los ambientes geográficos mediante el estudio de campo [3] para obtener valores de predicción cercanos a los datos esperados de acuerdo a las condiciones técnicas de los equipos.

Una forma práctica de predecir el comportamiento de la señal en un área de trabajo urbano es utilizar herramientas de software basados en sistema de información geográfica (SIG) que favorece la captura para el análisis e interpretación de los datos espaciales y que por medio de ciertas metodologías de programación se crea una superficie continua a partir de los datos muestreados [4], como es el caso de ArcGIS [5].

Para visualizar los datos de forma espacial se utiliza ArcMap como un componente de ArcGIS, una vez cargados se procede a examinar los diferentes atributos de varias ubicaciones en el paisaje y mediante el proceso de interpolación se construye una superficie continua por medio de algoritmos matemáticos de la cobertura radioeléctrica para estimar el sitio en particular [6].

Las empresas de telecomunicaciones han implementado la planificación de redes inalámbricas por medio de sistemas GIS para ayudar a construir y ampliar su infraestructura, donde dan cuenta de las variables como la topografía, la densidad de población y las futuros crecimientos del servicio al momento de seleccionar un método de transmisión [3]. Como el terreno y los obstáculos, afectan a las ondas de radio [7], los ingenieros prefieren, para tal efecto superponen los datos de la red y características de los equipos de manera que pueden tener un modelamiento aproximado de la coberturas de un sistema de radio [8].

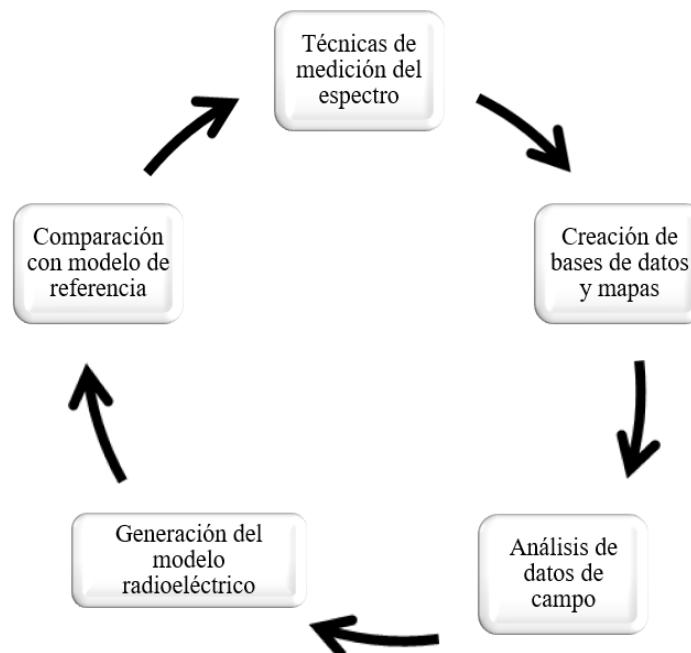
En la planificación de la red se deben reducir los gastos de infraestructura en la implementación y modernización de los transceptores en lo que se refiere a la estimación de las pérdidas del trayecto estimando un cuidadoso análisis de datos espaciales con un SIG para determinar las posibles ubicaciones tanto de los usuarios como de las torres repetidoras, con ello es posible la localización de las zonas muertas y el área de solapamiento de la cobertura de los niveles de intensidad de la estación transmisora como de otras estaciones adyacentes [9].

## Metodología

En el desarrollo experimental se realiza un análisis de la normativa colombiana sobre el uso legal del espectro radioeléctrico de radiodifusión sonora [10], para identificar variables más significativas de uso, administración y explotación del mismo en el país, como también las técnicas y datos geográficos, se establece el referente de la metodología propuesta en el manual técnico del espectro de Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [11].

La metodología propuesta se presenta en la Figura 1, que de acuerdo a [12] está estructurada en cinco fases: 1) técnicas de medición del espectro, 2) creación de bases de datos y mapas de georreferenciación, 3) análisis de datos de campo, 4) generación del modelo radioeléctrico y 5) comparación con un modelo de referencia, posteriormente se describen las acciones previstas para cada una de las fases propuestas [13].

Figura 1. Metodología propuesta.



Fuente: Elaboración propia

### 1. Fase de técnicas de medición del espectro

La adquisición de datos del total de 648 muestras es representada por los valores de densidad de potencia y unidades similares como lo muestra la Tabla 1, que se adquieren por medio del analizador de espectros con su respectiva antena para realizar la comprobación de los niveles de potencia y sus equivalentes eléctricos producidos por radiodifusión en la frecuencia modulada en el municipio de Pamplona [14], de las cuales se seleccionan las 27 muestras más significativas que son promediadas en cada uno de los puntos geográficos y que fueron seleccionados al azar tratando en lo posible de que exista línea de vista durante las pruebas, dichos datos se exportan al software ArcGIS [5] para iniciar el proceso de análisis espacial [10].

Tabla 1. Valores de densidad de potencia y unidades equivalentes emisora FM 94,9 MHz

Ubicación de las muestras	Representación niveles de potencia en 94,9 Mhz				
	Distancia	dBm	(ηW)	(mV)	(μW/m2)
Antena transmisora	5	-10,46	90100	82,13	113,31
Edificio Francisco de Paula, UP	240	-16,95	20303	37,97	36,836
Edificio Simón Bolívar, UP,	337	-11,68	70023	71,92	88,512
Casona, UP.	884	-74,27	0,038693	0,05341	0,0012
Rosario, UP.	946	-38,99	148,22	3,1606	0,3033
San Rafael	2495	-75,56	0,028400	0,045896	0,0019
Capilla San Pedro	2502	-41,91	0,19733	163,23	0,2521
Tanques	3392	-64,47	0,35943	0,16394	0,0017

Fuente: Elaboración propia

La evaluación de la toma de muestras se realizan atendiendo el decreto 195 de 2005 y la resolución 001645 del 29 de julio de 2005, junto con la normativas internacionales referente a los modelos de categorías de accesibilidad; para una categoría de accesibilidad 1 donde se estipula que la antena debe estar a una altura  $h$  sobre el nivel del suelo, teniendo en cuenta esta información y según la norma [15] la metodología para las mediciones determina: 1) establezca la hora pico más cargada de nivel de tráfico cuando ejecute la medición, 2) inicie la captura de los datos en la zona ocupacional a una distancia que represente una lectura significativa, 3) cuando los valores medidos superen en los recorridos los límites de exposición de la norma K.52 [16], se realizarán mediciones con promedios de seis minutos con el objetivo asegurar una cantidad de datos en ese límite de tiempo, 4) la información se depura y se procesa para obtener los datos y 5) se obtienen los resultados analíticos.

Como la ganancia de la antena receptora es igual a 0 dBi [17] y normalizando dicho valor en potencia utilizando la ecuación 1 se resuelve en términos de la longitud de onda y se alcanzan las áreas de apertura efectiva en campo para la frecuencia estudiada [18].

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \left[ \frac{r}{m^2} \right] \quad (1)$$

Con los datos de apertura efectiva para la estación radiante en FM, se obtiene la densidad de potencia de cada muestra [19], por medio de la ecuación 2 [20].

$$S = \frac{P_r}{A_e}, \frac{W}{m^2} \quad (2)$$

## 2. Fase de creación de bases de datos y mapas de georreferenciación

Para la construcción de la base de datos se toma como referente tres estaciones radiantes FM con frecuencias de 90.7 MHz, 94.9 MHz y 97.9 MHz presentes en el casco urbano del municipio de Pamplona, con el fin de obtener la densidad de potencia incidente por unidad de superficie, de acuerdo al relieve del área de estudio se escoge el algoritmo de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para conseguir los valores de la celda obtenida por medio de una combinación lineal ponderada de un conjunto de datos de las muestras tomadas con la finalidad de que la superficie que se interpola sea una variable dependiente de la ubicación [21].

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde la ubicación de la muestra, debido a que se basa en la inversa de la distancia elevada a una potencia determinada, que le permite controlar significativamente los puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida, al definir un valor de potencia más alto (ver ecuación 3). Por tanto, el área de impacto y la superficie establecida contiene más detalles de la ubicación, esto significa que al aumentar la potencia, los valores interpolados se aproximan al valor del punto de la muestra más cercana. Cuando se tiene un valor bajo de potencia, los puntos contiguos y vecinos adquieren más influencia que los que se encuentran más alejados, dando como resultado un área superficial mucho más suave [21].

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (3)$$

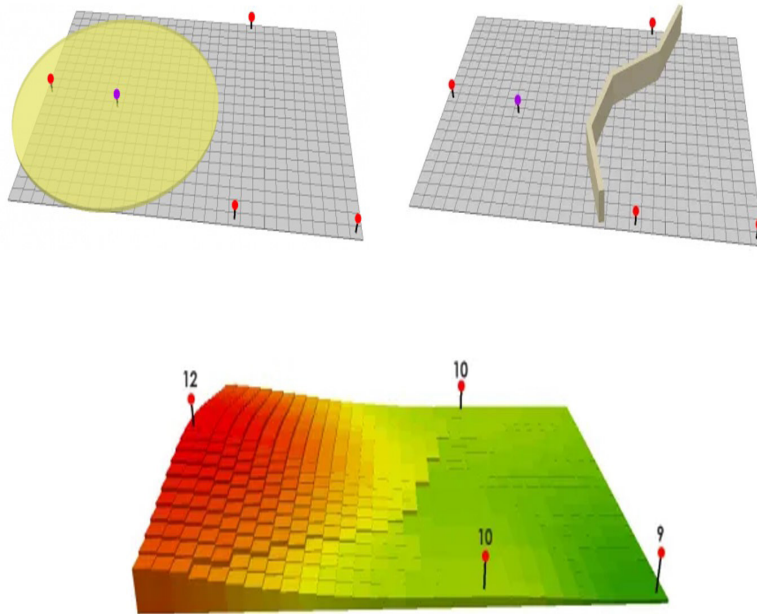
Donde:  $Z_i$  = Valor medido,  $d_i$  = distancia entre los puntos y  $p$  = potencia de interpolación.

Para cantidades pequeñas en el denominador (más distancia) se presenta menos efecto sobre el valor interpolado  $p$ . Esto quiere decir que nunca se tendrán valores por encima o por debajo de los valores máximos y mínimos conocidos [22].

Como no hay relación directa de la fórmula de IDW con ningún proceso físico real, no se pueden generalizar las formas de determinar que un valor de potencia obtenido en particular es demasiado grande [23]; con los puntos registrados IDW es capaz de determinar un radio de búsqueda y su interpolación sólo utilizará el número de puntos conocidos dentro de dicho radio, que puede establecer barreras si hay crestas en un perfil de elevación o barreras de ruido.

Los puntos interpolados se estiman con base a la distancia de los valores conocidos de la celda, por tanto, en la simulación se incluye sólo el área del campus universitario para verificar el comportamiento que tiene la onda dentro de esta pequeña zona, los puntos que están más cerca de los valores conocidos están más influenciados que los puntos que están más lejos, como se despliega en la Figura 2 el detalle del funcionamiento de la interpolación [23].

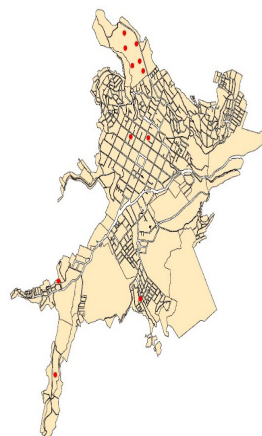
Figura 2. Funcionamiento Interpolación IDW.¿



Fuente: [21]

El método del sistema geodésico WGS84 es el referente para ubicar las coordenadas X y Y que sirve de base para la creación de los mapas en la simulación, teniendo como presente la posición geográfica en el hemisferio norte zona 18. Para la extracción del mapa se utilizó la ubicación de los puntos de medición Municipio de Pamplona de la Figura 3, con la información suministrada desde la página del Departamento Nacional de Estadística (DANE) de los mapas políticos y de cascos urbanos del país para extraer el mapa de trabajo de la correspondiente.

Figura 3. Ubicación de los puntos de medición Municipio de Pamplona



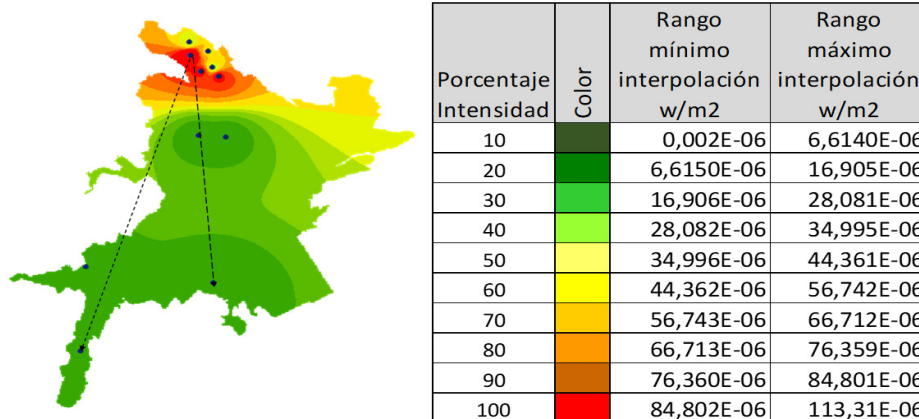
Fuente: Elaboración propia, adaptado mapas de DANE.

Finalmente, la obtención y generación de la base de datos es el resultado de los puntos establecidos en las mediciones ejecutadas en campo, la información se ingresa de forma manual creando cada uno de los campos necesarios incluyendo el dato de la altitud en donde se tomaron los niveles de potencia de campo eléctrico en cada punto.

### 3. Fase de análisis de datos de campo

Con los datos de densidad de potencia de campo eléctrico de los puntos de medición registrados en el mapa de radiación del casco urbano Pamplona, de acuerdo a la Figura 4, se genera la simulación para incluir todas las áreas de radiación para visualizar el comportamiento que tiene la intensidad de onda de radio.

Figura 4. Mapa de radiación del casco urbano Pamplona.¿



Fuente: Elaboración propia

La zona de color rojo del mapa de radiación representa el área con la mayor intensidad que es donde se ubica el transmisor de FM, se visualiza que la emisión del lóbulo principal de la onda está dirigida aproximadamente a 225 grados norte, la onda no se transmite en la misma proporción desde la antena, debido a los obstáculos de las edificaciones y vegetación que causa una disminución de la densidad de potencia de la onda de radio en 94.9 MHz.

La curva de nivel de color naranja y amarillo describe la forma en cómo el porcentaje de la radiación tiende a desplazarse, perdiendo la forma oval del contorno haciendo que la energía se disperse al no existir una contribución uniforme, a medida que se realiza el recorrido en la zona céntrica de la ciudad, la representación de los diferentes tonos verdes indican los porcentajes de intensidad de acuerdo a los límites de interpolación mínimo y máximo [24].

### 4. Fase de generación de un modelo radioeléctrico

Las técnicas para generar un modelo de radio propagación requiere de un riguroso estudio y una adecuada planeación, como lo describe el manual de propagación técnica del espectro [11] que se estructura en las fases de: la organización, las estructuras físicas y de personal, equipos de comprobación, automatización de procesos, mediciones, procedimientos y herramientas de apoyo.

En el desarrollo experimental se evalúan las condiciones técnicas y legales del marco legal del espectro radioeléctrico de radiodifusión sonora en Colombia en lo que se refiere a la identificación de los parámetros radioeléctricos [14] como también a la ingeniería y datos geográficos, de acuerdo a [25] es posible extraer de forma experimental un modelo de propagación basado en las recomendaciones y reglamentaciones internacionales colocando en consideración: las observaciones sobre las mediciones, las apreciaciones generales sobre la medición de la densidad de flujo de potencia y la intensidad de campo eléctrico, los métodos de medida y los programas de software, para el caso de estudio se utiliza la expresión analítica (4):

$$y = A - 10 * n * \ln(B) + \sigma L \quad (4)$$

Dónde: A es la variable que depende de la propagación del espacio libre, B es la variable predictor de la distancia,  $n$  el exponente de pérdidas obtenido del ambiente urbano estudiado y  $\sigma_L$  es el factor de pérdidas. De manera que es posible analizar la correlación entre dos variables A y B con los datos obtenidos del algoritmo IDW de acuerdo a los niveles promedios de la densidad de potencia obtenido de las dos fases anteriores, como se examina en la Figura 4, para tal caso se utiliza la ecuación de modelo de regresión (5) [26].

$$y = -15,44 \ln(d) + 139,71; R^2 = 0,7701 \quad (5)$$

Dónde: d = distancia es la distancia en metros y  $R^2$  = es el valor coeficiente de determinación

Esta función permite obtener un modelo adaptado de pérdidas de trayectoria que se ajustan a los datos extraídos con el algoritmo IDW mediante un análisis de la exactitud del ajuste del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que permite predecir los resultados y la variación de la intensidad de potencia.

Con el fin de contrastar los resultados de la ecuación 5 con los datos obtenidos en campo, se procede de igual forma para obtener como resultado la ecuación (6).

$$y = -19,13 \ln(d) + 150,24; R^2 = 0,7732 \quad (6)$$

El coeficiente de determinación (CD) que se encuentra normalizado, cuando más cercano esta del valor de la unidad indica un ajuste del 100%. Para este tipo de aproximación experimental se pueden considerar las apreciaciones de la norma UIT R P.1812-4 para el caso de pérdidas por variabilidad de las ubicaciones, cuando se hace referencia a estadísticas espaciales debidas a las variaciones de la ocupación del suelo en las inmediaciones en donde se deduce que la distribución de valor mediano de la intensidad del campo en entornos urbanos se llega a la consolidación de una distribución tipo log-normal con un media cero.

Por tanto, los valores de la desviación típica dependen de la frecuencia y el entorno en situaciones de estudios empíricos que han demostrado un valor representativo como un factor de pérdida adicional mediante la expresión (7) [27].

Por tanto, los valores de la desviación típica dependen de la frecuencia y el entorno en situaciones de estudios empíricos que han demostrado un valor representativo como un factor de pérdida adicional mediante la expresión (7) [27].

$$\sigma_L = K_L + 1,3 \log(f) \quad (7)$$

Dónde:  $K_L = 5,1$  para receptores con antenas ubicadas por debajo de la altura de la ocupación del suelo, en entornos urbanos o suburbano [28].

De acuerdo a lo anterior, al incluir un factor  $\sigma_L$  de pérdidas para estimar en términos globales los factores y fenómenos externos que inciden en la intensidad de campo recibido, se obtiene la expresión general para el modelo IDW (8) [28].

$$y = -15,44 \ln(d) + 139,71 + \sigma_L \quad (8)$$

Realizando el mismo procedimiento se agrega también el factor de pérdida adicional para los datos obtenidos en campo, como se repara en la ecuación (9).



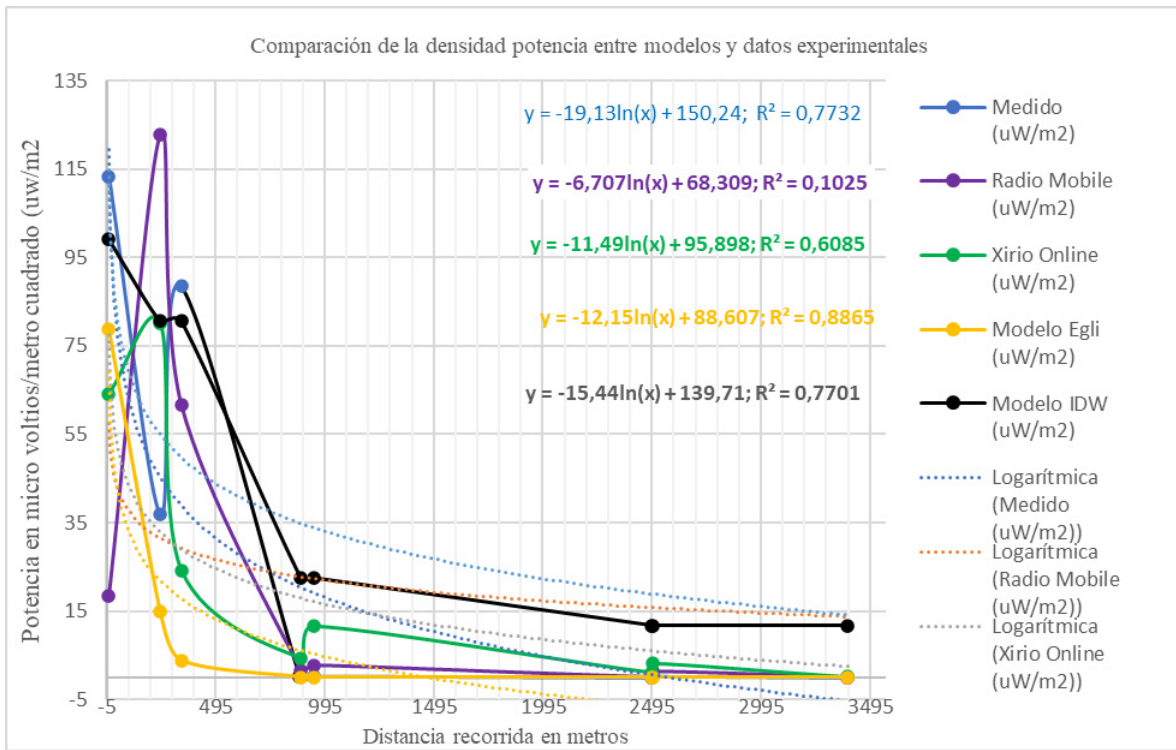
$$y = -19,13 \ln(d) + 150,24 + \sigma L \quad (9)$$

**5. Fase de comparación con modelos de propagación**

Para evaluar el desempeño del modelo empírico propuesto se hace una comparación con los modelos de propagación existentes en la literatura que pueden ser aplicados para las condiciones correspondientes para este tipo de frecuencias en los entornos donde se realizaron las mediciones. De esta manera, los modelos a ser utilizados para la comparación son: el de Xirio online, Radio mobile (Longley-Rice) y Egli. [14].

En esta fase se introducen los parámetros de altura del equipo que transmite, el equipo que recibe y las ganancias de las antenas para realizar las pruebas con los modelos mencionados [26] y lograr obtener la comparación de la densidad de potencia entre modelos como lo muestra la Figura 5, en donde los valores del CD son similares para la ecuaciones contenidas para el modelo IDW y el Medido; en contraste con los modelos de simulación Xirio el CD es bajo y Radio Mobile no llena las expectativas, mientras que el modelo Egli es mejor que los anteriores con un nivel de ajuste del 88,65%.

**Figura 5. Comparación de la densidad de potencia entre modelos**



Fuente: Elaboración propia

Mediante la comparación de los modelos de forma gráfica se contemplan los cambios instantáneos de la densidad de potencia y el comportamiento de tipo con decaimiento exponencial en la medida en que el receptor se distancia de la antena trasmisora, la variación en los trazados de la curvas obtenidas de tipo logaritmo presenta una diferencia aproximadamente en potencia de entre 10µW/m² a 25µW/m².

## Resultados y discusiones

En un sistema radioeléctrico los niveles de potencia deben estar normados a los estándares internacionales [11] de acuerdo a los procedimientos establecidos para medir la densidad del campo eléctrico; por medio de la Tabla 2 se detallan los valores promedio de densidad de potencia bajo los criterios de: cálculos analíticos, medición real en campo, software de simulación y modelos de propagación.

Tabla 2. Valores Promedios de densidad de potencia para la frecuencia de 94,9 MHz

Ubicación	Distancia (m)	Calculados ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ )	Medidos ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ )	Radio Mobile ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ )	Xirio Online ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ )	Modelo Egli ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ )	Modelo IDW ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ )
Antena transmisora	5	113,29174	113,31	18,59	64,198	78,6521	99,0565
Edi. Francisco Paula, UP	240	25,5289922	36,836	122,86	80,06	14,8165	80,5805
Edificio Simón Bolívar, UP,	337	88,0469202	88,512	61,58	24,28	3,81127	80,5805
La Casona	884	0,04865258	0,0012	1,73	4,45	0,08049	22,4935
El Rosario	946	0,18637183	0,3033	2,74	11,64	0,06137	22,4935
San Rafael	2495	0,03571016	0,0019	0,0975	1,183	0,00126	11,76
San Pedro	2502	0,24812274	0,2521	1,34	3,2	0,00125	11,76
Los tanques	3392	0,00160018	0,0017	0,0426	0,15435	0,0037	11,76

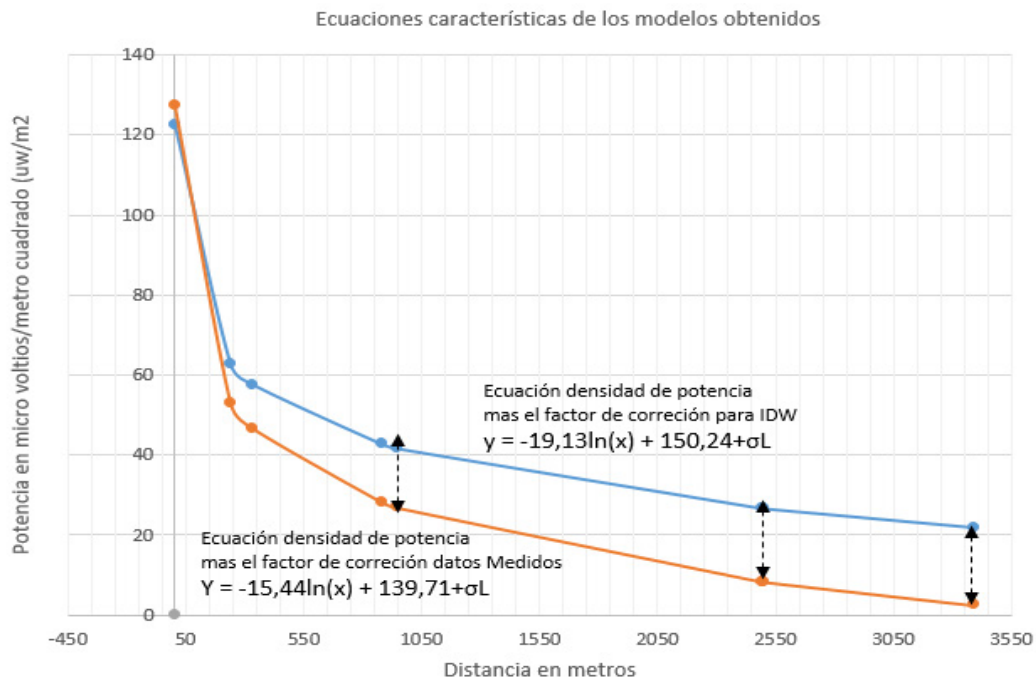
Fuente: Elaboración propia

Al comparar inicialmente los valores de la Tabla 2 con respecto a las densidades de potencias medidos contra los datos obtenidos del modelo de pendientes por medio del algoritmo IDW a través de un sistema de información geográfica (SIG), éste parece ser un modelo de software referente aproximado, teniendo presente que ArcGIS genera un proceso de segmentación por área geográfica por medio de la interpolación de máximos y mínimos a través de celdas de cobertura para distintos niveles de intensidad en forma de energía espectral, sin embargo, no considera los obstáculos y factores externos que producen atenuación de la señal y tampoco los mecanismos de propagación, pero es una herramienta que puede facilitar el proceso de la planeación para los estudios de radio propagación.

Al confrontar los datos obtenidos en campo contra el modelo IDW [23] el valor del punto inicial en 5 metros (ver Tabla 7), es relativamente alto en comparación con los demás datos debido a la máxima potencia de radiación por el campo cercano inducido por la antena [20], sin embargo, para los otros datos se deben realizar los ajustes al modelo por posibles imperfecciones al no estimar las pérdidas: en espacio libre, los componentes y dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos, como también fenómenos físicos, atmosféricos, geográficos y climáticos, con el propósito de guardar cierta proporcionalidad y concordancia con los datos del modelo IDW [29], pero éste último, aunque con los valores de las mediciones desconocidas permite que por medio de la interpolación espacial sea posible la estimación de valores en puntos desconocidos que resultan inviables de medir, sobre todo en sitios de difícil acceso por la topografía del terreno y la disponibilidad de equipos en campo.

Finamente, al realizar un análisis de los modelos matemáticos obtenidos para la densidad de potencia [30], como se observa en la Figura 6, se aprecia un efecto de caída de 20 dB apartir de las distancias superiores a 900 metros debido al factor  $\sigma_L$  y que se ve mas pronunciado con los datos medidos, como lo demuestran las normas tecnicas de la estudiadas ITU-R como es el caso de la [27, 31, 32].

Figura 6. Sistema de ecuaciones con factor de corrección



Fuente: Elaboración propia

Este comportamiento analítico de tipo log-normal es el resultado de los valores de los datos medidos en el espacio exterior en donde las condiciones geográficas y climáticas, las orientaciones de la antena con línea de vista, las obstrucciones en los trayectos (que no son posibles de controlar) y los mecanismos de propagación, entre otros, están presentes en la onda electromagnética que viaja en el ambiente haciendo que disminuyan los niveles de energía que transporta cuando se trabaja en las mediciones en ambientes reales, sin embargo, con el uso del modelo IDW se pueden hacer aproximaciones que se adecuen más al estudio y caracterización de enlaces de radio.

## Conclusiones

En el proceso de la planeación de sistemas de radio propagación y caracterización de áreas de cobertura, con el modelo obtenido por medio de la ayuda de una herramienta de un sistema de información geográfica estima la extracción de la información con mapas reales basado en la curvatura de la tierra, lo cual hace que sea una herramienta confiable.

Por otra parte, el nivel de ajuste para obtener valores más precisos no considera las pérdidas producidas por las condiciones ambientales y pérdidas implícitas de los dispositivos de hardware o los factores de corrección de los fenómenos de propagación, sin embargo, es una herramienta que aporta información valiosa al momento de realizar la georreferenciación y determinación de los niveles de irradiación.

Con la segmentación por zonas de intensidad de radiación obtenidas con el modelo IDW de ArcGIS es posible en un aceptable grado de confianza precisar áreas de cobertura para un sistema de radio con buen grado de exactitud realizando el muestreo selectivo para simplificar el estudio, seguimiento y diagnóstico del espectro radioeléctrico.

A nivel de operación de equipos de radio frecuencia la resolución de la predicción es el ancho de una zona cuadrada sobre la que se aplica la variabilidad, lo que permite una predicción de los niveles de potencia con una desviación estándar apropiada entre 8dB y 12 dB para zonas urbanas cuando no existe dependencia de la frecuencia.

Mediante la obtención de un modelo analítico de forma empírica y con herramientas de software es factible obtener el desempeño de las un sistema de radio para el diseño de los cálculos de potencia en las posibles ubicaciones donde de predice la cobertura para un servicio de radiocomunicaciones.

En la utilización de software en análisis estadístico se debe considerar el error sistemático de las mediciones de potencia que puede ser resultado de un defecto o no calibración del instrumento, como también estimar los errores aleatorios debidos a fenómenos externos.

## Referencias bibliográficas

1. S. Bi, J. Lyu, Z. Ding, and R. Zhang, "Engineering radio maps for wireless resource management," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 2, pp. 133–141, 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800146.
2. Z. Naseem, I. Nausheen, and Z. Mirza, "Propagation Models for Wireless Communication System," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 9001, pp. 237–242, 2008, [Online]. Available: www.irjet.net.
3. T. Land, "FM Radio Signal Propagation Evaluation and," 2018.
4. ArcGISAPI, *ArcGIS for Javascript Developers by Example*, vol. 53, no. 9. 2016.
5. A. C. Keyel, S. E. Reed, M. F. McKenna, and G. Wittemyer, "Modeling anthropogenic noise propagation using the Sound Mapping Tools ArcGIS toolbox," *Environ. Model. Softw.*, vol. 97, pp. 56–60, 2017, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.07.008.
6. L. Juan-Llacer, J. V. Rodriguez, J. M. Molina-Garcia-Pardo, J. Pascual-García, and M. Martínez-Inglés, "RADIOGIS: Educational software for learning the calculation of radio electric coverage in wireless communication systems," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 27, no. 1, pp. 13–28, 2019, doi: 10.1002/cae.22052.
7. G. Zhu, X. Gong, and R. Luo, "Characterizing and mapping of exposure to radiofrequency electromagnetic fields (20–3,000 Mhz) in Chengdu, China," *Health Phys.*, vol. 112, no. 3, pp. 266–275, 2017, doi: 10.1097/HP.0000000000000599.
8. A. L. Penteado Botelho and C. Akamine, "Optimization of the propagation model choice by measuring field and artificial intelligence," *Set Int. J. Broadcast Eng.*, vol. 2018, no. 1, pp. 8–16, 2018, doi: 10.18580/setijbe.2018.1.
9. S. Tayal, P. K. Garg, and S. Vijay, "Site suitability analysis for locating optimal mobile towers in uttarakhand using gis," *38th Asian Conf. Remote Sens. - Sp. Appl. Touching Hum. Lives, ACRS 2017*, vol. 2017–Octob, pp. 2–7, 2017.
10. Ministerio de las TIC, "Manual de operación del SGE," vol. 1, no. 1, p. P.38, 2016.
11. U. Comprobación tecnica del espectro, *Manual Comprobación Técnica del Espectro*, vol. 1. Ginebra, Suiza, 2011.
12. L. J. Rodríguez Sepulveda, J. E. Eslava Pedraza, J. E. Gutiérrez Lopera, A. R. Mejía Serrano, and A. J. Soto Vergel, "Monitoreo y reporte de estadísticas de descargas atmosféricas mediante aplicación móvil en Android," *J. Cienc. e Ing.*, vol. 12, no. 1, pp. 116–123, Aug. 2020, doi: 10.46571/JCI.2020.1.10.

13. J. Verduijn, J. G. Cespedes Clavijo, and G. M. Fajardo Muriel, "Manual de gestion nacional del espectro radioeletrico," *PhD Propos.*, vol. 1, 2015.
14. F. Rancy, "Manual sobre la Gestión nacional del espectro," p. 358, 2015.
15. ITU-R Recommendation SM 2256-1, "Medición y evaluación de la ocupación del espectro Serie SM.2256-1," vol. 1, 2016.
16. I.-R. R. ITU-R Recommendation K.52, "ITU-T Rec. K.52 Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields," vol. 52, 2021.
17. L. G. Tran, H. K. Cha, and W. T. Park, "RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications," *Micro Nano Syst. Lett.*, vol. 5, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s40486-017-0051-0.
18. E. Marpanaji, K. T. Yuwono, M. I. Mahali, P. T. Aji, and N. A. B. Nugraha, "Experimental Study of Measuring Radiation Patterns for VHF and UHF Antennas," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1413, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1413/1/012013.
19. U. Recomendación UIT-R P.525-4, "Propagación de las ondas radioeléctricas, Unión Internacional de Telecomunicaciones," vol. 02, no. 514, p. 10813, 2019.
20. C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2016.
21. ArcGIS, "Argis metadato.pdf." Manual, 2022, [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>.
22. Y. Zhang, T. Han, H. Liu, X. Wang, and E. Zhang, "Cooperation of the spatial interpolation algorithm for the contour map of the shockwave overpressure field," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 10, no. 6, pp. 104–110, 2017, doi: 10.25103/jestr.106.14.
23. P. Ortega, "Comparación de técnicas de interpolación espacial ( IDW y Kriging ) utilizando medidas de campo eléctrico en la comuna dos de la ciudad de San José de Cúcuta .," vol. 1, p. 16, 2017.
24. D. Maglione, J. Soto, J. L. Sáenz, and O. Bonfili, "Utilización de diferentes metodologías para la construcción de un mapa de precipitación acumulada en la Provincia de Santa Cruz," *Inf. Científicos Técnicos - UNPA*, vol. 11, no. 1, pp. 154–169, 2019, doi: 10.22305/ict-unpa.v11i1.779.
25. J. Herrera, "Metodología de medición del espectro con técnicas experimentales para obtener modelos de propagación," vol. 1, p. 165, 2021, [Online]. Available: [https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_10/recursos/2015\\_s1/pag\\_contenido/02032015/libros\\_2015.jsp](https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/2015_s1/pag_contenido/02032015/libros_2015.jsp).
26. A. Quistial, P. Lupera Morillo, C. Tipantuña, and J. Carvajal, "Modelo matemático adaptado para el cálculo de pérdidas de propagación en la banda de 900 MHz para microceldas en la ciudad de Quito," *Rev. Politécnica*, vol. 41, no. 2, 2018.
27. ITU-R Recommendation ITU-R P.1812-6, "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz P Series Radiowave propagation," *Tech. Rep.*, vol. 4, 2021.
28. M. Ayadi, A. Ben Zineb, and S. Tabbane, "A UHF Path Loss Model Using Learning Machine for Heterogeneous Networks," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 7, pp. 3675–3683, 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2705112.
29. J. Martínez Garcés y J. . Barreto Ferreira, "Modelo de planeación para la inversión tecnológica en centros de investigación universitarios", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 7, n.º 2, 2019. DOI: <https://orcid.org/0000-0002-8120-3285>
30. International Telecommunication Union ITU-R P.525-4, "Rec. ITU-R P.525-4. Cálculo de la atenuación en el espacio libre.," vol. 4, p. 6, 2019.

31. A. I. Middy and S. Roy, "Spatial interpolation techniques on participatory sensing data," *ACM Trans. Spat. Algorithms Syst.*, vol. 7, no. 3, 2021, doi: 10.1145/3457609.
32. D. D. López Juvinao, L. M. . Torres Ustate, y F. O. Moya Camacho, "Tecnologías, procesos y problemática ambiental en la Minería de arcilla", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, n.º 2, pp. 20–43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.2.3857>