

*Revista Electrónica Nova Scientia*

Modelo de propagación simplificado para LTE  
en la frecuencia de 2.1GHz

Simplified propagation model for LTE in the  
frequency of 2.1 GHz

**Sergio Vidal-Beltrán<sup>1</sup>, Edgar Alan Degollado-Rea<sup>1</sup>  
y José Luis López-Bonilla<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup>Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME-Zacatenco.  
Instituto Politécnico Nacional

---

México

Jose Luis López-Bonilla.: [jlopezb@ipn.mx](mailto:jlopezb@ipn.mx)

## Resumen

Para la frecuencia de 2.1 GHz, los modelos de propagación utilizados para estimar la atenuación de la señal en sistemas de comunicaciones móviles celulares LTE (Long Term Evolution), son principalmente el Modelo Xia-Bertoni y Walfisch-Bertoni [2, 3, 5, 9, 10, 15], los cuales son modelos aplicables hasta la frecuencia de 3GHz. Para estos modelos, las ecuaciones dependen de distintas variables del entorno de propagación (efecto de techos y altura de edificios, entre otros), lo cual los hace precisos, sin embargo, resultan más complejos en su cálculo [8, 13]. En este trabajo, se hace un análisis de las pérdidas de propagación por trayectoria usando el método empírico de pérdidas simplificado, el cual depende de menos variables que los modelos tradicionalmente usados, y por los datos recopilados en campo, presentan un mejor desempeño para la frecuencia de 2.130 GHz. En la parte final del trabajo se muestran las ecuaciones del modelo simplificado para dos áreas de la ciudad de México, las cuales son usadas para generalizar el modelo a otras áreas con características similares.

**Palabras Clave:** Modelos de propagación; Walfisch-Bertoni; Xia-Bertoni; LTE

*Recepción:* 17-03-2017

*Aceptación:* 16-09-2017

## Abstract

For 2.1 GHz, propagation models used to estimate signal attenuation in LTE (Long Term Evolution) mobile communications systems are mainly the Xia-Bertoni and Walfisch-Bertoni Model [2, 3, 5, 9, 10, 15], which are models applicable up to 3GHz. For these models the equations depend on different variables of the propagation environment (effect of roofs and height of buildings, among others), which makes them precise, however, they are more complex in their calculation [8, 13]. In this paper, an analysis of path loss is made using the simplified empirical propagation method, which depends on fewer variables than the traditionally used models and the data collected in the field presents a better performance for the frequency of 2.130 GHz. The final part of the paper shows the equations of the simplified model for two areas of Mexico City, which are used to generalize the model to other areas with similar characteristics.

**Keywords:** Propagation models; Walfisch-Bertoni; Xia-Bertoni; LTE.

## Introducción

En la actualidad, en el estudio de la señal de comunicaciones móviles celulares LTE, en tareas como la planeación para el despliegue de nuevas redes, la ampliación o el ajuste de la cobertura de las existentes, se tiene una gran dependencia de modelos teóricos de propagación para estimar las pérdidas por trayectoria en la propagación de la señal. Estos modelos teóricos de propagación utilizados fueron generalmente desarrollados en otros países o ciudades donde las construcciones de los edificios están realizadas bajo normatividad y condiciones distintas a las de la Ciudad de México, sumando además condiciones geográficas, demográficas y ambientales igualmente diferentes.

Los modelos de propagación utilizados, como Xia-Bertoni, Walfisch-Bertoni o el del Canal de Comunicaciones Winner II, requieren el cálculo preliminar de diversos parámetros de ajuste que dependen del entorno en el que se vayan a utilizar lo que hace en algunos casos más delicados el cálculo debido a los diversos factores involucrados. Lo antes descrito, además de la entrada de nuevos proveedores de servicio en el país, condujo al planteamiento de la necesidad de contar con un método para generar un modelo de propagación más simple que caracterice las pérdidas por trayectoria de la señal de comunicaciones móviles celulares LTE en la banda de frecuencia de 2.1 GHz, el cual sea desarrollado en los entornos urbanos de interés, en este caso, la Ciudad de México.

En el Release 8 de sus especificaciones, el 3GPP completó el que es su sistema LTE. El objetivo principal es proporcionar un acceso de radiofrecuencia de alto rendimiento, que permita altas velocidades de transmisión y recepción en dispositivos móviles, y que pueda coexistir con HSPA y sistemas anteriores, permitiendo a los operadores una rápida y sencilla migración hacia esta nueva tecnología. LTE emplea enlaces OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) para minimizar las interferencias e incrementar la eficiencia espectral, utilizando canales de tamaño variable entre 1.25 y 20 MHz.

LTE es una tecnología de radio que permite a los operadores lograr aún mayores velocidades de datos que con HSPA+. La gestión del espectro es también más flexible, permitiendo mayor ancho de banda. Es parte del camino evolutivo de GSM hacia la banda ancha móvil, EDGE, EDGE Evolution, (EDGE+), UMTS, HSPA (HSDPA y HSUPA combinados) y HSPA Evolution (HSPA+). A pesar de que HSPA y su evolución (HSPA+) están bien

posicionadas para proporcionar servicios de datos móviles, LTE proporciona mejores prestaciones de latencia, mayores velocidades de transmisión, uso más flexible del espectro, y un mejor uso de tecnologías de múltiples antenas (MIMO). LTE es además una red únicamente de paquetes (PS, *Packets Switching*), con lo que desaparece la conmutación de circuitos (CS, *Circuit Switching*). En LTE, toda la arquitectura de red está basada en IP. LTE permite también el manejo de mayores anchos de banda.

De acuerdo con [16], las principales capacidades de LTE son:

**Velocidad máxima de transmisión teórica en el enlace descendente** (de la estación base al móvil) de hasta 326 Mbit/s usando un ancho de banda de 20 MHz y MIMO 4x4 ó 173 Mbit/s con MIMO 2x2; u 86 y 58 Mbit/s con 1x2 64 QAM respectivamente (tal y como puede verse en la figura 2.6)

**Velocidad máxima de transmisión teórica en el enlace ascendente** (del móvil a estación base) de 86.4 Mbits/s con ancho de banda de 20 MHz.

**Funcionamiento tanto en modo TDD** (*Time Duplex Division*) como FDD (*Frequency Duplex Division*).

**Ancho de banda escalable** desde 1.25 hasta 20 MHz, que abarca 1.25 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz.

**Aumento considerable de la eficiencia espectral** (número de bits que pueden ser transmitidos por Hz), con un incremento respecto de HSPA de entre 100% y el 200%.

**Reducción de la latencia**, de hasta 10 milisegundos (ms), de ida y vuelta entre el equipo del usuario y la estación base, y menos de 100 ms el tiempo de transición de los modos inactivo (*idle*) a activo (*conneted*).

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o determinísticos o una combinación de estos dos o semi-empíricos.

Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF pueda tener entre una estación base y un receptor móvil o fijo. La ventaja de modelar radiocanales teniendo

en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores. De esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos. [17].

En el presente trabajo, se realiza un análisis del comportamiento de la señal LTE en la frecuencia de 2.130 GHz, usando el modelo de propagación simplificado [6, 7, 14]. La ecuación que define la potencia de recepción afectada por pérdidas por trayectoria en función de la distancia está dada por (1).

$$P_r = P_t K \left[ \frac{d_0}{d} \right]^\gamma \quad (1)$$

Donde

$P_r$  Es la potencia de recepción (dB<sub>m</sub>).

$P_t$  Es la potencia de transmisión (dB<sub>m</sub>).

$d_0$  Valor de referencia para el campo lejano de la antena, para este trabajo se propone usar  $d_0 = 1m$ .

$d$  Es la distancia entre el transmisor (eNodoB) y el punto donde se realiza la medición con el analizador de espectro (mts).

$\gamma$  Es el exponente de la pérdida por trayectoria.

Con base en (1), la potencia de recepción (en dB<sub>m</sub>) se define por (2)

$$P_r(dB_m) = P_t(dB_m) + K(dB) - 10\gamma \log_{10} \left[ \frac{d}{d_0} \right] \quad (2)$$

Donde:

$$K(dB) = -20 \log_{10} \left[ \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right] \quad (3)$$

$P_t(dB_m)$  se consideró de 20W (43dB<sub>m</sub>)

La ecuación (2), es válida cuando  $d > d_0$ ,

El valor de  $\gamma$  depende del entorno de propagación, y en conjunto con  $K$ , determina la atenuación de la señal. Para obtener el valor optimizado de  $\gamma$  se utiliza el método de ajuste mediante el error cuadrático medio de las mediciones realizadas en campo (4) y los valores calculados.

$$F(\gamma) = \sum_{i=1}^n [P_{empirica}(d_i) - P_{calculada}(d_i)]^2 \quad (4)$$

Donde:

$P_{empirica}(d_i)$  Es la potencia medida mediante el analizador de espectro.

$P_{calculada}(d_i) = K - 10\gamma \log_{10}(d)$ , la cual está basada en (2).

Usando (3), y considerando  $d_0 = 1 \text{ m}$ ,  $f = 2130 \text{ MHz}$  el valor de  $K$  se obtiene en (5):

$$K(\text{dB}) = -20 \log_{10} \left[ \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right] = -20 \log_{10} \left[ \frac{4\pi(1\text{m})}{0.14085\text{m}} \right] = -39.009 \text{ dB} \quad (5)$$

Sustituyendo (2) y (5) en (4), se obtiene (6):

$$F(\gamma) = \sum_{i=1}^n [P_{empirica}(d_i) - (-39.009 - 10\gamma \log_{10}(d_i))]^2 \quad (6)$$

Considerando que  $\frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} \rightarrow 0$ , se obtiene el valor de  $\gamma$  a partir de (6), resultando en (7):

$$\frac{\partial F(\gamma)}{\partial \gamma} = \sum_{i=1}^n [P_{empirica}(d_i) - (-39.009 - 10\gamma \log_{10}(d_i))]^2 = 0 \quad (7)$$

Se utilizó un Analizador de Espectro Anritsu (MS2713E) [1], configurado en la Banda 4 de LTE [4] en el enlace descendente y el canal EUARFCN 2150 [4], para realizar las mediciones de potencia de los eNodoB. La distancia  $d_i$  se calcula mediante la ecuación de Haversine [11], con los datos de las coordenadas del eNodoB y el punto donde se realizó la medición con el MS2713E [1]. Para la zona de Lindavista se analizó un área de  $5.7 \text{ Km}^2$  en la cual se localizaron

24 eNodoB y realizaron 8000 mediciones de potencia; el área de San Rafael fue de 7.5 Km<sup>2</sup> y se detectaron 17 transmisores de LTE y se realizaron 3000 mediciones.

En redes LTE, el Cell-ID es un identificador global que se asigna a cada sector de una célula, los valores que puede tomar son de 0-503. Para realizar las mediciones, el MS2713E detecta los Cell-ID con mayor potencia, y con base en él se realizan las mediciones. En la tabla 1, se muestran los datos del Cell-ID 99 para la Zona Lindavista, su ubicación, cantidad de mediciones realizadas para ese transmisor y las distancias mínimas y máximas a las cuales se realizaron las mediciones.

Tabla 1. Identificador de la célula para la zona Lindavista (Cell-ID 99).

| Cell ID | Latitud   | Longitud       | Numero de mediciones | Distancia mínima entre el eNodoB y la medición (mts) | Distancia máxima entre el eNodoB y la medición (mts) |
|---------|-----------|----------------|----------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 99      | 19.448511 | -<br>99.156231 | 232                  | 10.011                                               | 397.481                                              |

Sustituyendo los 232 valores de  $d_i$  (Tabla 1) en (7), se obtiene que:

$$\gamma = 3.8188 \tag{8}$$

Sustituyendo (8) en (2), se obtiene (9):

$$P_r(dBm) = 43 + 39.009 - 10(3.8188)\log_{10}(d_i) \tag{9}$$

Se observa que la ecuación (9) solo depende de la distancia  $d_i$ .

## Escenarios de medición

Para realizar este trabajo, se identificaron dos de las áreas más comunes y de interés en la Ciudad de México. Para la elección de estas zonas, se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

Características de las Construcciones

Población

Principal actividad en la zona

Existencia de espacios abiertos

Nivel de vegetación

Amplitud de las vialidades

De las candidatas al estudio, se eligieron como zonas de medición y análisis una sección de la Colonia Lindavista y una sección de la colonia San Rafael

La zona Lindavista se ubica en el Norte de la Ciudad de México, la cual es una zona de uso residencial, sus características principales son:

**Altura:** Entre los 10 y 15 metros. Muy pocas construcciones por encima de los 15 metros con uso principalmente habitacional.

**Población:** 21,601 habitantes con poca población la mayor parte de la semana.

**Principal actividad en la zona:** Zona habitacional y escolar.

**Existencia de espacios abiertos:** Parque Deportivo “Miguel Aleman”, Zona Deportiva, Cultural y de Gobierno, Unidad Profesional “Adolfo López Mateos” del Instituto Politécnico Nacional.

**Nivel de vegetación:** Medio.

**Amplitud de las vialidades:** En el área analizada, se incluyen 4 vialidades primarias con amplitudes de 5, 6 y 8 carriles. El resto de las calles son principalmente de tránsito local con un promedio de 4 carriles por lo que se considera una zona de vialidades amplias.

La zona San Rafael se encuentra en el centro de la Ciudad de México. La zona posee tanto construcciones antiguas (datan de alrededor de 1900-1910) como un alto desarrollo de edificios de departamentos. Adicionalmente, es una de las zonas laborales y escolares más importantes de la Ciudad de México con un alto nivel de población flotante que incrementa de forma considerable la cantidad de personas que están presentes diariamente en la zona.

**Características de las Construcciones:** Construcciones de altura media y alta, que en promedio van desde los 3 a los 10 pisos. Las construcciones más antiguas están hechas a base de bloques gruesos

**Población:** 60,644 habitantes con alta población la mayor parte de la semana. Al ser sede de las instalaciones principales de diversas empresas y negocios, la cantidad de población flotante que esta la mayor parte de los días en ella es alta

**Principal actividad en la zona:** Zona habitacional, laboral y comercial

**Existencia de espacios abiertos:** pocos, algunas canchas deportivas en escuelas.

**Nivel de vegetación:** Bajo

**Amplitud de las vialidades:** En área analizada, se incluyen 2 vialidades primarias con amplitudes de 6 y 8 carriles. El resto de las calles son principalmente de tránsito local con un promedio de 3 carriles por lo que se considera una zona de vialidades de mediana amplitud

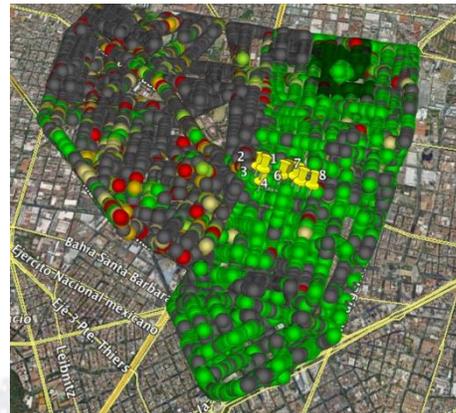


Figura 1, Zonas seleccionadas para hacer las mediciones (zona Lindavista y zona San Rafael)

## Desarrollo

Los valores empíricos se recabaron mediante el analizador de espectro, y mediante el método mostrado en este trabajo se encontró la ecuación (9). Los valores de potencia medida muestran un comportamiento aleatorio ya que la propagación electromagnética se ve afectada por el desvanecimiento y multitrayectoria; es por esto que con el propósito de comparar los datos medidos contra calculados en (9) se usó una regresión lineal [12] para ajustar los datos medidos a una recta; la tabla 2 muestra los primeros 5 valores de los 232 medidos para el Cell-ID 99.

Tabla 2. Tabla resumen para el Cell-ID 99

| No. | Latitud   | Longitud   | Distancia entre el punto de medición y el eNodeB [mts] | Potencia medida (dBm) | Potencia por Regresión Lineal [dBm] | Potencia calculada ( $P_r$ ) [dBm] |
|-----|-----------|------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1   | 19.448503 | -99.156326 | 10.011                                                 | -65.6                 | -69.1263                            | -34.2094                           |
| 2   | 19.448576 | -99.156311 | 11.084                                                 | -68.6                 | -69.2000                            | -35.8977                           |
| 3   | 19.448629 | -99.156258 | 13.437                                                 | -68.1                 | -69.3617                            | -39.0898                           |
| 4   | 19.44854  | -99.156067 | 17.514                                                 | -58.5                 | -69.641                             | -43.4838                           |
| 5   | 19.448605 | -99.156082 | 18.817                                                 | -67.6                 | -69.7315                            | -44.6737                           |

Con los datos calculados en (9) y los datos de la Tabla 2 se construye la figura 3, la cual muestra los valores de potencia medida, la regresión lineal y los valores calculados mediante (9).

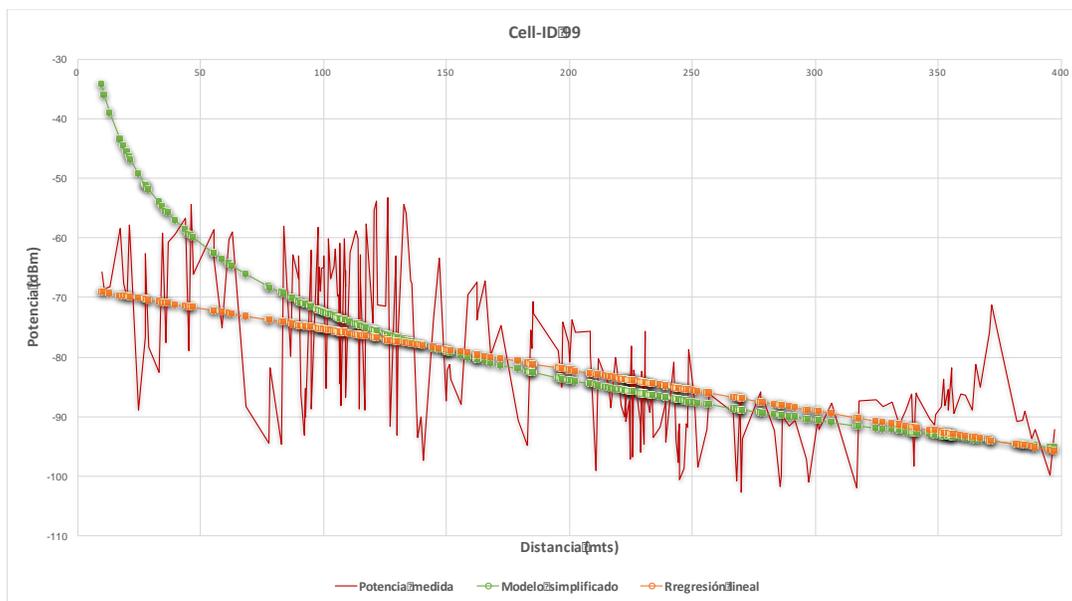


Figura 3. Valores de potencia medida, la regresión lineal y los valores calculados

De la figura (3) se observa que el Método Simplificado tiene una buena aproximación a lo medido en campo. Para comparar la predicción de potencia del Modelo Simplificado, en la figura 4 se muestran las curvas de los modelos Xia-Bertoni y Walfisch Bertoni, los cuales son usados ampliamente para modelar el comportamiento de señales electromagnéticas.

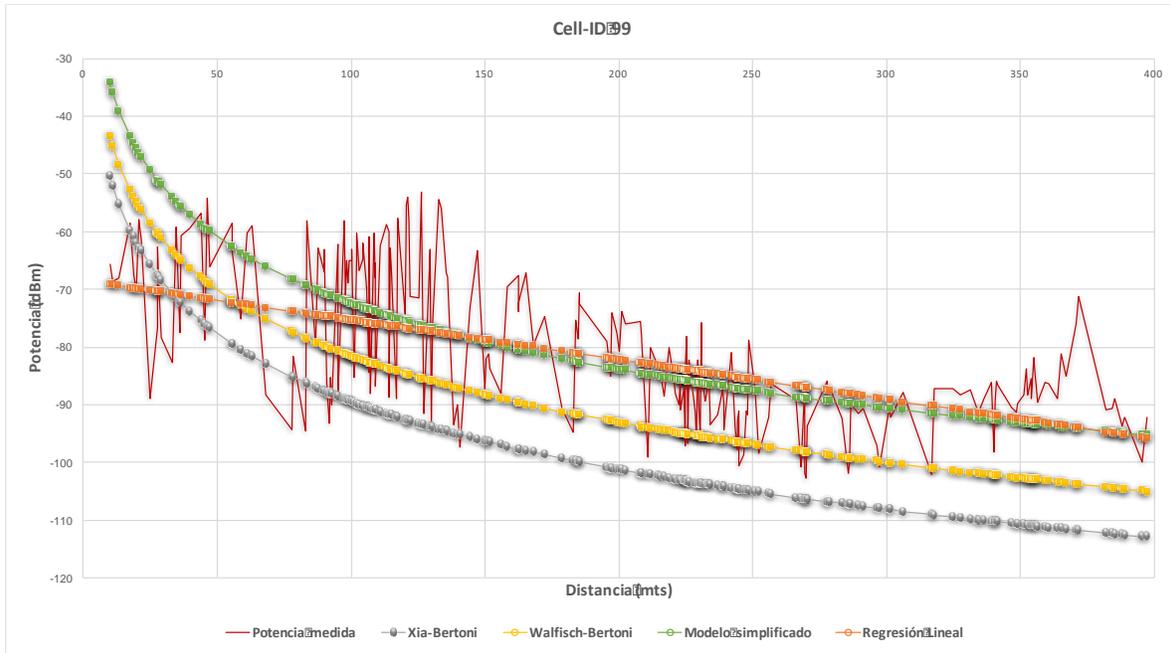


Figura 4. Curvas de los modelos Xia-Bertoni y Walfisch Bertoni

De la figura 4, se observa que tanto Xia-Bertoni como Walfisch-Bertoni hacen una estimación por debajo de lo medido en campo. El modelo propuesto en (9) tiene una mejor aproximación a lo medido con el analizador de espectro; este mismo análisis se realizó para todos los eNodoB encontrados en la Zona de Lindavista y San Rafael. Las figuras 5 y 6 muestran las gráficas para los Cell-ID 453 ( $\gamma = 3.91951$ ) y Cell-ID 370 ( $\gamma = 3.8306$ ).

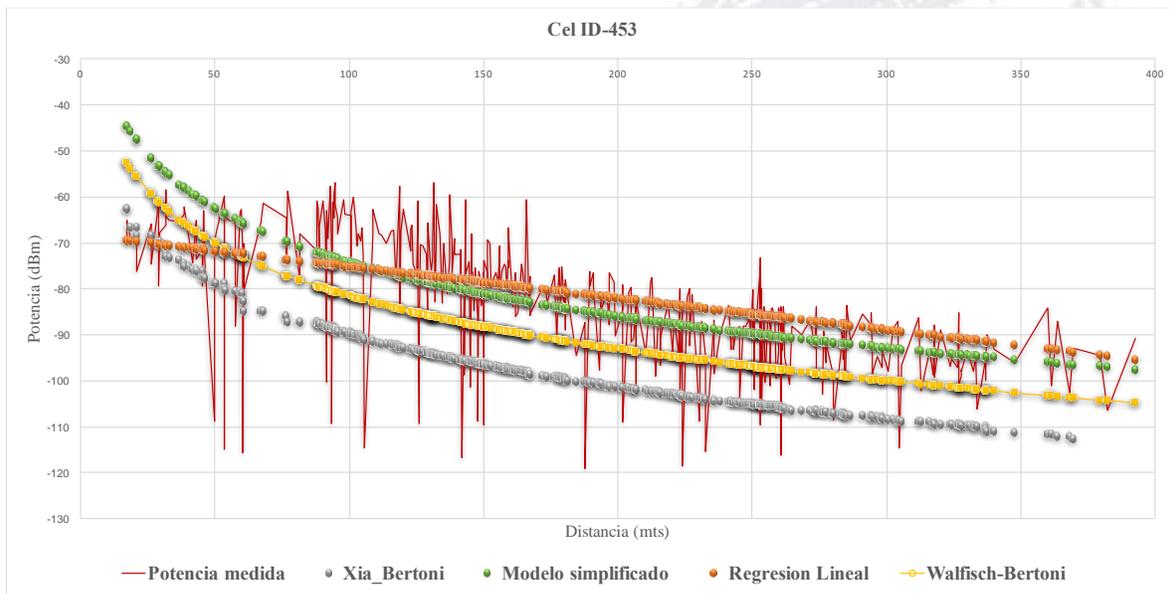


Figura 5. Curvas de potencia de recepción para el Cell-ID 453

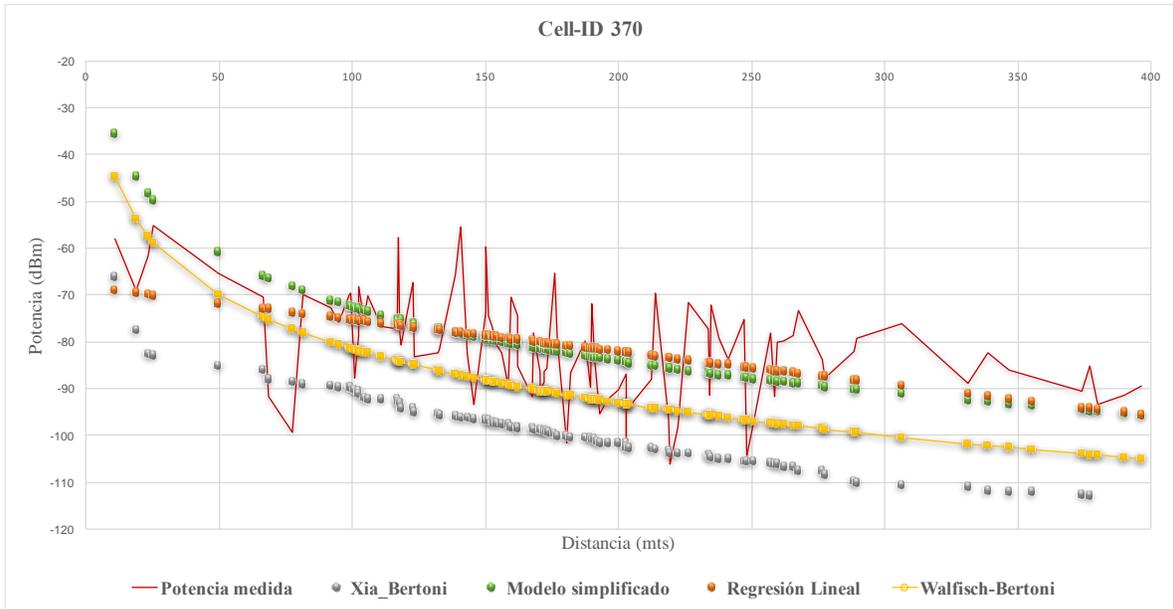


Figura 6. Curvas de potencia de recepción para el Cell-ID 370

Este procedimiento se repitió para los 24 eNodoB de Lindavista y los 17 de San Rafael, la Tabla 3 muestra el resumen de los valores de  $\gamma$

Tabla 3. Resumen de los valores de  $\gamma$

| Zona       | Valor de Gamma $\gamma$ calculado | Valor promedio de Gamma $\gamma$ |
|------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Lindavista | 3.2 → 3.9                         | 3.51                             |
| San Rafael | 3.6 → 4                           | 3.84                             |

Sustituyendo el valor promedio de  $\gamma$  en (9), la ecuación que describe la propagación electromagnética en San Rafael está dada por:

$$P_r(dBm) = 43 + 39.009 - 10(3.84)\log_{10}(d_i) \quad (10)$$

Y la ecuación para Lindavista está dada por:

$$P_r(dBm) = 43 + 39.009 - 10(3.51)\log_{10}(d_i) \quad (11)$$

### Conclusiones

En este trabajo, mediante mediciones empíricas en la Ciudad de México y la aplicación del modelo de propagación simplificado se encuentran las ecuaciones que describen la propagación de las ondas electromagnéticas para LTE en la frecuencia de 2.130 GHz. El Modelo simplificado propuesto en este trabajo presenta dos ventajas sobre los modelos tradicionalmente usados: la primera de ellas es su simplicidad, ya que las ecuaciones (10) y (11) dependen solo de la

distancia entre el transmisor y el punto de interés, y la segunda es que presentan un mejor ajuste a los datos recabados en campo, incluso mejor a los modelos Walfisch –Bertoni y Xia-Bertoni. Las ecuaciones del modelo de propagación simplificado propuestas en este trabajo, pueden aplicarse a entornos con características similares, siendo más sencillo su aplicación que los modelos de propagación convencionales. En México, el gobierno federal esta desarrollando el despliegue de una red LTE de cobertura nacional en la banda de frecuencia de 700 MHz. Éste método puede ser aplicable a esta banda de frecuencia, caracterizando los diversos entornos de propagación dependiendo de la región geográfica del país.

## Referencias

- Anritsu Co., (2016) ‘Spectrum Master™ MS271xE User Guide, Handheld Spectrum Analyzer’.
- Berg, J.-E., Bownds, R. and Lotse, F. (1992) ‘Path loss and fading models for microcells at 900 MHz,’ Vehic. Technol. Conf. Rec., pp. 666–671.
- COST 231 Final report, Digital Mobile Radio (1999) ‘COST 231 View on the Evolution Towards 3rd Generation Systems’, Commission of the European Communities and COST Telecommunications, Brussels.
- Erceg, V., Fortune, S. J., Ling, J., Rustako, A. J., and Valenzuela, R. (1997) ‘Comparison of computer-based propagation tool prediction with experimental data collected in urban microcellular environments’, IEEE J. Select. Areas Commun. vol. 15, pp. 677–684.
- ETSI TS 136 101, ‘Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception’ (3GPP TS 36.101 version 8.25.0 Release 8)
- G.K. Chan, (1991) ‘Propagation and coverage prediction for cellular radio systems,’ IEEE Trans. Vehic. Technol., Vol VT-40, No. 4, pp. 665–670.
- Goldsmith A., (2005) ‘Wireless Communications’, Cambridge University Press.
- Goldsmith, A. And Greenstein, L. (1993) ‘A measurement-based model for predicting coverage areas of urban microcells,’ IEEE J. Selected Areas Commun., Vol. SAC-11, No. 7, pp. 1013–1023.
- E. Greenberg and E. Klodzh, (2015) ‘Comparison of deterministic, empirical and physical propagation models in urban environments,’ *IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS)*, Tel Aviv,

2015, pp. 1-5.  
doi: 10.1109/COMCAS.2015.7360394

Hata, M., (1980) 'Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services', IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 29, pp. 317–325.

Ikegami, F., Takeuchi, T. and Yoshida, S. (1991)'Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 39 (3), 299–302.

Jiménez, M. del C., (2014) 'Análisis Experimental de la Propagación de Señales en Sistemas Móviles de Cuarta Generación (LTE)', Tesis de Maestría IPN, SEPI ESIME Zacatenco, México D.F.

Martínez Ramírez, M. (2006) 'Análisis de propagación en interiores en la banda de 2.4 GHz para el diseño de cobertura de la red IEEE802.11b/g de la ESIME Zacatenco', Tesis de maestría en ciencias IPN, SEPI ESIME Zacatenco, México D.F.

Okumura, Y., E. Ohmori, T. Kawano and K. Fukuda, (1968) 'Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile radio service', Review of the Electrical Communications Laboratories, 16, 825–73.

Rappaport T. S., (2001) 'Wireless Communications - Principles and Practice', 2nd Edition, Prentice Hall.

Walfisch, J. and Bertoni, H. (1988) 'A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments', IEEE Trans. Antennas Propagat. AP-36, pp. 1788-1796.

Huidobro, J. M., 'Sistemas 4G. LTE.' En 'Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE', pp 249-311, Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., México D.F., 2013

Jiménez, M. del C., 'Análisis Experimental de la Propagación de Señales en Sistemas Móviles de Cuarta Generación (LTE)', Tesis de Maestría IPN, SEPI ESIME Zacatenco, México D.F., 2014